

橋面の結露凍結と積雪の数値シミュレーション

福井県雪対策・建設技術研究所 正会員 宮本重信

1. はじめに

冬期に結露凍結や圧雪などの路面の状況を前日に予知できれば、融雪材の適正な散布に有用である。また、橋梁の設計時に、結露凍結や圧雪の頻度が分かれば、橋種の選択に際しての評価に有益である。ここでは、鋼床版橋とRC床版橋について、気象台の観測データを用いて結露凍結や積雪をシミュレートした。

2. モデル式・仮定など

本論で対象とする鋼床版橋は、舗装厚7cm, 鋼床版橋厚12mmで、床版下面に開断面リブを有する。RC床版橋は、舗装床版厚26cmである。舗装・床版の内部とその上下面でそれぞれ次式が成り立つ。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial X} = k \frac{\partial^2 T}{\partial X^2}$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{X=0 \text{ (上面)}} = q_u$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{X=0 \text{ (下面)}} = q_l$$

ρ : 密度 C : 熱容量 k : 熱伝導率 T : 温度 τ : 時間
 q : 舗装への流入熱量

式は、差分式に置き換えてパソコンで計算される。積雪については、降雪量（降雨換算重量）を必要融解熱量に置き換えて、その必要融解熱量を積み上げ、その熱量が舗装と積雪上面からの流入熱量によって0になれば、積雪なしとした。舗装上面の熱流束 q_u は、積雪時には、放射熱はその積雪量 Q_{sw}^{P+1} に応じて積雪を透過して直接路面に達すると仮定し計算した。その透過率 β は別に実験観測で求めた。無積雪では $\beta=1$ 。積雪の内部の熱抵抗がないと仮定し、積雪温度 T_s を求めた。

$$Q_{s^{P+1}} = Q_s^P + S_w L_s$$

$$Q_{sw^{P+1}} = Q_{sw}^P + S_w$$

$$q_u = \beta G(1 - \alpha_r) + \beta N_r + H_r + E_r + M$$

$$Q_{s^{P+1}} = 0 \text{ (無降積雪時)} : M = 0$$

$$Q_{s^{P+1}} > 0 \text{ (降積雪時)} : M = h(T_s - T_{x=0})$$

$$Q_{s^{P+1}} = Q_{s^{P+1}} - \{(1 - \beta)G(1 - \alpha_s) + (1 - \beta)N_s + H_s - M\}$$

$$Q_{s^{P+1}} > Q_{sw^{P+1}} L_s : T_s = -(Q_{s^{P+1}} - Q_{sw^{P+1}} L_s) / C_s \rho_s$$

$$Q_{s^{P+1}} \leq Q_{sw^{P+1}} L_s : T_s = 0 \quad Q_{s^{P+1}} = Q_{sw^{P+1}} L_s$$

$$q_l = F_1 \cdot N_1 + F_1 \cdot G \cdot (1 - \alpha_l) \cdot \alpha_{river} + H_l + E_l$$

ここで、 $Q_{s^{P+1}}$: (P+1)時刻での積み上げられた積雪
 必要融解熱量 $Q_{sw^{P+1}}$: 積み上げられた積雪の重量
 S_w : 降雪重量 L_s : 降雪重量当たり必要融解熱量 M : 融雪熱量 h : 融雪時の路面と積雪の熱伝達率

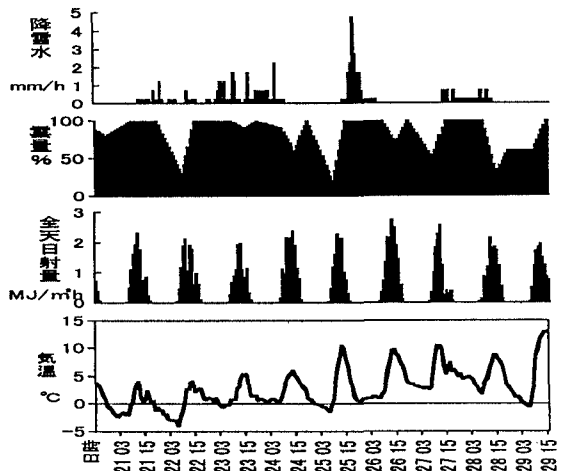


図-1 期間中の気象

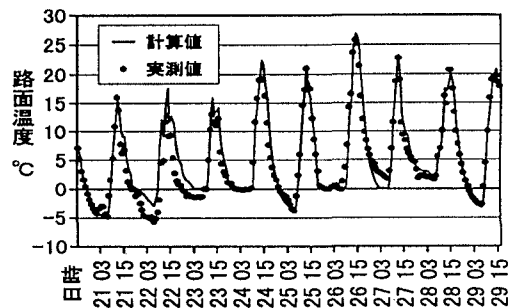


図-2 鋼床版橋路温の計算値と実測値

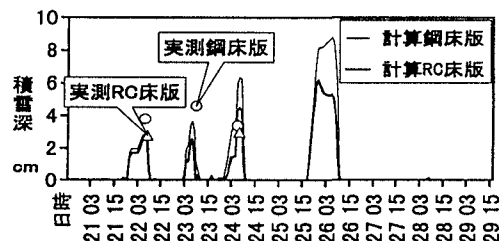


図-3 積雪深の計算値と実測値

G:日射量 α :アルベド β :積雪時の放射の路面への透過率 N:長波長の正味放射熱量(雲量, 雲種, 水蒸気圧から Bruntの式で計算) H:顕熱輸送量 E:蒸発凝結に伴う潜熱輸送量 $C_s \rho_s$:雪の比熱 h:雪と舗装表面の間の熱伝達率 添え字のs積雪との熱移動 r:積雪なしで路面との熱移動 l:床版下。F_lは床版下面の放射形態係数, H_lではリブを熱フィンとして考慮, α_{river} は床版下の河川水のアルベド である。

$$E = L E_v \quad E_v = (H_r / C_{air}) (X_s - X_o)$$

E_v :時間当たり蒸発(結露)量 L:水(氷)の蒸発(結露)潜熱 C_{air} :湿り空気比熱 X_s :舗装表面の飽和絶対湿度 X_o :空気の絶対湿度 ただし蒸発は路面が濡れてない時は0。結露量 E_v を累計していけば、その累計値と路面すべり摩擦係数の関係実験式から、路面のすべりが推測できる。

3. 計算値と実測値の比較

降雪と結露凍結が繰り返された福井市内の1996年2月20日16時から10日間について、福井気象台の気象データ(図-1)などを用いて、20日16時の実測路面温度を初期値として与えて計算した。雲量、雲種は9時15分21時の観測で、観測されていない時間は内挿した。

鋼床版橋の舗装表面から10mmの深さの温度について、計算値と実測値とを比較したのが図-2である。図から計算値が実測値とよく一致していることが分かる。図-3は、路面の積雪量で、その比重を0.09として Q_{sw} から求めたものである。

鋼床版橋の計算舗装表面温度と露点と図-4に、計算結露量を図-5に示す。25日朝は、21日に比べ、路面温度が高いが、結露量は多い。これは、露点温度が25日朝は高いことによる。路面のすべり摩擦係数を結露量、積雪、湿潤から推定すると図-6を得る。舗装表面温度が露点以下で急激に結露し、極端にすべりやすくなることが分かる。

図-7は、RC床版と鋼床版の舗装表面温度の計算結果である。熱容量の大きなRC床版は、鋼床版に比べ1℃ほど高いにすぎないが、露点以上となったため、期間中、ほとんど結露凍結してない(図-4)。

4. まとめ

当該数値シミュレーションモデルと気象台データなどを用いれば、冬期の橋面の温度、結露量、積雪量、路面のすべり摩擦が推定できる。

文献 宮本 室田 杉森: 橋梁の床版下面構造がその路面凍結におよぼす影響 日本雪工学会誌Vol. 14 No. 1 1998. 1

宮本 室田: 鋼床版橋路面の蓄熱材封入による凍結抑制の研究 土木学会論文集No. 574/VI-36/73-83, 1997. 9

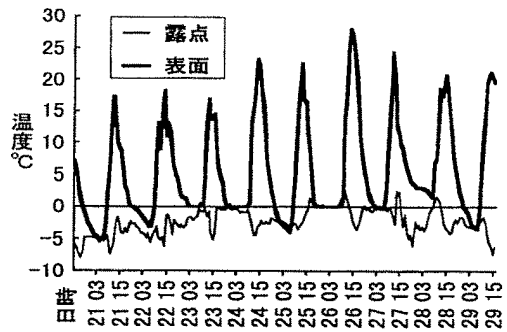


図-4 鋼床版の舗装表面温度と露点

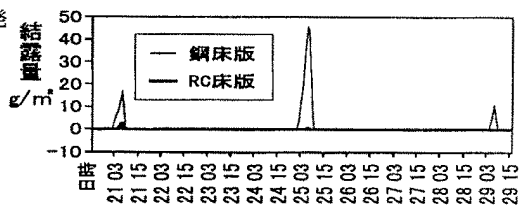


図-5 結露(凍結)量

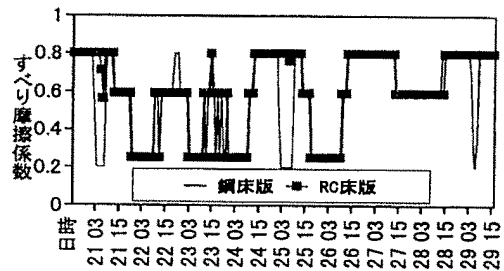


図-6 すべり摩擦係数

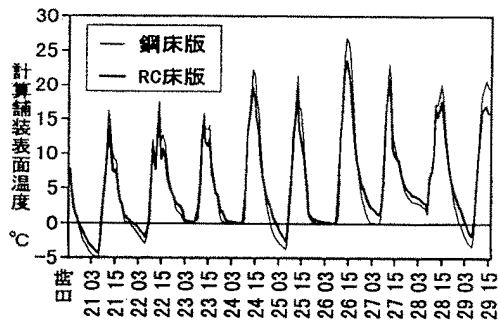


図-7 計算舗装表面温度