

Ⅲ-90

不飽和土の熱伝導に関する数値力学モデル

鹿児島大学大学院 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

鹿児島県では1993年鹿児島豪雨をはじめ、これまでに数多くの斜面崩壊が発生してきた。これらの斜面崩壊現象は異常に多い降雨が直接的な誘因であったが、それまでに斜面の土が長期間(10年程度の時間スケール)にわたって日射、降雨等による乾湿の繰返し(土中の含水比の周期的な変化)を受けてきたためと考えられる。すなわち、乾湿の繰返しは土中の有効応力が周期的に変化し、土にとっては繰返し载荷を受けることによって強度が低下したものと考えられる(風化の一種)。当研究室ではこのような認識に立ち、飽和土中の熱伝導モデル¹⁾、熱伝達モデル²⁾、³⁾の提案を行ってきた。さらには、不飽和土中の間隙流体の相変化を考慮した熱伝導、熱伝達に関する理論的考察、数値力学モデルの提案、及び、数値実験を行ってきた。⁴⁾、⁵⁾、⁶⁾。本報告ではこれまでの一次元モデルを二次元に拡張し、数値実験を行なっている。

2. 不飽和土中の熱伝導のモデル化

図-1(a)は不飽和地盤を5層5列の要素に分割したものを示している。図-1(b)は図-1(a)の要素(i, j)と隣接する要素を表し、熱の流れを示している。各要素間の熱量の移動は熱伝導係数により検討する。土塊の固相(土粒子)、液相(間隙水)、気相(間隙空気)の熱伝導係数をそれぞれ k_s 、 k_w 、 k_a とすると要素(i-1, j)と要素(i, j)間での熱流量は次式で表される。

$$q_s = k_s \cdot (T_{(i-1, j)} - T_{(i, j)}) \cdot \frac{A_s}{\Delta h} \quad \dots\dots (1)$$

$$q_w = k_w \cdot (T_{(i-1, j)} - T_{(i, j)}) \cdot \frac{A_w}{\Delta h} \quad \dots\dots (2)$$

$$q_a = k_a \cdot (T_{(i-1, j)} - T_{(i, j)}) \cdot \frac{A_a}{\Delta h} \quad \dots\dots (3)$$

$$q_{(i, j)} = q_s + q_w + q_a \quad \dots\dots (4)$$

ここに、 q_s ；固相の熱流量、 k_s ；固相の熱伝導係数、 q_w ；液相の熱流量、 k_w ；液相の熱伝導係数、 q_a ；気相の熱流量、 k_a ；気相の熱伝導係数、 $q_{(i, j)}$ ；要素(i-1, j)から要素(i, j)への熱流量、 $T_{(i, j)}$ ；要素(i, j)の温度、 A_s ；間隙比による固相の面積、 A_w ；間隙比による液相の面積、 A_a ；間隙比による気相の面積、 Δh ；要素の1辺の長さ。

さらに、相変化に関する次式を付け加えることによって二次元の熱伝導の数値実験が可能になる。

$$P = \exp \{ A - B/T + C \cdot \ln(T) \} \quad \dots\dots (5)$$

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

$$\Delta T = \frac{q_t}{c_w \cdot \rho_w \cdot V_w + c_s \cdot \rho_s \cdot V_s + c_a \cdot \rho_a \cdot V_a} \quad \dots\dots (6)$$

ここに、 ΔT ；温度変化量、 q_t ；間隙水の温度変化に費やされる熱量、 c_w ；間隙水の比熱、 c_s ；固相の比熱、 c_a ；固相の比熱、 ρ_w ；間隙水の密度、 ρ_s ；固相の密度、 ρ_a ；固相の密度、 V_w ；間隙水の体積、 V_s ；固相の体積、 V_a ；固相の体積。

$$V_s(T + \Delta T) = V_s(T) + \Delta V_s$$

$$= V_s(T) + \frac{q_p}{\rho_w \cdot Q} \quad \dots\dots (7)$$

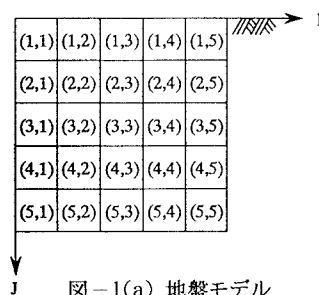


図-1(a) 地盤モデル

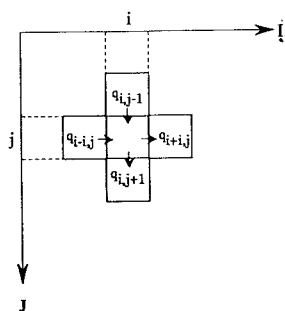


図-1(b) 熱伝導モデル

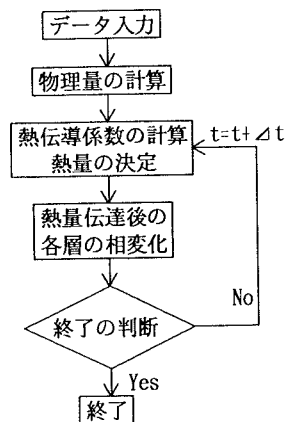


図-2 フローチャート

ここに、 $V_s(T)$ ；温度 T における気相の体積、
 q_p ；飽和蒸気圧の変化に費やされる熱量、
 Q ；間隙水の潜熱。

$$Pe(t) = \frac{V_s(t) + \frac{q_p \cdot V_r}{Q}}{V_s(t)} \cdot Pe(t-1) \quad \dots\dots (8)$$

ここに、 $Pe(t)$ ；時間 t での蒸気圧、
 V_r ；水蒸気の体積比。

3. 数値実験

図-2は数値実験の手順を示したフローチャートである。表-1は数値実験に必要な入力パラメータとそれらの具体値である。時間経過に伴う各要素の温度変化を図-3、4、5、6、7、8、9に示す。

表-1 入力値

要素の数	25
要素の1辺の長さ	1 [cm]
初期温度(1,3)以外	10 [°C]
温度(1,3)	20 [°C]
間隙比	0.8
飽和度	50 [%]
湿度	100 [%]
土粒子の比熱	0.8 [J/(g·K)]
土粒子の比重	2.65
熱伝導係数 気相	0.03 [W/(m·K)]
液相	- [W/(m·K)]
固相	0.3 [W/(m·K)]

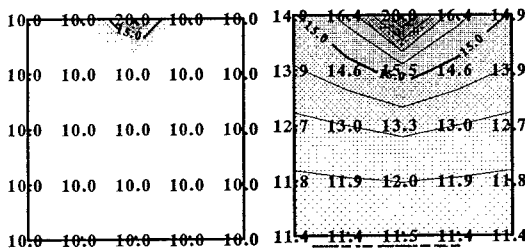


図-4 初期状態 (0[sec.])

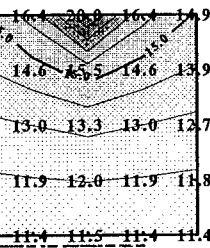


図-5 6000[sec.]

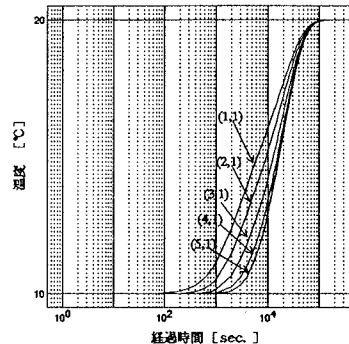


図-3 経過時間に伴う第1列の温度変化

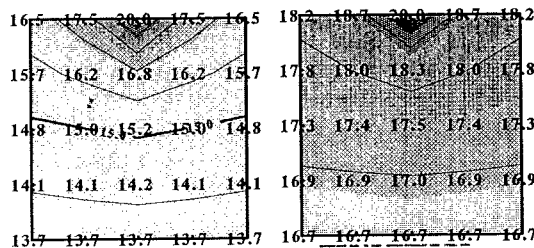


図-6 12000[sec.]

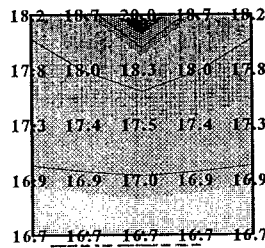


図-7 24000[sec.]

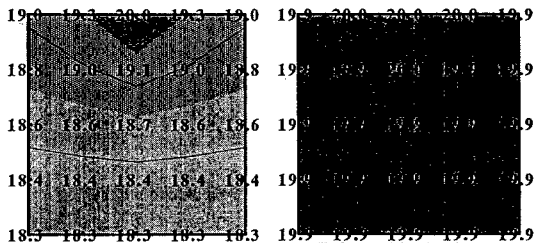


図-8 36000[sec.]

図-9 90000[sec.]

4. あとがき

間隙流体の相変化を考慮した不飽和土中の熱伝導に関する数値力学モデルの提案とモデルを用いた数値実験を行なった。間隙流体の相変化によって間隙圧が変化する。すなわち、有効応力が変化する。提案している力学モデルがこのような現象を定量的に評価できることを明らかにした。しかし、このモデルでは間隙流体の移動が検討できていない。蒸発や浸透による熱の移動をどのように考慮できるかが課題である。また今後は、このような繰返し応力の発生が地盤にどのような影響を及ぼすのかを定量的に明らかにしていきたい。

本研究に対して平成6年度科研費（一般(C)）の助成をいただいた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 名倉、北村：地盤内の熱伝導に関する一考察（その2）、土木学会第47回年次学術講演会（Ⅲ部）、pp. 1116-1117、1992.
- 2) 名倉、北村：飽和地盤の熱伝達に関する一考察、平成4年度土木学会西部支部研究発表会、pp. 564-565、1993.
- 3) R. Kitamura & 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.
- 4) 北村、宮本：海底地盤の流動化に関する一考察、第39回土質工学シンポジウム、pp. 37-42、1994.
- 5) 宮本、北村：不飽和土中の間隙流体の相変化について、平成6年度土木学会西部支部研究発表会、1995.
- 6) 宮本、北村：間隙流体の相変化を考慮した不飽和土の数値力学モデルの提案、第30回土質工学研究発表会、1995(投稿中)