

第 I 部門

腐食に寄与する結露の評価を目的とした鋼材表面温度解析

京都大学工学部 学生員 ○徳増 秀俊
京都大学大学院工学研究科 正会員 野口 恭平

京都大学大学院工学研究科 学生員 井伊 悠
京都大学大学院工学研究科 正会員 白土 博通

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となっており, 付着塩分量の定量的な評価が求められる. その際には降雨や結露により発生する水分による付着量低減を考慮する必要がある. 本研究では, 簡単な条件下で実験を行い, 結露発生に関係する鋼材表面温度の解析手法の妥当性について検討した. さらに, その解析手法を実橋梁主桁に適用し, 表面温度解析を行った.

2. 表面温度解析手法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. ここで, C_v : 熱容量 [J/m³/K], λ : 熱伝導率 [W/m/K], x : 鋼材厚さ方向 [m], α : 対流熱伝達率 [W/m²/K], a_s : 日射吸収率, ε_s : 長波放射率であり, T_{out} は外気温を, T_s は鋼材表面温度を表す. また, 入力値である気温, 風速, 日射量等の気象データには現地における観測値を用いた.

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

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

ここで, 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-Rubens 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. ここで, 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 Jurgens 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している(式(5)). ここで, 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 実橋梁では周辺の地形や構造物の形状等, 前節で述べた放射に影響する要因が多い. 本研究ではそれらの複雑な要素を除いた簡単な条件下で実験を行い, 得られた計測値と計算値を比較することで解析手法の妥当性について検討した. 実験は 300 mm×400 mm の長方形で, 厚さ 2 mm のステンレス板を用い, この板を屋外に水平に設置した場合と鉛直に設置した場合の表面温度と気象データ(気温, 湿度, 風速, 日射, 放射収支)を計測した. 実験は 2017 年 9 月~11 月の間に, 水平設置の計測を 8 日分, 鉛直設置の計測を 6 日分を行った. 水平設置の 1 日分の結果を図 1 に示す. この図より, J-R 式では計算値と計測値で大きな誤差が生じたが, Jurgens の式では精度良く計算できた. なお, 鉛直設置の場合でも同様の傾向がみられた. J-R 式で誤差が生じたのは, この式が自然対流を考慮していないためと考えられる. 低風速域では本来自然対流の影響が大きいため, 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となったと考えられる. 一方, 自然対流も考慮している Jurgens 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, Jurgens 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 前節で検討した解析手法を用いて、実橋梁主桁を対象に表面温度を計算した。ここで、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）であり、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2)。まず、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 次元の表面温度を計算する。一方、同橋のウェブ部の表面温度と気象データを計測した。計算及び計測期間は 2017 年 12 月 2 日～12 月 14 日の 12 日間である。また、対流熱伝達率の算出式には Jurges の式を用いた。図 3 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。図より、計算値は計測値を概ね再現できたといえる。

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、下フランジ部も考慮した温度計算を行った。計算の対象はウェブ部が厚さ 0.02 m、高さ 1.84 m の長方形形状であり、下フランジ部が高さ 0.16 m、傾斜角約 30 deg の三角形形状である。ウェブ部及び下フランジ部の計算結果抽出位置はそれぞれ図 2 に示すとおりである。両者の計算値について、最初の 4 日間における比較結果を図 4 に示す。この図より、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結露が発生しやすいと考えられる。

5. 結論と課題

- 1) 結露発生に関する鋼材表面温度解析について、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。
- 2) 検討した解析手法を用いて実橋梁主桁ウェブ部でも温度解析を行い、その精度を確認した。
- 3) ウェブ部と下フランジ部の表面温度計算値を比較すると、両者の表面温度が異なり、対象橋梁の下フランジ部では相対的に結露が発生しやすいという可能性が示された。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。

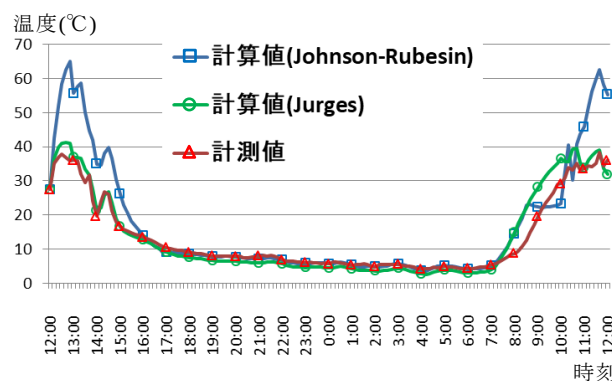


図 1 鋼板表面温度の計算値と計測値(11/27-11/28)

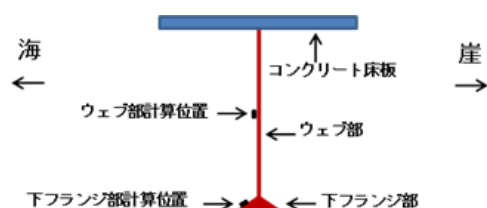


図 2 対象主桁概形及び 2 次元計算結果抽出位置

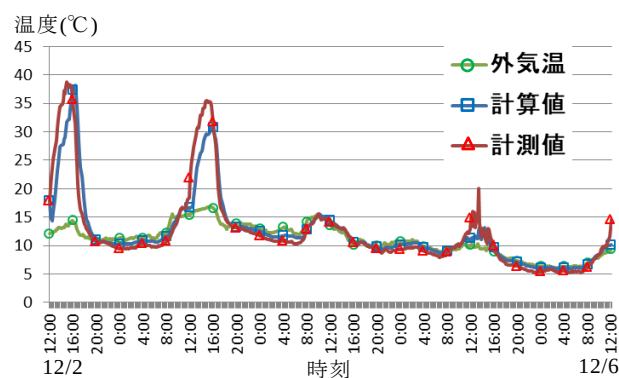


図 3 ウェブ部海側面温度の計算値と計測値

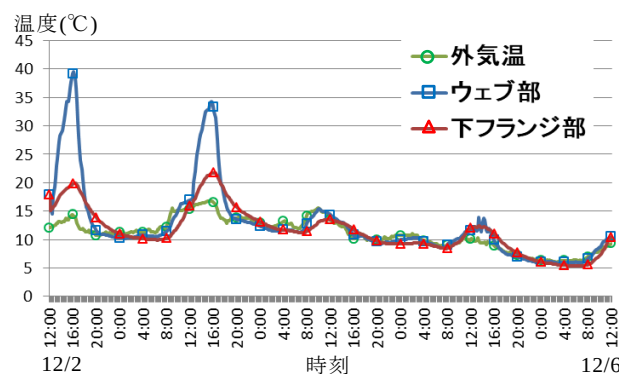


図 4 ウェブ部及び下フランジ部温度の計算値

参考文献

- 1) 伊庭ら：屋根瓦における結露発生に関する検討，日本建築学会環境系論文集，第 74 巻，第 639 号，587-593，2009。
- 2) 萩島ら：都市表面の対流熱伝達率に関する既往研究のレビュー，水文・水資源学会誌，vol.17，No.5，536-554，2004。
- 3) 鉾井ら：建築環境工学Ⅱ，株式会社朝倉書店，2015。