

舗装体の一次元熱伝導に関する研究

北大工学部	正員	○森吉昭博
土木試験所	正員	久保 宏
北大工学部	学生員	鷲巣 慎
北大工学部	正員	深井一郎
北大工学部	正員	菅原照雄

1. まえがき

寒冷地へ一般道路部においては、舗装体が低温にさらされるために、舗装内部で舗装材料が凍結したり、融解したりするので、舗装体は冬期に凍上し、春期に融解する。このため、材料の置換工法、断熱工法等を用い、できるだけこれらの諸現象を防止するようにしている。道路部での凍上、融解に関する研究は非常に歴史が古く、北海道においてもほぼ30年の歴史を持っている。これらの諸現象の解析は諸外国においてもかなり行なわれているが、いまだ、これといった解析法がなく、種々の実験式を用いて推定しているにすぎない。このように、これらの現象には不安定な要素が多く存在するため、室外の実験により凍結、融解の状態を観察しているのが現状である。本研究は、以上の点を考慮し、室外に設置した舗装構造から得られた測定値から舗装体中の各構成層の物理特性と推定し、実験値との関連を考慮し、舗装体が凍結、融解するときの舗装体中の温度分布を有限要素法により求め、実験値と比較したものである。解析の結果、凍結しない時期の舗装各構成層の物理特性と、舗装体が凍結、融解する時期のそれとはまったく異なること、及び、断熱材上部には、かなりの水分が存在することが推定された。

2. 解析方法

n 層系の舗装体の熱伝導問題は次の一次元熱伝導方程式によって表される。

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{k_i}{c_i \rho_i} \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} \quad (i = 1, \dots, n)$$

各層の境界における条件は以下のとおりである。

$$-k_i \frac{\partial T_i}{\partial x} = -k_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial x} \quad (i = 1, \dots, n-1)$$

ここで k_i , c_i , ρ_i , T_i はそれぞれ第 i 層の熱伝導率、比熱、密度、温度であり、 t は時間、また舗装体深さ方向に x 軸をとるものとする。

以上の式を用いて、図1に示す舗装構造のアスファルト層以下の路盤、断熱材、路床の3層について、上部及び下部、すなわち深さ20cm, 81cmの点における実測値に固定してその間の温度分布を求め、残りの4点における実測値と比較した。また物理定数の推定は次の手順で行なった。

- ① 各層の熱伝導率 k を仮定し、深さ方向の温度分布から、これに見合う定数を試行錯誤により求める。
- ② ①で求めた定数を用いて各層の熱拡散率 $k/c\rho$ を仮定し、温度-時間曲線から、熱容量 $c\rho$ を求める。
- ③ ①及び②を繰り返す。最終的な各層の k , $c\rho$ を推定する。

次に、凍結が予想される季節においては、単なる熱伝導の問題を解いても、計算値と実測値に近づけることは困難で、各構成層の潜熱を考慮する必要がある。潜熱を考

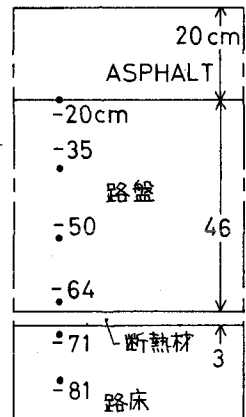


図.1 (●……温度測定点)

慮して計算し、実測値と比較し、これを繰り返すと最終的に各層の潜熱が推定される。図2に非凍結→凍結の状態の変化がある場合の計算の手順を示すが、これと逆の現象、すなわち凍結→融解の場合も同様の手順で計算できる。

3. 実測値との比較

図3は1月における深さ方向の温度分布を実測値から推定したものである。これより断熱材上部の路盤、すなわち下層路盤は上層路盤とは物理定数が異なる、従ってこの問題は路盤を2層に分けて全部で4層の問題として扱うことが妥当であること。また、8日、9日、10日の50cm以下の温度はほとんど変化していないところから、この付近において凍結が開始していると考えることが妥当なことがわかる。

図4は、5月における舗装体中の温度と時間の関係を示す。△は従来から提案されている物理定数を用いた計算値であり、×は本研究で求められた定数を用いたときの結果であり、実測値は○で示してある。この図から明らかなように、断熱材上部2cmの位置における温度は従来の数値を用いると著しく実測値と異なるが、本研究で求めた数値によると、どの深さにおいても良く一致することがわかる。

次に、9月における計算結果と実測値との比較を図5において行う。従来の数値による計算結果と実測値の相関はかなり高いと言える。また温度の変化が比較的小さいこともあって、5月において求めた数値を用いた場合もほとんど同様の結果が得られている。

図6は、既に凍結している部分と凍結に移行している部分が同時に存在すると予想される1月における結果である。従来の物理定数を用いた計算結果は実測値と著しく異なる。また熱伝導率、熱容量を変化させただけでは、9日、10日において深さ50cm、60cmの位置で計算値が実測値よりも著しく低くなってしまう。既に述べたように、その付近で凍結が開始していることも考慮に入れなければならないことがわかる。物理定数を変化させ、更に非凍結から凍結に移行する際の潜熱を考慮に入れた本研究の計算結果は実測値とさきめて良好一致を示している。

4. むすび

以上の結果から得られた結論を要約すると次のようになる。

- ① 舗装構成層の物理定数は季節により変動する。
- ② 凍結、あるいは融解のない時期における舗装各深さにおける温度は従来の物理定数を用いても下層路盤の下部を除けば、実測値と比較的一致する。
- ③ 凍結、あるいは融解の予想される時期における下層路盤の温度を推定することは、従来の方法では難しく、本研究で用いた潜熱を考慮した方法によらなければならない。

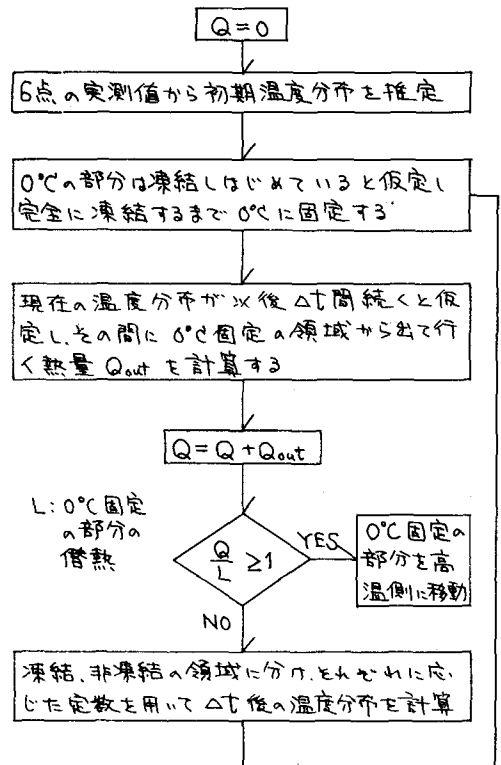


図2. 非凍結→凍結を考慮した計算の手順

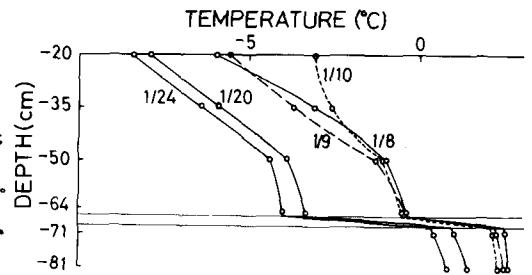


図3. 1月における深さ方向の温度分布(実測値より推定)

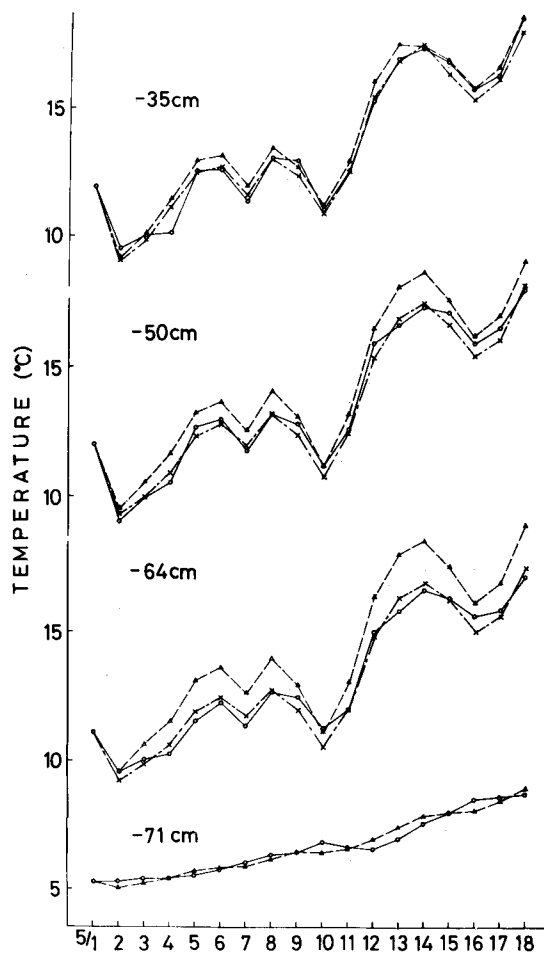


図.4. 5月における計算結果と
実測値との比較

	従来, 9月	5月 (9月)	1月
路盤	$k=0.00779 \text{ cal/cm}^2$ $c=0.23 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$ $p=2.1 \text{ g/cm}^3$ 含水率 $w=8\%$ $L=5.3 \text{ cal/cm}^3$	$k \begin{cases} \uparrow 0.00779 \\ \downarrow 0.00779 \end{cases}$ $c \begin{cases} \uparrow 0.23 \\ \downarrow 0.345 \end{cases}$	$k \begin{cases} \uparrow 0.00779 \\ \downarrow 0.00779 \end{cases}$ $c \begin{cases} \uparrow 0.345 \\ \downarrow 0.598 \end{cases}$ $L=134$
断熱材	$k=0.00008$ $c=0.17$ $p=0.0647$	$k=0.0002$	$k=0.0002$
床	$k=0.00279$ $c=0.695$ $p=0.9$ $w=70\%$	$k=0.00558$	$k=0.00558$

表 1. 従来、物理定数、本研究の定数

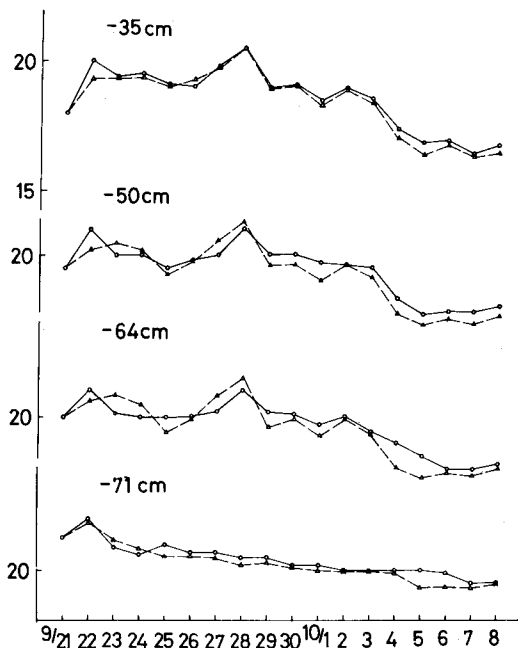


図.5. 9月における計算結果と
実測値との比較

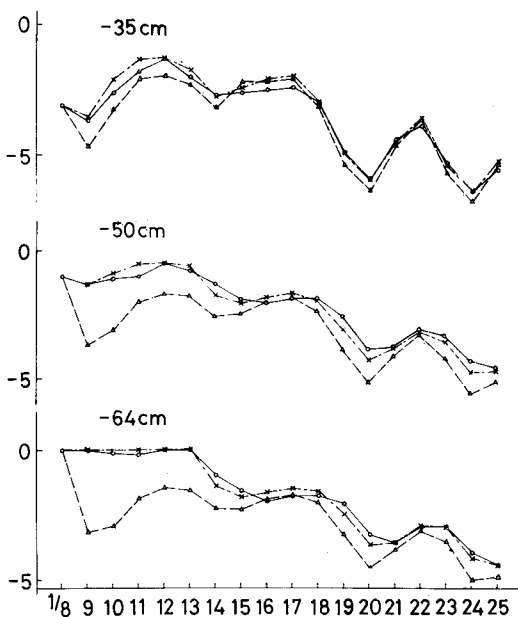


図.6. 3月における計算結果と
実測値との比較

- measured
- △- calculated (従来、の定数)
- ×- " (本研究、の定数)

なお、表1は本方法で求められた各月の物理定数と、従来から用いられているものを示すものである。これより、5月における下層路盤の熱容量 CP は9月の時期のそれよりも約50%大きな値となっている。この原因は、5月は下層路盤に、かなり水分が含まれているためと考えられる。一方、凍結のある1月においては更に下層路盤の CP は大きく、上層路盤の CP も5月の下層路盤の値となっている。このことは、1月に下層路盤に異常なほどの水分が存在することを予想させるものである。

今後の問題として、本方法を更に長い時間に対して適用できるか否か、また外気温を変動させた場合についての適用の可能性を検討する必要がある。

本報告は以上の確認がなされれば、一般道路部の舗装構造の設計だけでなく、トンネル部及び水路部に対しても適用可能であると思われる。更に、この研究を進めると一次元のみならず、二次元の場合にもまったく同一の手法で、物理定数も推定することが可能であると思われる。

最後に、本研究を行なうにあたっては開発局美々試験道路の実測データを使用させていただいた。また、計算にあたっては、北大大型計算機センター、FACOM 230-75を使用した。

参考文献

1. 平尾、高橋、久保、菅原、；アスファルト舗装体の温度変化について、土木試験所月報、第162号、1966
2. 久保、美馬、豊島、；凍結指数と道路の凍結深さに関する調査研究、第18回北海道開発局技術研究発表会資料、1975
3. 武政、桑田、；砂および碎石による二層の熱伝導について、長崎大学工学部研究報告第6号、1975