

付着塩分量に關与する結露の評価に必要な鋼材表面温度解析の検討

京都大学大学院 学生員 ○徳増 秀俊
京都大学大学院 正会員 野口 恭平

JR 東日本 (研究当時京都大学大学院生) 正会員 井伊 悠
京都大学大学院 正会員 白土 博通
京都大学大学院 正会員 八木 知己

1. 序論 多くの構造物の劣化が進む中、効率的な維持管理の重要性は増している。特に海岸部では海塩粒子による橋梁の腐食が深刻であり、付着塩分量の定量的な評価が求められる。図1は和歌山県の太平洋岸近くに設置したI字鋼供試体への付着塩分量の経時変化(2017年9月～12月)であり、付着量が増加するばかりではなく、減少する場合もあることがわかる。その原因の一つとして結露水による洗浄が考えられ、付着塩分量の評価にはこのような低減効果の考慮が必要である。本研究では、まず理想的な条件下で実験を行い、結露発生に直結する鋼材表面温度の解析手法の妥当性を検討した。さらに、実橋梁主桁の表面温度解析も行い、実橋における結露発生量及び付着塩分量の評価に向けて考察を行った。

2. 温度解析手法¹⁾ 鋼材温度 T [K] の変化を求めるために、1次元熱伝導方程式(式(1))の差分計算を行った。鋼材表面における境界条件には対流熱伝達と放射による熱流を考慮した式(2)を用いた。対流熱伝達は外気と鋼材との間の熱交換であり、放射は日射からの短波放射 J_h [W/m²] と大気や周りの物体からの長波放射 J_a [W/m²]、鋼材自身からの放射 J_r [W/m²] から成る。 C_v : 熱容量 [J/m³/K]、 λ : 熱伝導率 [W/m/K]、 x : 厚さ方向 [m]、 T_{out} : 外気温 [K]、 T_s : 鋼材表面温度 [K]、 a_s : 日射吸収率、 ε_s : 長波放射率である。また、入力値となる気温、風速、日射量等の気象データには現地での観測値を用いた。

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

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T_{out} - T_s) + a_s \cdot J_h + \varepsilon_s \cdot J_a - J_r \quad (2)$$

対流熱伝達率 α の算出式は複数提案されているが、本研究では2つの式を採用した。1つ目は伝熱分野で用いられている Johnson-Rubenstein の式²⁾(以下 J-R 式)である。これは平板上を流れる強制対流に適用で

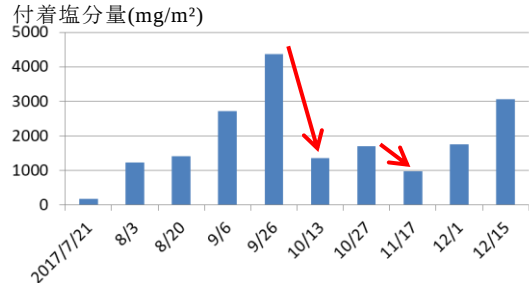


図1 付着塩分量の経時的変化

きる経験式であり、式(3)と式(4)から対流熱伝達率が求まる。 N_u : ヌッセルト数、 P_r : プラントル数、 R_e : レイノルズ数、 L : 構造物代表長さ [m]、 λ_{air} : 空気の熱伝導率 [W/m/K]である。

$$N_u = 0.0296 \cdot P_r^{1/3} R_e^{4/5} \quad (3)$$

$$N_u = \frac{\alpha L}{\lambda_{air}} \quad (4)$$

2つ目は建築分野で用いられている Jurges の式³⁾である。これは垂直な平板を対象とした風洞実験による実験式であり、対流熱伝達率を風速のみの関数で表す(式(5))。 v : 風速 [m/s]である。

$$\alpha = \begin{cases} 5.8 + 3.9v & (v \leq 5) \\ 7.12v^{0.78} & (v > 5) \end{cases} \quad (5)$$

3. 解析手法の検討 実橋梁では周辺地形や構造物の形状等、解析に影響する要因が多い。本研究では付近にそのような地形がなく、平板という単純な形状の物体を対象とした理想的な条件下で実験を行い、計測値と計算値を比較することで解析手法の妥当性を検討した。実験は 300 mm × 400 mm の長方形で、厚さ 2 mm のステンレス板を屋外に水平または鉛直に設置した場合の表面温度と気象データを計測した。実験は 2017 年 9 月～11 月に行った。水平設置のある1日分の結果を図2に示す。J-R 式では計算値と計測値で大きな差が生じた一方で、Jurges の式では

キーワード 腐食, 付着塩分量, 結露, 温度解析

〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻橋梁工学研究室 TEL 075-383-3167

精度良く計算できた。鉛直設置の場合でも同様の傾向がみられた。J-R 式で差が生じたのは、この式が自然対流を考慮していないためと考えられる。J-R 式では自然対流を考慮しない分、対流熱伝達率が過小になり、相対的に放射の影響が過大になる。したがって、放射が強い昼間で結果に差が生じたと考えられる。一方、自然対流も考慮した Jurgess の式を用いた場合は精度良く計算できたことから、対流熱伝達率や放射を正しく評価できれば温度が精度良く計算できると考えられ、Jurgess の式を用いた場合の本解析手法の妥当性が確認できた。

4. 実橋梁における温度解析 前節の解析手法を用いて、実橋梁主桁の表面温度を計算した。対象橋梁は和歌山県の海沿いに位置し、3 主桁を有する鋼橋（天鳥橋）で、温度解析では最も海側に面した主桁を解析対象とした(図 3)。主桁のウェブ部を厚さ 0.02 m の鋼板とみなし、厚さ方向に 1 次元の温度計算を行い、得られた表面温度を観測結果と比較した。計算及び計測期間は 2017 年 12 月 2 日～12 月 14 日である。対流熱伝達率の算出式には Jurgess の式を用いた。図 4 に最初の 4 日間におけるウェブ部海側面表面温度の計算及び計測結果を示す。計算値が計測値を概ね再現できたため、数値計算によって鋼材表面温度及び結露発生量を評価できるといえる。

ここで、主桁は実際にはウェブ部と下フランジ部で構成されており、それぞれ形状や受ける放射量が異なるため、表面温度、ひいては結露発生量も異なると考えられる。そこで、解析手法を 2 次元に拡張し、ウェブ部だけでなく下フランジ部も考慮した温度計算を行った。計算結果抽出位置は図 3 に示すとおりである。最初の 4 日間におけるウェブ部と下フランジ部の計算結果を図 5 に示す。両者の温度に差があることから、結露の有無及び発生量にも差があると思われる。特に結露が発生しやすい午前中において、ウェブ部に比べて下フランジ部の温度が低くなる時間帯がみられたため、本橋の下フランジ部はウェブ部よりも結露が発生しやすいと考えられる。

5. 結論と課題

1) 鋼材表面温度解析について、実験によって解析手法の妥当性を検討し、実橋梁主桁ウェブ部の温度解析を行った。計算値が計測値を再現できたことから、数値計算によって鋼材表面温度、

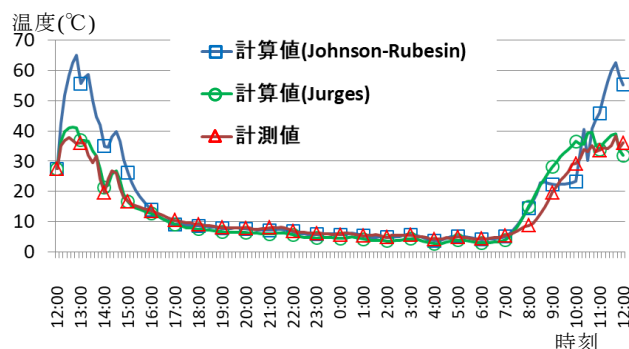


図 2 鋼板表面温度の計算値と計測値(11/27-11/28)

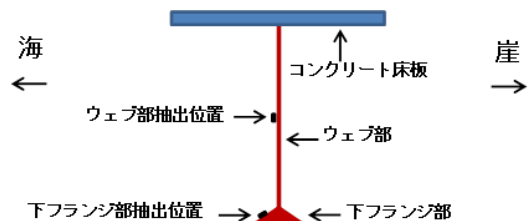


図 3 対象主桁概形及び 2 次元計算結果抽出位置

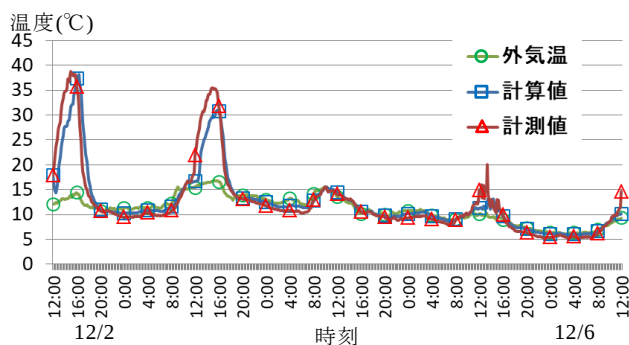


図 4 ウェブ部海側面温度の計算値と計測値

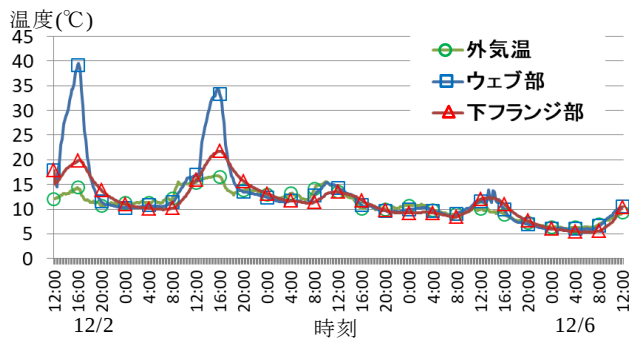


図 5 ウェブ部及び下フランジ部温度の計算値

ひいては結露発生量を求め、付着塩分量評価に用いることができるといえる。

- ウェブ部と下フランジ部の表面温度計算値が異なることから、結露発生量も異なると考えられる。今後は下フランジ部においても計測を行い、実際の傾向も踏まえて検討する必要がある。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 15H02261 の助成を受けた。

参考文献 1)伊庭ら：日本建築学会環境系論文集，74(639)，587-593，2009。2)萩島ら：水文・水資源学会誌，17(5)，536-554，2004。3)鉾井ら：建築環境工学Ⅱ，朝倉書店，2015。