

放熱管を有する舗装体の融雪能力特性

Characteristics of Snow-Melting Ability of Pavement with Piping System

福原輝幸*・橋本泰英**

By Teruyuki FUKUHARA and Yasuhide HASHIMOTO

The ability of a pavement, containing a piping system, to melt snow is examined in this paper. The effects of the thermal conductivity of concrete pavement and the flow rate of groundwater in a pipe on the energy flux, transferred through the top of the pavement, are evaluated by the mathematical model. The coefficient of heat transfer between concrete and snow is an important parameter of the boundary condition and is obtained from the field test. The computation result indicates that the larger the thermal conductivity of concrete is, the larger the snow-melting ability is but the temperature drop of the groundwater along the pipe increases. The proposed model can easily decide the optimum flow rate of the groundwater utilized in the snow-melting system.

Keywords: snow-melting system, heat transfer, groundwater flow

1. 緒 論

これまで北陸地方の豪雪地帯においては、融雪方法として地下水を利用した散水融雪システムが広く用いられてきた。このシステムは融雪能力という点では優れている反面、地下水の過度の汲み上げによる地下水不足をもたらし、また散水による水跳ねのために歩行者に不快感を与えるといった問題を生んでいる。このような問題に対処するため、最近ではコンクリート舗装体内に埋設したパイプ内に低温水(地下水など)を循環させて路面上の雪を融かす無散水融雪システムが普及し始めている(図-1)。しかしながら無散水融雪方法ではシステムの伝熱メカニズムのみならず融雪の素過程に未知の部分があるために、効果的な自然エネルギーすなわち地下水利用がなされていないのが現状である。

本論文ではエネルギー(地下水)有効利用の観点から、数学モデルを用いて無散水融雪システムの融雪能力に及ぼす舗装体の熱伝導率、および供給地下水量の影響を明らかにすることを目的とする。

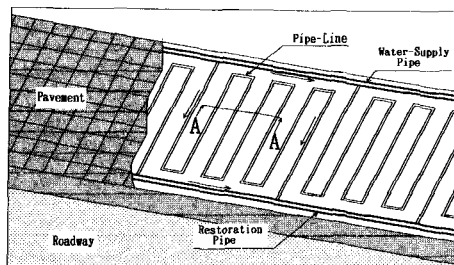


図-1 無散水融雪システム概念図

* 正会員 工博 福井大学助教授 工学部環境設計工学科
(〒910 福井県福井市文京3-9-1)

** 正会員 福井大学研究生 工学部環境設計工学科
(〒910 福井県福井市文京3-9-1)

2. 無散水融雪装置の熱的性質

2-1. 解析モデル

放熱管は蛇行して埋設されるから舗装体内温度は図-1(A-A断面)で示すように、隣接する複数の放熱管の影響を受ける。従って、解析は図-2に示すような2次元モデルについて行なう。

コンクリート舗装体の厚さは $D(m)$ 、舗装体底面温度は一様に $T_D(^\circ C)$ とし、放熱管はいずれも等間隔・等埋設深とする。放熱管の埋設ピッチは $S(m)$ 、埋設深は $b(m)$ とし、放熱管を通る地下水温度および放熱管の半径はそれぞれ $T_w(^\circ C)$ 、 $R(m)$ とする。座標系は地表面を Y 軸に、中央の放熱管の中心を X 軸に、管軸方向を Z 軸にそれぞれ選ぶ。上述したように、注目する X 軸上の放熱管の周辺温度はその左右にそれぞれ n 個隣接する放熱管の影響を受けるものとする。なお、放熱管の熱抵抗は無視する。

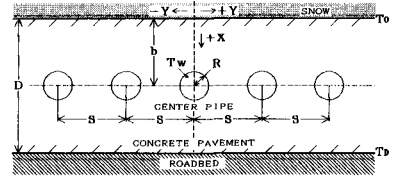


図-2 解析モデル

2-2. 舗装体の断面内温度分布

今、コンクリート舗装体上の雪温を $0^\circ C$ として、舗装体表面においてNewtonの冷却法則を適用する。コンクリートと雪面の間の熱伝達率 $S_N(W/m^2K)$ と、コンクリートの熱伝導率 $\lambda(W/mK)$ の比 S_N/λ を $h(1/m)$ とすれば、舗装体内の温度分布 $T(x, y)$ は以下の熱伝導方程式ならびに境界条件から計算される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} &= 0 \\ (x-b)^2 + (y-n \cdot S)^2 &= R^2 : T=T_w, \quad x=0 : -\frac{\partial T}{\partial x} + h \cdot T=0 \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)を T について解けば、最終的に次式となる。

$$T = (T_D - h \int_0^\infty \phi(D+\xi, y) \cdot \exp(-h \cdot \xi) d\xi) \cdot \exp(h \cdot (x-D)) + h \int_0^\infty \phi(x+\xi, y) \cdot \exp(-h \cdot \xi) d\xi \quad (2)$$

ここで、

$$\phi(x, y) = T_w / \log\{(b-a)/(b+a)\} \cdot \log\left[\frac{(x-a)^2 + (y-n \cdot S)^2}{(x+a)^2 + (y-n \cdot S)^2}\right] \quad [\text{ただし、} a = \sqrt{b^2 - R^2}] \quad (3)$$

従って、 T_0 (舗装体表面温度)は式(2)に $x=0$ を代入することにより求まる。ここで、注目する放熱管の左右 n 個から影響を受けた舗装体内温度分布は式(2)を $2n+1$ にわたり重ね合わせることににより求まる。しかしながら式(2)では x が大きくなる程(底面に向うにつれて)誤差が大きくなるために、底面付近における温度分布の信頼性は低い。従って、底面から出て行く熱エネルギーが正確に求められない。よって、 $x=D$ 付近の温度は次の基礎式および境界条件の基に計算される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} &= 0 \\ (x-b)^2 + (y-n \cdot S)^2 &= R^2 : T=T_w, \quad x=D : T=T_D \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)を T について解けば、最終的に次式となる。

$$T = (T_w - T_D) / \log\{(D-b-a')/(D-b+a')\} \cdot \log\left[\frac{(D-x-a')^2 + (y-n \cdot S)^2}{(D-x+a')^2 + (y-n \cdot S)^2}\right] + T_D \quad (5)$$

ここに、 $a' = \sqrt{(D-b)^2 - R^2}$ である。

2-3. 管軸方向水温分布

定常状態における水温 T_w の管軸方向変化は次式で表される。

$$Q \cdot C_p \cdot (\partial T_w / \partial z) + q = 0 \quad (6)$$

ここに Q :流量、 C_p :水の熱容量、 $q(=q_u+q_d)$:舗装体から出て行く熱エネルギー(舗装体から出て行く場合を正とする)を表す。ここで添字 u および d は舗装体上面、下面をそれぞれ意味し、 q_u および q_d はそれぞれ

$$q_u = S_N \int T_0 dy \quad (7), \quad q_d = -\lambda \int (\partial T / \partial x) |_{x=D} dy \quad (8)$$

となる。式(8)中の $(\partial T / \partial x) |_{x=D}$ は式(5)より解析的に求まるから、最終的にこのシステムから出て行く全エネルギー $-q$ (単位長さ当たり)は T_w の関数として次のようになる。

$$q = q_u + q_d = A + T_w \cdot B \quad (9)$$

ここに、

$$A = S_N \int T_D \cdot \exp(-h \cdot D) dy + \lambda \int T_D / \log\{(D-b-a')/(D-b+a')\} \cdot [4 \cdot a' / \{a'^2 + (y-n \cdot S)^2\}] dy \quad (10)$$

$$B = S_N \int \left[\left(\int_0^\infty \phi(\xi, y) \cdot \exp(-h \cdot \xi) d\xi / T_w \right) \cdot \exp(-h \cdot D) \cdot \left(\int_0^\infty \phi(D + \xi, y) \cdot \exp(-h \cdot \xi) d\xi / T_w \right) \right. \\ \left. - \lambda \int 1 / \log\{(D - b - a') / (D - b + a')\} \cdot [4 \cdot a' / \{a'^2 + (y - n \cdot S)^2\}] dy \right] dy \quad (11)$$

従って、式(9)を式(6)に代入することにより水温の管軸方向変化は以下のような指数関数

$$T_w = (T_{w1} + A/B) \cdot \exp\{-B \cdot z / (Q \cdot C_p)\} - A/B \quad (12)$$

で与えられる。ここに、 T_{w1} は入り口水温である。

3. 雪面抵抗の実験

31×31×10cmのコンクリート盤の下面より一様な熱を与え、コンクリート盤内の温度および雪中の温度を計測した。熱源には 50×50cmの温水マットを使用し、温水マット内に一定温度の温水を循環させ、マットの温度がどの地点でも一様となるようにした。温水マットから供給される熱量は 31×31cmの熱流計をコンクリート盤と温水マットの間にはさみ込み、これをハイブリッドレコーダーに接続して計測した。コンクリート盤内温度はサーミスターにより測定され、測定点は図-3に示すように下面より2cm、4cm、6cm、8cmおよび表面下0.2cmの計5点である。なお、コンクリート盤の周辺は発砲スチロールで断熱される。

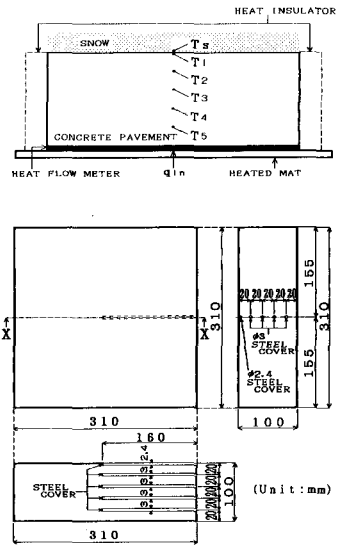


図-3 コンクリート盤詳細図

4. 実験および解析結果

4-1. 雪面抵抗の実験結果

実験開始後約70分でコンクリート盤内各測定点とも温度は定常となった。経過時間90分での温度分布を図-4に示す。温度分布は線形であり、表面温度はゼロとはならず正の値を有すると思われる。これより70分後、80分後、90分後の S_N を算出し、その平均値を数学モデルの中で用いる。結果は表-1の通りであり、 $S_N = 253.9 \text{ W/m}^2\text{K}$ を得た。

表-1 熱伝達率測定結果

Time(min)	70	80	90	Mean
$S_N(\text{W/m}^2\text{K})$	245.5	255.9	260.3	253.9

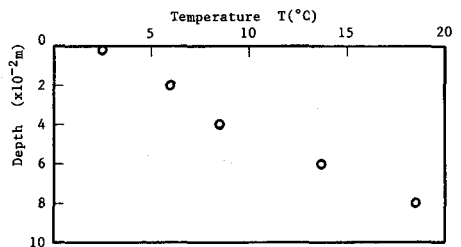


図-4 コンクリート盤内の定常温度分布

4-2. 解析結果

2. で求めた理論解により、シュミレーションを行なう。計算条件は $D = 0.15 \text{ m}$, $S = 0.15 \text{ m}$, $T_{w1} = 15.5^\circ\text{C}$, $T_D = 4^\circ\text{C}$, $b = 0.0585 \text{ m}$, $R = 0.0085 \text{ m}$, $S_N = 253.9 \text{ W/m}^2\text{K}$ とする。なお、温度の値は福井県で測定された¹⁾代表的な値である。

解析モデルでは図-2の断面内において管内水温は同じとするから、 n の値が大きくなるほど流下方向の温度変化のため、この仮定に反する。そこで、 n の違いによる表面温度分布の変化を調べた。その結果が図-5である。計算では $\lambda = 2 \text{ W/mK}$, $T_w = 15.5^\circ\text{C}$ とする。単管($n=0$)と複数管での温度の差異は大きい。後で示すように管水温の管軸方向変化と実際の配管ピッチに基づけば、 $n=1$ では同一断面内の3つの管水温はほぼ等しいとみなせる。さらに図-5より $n=1$ と $n=2$ 以上での表面温度の差は小さいことにより(若干過小評価になるが)、以下では $n=1$ として計算を進める。また、図-6には $\lambda = 2 \text{ W/mK}$, $Q = 8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ における管の長さ単位面積当たりの全放熱量 Q_T 、上部放熱量 Q_u および下部放熱量 Q_b の関係を示す。システム全体にわたり熱エネルギー保存則が満たされている。表面温度を 0°C としたときの数値計算による底面付近の温度分布は式(5)の値とほぼ一致することをも考慮すれば、図-6の熱エネルギー収支の信頼性は高く計算モデルの妥当性が示される。

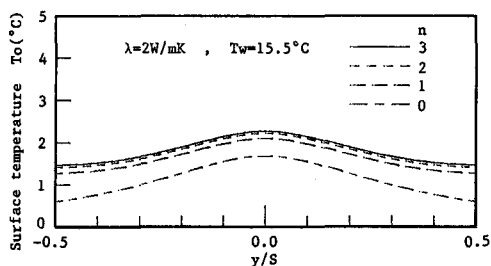


図-5 地表面温度分布

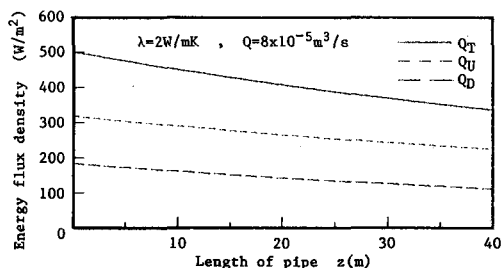


図-6 エネルギー収支

図-7および図-8は $Q=6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ での $\lambda=1, 2, 3 \text{ W/mK}$ の違いによるZ方向の水温変化を示す。また図-9および図-10にパイプ長さ z と融雪能力(融雪エネルギー密度 Q_0 および融雪速度 V_m)の関係を示す。なお、 V_m は 1 cm/h の融雪に 140 W/m^2 必要であるとして算出される¹⁾。図-7および図-8より流量の多い方が、また熱伝導率の小さい方が水温は下がりにくいことが知れる。図-9および図-10からは、流量の多い方が、また熱伝導率の大きい方が融雪能力は高いことが判る。しかしながら λ が大きくなるにつれて流下方向にわたる融雪能力の低下は著しくなるので、パイプ長の決定には注意を要する。例えば、 $\lambda=3 \text{ W/mK}$ 、 $Q=8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ の場合の融雪能力は初め 3.4 cm/h であるのが、 40 m 下流では 2.1 cm/h となり約60%に低下する。

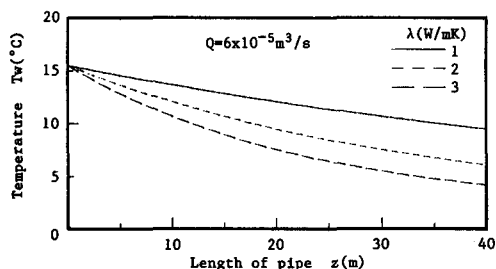


図-7 管内水温の流下方向変化

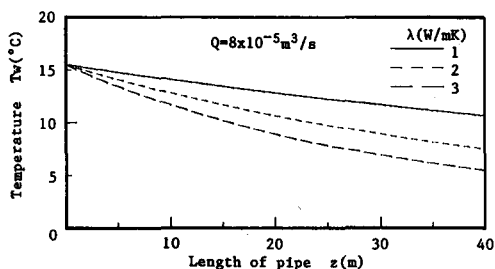


図-8 管内水温の流下方向変化

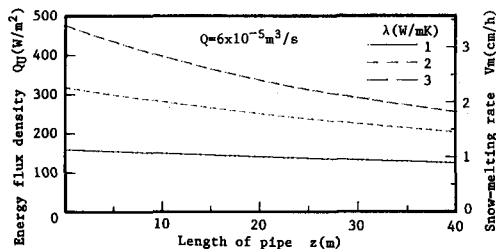


図-9 融雪能力

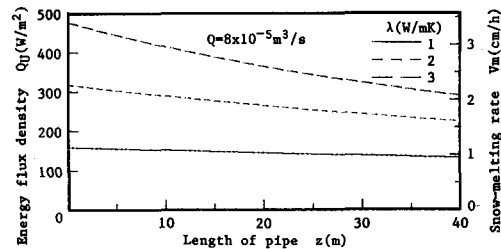


図-10 融雪能力

5. 結論

本論文では無散水融雪装置の融雪能力に及ぼすコンクリート熱伝導率および地下水流量の影響を明らかにした。その結果、舗装体の熱伝導率が高いほど融雪能力は上がるので、地下水流量をできるだけ節約して使うためには舗装体にできるだけ熱伝導率の良い素材を使用するとともに、配管ピッチ・埋設深・パイプ長を決定することが肝要である。

参考文献

- 1) 宮本重信、藤野間幸英：放熱管方式融雪の解説と実測、福井県建設・雪対策センター年報第2号、1988