

不飽和土中の間隙流体の相変化について

鹿児島大学工学部 学生員 宮本裕二
 鹿児島大学工学部 正 員 北村良介

1. まえがき

地盤は、日射や人工構造物からの放熱、火山活動等によって温度変化、熱収支を繰り返している。不飽和土の間隙流体は水、空気で構成され、熱により相変化する。相変化は、地盤内の間隙圧の変化をもたらし、地盤の力学的挙動に影響を及ぼす。ここでは、不飽和土をモデル化し、熱による間隙流体の相変化の数値実験を行い、不飽和土における間隙流体の熱的特性を定量的に評価する。

2. 不飽和土の要素のモデル化

図-1は、不飽和地盤中の土の微小要素を取り出してモデル化したものである。まず間隙流体のみに着目し、間隙流体の相変化を温度と圧力の関数として表したものが、図-2に示す蒸気圧曲線¹⁾である。蒸気圧曲線は、(1)式²⁾で示される。A、B、Cは、間隙物質によって決まる定数で、ここでは、水の場合を示す。

$$P = \exp \{ A - B/T + C \times \ln(T) \} \quad \dots\dots (1)$$

ここで、P; 圧力、
 T; 温度。
 $A = 5.01862E1$ 、
 $B = 6.57894E3$ 、
 $C = -4.32875$ 。

気相が飽和状態(湿度 $\alpha = 100\%$)であるとして、要素に熱量を与えると、(2)式に示すように熱量は間隙水の温度変化と飽和蒸気圧の変化に費やされる。

$$q = q_t + q_p \quad \dots\dots (2)$$

ここで、 q ; 微小要素に与えられる熱量、
 q_t ; 間隙水の温度変化に費やされる熱量、
 q_p ; 飽和蒸気圧の変化に費やされる熱量。

要素の温度変化 ΔT は、 q_t により次式のように表される。

$$\Delta T = \frac{q_t}{c_w \cdot \rho_w \cdot V_w} \quad \dots\dots (3)$$

ここで、 c_w ; 間隙水の比熱、 ρ_w ; 間隙水の密度、
 V_w ; 間隙水の体積。

また、間隙気体の体積変化は次式で求められる。

$$\begin{aligned} V_s(T + \Delta T) &= V_s(T) + \Delta V_s \\ &= V_s(T) + \frac{q_p}{\rho_w \cdot Q} \quad \dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここで、 Q ; 間隙水の潜熱。

熱量 q を与えた後も間隙気体が飽和状態にあるとすると、要素の状態は、常に蒸気圧曲線(湿度 $\alpha = 100\%$)上を変化する。よって、熱量 q が与えられたときの温度変化が分かれば、そのときの間隙圧 $P_{s,t}$ (飽和蒸気圧)は、蒸気圧曲線によって求まる。また、水の物性値を土粒子の物性値に置き換えることにより、固相の温度変化を検討でき、土塊全体の熱平衡問題を解くことができる。

$$\Delta T = \frac{q_t}{c_w \cdot \rho_w \cdot V_w + c_s \cdot \rho_s \cdot V_s} \quad \dots\dots (5)$$

ここで、 c_s ; 固相の比熱、 ρ_s ; 固相の密度、
 V_s ; 固相の体積。

3. 数値実験

2節で概説したモデルを用いて数値実験を行う。図-3に数値実験のフローチャートを示す。

① 物理量の計算

データ入力によって設定された値より各物理量を求める。間隙水の物性データ³⁾をファイルより読み込む。飽和蒸気圧は、温度が決まれば(1)式より求めることができる。

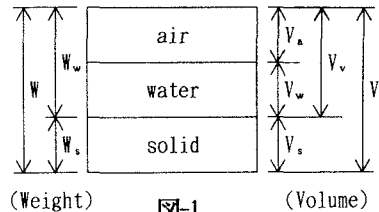
② q_t 、 q_p の計算

図-1

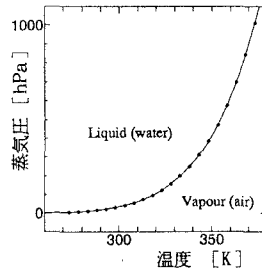


図-2 蒸気圧曲線

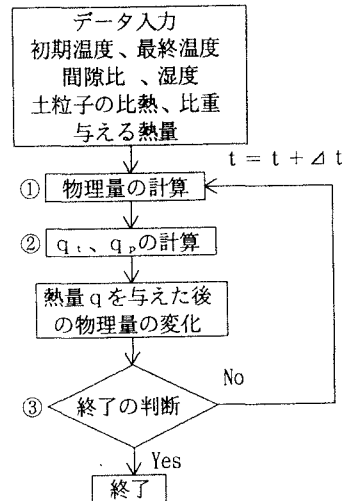


図-3 フローチャート

要素に与える熱量 q から温度変化に費やされる熱量 q_t を仮定し、(1)式～(7)式を用いて、間隙空気分圧が飽和蒸気圧と一致(湿度=100%)するように q_t を決定したら、(2)式から q_p を決定する。

$$P_e(t) = \frac{V_s(t) + \frac{q_p \times V_r}{Q}}{V_s(t)} \times P_e(t-1) \quad \dots\dots (7)$$

ここで、 $P_e(t)$; 時間 t での q_p を与えたときの間隙空気分圧、 V_r ; 水蒸気の体積比。

③ 終了の判断

データ入力時に決めた最終温度に到達した時点で終了する。もしくは、相変化できない状態(飽和度 $S_r = 0\%$)に達したところで終了とする。終了の判断がされないときは、相変化後の物理量で①に戻り、その温度での物理量を初期値として、再び熱量を与えて計算をする。

本報告では、一例として表-1に示す入力値による数値実験結果を図-4、5、6に示す。図-4では、時間と共に q_t が減少しているが、図-5では、温度がほぼ一定に変化していることが分かる。これは(5)式からも分かるように温度変化が比熱、密度、間隙水の体積に関係しているため、温度が上がるにつれて比熱、密度、間隙水の体積ともに小さくなるのが要因の1つであろう。また図-6より、時間と共に飽和度の減少量が大きくなっていることが分かる。これは、図-4から分かるように q_p が時間と共に増加しているためであろう。

表-1 入力値

初期条件		地盤条件	
温度	10 [°C]	要素の体積	1000 [cm³]
飽和度	50 [%]	間隙比	0.8
湿度	100 [%]	土粒子の比熱	0.8 [J/(g・K)]
		土粒子の比重	2.65
熱量を与える時間ステップ			1 [sec.]
時間ステップあたりに与える熱量			10 [J/sec.]
最終温度			50 [°C]

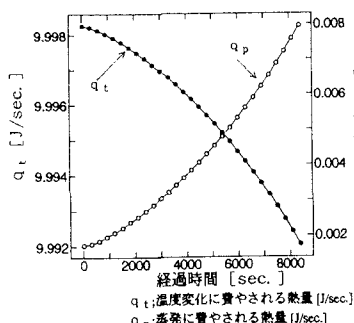


図-4 与えた熱量に対する q_t 、 q_p の変化

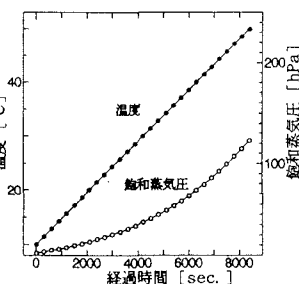


図-5 与えた熱量に対する 温度、飽和蒸気圧の変化

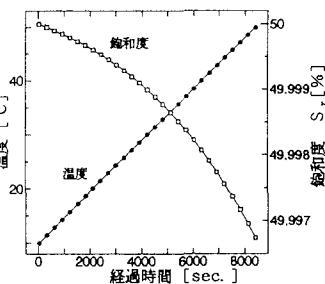


図-6 与えた熱量に対する 温度、飽和度の变化

4. まとめ

このモデルでは、1つの断熱要素の相変化を表現するための数値実験を行ったが、実際は、隣接する要素間の熱の出入り、温度変化を考慮すべきである。また、要素間の蒸気の移動、飽和度の変化によるサクシオン、含水比の変化等を検討していく必要がある。飽和土についての熱伝導に関するモデルは既に北村らにより提案しており⁴⁾、同様の手法がこのモデルにも適用できる。それには、三相の熱伝導係数へのアプローチの仕方を検討する必要がある。また、蒸発量においては、各要素の湿度、分圧の条件を変化させることにより、湿度、蒸気圧の差を動水勾配にして、移動量を評価する必要がある。また、湿度条件を各要素で変化させることにより、蒸発量の移動を検討したい。地盤表層での蒸発量は、風の影響が大きいと考えられるので、乾燥操作を考慮したアプローチが必要であろう。蒸発量の定量的な研究として、桐栄⁵⁾により、輸送現象の見地から乾燥操作による研究がなされている。また、飽和度の変化によるサクシオン、体積含水率、含水比の変化は北村らによる間隙モデル⁶⁾を適用することにより物理量の定量化を検討したい。このような取り組みにより、不飽和地盤の間隙圧、有効応力を定量的に評価し、地盤強度に関する熱的特性を検討していきたい。

参考文献

- 1) 国立天文台編；理科年表，p. 481，丸善，1994.
- 2) 小島 和夫；エンジニアのための化学熱力学入門，p. 90，培風館，1989.
- 3) 国立天文台編；理科年表，p. 442, p. 475，丸善，1994.
- 4) R. Kitamura and T. Nagura; A numerical method for heat transfer in the particulate material Proc. 3rd Int. Conf. on Advanced Computational Methods in Heat Transfer, pp. 435-441, 1994.
- 5) 桐栄 良三；乾燥操作の基礎理論，ホソカワミクロン株式会社，1994.
- 6) 北村良介，福原清作；間隙モデルに関する一考察，土木学会第49回年次学術講演概要集第3部 (Proc. 49th Annual Conf. of the Japan Society of Civil Engineering. 3), pp. 206-207, 1994