

(株)竹中技術研究所 正会員○上田貴夫
石瀬俊明
正会員 中崎英彦

1. まえがき

寒冷地の開発、あるいはLNGなどの低温物質の貯蔵、運搬などに際して遭遇する地盤の凍結は、工学的には凍結土圧、凍上などの問題を発生させる。これらの凍結による現象は、圧力、冷却温度、土質などにより変化するが、著者らは、これらの影響を実験的に調べてきた。¹⁾しかし、今後エネルギー備蓄、開発等と関連して、より一般的な状況への対応が要求されてくると思われるので、これらの現象を理論的に解明し、数値計算によるシミュレーション手法を確立する必要がある。

今回は、その1手法を報告するものである。

2. シミュレーションの基礎方程式

地盤の凍結現象は、潜熱の項を含んだ熱伝導方程式と、水分の移動を表わす水分伝導方程式の2つを組み合わすことによってシミュレートできる。地盤内での温度分布、凍結量、含水量分布は、これら2つの方程式を満足する解を求めることで得られる。

まず、熱伝導方程式は次のように表わされる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L \cdot \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} - \rho_w \cdot c_w \cdot v \frac{\partial T}{\partial x} = c \frac{\partial T}{\partial t} \tag{1}$$

また、水分の伝導方程式は次のようである。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(\theta_w) \frac{\partial \psi}{\partial x} + k(\theta_w) \right) - \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \frac{\partial \theta_w}{\partial t} \tag{2}$$

ここに、 K ：熱伝導率 (cal/cm・sec・℃)、 T ：温度 (℃)、 x ：距離 (cm)、 L ：潜熱 (cal/kg)
 t ：時間 (sec)、 ρ ：密度 (kg/cm³)、 θ_i ：体積含水率、 c ：熱容量 (cal/(cm³・℃))
 v ：水の流速 (cm/sec)、 θ_w ：体積含水率、 $k(\theta_w)$ ：透水係数 (cm/sec)、
 ψ ：毛管ポテンシャル (cm) なおサフィクス i および w はそれぞれ氷、水を表わす。
対象が、水、氷、土粒子からなる多相混合体であるゆえ、 c 、 K は、それぞれ以下の式で求めた。

$$c = \sum_{j=1}^3 c_j \cdot \theta_j \tag{3}$$

$$K = \frac{\sum_{j=1}^3 K_j \theta_j \lambda_j}{\sum_{j=1}^3 K_j \theta_j} \tag{4}$$

ここに、 c_j 、 θ_j 、 K_j 、 λ_j ($j = 1, 2, 3$)は、それぞれ水、氷、土粒子の熱容量、体積含有率、熱伝導率、重み係数を表わす。

氷点下においては、これらの方程式は、Schofield によって示された次の関係式で結ばれている。

$$\psi = 12.469 (T - T_0) \tag{5}$$

ここで T_0 は $\psi = 0$ における氷点で $T \leq T_0$ である。
シミュレーションに先立って、 $k(\theta_w)$ 、 $\psi(\theta_w)$ を与える必要があるが、両者とも体積含水率 θ_w の関数であり、これらは、例えばKoopman & Millerの実験²⁾で示されるように、

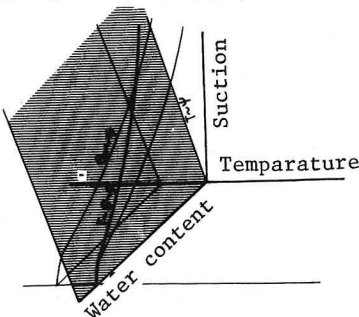


図-1 温度～含水率～ポテンシャル関係概念図

よい対応をなしている。一方、氷点下においては、(5)式で示されるように ψ は温度の関数であるため、温度、含水率のいずれか一方が定まれば ψ は一義的に定まってくる。氷点下における T 、 ψ 、 θ_w の関係を概念的に示せば、図-1のように表わすことができる。

3. 計算のアルゴリズム

(1)、(2)式の計算にあたっては差分法を用いた。地盤内各地点の温度が氷点以上のときは、負のポテンシャルの発生はなく普通の熱伝導現象であるが、氷点以下になったとき水分の移動と凍結が始まる。まず氷点以下となった節点の体積含水率を熱流差から求め、これを基本式に代入して新たな T と ψ を求める。次に(5)式から ψ を求め、基本式における ψ と一致するように含水率を修正し収束させる。これらの過程を各時間ステップで各節点についてそれぞれの値が収束するまでくり返しながシミュレーションを行なう。

計算は図-2に示すようなモデルについて行なった。

4. 結果および考察

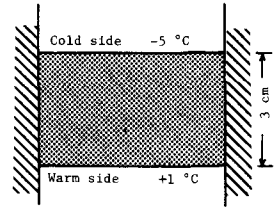
計算結果を図-3～図-6に示す。図-3は試料内の(水+氷)の体積含有率の時間的变化である。定性的には、Dirksen & Miller 等の実験結果とよい対応を示している。図-4は温度分布の経時変化であり、凍結線進行状況を明らかにすることができる。

従来この種のシミュレーションは、拘束圧力がない状態のもとで解析されたが、サクションが凍土内では拘束圧力の影響で低下するとの概念のもとに拘束圧力の効果を考慮した結果が図-4に示すものである。同図より、拘束圧力が存在する場合、凍結線背後に発生する氷が大幅に低下し、凍上量が減少する傾向がうかがえる。図-6は、拘束圧力が各々0, 1.5, 3.0 ㎏における、凍上量および凍結量の経時変化であるが、拘束圧力が存在する場合の、初期の排水過程を定性的にシミュレートできることを示している。

今後、土質特性等を実験事実と対応づけることによりシミュレーションモデルの改良を行ない、現実問題への適用をはかっていきたい。

参考文献 1) E.Penner & T.Ueda(1978) A soil frost susceptibility test and a basis for interpreting heave rates. Proc. 3rd Int. Conf. on Permafrost vol.1.
2) R.W.R.Koopmans & R.D.Miller(1966) Soil freezing and soil water characteristic curves. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., vol.30.
3) C.Dirksen & R.D.Miller(1966) Closed-system freezing of unsaturated soil. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., vol.30.

図-6 凍結量および凍上量の経時変化



$$\theta(\theta_w) = 10^{8.64\theta_w - 10.5}$$

$$\psi(\theta_w) = -10^{-8.64\theta_w + 5}$$

図-2 計算モデル

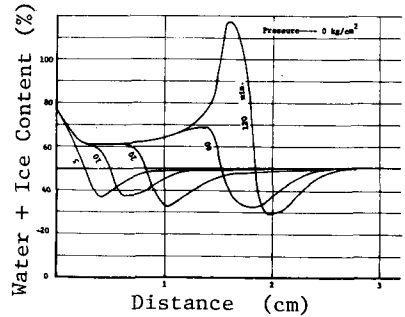


図-3 含水(氷)率の分布 (圧力 $P=0$ ㎏)

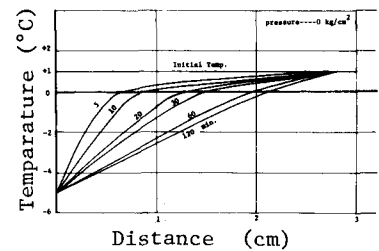


図-4 温度分布 (圧力 $P=0$ ㎏)

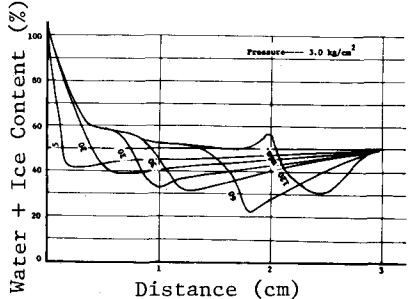


図-5 含水(氷)率の分布 ($P=3$ ㎏)

