

Ⅲ-B355 DILモデルによるステップ凍上試験のシミュレーション

日本道路公団 正会員 釘野 公寿
 摂南大学 正会員 伊藤 譲

1. はじめに

寒冷地では冬期に気温が低下すると地盤の凍上が発生し、高速道路等の土木構造物に被害を及ぼす。道路建設において凍上被害の予測と対策を立てるために室内凍上試験が実施される。その結果、土が凍上性を有すると判定されると置換え等の凍上対策を実施することになる。しかし、この方法では凍上量に応じた対策ができないために経済性に問題があるとされる。そこで、定量的予測方法が必要と考えられた。

2. 目的

今回はNixonによって提案されたDILモデル（Discrete Ice Lens Model）を紹介し、その入力パラメータの影響を評価し、さらにステップ凍上試験の結果との比較を示す。DILモデルは比較的低凍上性の土を対象とするとされ、道路の路床材料の凍上予測に適用されることが期待される。また、アイスレンズの発生位置の予測も可能であるという特徴を有する。

3. DILモデルの概要

NixonのDILモデルは、図1(a)に示すように凍結土中の温度分布は直線で近似される。また、凍結フリンジ両端での熱平衡は次のように表わされる。

$$K_f G_f - K_{ff} G_{ff} = L V_{ff} \quad (1)$$

凍結フリンジー未凍土の境界において

$$K_{ff} G_{ff} - K_u G_u = n_f \cdot L \cdot dX_u / dt \quad (2)$$

ここで、

K_f, K_{ff}, K_u : 凍土, 凍結フリンジ, 未凍土の熱伝導率

G_f, G_{ff}, G_u : 凍土, 凍結フリンジ, 未凍土の温度勾配

n_f : 凍結フリンジー未凍土の境界で相変化する土の体積率

V_{ff} : アイスレンズ底部への凍結フリンジ中の水流, L : 水の潜熱

次に、凍結フリンジ中の水流は次式で表わされる。

$$V_{ff} = k_0 (-T)^{-\alpha} \cdot dP_w / dx \quad (3)$$

ここで、

k_0 : -1°C における凍土の透水係数, P_w : 凍結フリンジの間隙水圧

α : 凍土の透水係数と $-T$ の関数を表わす定数, T : 温度

また、凍結フリンジ中の間隙水圧は式(4)より得られる。

$$d/dx (k dP_w / dx) = 0.09 n_d W_u / dt \quad (4)$$

k : 透水係数, W_u : 不凍水量

ところで、図2に示す凍結フリンジ中での圧力変化より、新たにアイスレンズが発生し、成長開始する条件は次式で表わされる。

$$P_i > P_o + P_{sep} \quad (4)$$

P_i : 凍結フリンジの間隙水圧, P_o : 上載圧力, P_{sep} : 分離圧力

なお、フリンジ中の間隙水圧と間隙水圧との関係は式(6)で表わされる。

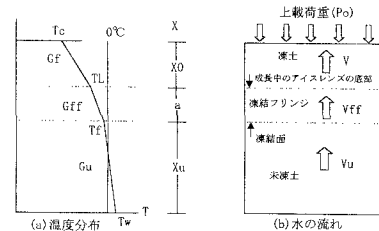


図1 凍土の模式図

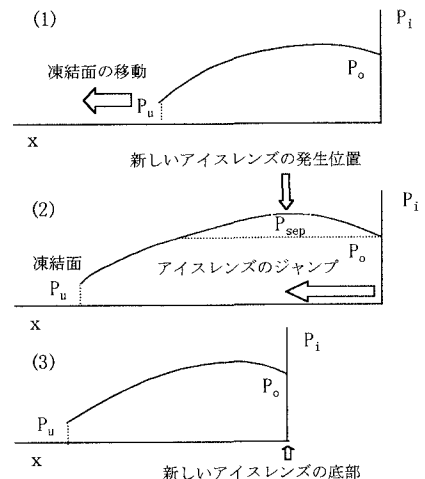


図2 凍結フリンジの圧力分布図

キーワード 凍上, 数値解析

連絡先 寝屋川市池田中町17-8 摂南大学 工学部 土木工学科 0720(39)9701

$$1.09P_1 = P_w - \beta T \quad (6)$$

β : 熱力学定数

また、図2に示すの凍結面の移動速度、すなわち凍結フリンジの成長速度 da/dt は次式で表わされる。

$$da/dt = (Q - Q_0) / (L - dH_f/dT \cdot dT/dt) \quad (7)$$

H_f : 氷の高さ, Q_{ff} , Q_u : 凍結フリンジ, 未凍土の熱流動

ここで、氷の高さ H_f を得るためにフリンジ領域で次の積分を行なう。ただし、 n は土の間隙率。

$$H_f = n \int (1 - W_u) dx \quad (8)$$

4. 計算例

4. 1 入力パラメータの影響

入力パラメータの影響を調べるためステップ凍上試験のシミュレーションを行なった。計算時間の刻み Δt については 0.0005 から 0.001 日の範囲では凍上量が 1.1% 変化した。凍結フリンジの分割 Δa については 0.067 から 0.4 mm の範囲で凍上量は 0.04% 変化した。また、初期フリンジの厚さ a と初期凍土高さ X_0 についても、その凍上量に与える影響は小さい。さらに、土固有のパラメータである熱伝導率を図3のように変化させても、凍上量は 4.1% の変化であった。

ところが、フリンジの透水係数を支配する DIL パラメータの影響は図4, 5に示すとおりであり、凍上量はそれぞれ基本値より k_0 では約 20%、 α では約 40% の変化であった。さらに、未凍土の透水係数では凍上量は基本値より 6% 程度の変化であった。

4. 2 ステップ凍上試験

ステップ凍上試験により求められたパラメータを用いて凍上を予測し、実験値との比較を行なう。図6, 7, 8は両端温度 $T_w/T_c = 7.01/-6.96^\circ\text{C}$ 、上載荷重 $P_u = 49\text{kPa}$ の試験についてのシミュレーションである。凍上量の変化は大きく違っているが、吸水速度の変化の傾向が似かよっていることが注目される。

5. まとめ

DIL モデルによる凍上予測が紹介された。一連のステップ凍上試験から得られたパラメータによる凍上試験のシミュレーションを実施した。その結果、凍上量が一致することはないが、凍上速度の急変などの現象を説明することは可能であるとの感触が得られた。今後、パラメータの抽出を正確に行なうことで、凍上量自体の予測も高まると期待される。

<参考文献>

J.-F. Nixon: Discrete Ice Lens Theory for Frost Heave in Soils, Canadian Geotechnical Journal, vol. 28, pp. 843-859, 1991

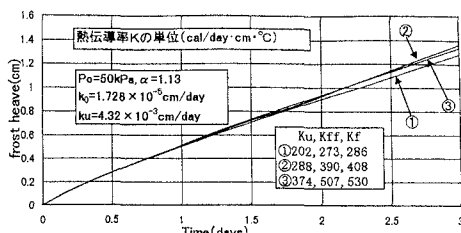


図3 熱伝導率による影響

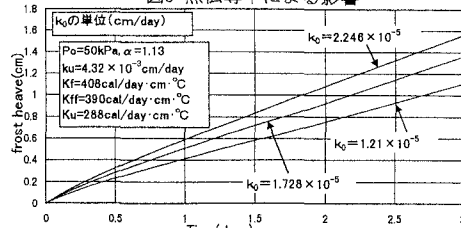


図4 DILパラメータ k_0 による影響

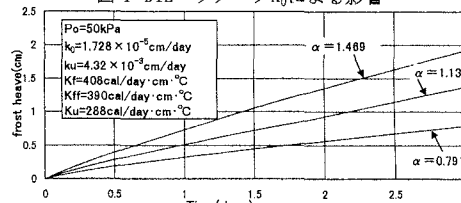


図5 DILパラメータ α による影響

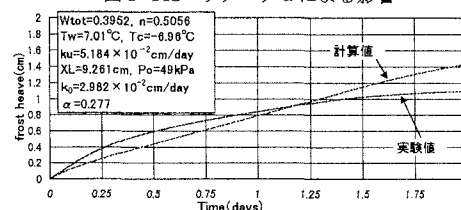


図6 凍上量の計算値と実験値

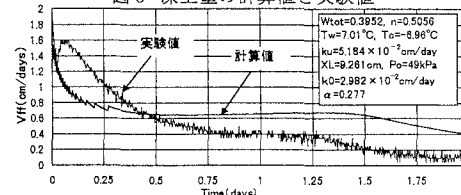


図7 凍上速度の計算値と実験値

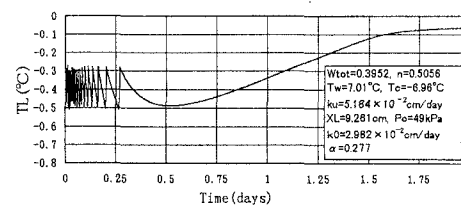


図8 アイスレンズ底の温度の計算値