

凍結時における土中の温度勾配とサクション圧に関する研究

○東北大学工学部(学) 指崎昭宏
東北大学工学部(正) 柳沢栄司
東北大学工学部(学) 阿部泰典

1. まえがき

土の凍結は土中の熱伝導と水分移動が相互に影響し合う複雑な現象である。特に凍結、凍上機構で問題となるのは凍結面に吸水を伴いながら凍結する現象である。本報告では、その際発生するサクション圧に着目し、温度変化と共に実験、解析を行った。

2. 実験概要

試料は青葉山ローム土を気乾状態にしたものと、阿武隈川産の砂の各々を0.84mmフリエでふるい分け通過したものと混合し粒度配合を変えて使用した。混合割合は、ローム土：砂, 10:0, 8:2, 6:4, 4:6, の4種類で、各々飽和度が100%を確保できる含水比に調整した。本報告で述べる土の物理的性質を表-1に示す。又試験装置の概略を図-1に示す。試料をビニール円筒（内径125mm, 高さ210mm）に空気が入らないよう詰め、あらかじめ圧密したものを、上面から一定温度-9.4°Cで冷却した。測定項目は、未凍結土中の間隙水圧変化（センサーは5本、供試体上面より2, 4, 6, 8, 10cmに入れた）、温度変化（センサーは6本、同0.2, 4, 6, 8, 15cmに入れた。）、及び冷却開始から24時間経過後の凍結深、並びに土中含水比の変化である。間隙水圧センサーには、先端が空洞のままの真ちゅうパイプ（外径1.5mm）のものを用い、供試体にあらかじめ開けておいた穴（径はセンサーと同じ）にそって空気が混入しないよう差し込んだ。他端は水銀マノメーターにつないだ。

3. 実験結果及び考察

図-3は温度勾配の経時変化であるが、凍結深さ(X)は $X = a\sqrt{t} - b$ と表すことができ、吸排水現象を考慮していないNeumann解と一致している。これは未凍結域で一旦吸水を受けて容積含水率が減少した後、凍結面で吸水するため図-4に示したように、凍結土の容積含水率が深さによって大きく違わない（最大でも3%以内）ことによると考えられる。各供試体のa, bはN01で2.80, 2.80, N02で3.33, 3.43である。なおbは供試体と冷却器が密着していないために生ずる定数と推定でき、他の供試体についてもだいたいこの程度の値が得られている。

間隙水圧分布はTerzaghiの圧密方程式を凍結速度で動く座標系からみた方程式に変換することによって得られる。圧密方程式は次の通りである。

$$\frac{\partial P(x', t')}{\partial t'} = C_v \frac{\partial^2 P(x', t')}{\partial x'^2} \quad (x' \leq X) \quad (1)$$

初期条件: $t'=0$ のとき $P=0$

境界条件: $x'=\infty$ のとき $P=0$ $x'=X$ のとき $P=P_0$

試験番号	N01	N02
混合割合(ローム砂)	6:4	4:6
土粒子の比面積(m^2/m^3)	271	271
初期含水比(%)	34.9	27.06
飽和度(%)	95.7	89.4
初期含水比	100	98.3

表-1 試料の物理的性質

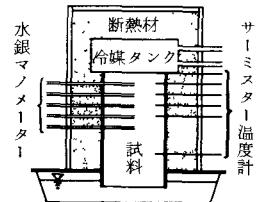


図-1 実験装置

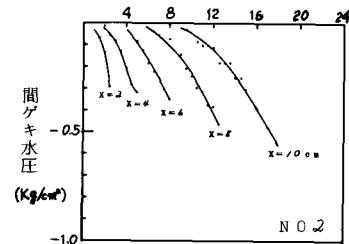
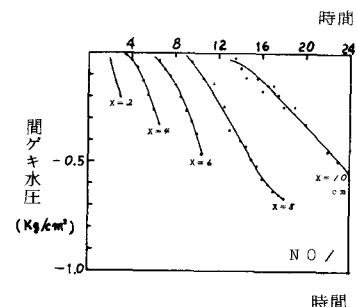


図-2 間隙水圧の経時変化

P : 間隙水圧, C_v : 压密係数,
 X : 供試体上面からの距離, X' : 繰結深さ
 t' : 経過時間, P_0 : 繰結面における間隙水圧
 x : 繰結面からの距離, k : 透水係数
 ρ_w : 間隙水の密度
 $\operatorname{erf} c(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_y^{\infty} e^{-t^2} dt$

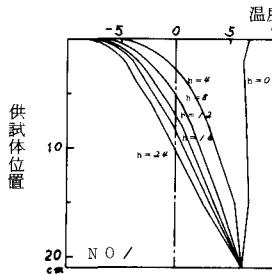


図-3 供試体中の温度勾配

今、 $X = a\sqrt{t} - b$ と表わせるので、変数変換 $X' = X' - (a\sqrt{t} - b)$, $t = t'$ を行なえば、(1)式の解は次のようになる。

$$P(X, t) = \frac{2}{\sqrt{\pi} \operatorname{erfc}(\frac{a}{2\sqrt{t}})} \int_{\frac{2\sqrt{t}X}{a}}^{\infty} e^{-t''^2} P_0 \left\{ t'' - \frac{X^2}{4C_v(a^2 - 2at'')} \right\} dt'' \quad (2)$$

従て、繰結面への水分移動速度はダルシーの法則から、

$$\frac{dw}{dt} = \frac{k_p \partial P}{\rho_w \partial X} \Big|_{X=0} = -\frac{k_p}{\rho_w \sqrt{\pi} \operatorname{erfc}(\frac{a}{2\sqrt{t}})} \frac{1}{e^{-\frac{(a\sqrt{t})^2}{4}}} \frac{P_0(t)}{\sqrt{C_v t}} \quad (3)$$

また、吸水率(吸水容積 V_w /繰結開始前の容積 V)は、

$$\frac{dw}{dx} = \frac{dw}{dt} \frac{dt}{dx} = -\frac{k_p}{\rho_w \sqrt{\pi} \operatorname{erfc}(\frac{a}{2\sqrt{t}})} \frac{2}{a \sqrt{C_v}} e^{-\frac{(a\sqrt{t})^2}{4}} \frac{1}{a \sqrt{C_v}} P_0 \left\{ \frac{(X+b)^2}{a^2} \right\} \quad (4)$$

さて、ここで図-2 の各々のセグマーの最大間隙水圧はほぼ繰結面における間隙水圧 P_0 に相等し、これは t に対して直線的に減りしているから、 $P_0(t) = \alpha t + \beta$ と近似して(1)～(4)式の解析を行なう。 α, β は各々 N.O.1 では $-0.031 - 0.11$, N.O.2 では $-0.016, -0.25$ を用いた。また C_v は N.O.1 で 1.0 , N.O.2 で 1.3 %とした。図-5 は(2)式から数値積分を行って求めた各経過時間の間隙水圧分布である。時間が経過する、すなわち繰結速度が小さくなる程間隙水圧が大きくなり、又影響領域も大きくなる傾向が得られた。図-4 の含水率分布はこのサクション圧分布の累積結果と考えられながら、24 時間経過後のサクション圧分布と相似性があることがわかる。このように繰結域では吸水し体積膨脹するが、末繰結域(特に繰結面付近)ではサクション圧によって圧密を受けたことになる。次に $k = 10^{-4} \text{ cm/sec}$ として(4)式から求めた吸水率を図-4 の上で示す。実際の含水率の増加分には上面から離れた経過大による傾向がある。これは前述した繰結面が達する前に含水率が減少する現象を考慮していないためである。

高志等は東上速度を次のように表わしている。

$$\frac{dt}{dh} = (1 + P) \left\{ \frac{dw}{dt} + n_f \frac{P}{1 + P} \frac{dx}{dt} \right\} \quad n_f: \text{自由水容積含水率} \\ P: \text{間隙水が繰結する時の容積膨脹率}$$

この式から推定すると東上量は 1.0 cm となり実際の東上量に比べかなり大きい。これは前述したように末繰結域で圧密収縮が生じていることと、 0°C 以下には、ても自由水の一部が末繰結状態で存在しているためと推定できる。

参考文献 雪水 第39巻 第2号 一次元走速度繰結における繰結面前方の間隙水圧と脱水圧密・高志、生穂、山本。

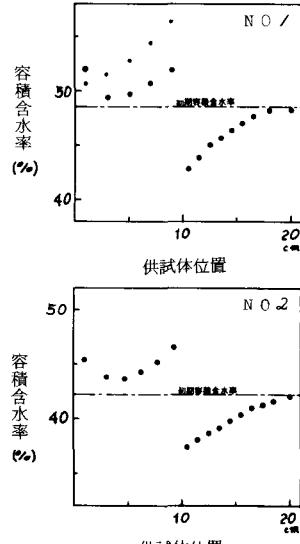


図-4 24 h 経過時の容積含水率

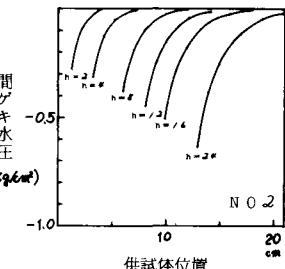
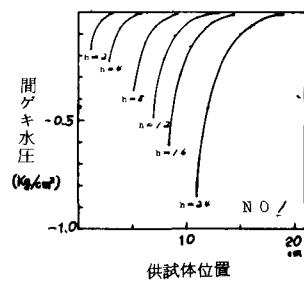


図-5 解析的間ゲキ水圧分布