

鋼床版上のアスファルト舗装の線状熱源による温度特性

北大工学部 正員 〇深井一郎
北大工学部 正員 森吉昭博
北大工学部 正員 菅原照雄

1. まえがき

積雪寒冷地の舗装体は外気温が非常に低いために車輛等のスリップ事故や熱応力による亀裂現象などが数多く発生する。このため寒冷地の舗装体はこれらの対策として断熱材や線状熱源の挿入、薬剤添加および熱伝導率の低い材料との置換工法等が行なわれている。このうち薬剤添加と線状熱源に関する研究ならびにその施工例は古く、数多くの実績があるが、いまだ解決されていない面も多い。一方断熱材を舗装体に挿入した研究は比較的新らしく、その使用例はかなり少なく、かつそれは限られた個所にしか用いられていない。この原因としては凍上対策として断熱材の利用は極めて有用であるにもかかわらず、力学的に不安定であることや凍上対策としての効果の判定が難しいことなどがあげられる。

近年モータリゼーションの発達と共に鋼床版上の舗装が歩道ならびに車道に舗設されるようになり、寒冷地における舗装体においては通常断熱材や線状熱源を挿入し、舗装に亀裂等のトラブルが生じないように配慮されたものが多い。しかし、これらの温度特性は解明されていない点が多く、設計を行うにあたってはいまだ経験に頼っているのが現状である。

本研究は以上の点を考慮し、鋼床版上のアスファルト舗装体中に線状熱源および断熱材を挿入したときの舗装モデルを想定し、舗装体の温度特性に著しい影響を与える断熱材の厚み、熱伝導率、および密度を変化させ、線状熱源の電流を印加したときの舗装体中の温度特性について、熱効率および温度分布を時間変化させた面より考察したものである。計算の結果は実測値とある範囲でかなりよく一致することが確かめられ、かつ舗装体の温度特性に影響を与える因子の解明より、これらの舗装構造の設計に対して一つの指針を与えることができた。

2. 計算方法

本研究では図-1に示す舗装構造モデルを想定し、このモデルに表-1に示す物理定数を用いて有限要素法を適用し、各節点の温度および表面の熱効率を計算した。

表-1 計算に用いた物理定数

層の名称	熱伝導率 Kcal/m・K・℃	比熱 Kcal/kg・℃	密度 g/cm ³	厚さ cm
アスファルト層	0.8 0.02, 0.04 0.1, 0.2	0.21	2.4 0.29 0.029	6.5 3 4
断熱材		0.20		
鋼床版	38	0.11	7.0	0.5
断熱部	13	0.11	8.51	φ=0.58

熱効率の計算においては定常状態（無限時間経過後）と非定常状態（電流印加直後から定常状態まで）を考慮し、前者では以下に述べる(1)、(2)式を、また後者においては(3)式のみを用いた。

図-1において各節点の路面表面温度と要素-層目下部の各節点の温度差を ΔT_m とすると表面に流れる熱量、 Q_1 は、要素1層目の熱伝導率を α_1 とすると $Q_1 = \int_{m=1}^n \alpha_1 \Delta T_m$ 、であられされ、同様の考え方が下面においても成立し、要素の最下層の熱伝導率を α_n とすると下方に流れる熱量、 Q_2 は $Q_2 = \int_{m=1}^n \alpha_n \Delta T_m$ 、で表わされる。従って上部に流れる熱の割合（熱効率）、 η 、は次式で表められる。

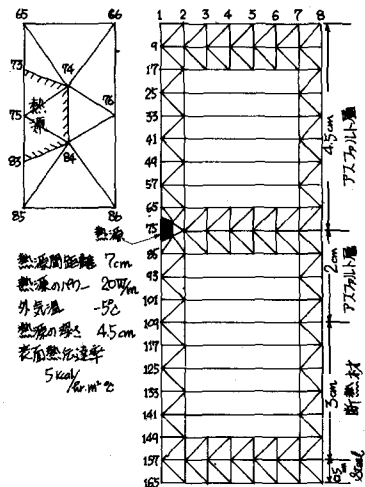


図-1 舗装構造モデル

$$\gamma = \frac{\int_{m=1}^r \alpha_1 \cdot \Delta T_m}{\left(\int_{m=1}^r \alpha_1 \cdot \Delta T_m + \int_{n=1}^r \alpha_2 \cdot \Delta T_n \right)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

一方、発熱体埋設面より上方の舗装体の熱抵抗、 R_1 、は表面熱伝達率の逆数と各層の厚さを各層の熱伝導率で除したものの和で表わされるので図-2より

$$R_1 = \frac{1}{\alpha} + \frac{0.045}{k_a}$$

また下方の舗装体の熱抵抗、 R_2 、は同様に

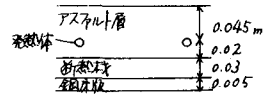
$$R_2 = \frac{1}{\alpha} + \frac{0.02}{k_a} + \frac{0.03}{k_d} + \frac{0.005}{k_s}$$

表面熱伝達率、 α

アスファルト層の熱伝導率、 k_a

断熱材の熱伝導率、 k_d

鋼床版の熱伝導率、 k_s



となり、熱効率 γ は次式で表現される。³⁾

図-2 代表的舗装構造

$$\gamma = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

3. 計算結果および考察

図-3は図-1の舗装構造モデルにおいて断熱材の厚さ3 cm、密度が 0.029 g/cm^3 のとき、断熱材の熱伝導率のみを変化させ熱源軸上の温度を電流印加後1時間、および2時間について計算した結果を示す。1時間後には路面表面温度は -1.3°C となり、断熱材の熱伝導率が10倍変化してもその影響はほとんど受けない。一方下面の鋼床版の温度は約 1°C 変化し、熱伝導率が高いものほど下面温度は高くなる。このため断熱材の表面より1 cm位の深さで両者の温度分布曲線が交差する。印加後2時間で路面温度は熱伝導率の小さな方が大きな方より約 1°C 高く、鋼床版下面温度は逆に前者が後者より約 4°C 低くなっている。また図より時間の経過と共に断熱材の上部および鋼床版の表面は熱伝導率の変化の影響を受けやすい。このため熱源より下のアスファルト層では熱伝導率の値が小さくなると共に深さ方向の温度勾配が大きくなる傾向にあり、熱源より上部のアスファルト層よりもこの部分はより大きな熱応力が生ずる可能性のあることを示唆している。一方、断熱部においては著しく温度変化を受けるため、このタイプの舗装構造の設計においては断熱材の膨張、収縮現象についても考慮し、かつこれらどの程度舗装構造に影響を与えるかについても検討することが必要であると思われる。

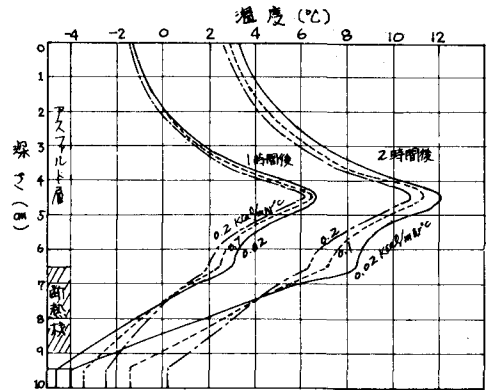


図-3 熱伝導率が温度分布に与える影響

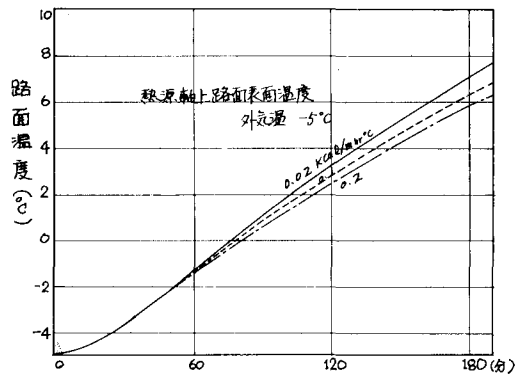


図-4 熱伝導率が路面表面温度に与える影響

図-4は図-3の路面表面温度と時間との関係を示す。図より熱伝導率の値は10倍変化させても電流印加後約80分で路面表面温度はいずれもほぼ 0°C に達し、2時間経過すると熱伝導率の小さな構造のものは大きなそれより約 1°C 、また3時間経過すると前者は後者より約 2°C それぞれ高い温度となる。従って路面表面温度の増加率は前者より後者の方が小さく、熱伝導率が $0.2 \text{ kcal/m}\cdot^\circ\text{C}$ の場合 最大値で約 0.06°C/分 であり、熱伝導率が $0.02 \text{ kcal/m}\cdot^\circ\text{C}$ の場合は最大値で約 0.08°C/分 である。

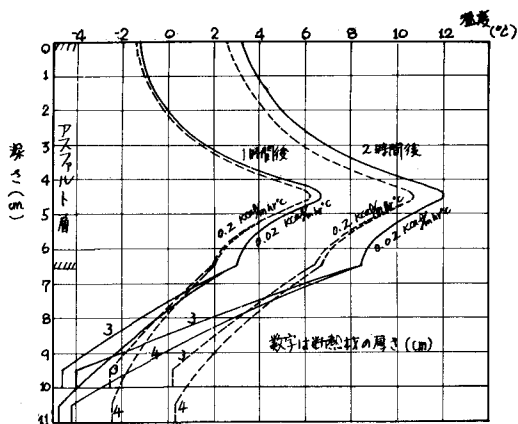


図-5 断熱材の厚さが温度分布に与える影響

図-5は断熱材の厚さが熱源軸上の温度分布に与える影響について検討するため、断熱材の熱伝導率をそれぞれ $0.02 \text{ Kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ 、 $0.2 \text{ Kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ と変化した場合、電流印加後1時間および2時間後の温度分布について整理したものである。断熱材の熱伝導率の小さい場合は断熱材の厚さが1 cm厚くなくともアスファルト層および鋼床版層の温度分布はほとんど変化せず、断熱材の温度分布のみが著しく変化しているにすぎない。

図-6は断熱材の密度が熱源軸上の温度分布に与える影響について検討するため、断熱材の厚さが3 cm、断熱材の熱伝導率が $0.02 \text{ Kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ の場合について密度をそれぞれ 0.029 g/cm^3 、 0.29 g/cm^3 と変化した場合の電流印加後1時間および2時間後の熱源軸上の温度分布を示す。時間経過と共に密度の大きな場合は小さな場合よりもアスファルト層で約 0.2°C 、断熱材層では約 1°C 、鋼床版層で 0.2°C とほぼ構造全体にわたりにわすかながら温度は上昇する。

図-7は図-6と同一条件において路面表面温度と経過時間との関係を示す。電流印加後約20分より密度の大きな断熱材を使用したものは小さいものより路面表面温度は約 0.2°C 高く、その後の時間経過と無関係である。

図-8は熱効率と時間との関係を断熱材の厚さが3 cm の場合について断熱材の密度および熱伝導率を変化させて整理したものである。熱伝導率の大きい場合は時間経過と共に次第に熱効率は増加するが、熱伝導率が小さくなると共に電流印加後初期に熱効率の極大値があらわれ、以後次第に減少する。このピーク時間は熱伝導率の小さいほど短い。また熱効率は熱伝導率の小さいものほど短時間に急激に増加する傾向にある。一方断熱材の密度が大きくなると電流印加後初期の熱効率が著しく大きくなり、時間経過と共に密度の小さいものとほぼ同一の熱効率となる。熱効率は電流印加後ほぼ3時間を経過すると、ほぼ一定値に収束するように思われるが、この時

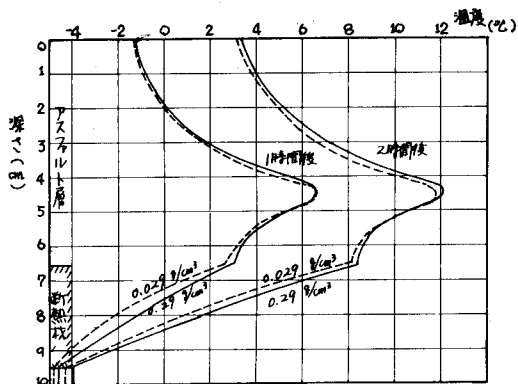


図-6 断熱材の密度が温度分布に与える影響

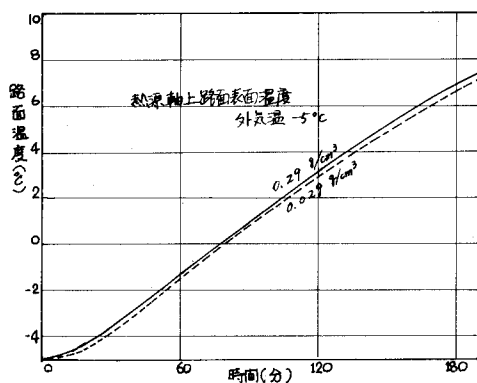


図-7 断熱材の密度が路面表面温度に与える影響

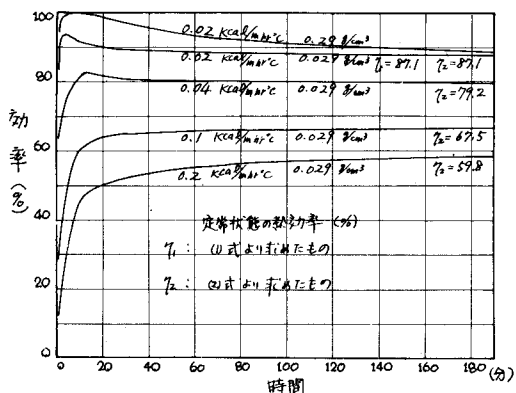


図-8 熱効率と時間との関係

期の熱効率率は(1)式より求めた定常、非定常状態ともほぼ同一の値となり、この値は(2)式より求めたものとはほぼ一致する。

図-9は本研究に用いた鋪装モデルと全く同一の鋪装構造を屋外に設置し、鋪装体内部の温度を測定した結果と本研究の計算により求めた結果とを比較したものである。この実験における初期状態は新雪が約4cm積った直後である。計算にあたっては外気温は -5°C 、表面熱伝導率は $5\text{ kcal/m}^2\text{r}^{\circ}\text{C}$ の一定値と仮定し、断熱材の熱伝導率は $0.04\text{ kcal/m r}^{\circ}\text{C}$ の値を用い、その他の定数は表-1の値を使用した。

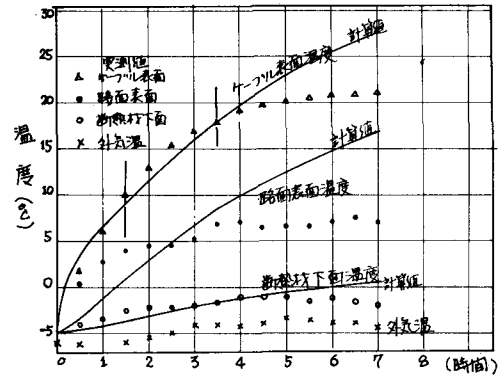


図-9 種々の深さにおける実測値と計算値との比較

実験では通電後約1.5時間で融雪効果が顕著となり、通電後3.25時間でほぼ融雪は完了した。これより図-9に示す実測値と計算値とのずれは路面表面を除いて融雪完了後次第に大きくなる傾向にあるが、初期設定条件が前者で多少異なるにもかかわらず、融雪完了以前のケーブル表面温度および断熱材下部の温度は比較的良好一致しているといえよう。

4. まとめ

以上より得られた主な結論を要約すると以下のとおりである。

- 1) 断熱材の熱伝導率が小さいほど鋪装体中のアスファルト層の温度は高く、鉄板版層の温度は低くなり、熱効率はよくなる。
- 2) 断熱材の厚さが1cm厚くなってもアスファルト層の温度上昇はほとんど期待できない。
- 3) 断熱材の密度が10倍大きくなっても鋪装体中の温度分布はほとんど変化しない。
- 4) 発熱ケーブルの表面温度および断熱材下部の温度は融雪完了以前では計算値と実測値とが比較的良好一致するように思われる。

以上で述べた研究においてはいずれも初期温度が鋪装内部において外気温と同一として、外気温が通電中も一定として、かつ融雪条件も考慮していないため路面表面温度が実測値と計算値とでは多少異なるが、この点についてはさらに検討する必要がある。しかしながら、熱効率がよくレスパンスの早い鋪装構造なるものに対してこれらの結果は有用な示唆を与えるものと考えられる。

これらの計算においては佐川一行君の協力を得、また実験のデータは古河電工(株)の提供を受けた。ここに感謝の意を表する。

なお本研究の計算は北大大型計算機 FACOM-230-75 を使用した。

参考文献

- 1) 森吉、深井、佐崎、菅原；線状熱源を有する鋪装体の定常状態における温度分布、土木学会北海道支部論文報告集、pp51~54、第32号、1976年
- 2) 深井、鈴木、森吉、菅原；線状熱源を有する鋪装体の非定常状態における温度分布、土木学会北海道支部論文報告集、第32号、pp55~58、1976年
- 3) 砂山、室田；横断歩道橋のロードヒーティング、—熱効率と断熱材—、土木施工、vol.17 no.5、pp43~48、1976年