

非線形多層モデルによって求めた道路の凍結深さと温度条件について

東北大学工学部 学生員 ○青木 照幸
同上 正会員 柳沢 栄司
同上 正会員 姚 義久

1. はじめに

北海道や東北地方などの寒冷地域においては、舗装道路の凍上や凍結融解作用による軟弱化等による凍害が問題となる。その対策としては気象データ等から予想される理論最大凍結深さの70%と粗粒材で置き換える置換工法が最も一般的である。現行の設計方法では主として凍結指数が凍結面の推定に用いられているが、実験結果では凍結深さや凍上量は更に多くの温度因子で変化しているものと考えられている。本研究では、青森県の現地観測記録に基づいて非線形多層モデルによって舗装道路地盤の凍結の進行をシミュレートし、温度条件による影響及び最大凍結深さの推定を試みた。

2. 解析の手法

シミュレーションプログラムのフローチャートを図1に示す。解析に用いた地盤及び土の熱的性質は、青森県における現地調査報告をもとに図2及び表1のように定め、任意の深さ、湿度、時間による土の熱的性質は次の式によつた。

熱伝導率 $\frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}}$

$$\lambda(x, T, t) = \lambda_s \phi_s + \lambda_w \phi_w + \lambda_i \phi_i \quad (1)$$

熱容量 $\frac{\text{cal}}{\text{cm}^3}$

$$C_p(x, T, t) = C_s \phi_s + C_w \phi_w + C_i \phi_i \quad (2)$$

但し、 $\phi_s = \phi_s(x, T, t)$ 土粒子の体積分率

$\phi_w = \phi_w(x, T, t)$ 土中水

$\phi_i = \phi_i(x, T, t)$ 土中氷

(1)及び(2)式を使用した非線形熱伝導方程式を時間差分間隔 0.001日、空間差分間隔 2.0 cmとして、陽解法によって解いた。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \lambda(x, T, t) \frac{\partial T}{\partial x} \right\} = \overline{C_p}(x, T, t) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3) \quad \overline{C_p} \text{ 見かけの熱容量 } \frac{\text{cal}}{\text{cm}^3}$$

$$\overline{C_p}(x, T, t) = C_p(x, T, t) \quad T \leq -1, 0 \leq T \quad (4)$$

$$\overline{C_p}(x, T, t) = L + C_p(x, T, t) \quad -1 < T < 0 \quad (5)$$

但し、 $L = 79.5 \cdot \rho_w$ 融解潜熱 $\frac{\text{cal}}{\text{cm}^3}$ 、 $\rho_w = \rho_w(x, T, t)$ 乾燥密度 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ 、 $W = W(x, T, t)$ 含水比
境界条件としては、

$$T(x, 0) = T_A \cdot \exp\left(-x \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\tau \cdot K}}\right) \cdot \cos\left(x \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\tau \cdot K}}\right) + T_B \quad (6)$$

の形を初期地中温度分布として、次の4パターンで解析した。

①地下6m以下 一定地温6℃

②地下3m以下 一定地温6℃

③地下2m以下 一定地温4.8℃

④地下3m以下 一定地温8℃ (図3参照)

凍結面での吸水力による水分移動は次のように考えた。すなわち、凍結面での間隙水圧は凍結速度の関数とし、

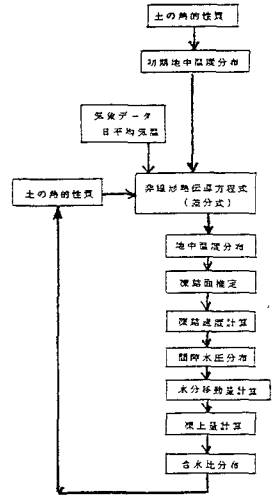


図1 フローチャート

1. アスファルト	8 cm
2. 置換材	92 cm
W=10%	
3. 路床土	100 cm
	200
	500
W=50%	

図2 解析に用いた地盤

表1 土の熱的性質

	比重 ($\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$)	比熱 ($\frac{\text{cal}}{\text{g}}$)	熱伝導率 ($\frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}}$)
土粒子 (置換材)	$\rho_s 2 = 2.65$	$C_s 2 = 0.17$	$\lambda_s 2 = 4.72 \times 10^{-3}$
(路床土)	$\rho_s 3 = 2.65$	$C_s 3 = 0.17$	$\lambda_s 3 = 4.44 \times 10^{-3}$
土中水	$\rho_w = 1.0$	$C_w = 1.0$	$\lambda_w = 1.39 \times 10^{-3}$
土中氷	$\rho_i = 0.92$	$C_i = 0.487$	$\lambda_i = 5.28 \times 10^{-3}$

$$U_A(V) = -C_1 \cdot \ln \frac{C_2}{V} \quad \nabla \text{ 凍結速度 } \text{cm/hour} \quad (7)$$

として与え、土によって定数を変えることとする。未凍土内の間隙水圧分布は、Terzaghiの圧密方程式によった。また凍土内の間隙水圧分布は、不凍水分量 U_f の関数として与えた。

$$U(U_f) = U_A \{1 + \alpha(1 - U_f)\} \quad (8)$$

この間隙水圧分布から、Darcyの法則によって水分移動量を求める。

3. 解析結果の一例及び考察

異常低温を記録した58年度の青森県の気象データから青森県東南部に位置する市川での日平均気温を用いた解析例を図4, 5, 6に示す。図4より差分空間が一番浅い初期地温分布②で非常に良い一致が見られる。これは、路床土のより深い所では熱源が大きく、表面温度変化の影響を受けにくいためであると考えられる。また、1, 2, 3と4の計算結果と比較すると、凍結面侵入の初期状態では境界面での一定地温(年平均気温とも考えられる)の影響が強いことがうかがえる。図5には0, 3, 6, 9, 39日後の地中温度分布の計算結果も、また図6には、3, 6, 9日後の凍結面付近の含水比の計算結果を示した。2つの図から凍結速度が速いと吸水量は少なく、凍結速度が遅いと吸水量が多いという関係が顕著に見られる。

4. 最大凍結深さと凍上量

最大凍結深さと凍上量の最大値は次のような結果であった。

実測値 98.4 cm 17 mm

① ピークが見られず。

② 109.4 cm 18.5 mm

③ 100.0 cm 28.7 mm

④ 96.4 cm 18.8 mm

③, ④については良い傾向が見られた。

5. あとがき

今回は少数の事例にて比較的精度の良い解析が行えたが、この方法を利用して他の地盤条件や熱条件での対応も多数検討すれば、凍結深さの簡易推定方法と考察することが可能である。

6. 参考文献

- 1) 柏崎昭宏「土の凍上特性に関する基礎的研究」東北大学修論(1982)
- 2) 高橋誠一「非線形熱伝導モデルによる凍結深さ・凍上量の予測」東北大学卒論(1985)

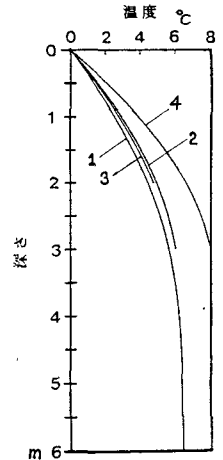


図3 初期地中温度分布

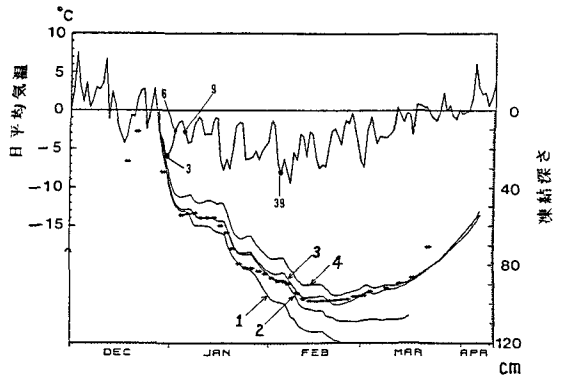


図4 凍結深さの実測値と計算値

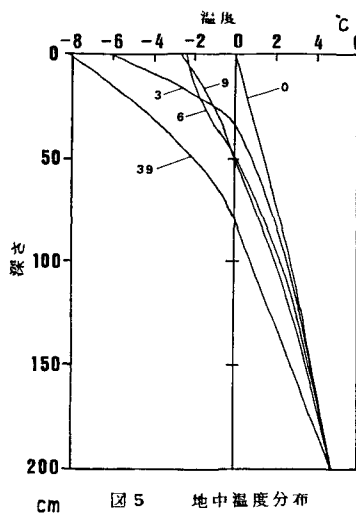


図5 地中温度分布

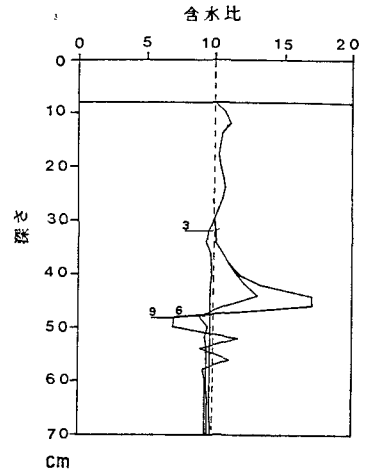


図6 凍結面付近の含水比分布