

東北大学 工学部 (学) ○ 北内義彦

東北大学 工学部 (正) 柳沢孝司

東北大学 工学部 (学) 柏崎昭宏

1. まえがき

凍上は基本的には、土中の熱伝導現象と水分移動現象の複合現象といえる。したがって、凍上現象をシミュレートする場合、熱移動の式と水分移動の式が中心となることは言うまでもない。しかし、これら互いに解いて現象を論ずるのだけでは不十分である。なぜならば、熱移動および水分移動現象は相互に影響し合っており、全体として非常に複雑な現象となっているからである。本報告では凍結速度をもとに、熱移動式と水分移動式のカップリングを行った。以下にそのモデルおよび数値解析結果を述べる。

2. モデルおよび計算

熱移動式は通常の非定常熱伝導方程式に凍結潜熱による熱放出の項を次式のように加えたものになる。

$$\rho_c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\rho_i \cdot L}{\rho_w} \frac{\partial \rho_i}{\partial t} \quad (1)$$

t : 経過時間 x : 冷却面からの距離 T : 温度

ρ : 土の密度 C : 土の比熱 λ : 土の熱伝導率

ρ_w : 水中水の密度 ρ_i : 土中氷の密度 ρ_v : 容積含水

水分移動は、凍結面における間隙水圧低下に着目し

未凍結土内の圧力勾配に従うものとした。

この未凍結土内の圧力分布の経時変化は次式の Terzaghi の圧密方程式を適用することによって得られる。

$$\frac{\partial P}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \quad (2)$$

P : 間隙水圧 C_v : 圧密係数

高志等によれば、凍結面における境界条件は有効応力と凍結速度の間数であるが、ここでは、荷重条件を一定にし凍結速度だけの関数とし、実験から求めた関係を用いた。圧力分布が求まれば、水分移動速度はダルシー法則を適用することによって容易に得られる。

3. 計算

(1), (2) 式の計算にあたっては差分法を用いた。本報告に用いた差分式の特徴は分割中をタイムステップ毎に変化させることである。すなわち、凍土内の凍結膨張量、未凍土内の脱水压密量に応じて、分割中の再編成を行なう。計算では、まず(1)式から温度および凍結速度を求める。次に、凍結速度を(2)式の境界条件に代入し、間隙水圧分布を得る。

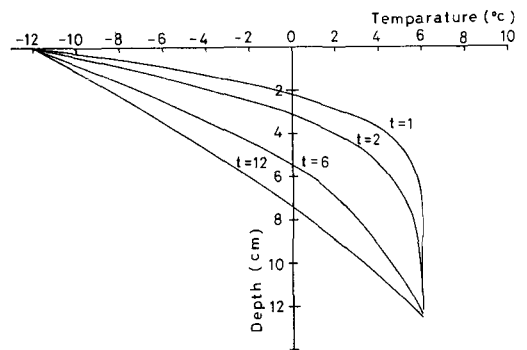


図 - 1

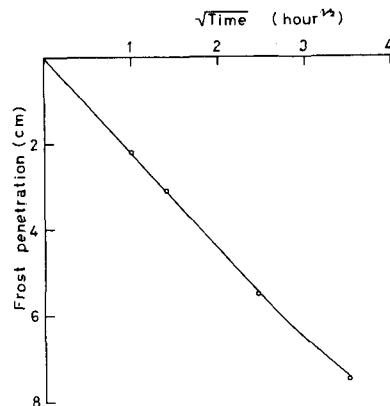


図 - 2

これから水分移動量および含水比分布、凍土量を求める。この計算を各節点、各タイムステップごとに繰返し行なう。

4. 結果および考察

図1～5は端面温度を各々 -12°C 、 $+6^{\circ}\text{C}$ の一定温度にした時の計算結果である。

図1は温度分布であり、時間経過に従って全体的に低下してゆくのがわかる。

図2は凍結面の位置と $\sqrt{t}$ の関係である。Neumanによれば、土中水の移動のない端面温度一定の凍結においては解析的に凍結面の位置 $X = a\sqrt{t}$ なる関係がある。図からわかるように、 $\sqrt{t}$ が0～3ぐらいの範囲では明らかに凍結面の位置と $\sqrt{t}$ は比例関係にある、それ以降は、幾分か直線からはずれるがこれは水分移動量が多くなり、処理すべき潜熱が増加するにため凍結面の進行が次第に遅滞したものと考えられる。

図3は未凍土内の間隙水圧分布である。凍結面が進行するにつれ凍結速度が小さくなる程、間隙水圧の低下は著しくなり、しかも影響領域も遠方へ及ぶようになる。しかし、影響領域が供試体の端まで及ぶと間隙水圧分布は異常をきたす。これは、境界条件の無限遠を供試体端にとっているためである。この影響は、この部分の含水比分布にもあらわれ、この部分の含水比は著しく低下する。

12時間経過後の含水比分布は図4に示されるとおりである。凍結面を境にして、凍土側では増加、未凍土側では減少している。含水比分布は水分移動の激しさをあらわすものであるから凍土側では凍結面に近い程、含水比が高くなる。逆に未凍土側では凍結面に近い所が最も含水比が低く、凍結面から離れるに従って回復してゆく傾向がある。

図5は凍土量の経時変化を示す。下の曲線は未凍土側の脱水压密を考慮した量である。凍土量は、その土が以前から含有していた水分の凍結膨張量と吸水による体積膨張の和である。冷却開始後しばらくは凍結速度は大きく、また水分移動量が小さいことから、ほとんど前者によるものであるが、凍結速度が小さくなるにしたがって後者に凍土の内容水移動してゆくと考えられる。

参考文献 高志、生頼、山本

一次元定速度凍結における
凍結面前方の間隙水圧と
脱水压密

