

IV-323 橋梁道路上の凍結メカニズムに関する実験的研究 - 第2報 -

福井大学 正 員 福原輝幸
三和測量 酒井重郎

1. はじめに

橋梁路面の凍結は路面が降雪時や散水後の湿潤時に限り生じる現象ではなく、霜附着凍結および霧附着凍結のように路面が乾いた状態からも比較的短時間で起こる¹⁾。しかしながら、これらの凍結現象の発生の有無や凍結時間は基本的に橋床と大気との間の熱エネルギーの交換により規定される。凍結に強い橋梁作りおよび精度の高い凍結センサーの開発にはこれらの熱的相互作用の把握が不可欠である。

そこで、本研究では熱エネルギーの観点から橋梁道路の凍結メカニズムの検討を行った。

2. 橋梁路面の凍結解析

2.1 橋床と大気との熱的相互作用

橋床と大気との間の熱エネルギー交換は Fig. 1 のように表される。その際、橋床上・下面境界要素の内部熱エネルギー U_B の時間変化率 $\partial U_B / \partial t$ は純長波放射エネルギー R (橋床上面では大気放射エネルギー R_S と路面放射エネルギー R_U との和、下面では川からの放射エネルギー R_R と橋床下面からの放射エネルギー R_D との和)、空気移動による顕熱 S 、蒸発による潜熱 L および熱伝導エネルギー C 、で規定される。すなわち、

$$\partial U_B / \partial t = (C - R - S - L) \quad (1)$$

2.2 伝熱解析

橋床内部では以下の熱伝導方程式が成り立つ。

$$(\rho c) \partial T / \partial t = \nabla (\lambda \nabla T) \quad (2)$$

ここに、 (ρc) ：橋床の体積熱容量、 T ：温度、 λ ：熱伝導率、 t ：時間、 ∇ ：微分演算子、である。なお、凍結解析は積分有限差分法により解かれる。

2.3 蒸発量

路面からの蒸発フラックス密度 M_v は境膜説 (Film theory) によって計算される。すなわち、

$$M_v = D_{atm} (\rho_{vs} - \rho_{va}) / \delta \quad (3)$$

ここに、 D_{atm} ：水蒸気拡散係数、 ρ_{vs} ：表面水の水蒸気密度、 ρ_{va} ：大気の水蒸気密度、 δ ：水蒸気密度境界層厚、である。

2.4 顕熱

空気移動に伴う大気と橋床上・下面との間で交換される熱エネルギー、顕熱 S は次式で与えられる。

$$S = \alpha_c (T_s - T_a) \quad (4)$$

ここに、 α_c ：熱伝達率、 T_s ：橋床上・下面の表面温度、 T_a ：大気温度、である。熱伝達率 α_c は風速で変化する物理量である。

3. 橋床モデルによる伝熱実験

実験は幅 0.3m、高さ 0.3m、長さ 1.8m の風洞を利用して行われる。ここでの風速は、橋床上面より 0.15 m での値とする。橋床モデルはコンクリート橋床 (0.2 × 0.2 × 高さ 0.2 m) およびスチール橋床 (0.2 × 0.2 × 高さ 0.128 m) の2種類である。なお、実験の詳細は参考文献²⁾を参照されたい。

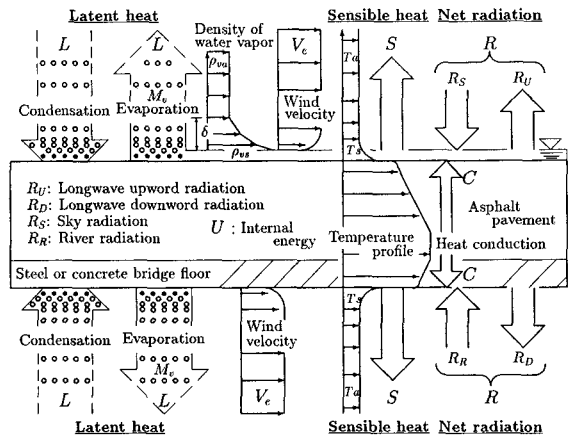


Fig. 1 橋床における熱エネルギー収支の概念

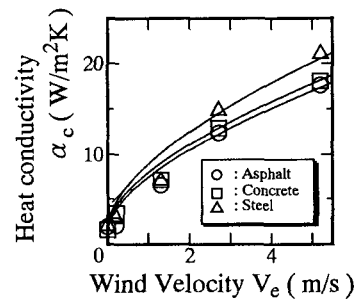


Fig. 2 熱伝達率と風速の関係

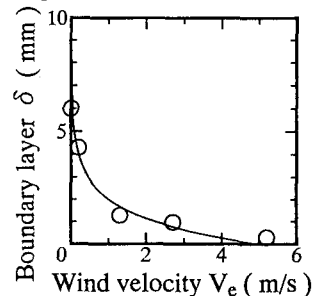


Fig. 3 境界層厚と風速の関係

4. 実験結果および考察

まず、橋床と大気との間の熱エネルギー交換の上で重要なパラメータである熱伝達率 α_c および水蒸気密度境界層厚 δ と風速 V_e の関係を、Fig. 2 および Fig. 3 にそれぞれ示す。風速 V_e の増加と共に α_c は増大し、 δ は減少する。伝熱計算ではこれらの関係が使用される。なお、以下では全て風速 2.7 m/s における結果が示される。

Fig. 4 は橋床内部温度および路面水温度の経時変化を表わしたものである（図中には計算値も示される）。この結果の詳細は参考文献²⁾で論述しているが、要約すると以下の通りである。コンクリート橋床では上面（アスファルト）および下面（コンクリート）での温度低下により、時間の経過と共に温度勾配が形成され、温度分布は両部分の接合部（橋床中央）付近で最大値をとるような弓状となる。スチール橋床では、アスファルト部分にのみ明確な温度勾配が現れるため、接合部付近で折れ曲がるような温度分布となる。なお、上述したような温度分布特性は風が吹くことにより明瞭となる。

Fig. 5 は路面水を横切る熱エネルギー成分の経時変化（実験開始からおおよそ凍結時点まで）を示したものである。コンクリート橋床およびスチール橋床とも、損失熱エネルギーを補うように橋床内部から路面水へ向かう熱伝導エネルギー（ C ）の供給がある。両橋床とも損失熱エネルギーは潜熱（ L ）、顕熱（ S ）、長波放射（ R ）の順（ただし、送風前は長波放射（ R ）、潜熱（ L ）、顕熱（ S ）の順²⁾）となる。両橋床を比較すると、各熱エネルギー成分に大きな違いはない。

最後に、内部熱エネルギー U の時間経過に伴う変化を示したものが Fig. 6 であり、各時間の内部熱エネルギー U は初期のそれ U_i で無次元化される。コンクリート橋床の初期内部エネルギー U_i は、体積の違いもあってスチール橋床の U_i に比べて約 1.4 倍大きい。内部熱エネルギーの時間的な減少率はスチール橋床の方がコンクリート橋床よりも大きいことが知れる。この傾向は静穏時よりも送風時でより明確となる²⁾。

5. 結論

本実験を通して以下のような結論が得られた。一般にスチール橋床の方がコンクリート橋床に比べて凍結しやすいと言われる原因は、前者の持つ内部エネルギーが後者のそれに比べて小さいために、舗装体表面に輸送される熱エネルギー供給の長期的な持続性に欠けるためと考えられる。

参考文献

- 1) 渡辺 洋：冷温水循環方式による橋梁路面凍結防止、福井大学卒業論文、1994。
- 2) 酒井重郎ら：橋梁道路上の凍結メカニズムに関する実験的研究、土木学会年講概要集、IV-292、1993。

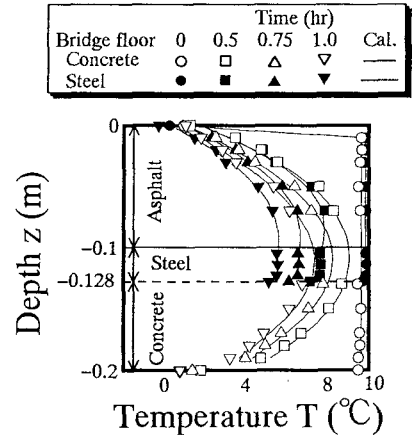


Fig. 4 橋床内温度分布の経時変化

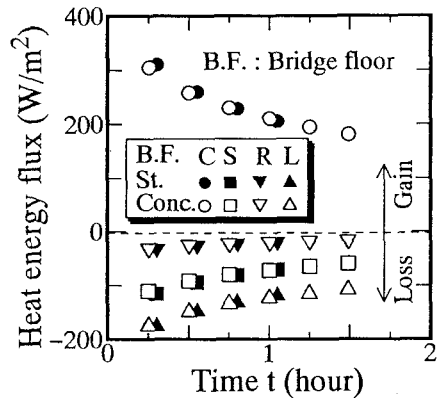


Fig. 5 熱エネルギーフラックスの経時変化

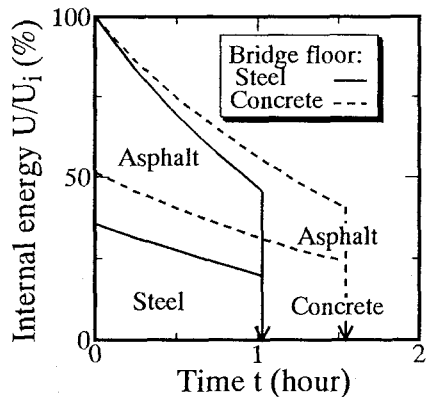


Fig. 6 内部熱エネルギーの経時変化