

V—34 断熱工法による道路凍上対策について

北海学園大学工学部 正員 武市 靖
 北海学園大学工学部 木下直人
 北海学園大学工学部 木村篤志

まえがき

道路整備にともない、交通量の少ない支線、生活道路や歩道の舗装化が進み、また冬期間の交通確保のために除雪対策の充実が図られるようになり、道路は一層奥深くまで冷やされ凍上を受けやすい状態になっている。積雪寒冷地において、このような道路では目標とする舗装合計厚は小さくてすむが、凍結深さが大きい場合には何らかの凍上対策工法を適用する必要がある。しかし、置換工法では置換材料を多量に要し、最近の天然資源に関する諸事情を考慮すると、必ずしも経済的とはいえない場合があり、交通荷重による断熱材の変形等の問題が少なく軽交通道路では、むしろ断熱工法の方が適用しやすい状況にあると考えられる。

そこで、本研究は軽交通道路と歩道の舗装断面について、断熱工法を適用した断面（以下、断熱断面と呼ぶ）と何らかの凍上対策工法を適用しない断面（以下、通常断面と呼ぶ）を設定して、大学構内で試験舗装を実施し、凍上・凍結に関する調査・解析を行なった。特に、凍上量、凍結深さ及び舗装体内各層の温度分布の経時変化等の点から、断熱断面と通常断面との比較を行ない、断熱工法の適用性について検討を加えてみた。

1. 試験概要

70m²の敷地に施工した試験舗装の平面配置、舗装構成・材料及び熱電対の埋設位置は図-1に示す通りであり、メチレンブルー凍結深度計と土圧計は各断面に1箇所ずつ設置した。軽交通道路を対象とした車道部の舗装構成は、A交通、設計CBR≧6に基づくもので、歩道部のそれは積雪寒冷地で採用されているものをそのまま用いた。また、試験舗装個所の在来地盤は砂れきを多く含んでいるので、凍上性のシルト質土で路床面から1～1.2mまで路床土の置換を行なった。

○凍上量、凍結深さ及び舗装体内温度の測定

冬期間、試験箇所は常に除雪を実施し、凍上量はレベル測量により、凍結深さはメチレンブルー凍結深度計で判定するとともに、地中温度同時曲線図からの算出をも行なった。

舗装体内各層の温度測定は、各層に埋設した熱電対により行ない、レコーダに自記記録させた。

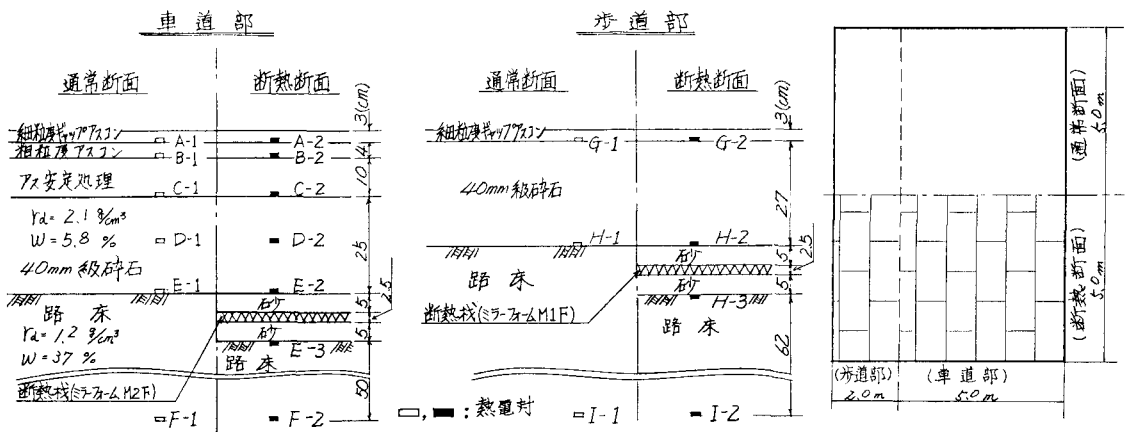


図-1 試験舗装の平面配置、舗装構成材料及び熱電対の埋設位置

○断熱伐の特性

	種類	圧縮強さ(kg/cm^2)	曲げ強さ(kg/cm^2)	熱伝導率($\text{Kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$)	比熱($\text{Kcal}/\text{kg}^\circ\text{C}$)	吸水率($\text{g}/100\text{cm}^3$)	密度(g/cm^3)
歩道部	M1F	3.0	4.4	0.029	0.27	0.01	0.030
車道部	M2F	4.0	5.9	0.023	0.27	0.01以下	0.035

2. 試験結果と考察

2-1. 凍上量と凍結深さ

図-2に示す通り、歩道部、車道部ともに12月から舗装の凍結が始まり、断熱断面では断熱伐より上部は冷やされやすいために、凍結開始期の凍結深さは通常断面より大きくなっている。12月下旬～1月頃にかけて、通常断面の凍結深さは急激に大きくなり、面断面の凍結深さの上下関係は逆転する。また、この時期になると、通常断面では凍結深さが路床面下10～15cmに達し、凍上がわずかながら発生している。

2月の最寒期に入ると、通常断面では路床面下30～40cmまで凍結が進み、凍上量も大きくなっている。特に歩道部断熱断面の凍結深さは急激に増加し、一時期、通常断面とほぼ同程度となり、また急減している。これは、断熱伐の埋設位置が歩道部では浅く、車道部の断熱伐より断熱効果の小さいものを使用しているためと考えられる。

最大凍上量は歩道部、車道部ともに断熱断面では5mm程度であるのに対し、通常断面では40～50mmにまで達し断熱工法による効果が現われている。しかし、歩道部の断熱断面では一時期、路床面下かなり深くまで凍結しているにもかかわらず凍上量が少ない。この理由として、2月1日～14日頃までの凍結速度が速く、レンズ状氷層が十分にできず土中水がそのままの位置で凍ってしまった、断熱工法の副次的効果によるもの、または舗装体内の境界条件の影響が現われた等が考えられるが、今回の試験では確認できなかった。

3月下旬～4月初旬の融解期に入ると、通常断面と断熱断面とでは凍結深さの減少状態に大きな差が生じている。断熱断面では、3月末の1～2日間に凍結深さが急減し、0になっているのに対し、通常断面では凍結中間層が1週間残留しており、融解期特有の路床・路盤の支持力低下による舗装破損の原因となる恐れがあり、この点についても、断熱工法の効果が現われているといえる。

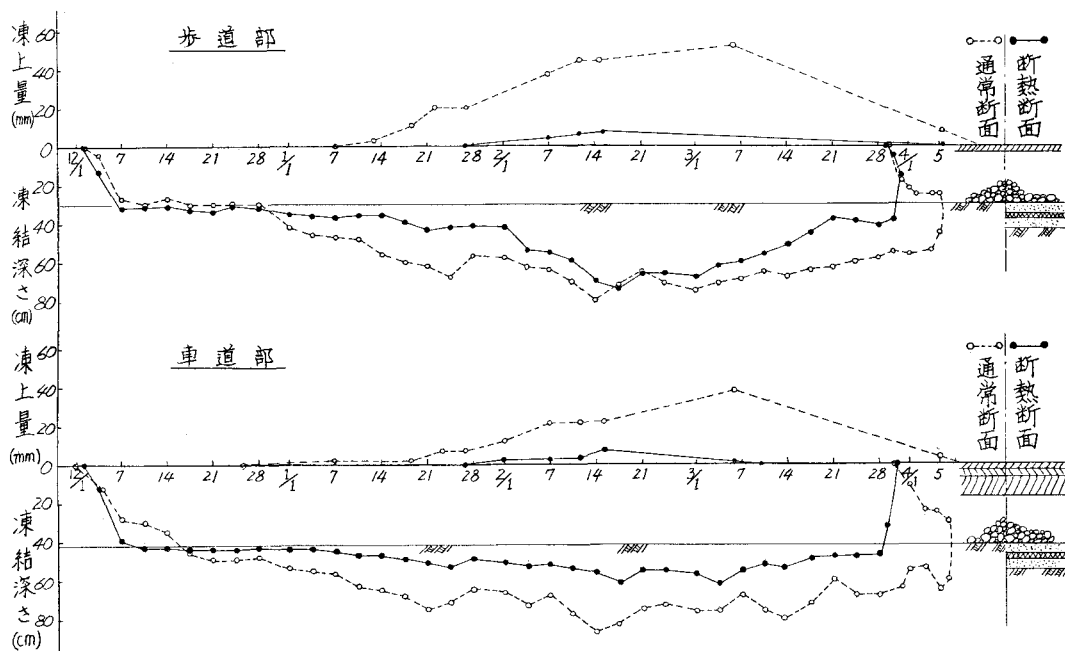


図-2 凍結開始期、凍結期及び融解期における車道部各層での日平均温度の経時変化(57.12-58.4)

2-2. 舗装体内各層での日平均温度の経時変化

図-3は車道部各層での日平均温度の経時変化を示したもので、この図から図-2で示した通常断面と断熱断面での各時期における凍結の推移がわかる。凍結開始期は断熱断面の下層路盤下面の温度は通常断面のそれより、一週間早く0℃以下になっているが、両者の温度差は1℃程度と小さい。2月の凍結期では、両者の温度差は3℃と大きくなり、断熱断面における下層路盤下面の温度はかなり低下しているが、断熱材下面の温度は-0.5℃以下にはなっていない。一方、断熱断面の表層部はより冷やされアスファルト混合物の性状に悪影響を与えるのではないかと当初考えていたが、通常断面のそれと比較するとやや低めで、着しい差はでておらず、むしろ下層路盤に断熱工法による熱的影響が大きくでている。

凍結開始期から凍結期にかけて、両断面における各層の温度分布の上下関係は同じ状態を保つが、融解期に入ると、その関係が逆転している。特に、下層路盤下面の温度を見ると、断熱断面では3月9日を境にして温度が0℃以上になっているにもかかわらず、通常断面では4月7日まで0℃以下が続いており、図-2で示した凍結中間層が通常断面では一週間残留することが、図-3から説明できる。

2-3. 舗装体内各層での月平均温度の周期変動

図-4は車道部各層での月平均温度の経時変化を57年12月から58年11月の1年間にわたり示したもので、通常断面では、実測値とフーリエ変換による理論値との比較を試みた。

両断面とも各層の温度分布は一年を周期とする変動を示しており、深くなるにつれ位相の遅れがわずかにみられるが現われている。

各層温度の実測値との比較に用いた理論値については、舗装体を一様な熱的性質をもつ半無限固体と仮定して算出した。表層下面での実測値を表面温度として、この表面温度が時間の周期関数 $\varphi(t)$ で、周期を T (一年)とすれば、 $\varphi(t)$ はフーリエ級数により(1)式で表わせる。(1)式より、任意の深さにおける温度分布は(2)式で表わせる。

$$\varphi(t) = a_0 + (a_1 \cos \omega t + b_1 \sin \omega t) + (a_2 \cos 2\omega t + b_2 \sin 2\omega t) + \dots \quad (1)$$

$$U = A_0 + A_1 \exp(-\sqrt{\frac{2K}{T}} \cdot X) \cos(\omega t - \sqrt{\frac{2K}{T}} \cdot X - \varepsilon_1) + A_2 \exp(-\sqrt{\frac{2K}{T}} \cdot X) \cos(2\omega t - \sqrt{\frac{2K}{T}} \cdot X - \varepsilon_2) + \dots \quad (2)$$

K : 温度拡散率(m^2/s), $T=25\omega$: 周期(h), X : 深さ(m), ε_n : 位相の遅れ(rad)

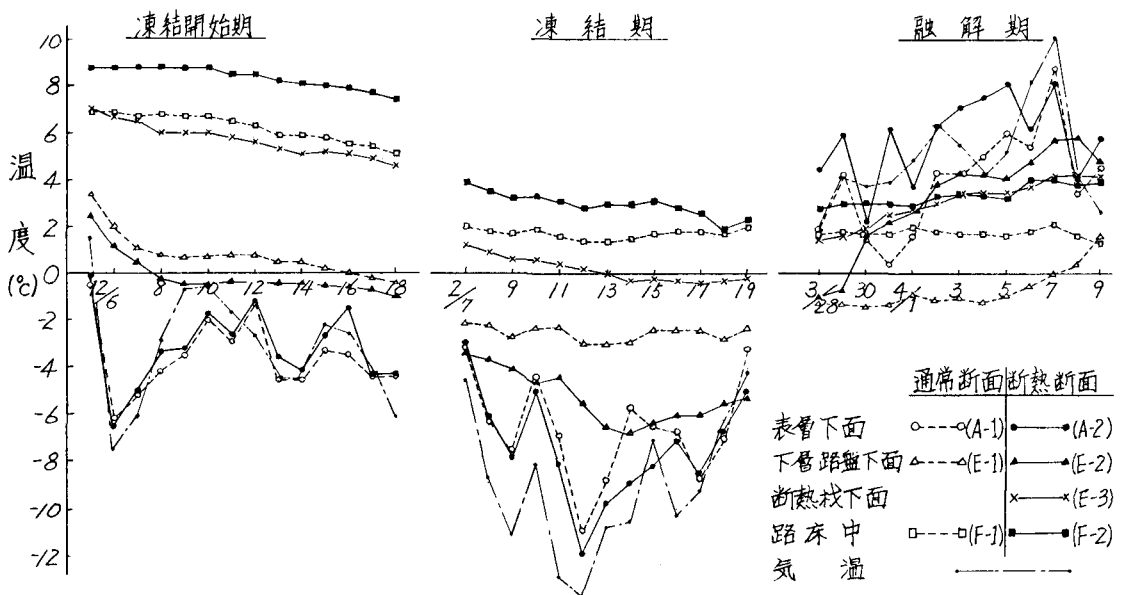


図-3 歩道部、車道部の通常断面と断熱断面における凍上量及び凍結深さの経時変化(57.12-58.4)

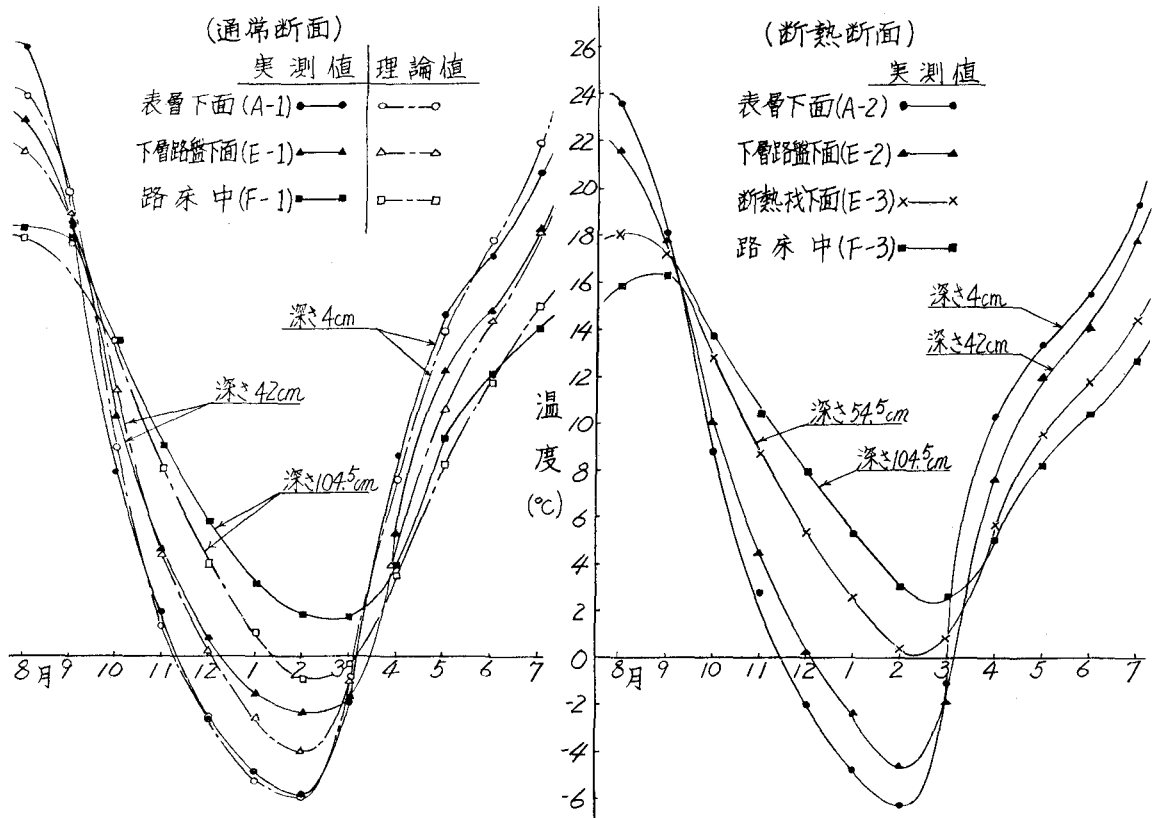


図-4 車道部各層における月平均温度の周期変動 (57.12~58.11)

(1)式では、表-1に示した実測値を代入して、表層部の温度分布をほぼ完全に表現するために、級数項の第3項までとり、(2)式では級数項の第3項までとった。(1)式より決定された各係数は表-2に示す通りである。温度拡散率はアスコン、碎石及び路床土に対する平均値として、 $K=0.0018(m^2/s)$ の値を採用した。

上記のような設定で算出した理論値と実測値との比較をみると、表層下の温度分布は一致するが、下層路盤下面と路床中の凍結期間中における温度分布は両者に2~3℃の差がでている。この理由として、舗装体を熱的性質が一様な半無限固体と仮定したこと、凍土と未凍土の温度拡散率の違いや潜熱の影響等を考慮していないことによるものと考えられる。

3. 結論

- (1). 断熱工法を適用することにより、凍上を防止することのみならず融解期における凍結中間層の残留を抑制することができる。
- (2). 断熱断面と通常断面における舗装体内各層の温度変動を比較すると、両者ともほぼ同様の周期変動をするが断熱断面における凍結期間中の下層路盤下面は断熱工法による熱的影響を強く受けている。

最後に、本研究を行なうに当たり、現場試験断面の築造の際、協力を頂いた丸島波辺建設(株)、日本ステレンペーパー(株)の各社に謝意を表します。

参考文献: 1) 木下誠一: 凍土の物理学, 森北出版, 1982 2) 村根規, 福田正: 舗装の熱的性質についての2, 3の検討, 舗装 6月, 1979 3) 川下研介: 伝熱論, オーム社, 1976 4) 福田正己, 先川信一郎: 凍土の熱伝導率の測定, 低温科学 物理編 30, 1975

表-1 表層面の平均温度

月	°C	月	°C
1	-4.9	7	20.6
2	-5.9	8	26.0
3	-2.0	9	18.4
4	8.6	10	7.9
5	14.6	11	1.9
6	17.1	12	-2.7

表-2 (1)式と(2)式の係数

Q0	8.3000	b4	-0.2021
Q1	13.5334	b5	0.4173
Q2	0.7000	A0	8.3000
Q3	2.1333	A1	14.6086
Q4	0.8500	A2	0.8083
Q5	0.2832	A3	1.6081
b1	-5.5006	E1	-0.3861
b2	0.4041	E2	0.5236
b3	1.2667	E3	0.5358