

無散水融雪舗装の伝熱特性評価法

福井大学大学院工学研究科

正会員 ○藤本 明宏

福井大学大学院工学研究科

非会員 諏訪 真彦

福井大学大学院工学研究科

正会員 福原 輝幸

1. はじめに

無散水融雪システムにおいて、舗装の熱物性値や熱輸送流体の熱伝達率は、システムの融雪性能に関わるため、製造される舗装毎に調べるのが望ましい。しかしながら、市販の計測機器は高価なものが多く、必ずしも簡単に熱パラメーターを得ることはできない。

そこで本論文では、室内実験と伝熱解析を組み合わせたコンクリート系舗装の比熱、熱伝導率および熱輸送流体の熱伝達率の評価法を紹介する。

2. 伝熱理論

図1は、通水孔(放熱管)を有する融雪舗装中の熱移動の概念を示す。円筒型舗装内部の半径(r)方向と鉛直(z)方向面内の二次元熱伝導方程式は次式で表される。

$$(\rho c)_p r \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_p r \frac{\partial T_p}{\partial r} \right) + r \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial z} \right) \quad (1)$$

ここに、 $(\rho c)_p$:舗装の体積熱容量(J/m³K)、 T_p :舗装温度(°C)、 λ_p :舗装の熱伝導率(W/mK) および t :時間(s)である。ここで、 z 方向の熱移動がなく、温度定常状態であれば、式(1)は式(2)となる。

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_p r \frac{\partial T_p}{\partial r} \right) = 0 \quad (2)$$

式(2)の積分により、 r 方向の T_p 分布 $T_p(r)$ の一般解は式(3)のように与えられ、舗装内部の伝導熱流 Q_c (W)は式(4)となる。

$$T_p(r) = C_1 \ln r + C_2 \quad (3)$$

$$Q_c = -2\pi r \lambda_p \left. \frac{dT_p}{dr} \right|_r \quad (4)$$

ここに、 C_1 および C_2 は積分定数である。

通水孔内の熱輸送流体から舗装への伝達熱流 Q_s (W)は、式(5)で与えられる。

$$Q_s = \alpha_w (T_w - T_{ps}) A_w \quad (5)$$

ここに、 α_w :熱輸送流体と舗装との間の熱伝達率(W/m²K)、 T_w :熱輸送流体の代表温度(°C)、 T_{ps} :通水孔表面温度(°C)および A_w :通水孔表面積(m²)である。

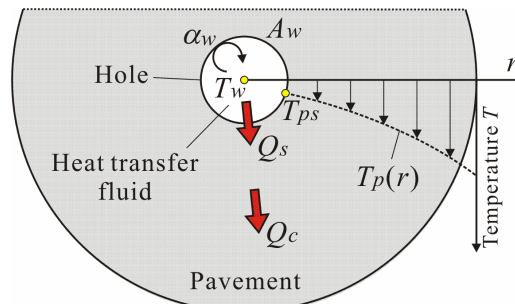


図1 無散水融雪舗装の熱移動の概念

3. 熱パラメーター評価

(1) 手順

舗装の比熱 c_p (J/gK)、 λ_p および α_w は、次の手順でそれぞれ求められる。

1. 熱量方式含水率計を用いて、 c_p を測定する。
2. 後述する伝熱実験から得られる $T_p(r)$ の時間変化と式(1)の解析解が適合するように、 λ_p を決定する。
3. 定常状態の $T_p(r)$ を測定することで、式(3)から T_{ps} が、式(4)から Q_c がそれぞれ得られる。定常では $Q_c = Q_s$ なので、式(5)により α_w を決定する。

(2) 比熱

図2は、熱量方式含水計による c_p 測定の概念である。舗装供試体を容器内に投入する前後で、舗装供試体と水の内部エネルギー変化量が等しいことから、 c_p は式(6)より得られる。

$$c_w M_w (T_{wi} - T_{wf}) = c_p M_p (T_{pi} - T_{pf}) \quad (6)$$

ここに、 c_w :水の比熱(J/gK)、 M_w :水の質量(g)、 $T_{wi}-T_{wf}$:舗装供試体投入前後の水の温度差(°C)、 M_p :舗装供試体の質量(g)、 $T_{pi}-T_{pf}$:舗装供試体の温度変化(°C)である。なお、精度検証のために、純アルミニウムの比熱 c_a (J/gK)も測定した。

(3) 熱伝導率および熱伝達率

図3は、 λ_p および α_w を求めるために行った伝熱実験装置の概要である。本装置は、中央に通水孔(直径15 mm)を有する舗装(直径0.20×高さ0.42 m)と氷水の入ったタンクから成り、舗装内部と通水孔出入口には同図のように

キーワード : 無散水融雪, 熱移動, 熱伝達, 熱伝導, 評価法

連絡先 : 〒910-8507 福井市文京 3-9-1 福井大学工学部建築建設工学科環境熱・水理研究室 Tel:0776-27-8595

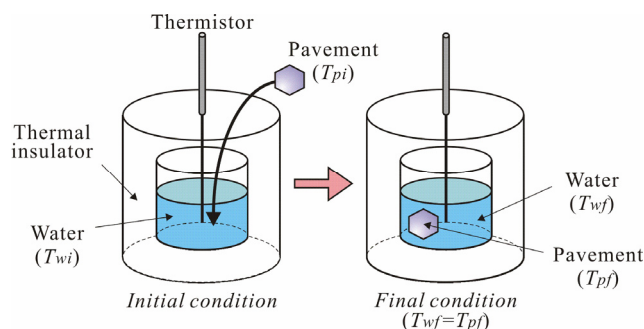


図2 熱量方式含水計による舗装の比熱測定概念

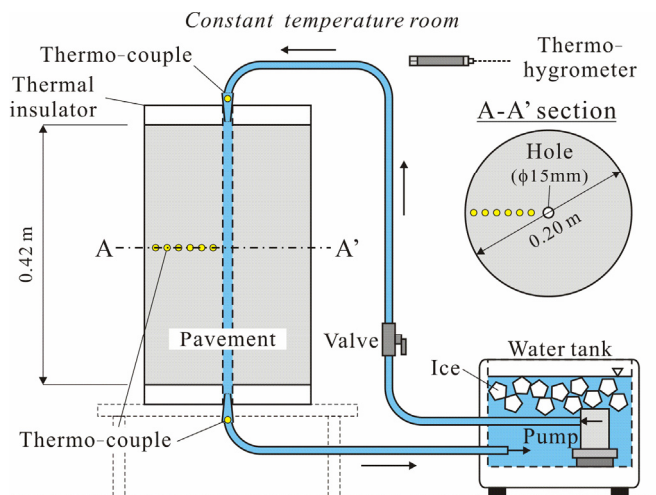


図3 伝熱実験装置の概要

熱電対が埋め込まれる。実験では、 15°C 様の舗装中央に 0°C の水を循環させ、定常温度に達するまで $T_p(r)$ を求める。なお、 z 方向の熱移動を抑制するために、スタイロフォーム(厚さ 50mm) で舗装供試体の上下面を断熱した。

4. 評価結果

以下に記載する添え字 NC, SC および FC は、普通コンクリート、珪石コンクリートおよび高強度繊維補強コンクリート(ダクトアル)をそれぞれ意味する。

(1) 比熱

図4は、 c_p の測定結果を示す。 c_{pNC} , c_{pSC} および c_{pFC} は、それぞれ $1.13 \sim 1.25 \text{ J/gK}$, $1.31 \sim 1.37 \text{ J/gK}$ および $1.24 \sim 1.33 \text{ J/gK}$ の範囲にあり、平均値はそれぞれ 1.19 , 1.34 および 1.28 J/gK であった。なお、得られた c_a は $0.92 \sim 0.94 \text{ J/gK}$ であった。参考文献中の c_a は $0.91 \text{ J/gK}^{1)}$ であり、本法による誤差は 3% 以内であった。

(2) 熱伝導率

図5は、 λ_p の評価結果である。 λ_{pNC} , λ_{pSC} および λ_{pFC} は、 Q_w に依存することなく、それぞれ $1.53 \sim 1.69 \text{ W/mK}$, $2.08 \sim 2.31 \text{ W/mK}$ および $1.96 \sim 2.07 \text{ W/mK}$ の範囲にあり、平均値は 1.59 , 2.20 および 2.04 W/mK であった。参考文献中の λ_{pFC} は $2.31 \text{ W/mK}^{2)}$ であり、本結果と概ね一致した。

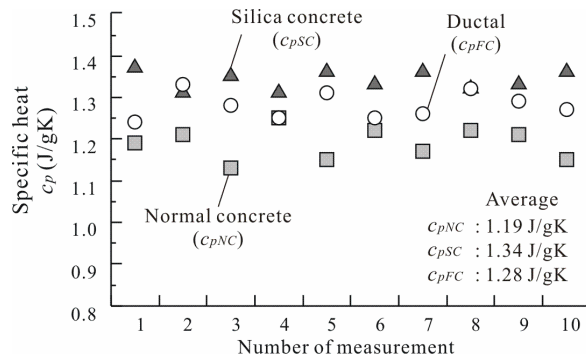


図4 比熱の測定結果

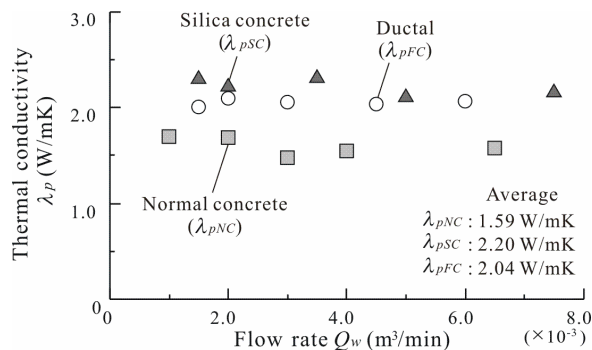


図5 熱伝導率の評価結果

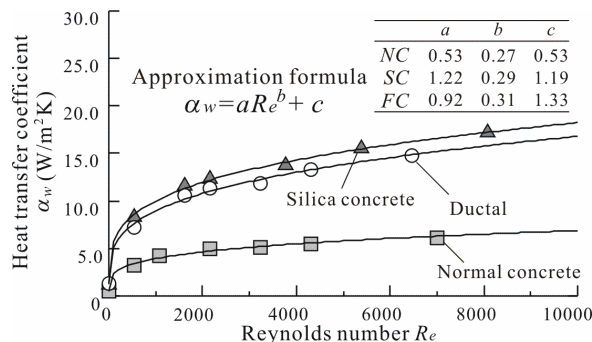


図6 熱伝導率とレイノルズ数の関係

(3) 熱伝達率

図6は、 α_w とレイノルズ数 Re の関係である。 α_w は、 Re の増加とともに次式のように非線形的に増大した。

$$\alpha_w = aRe^b + c \quad (7)$$

係数 a , b および c は図中に示される。

5. おわりに

本論文では、無散水融雪舗装の比熱、熱伝導率および熱輸送流体の熱伝達率を実験と解析から導く方法を示した。なお本研究は、みち環境技術研究会の平成21年度研究課題の一部として行われた。

参考文献

- 1) 日本機械学会：伝熱工学ハンドブック，丸善，p. 366 および p. 376, 1993.
- 2) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)，日本コンクリート工学協会，p. 20, 2005.