

III-140

SEGREGATION POTENTIAL による凍上解析

(その2; 熱と水の流れを結合した不飽和土の凍上解析)

日本道路公団試験所 三嶋信雄 (正) 伊藤 譲
清水建設(株) 技術研究所 (正) 了戒公利

1. まえがき

土の凍結膨張量を予測する式として、高志あるいはコンラッドが提案した式による方法がある。

先の報告では、コンラッド等が提案した分離ポテンシャル (SEGREGATION POTENTIAL) の概念を基にした飽和土の線形解析手法を提案した。その結果、凍結速度が小さい領域にも適用できることが明らかとなった。

ここでは、この手法を更に発展させ、不飽和土の凍上解析を行い、冷却温度、供試体長さ、土の吸水能力、乾燥密度、初期含水比などによる影響について検討した。

2. 熱と水の流れを結合した凍上解析

2.1 結合したモデルの基本式 地盤が図-1

(a) に示すように、一次元的に地表面から地盤内に向かって凍結する場合の凍土の熱移動は、次式で与えられる。

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa_1 \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) \quad (1)$$

未凍土の熱移動は、次式で与えられる。

$$\frac{\partial T_u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa_2 \frac{\partial T_u}{\partial z} \right) \quad (2)$$

ここに、 T_f 、 T_u は、凍土及び未凍土の温度、 z は深度、 t は時間、 κ_1 、 κ_2 は凍土及び未凍土の温度伝導率である。

凍結面での境界条件として、次の関係が成立する。

$$\lambda_1 \frac{\partial T_f}{\partial z} - \lambda_2 \frac{\partial T_u}{\partial z} = L_s \gamma_s V + L_w \gamma_w V_w \quad (3)$$

ここに、 λ_1 、 λ_2 は凍土、未凍土の熱伝導率、 L_s 、 L_w は土及び水の凍結潜熱、 γ_s 、 γ_w は土の湿潤及び水の密度、 V は凍結速度、 V_w は吸水速度である。

不飽和土中の水の流れは次式で与えられる。

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right\} \quad (4)$$

ここに、 h は圧力水頭、 $k(h)$ は透水係数、 $C(h)$ は水分容量である。

2.2 凍結面での吸水速度

透水係数として、CAMPBELL¹⁾は次式を提案した。

$$k(h) = k_s \left(\frac{\omega}{\omega_s} \right)^{2b+3} \quad (5)$$

ω は土の含水比、 ω_s 及び k_s は飽和土の含水比及び透水係数、 b は水分曲線から求まる定数であ

る。含水比と圧力水頭との間には、

$$h = h_s \left(\frac{\omega}{\omega_s} \right)^{-b} \quad (6)$$

の関係がある。水分容量は次式で与えられる。

$$C(h) = \frac{d\theta}{d\psi} \quad (7)$$

なお、 θ は容積水分率、 ψ はポテンシャルである。

凍結に伴う吸水速度 V_w は、コンラッドが提案している次式で与えられるとした。

$$V_w = S P_o \frac{dT_f}{dz} \quad (8)$$

また、有効応力が大きくなると、吸水速度は小さくなることから、次式が成立するものとする。

$$S P_o = S_p / \sigma' \quad (9)$$

ここに、 σ' は凍結面での有効応力、 S_p は凍上性に関する土固有の定数である。

2.3 凍結面での吸水力 深度 Z での初期のポテンシャル分布 $h_o(Z)$ とすると、深度 Z の初期有効応力 $\sigma'_o(Z)$ は、次式で与えられる。

$$\sigma'_o(Z) = \gamma_t Z - (\gamma_w h_o(Z)) \quad (10)$$

ここに、 γ_t は土の湿潤密度、 γ_w は水の密度である。

凍結面の進行にともなう、凍結面で発生する吸水力を S_f とすると、凍結面での有効応力 $\sigma'_1(Z)$ は次式で与えられる (図-1 (b))。

$$\sigma'_1(Z) = \gamma_t Z + \gamma_w h_o(Z) - S_f \quad (11)$$

不飽和土中においてダルシー則が成立するとすると、以下の式が成り立つ。

$$V_w = k_m i = -k_m \frac{\phi_f - \phi_u}{Z_f - Z_u} \quad (12)$$

ここに、 k_m は f 、 u 間の平均透水係数、 i は動水勾配、 ϕ_f 、 ϕ_u は深度 Z_f 、 Z_u におけるポテンシャルである。 ϕ_f を凍結面におけるポテンシャルとすると、 ϕ_f 、 ϕ_u は、次式で与えられる。

$$\phi_f = h(Z_f) - Z_f$$

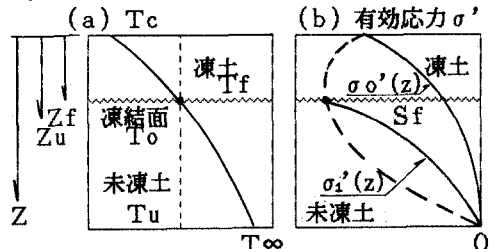


図-1 解析モデル(a)温度、(b)有効応力分布

$$= h_o(Z_f) - S_f / \gamma_w - Z_f \quad (13)$$

$$\phi u = h(Z_u) - Z_u \quad (14)$$

式(8)、(12)より、吸水力は次式で求まる。

$$S_f = \frac{1}{2} \{ B + C - \sqrt{(B - C)^2 + 4A} \} \quad (15)$$

$$A = \frac{\gamma_w S_p (Z_u - Z_f)}{k_m} \frac{d T_f}{d z}$$

$$B = \gamma_t Z_f - \gamma_w h_o(Z_f)$$

$$C = \gamma_w \{ (h(Z_u) - h_o(Z_f)) - d z \}$$

2.4 凍上量 凍上量は、地盤の間隙にある水 H_w と移動した水 ΔH_w の凍結膨張量が間隙 H_v 以上になったときに生ずるとした。つまり、

$$1.09 (H_w + \Delta H_w) > H_v$$

のとき、凍上量 $d h$ は次式で与えられる。

$$d h = 1.09 (H_w + \Delta H_w) - H_v \quad (16)$$

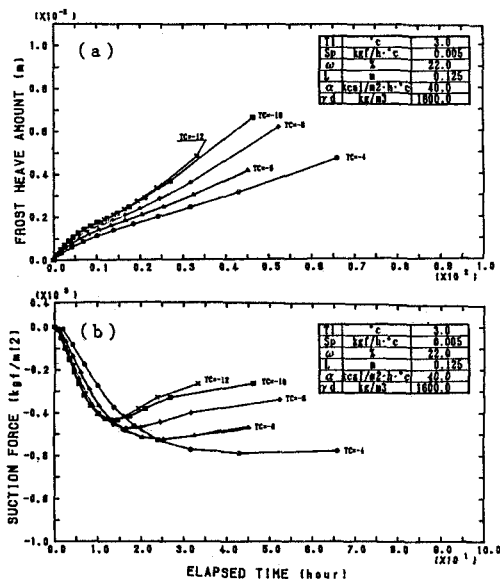


図-2 冷却温度を変化させたときの
(a)凍上量(b)吸水力の経時変化

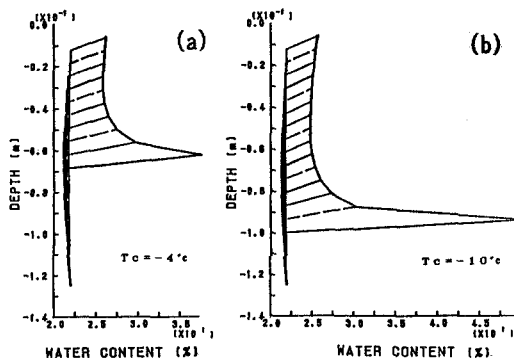


図-3 含水比の深度分布(a) $T_c = -4^\circ\text{C}$, (b) -10°C

3. 数値解析からみた凍上量に及ぼす要因

3.1 供試体両端面温度の影響 冷却温度が低いほど、凍上量は大きくなる(図-2)。凍結面での吸水力(絶対値)は、最大値を示した後、徐々に小さくなる。その最大値は冷却温度が低いほど早く現れる。

含水比は冷却温度が高いほど大きく現れている(図-3)。凍結に伴って、凍結面に向かって水が移動することにより、凍土の含水比が大幅に増加し、未凍土は逆に乾燥していく現象をよく近似できていると考えられる。

3.2 供試体長さの影響 供試体が長くなると、凍上はすぐには現れずに、ある時間経過後から生じる傾向を示した(図-4(a))。これは供試体が長くなると、凍結面への水の移動に時間が長くなるためである。

3.3 初期含水比の影響 供試体の初期含水比が小さいと、供試体の長さが長い場合と同様に、凍上量の発生に遅れが生じる(図-4(b))。

