

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載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⁾の提案を行ってきている。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ている。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。

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

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

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

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

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。

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

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

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

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。

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



図-1(a) 地盤モデル

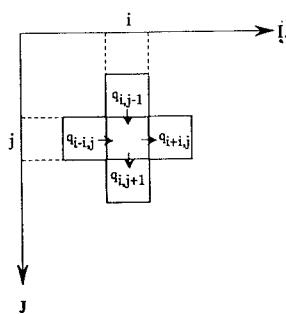


図-1(b) 热伝導モデル

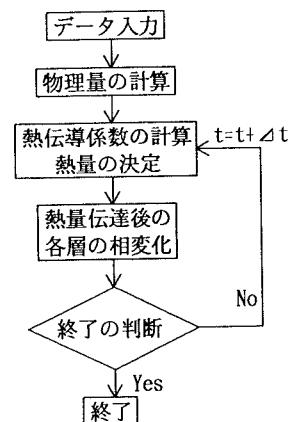


図-2 フローチャート

ここに、 $V_a(T)$ ；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。

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

ここに、 $P_e(t)$ ；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。

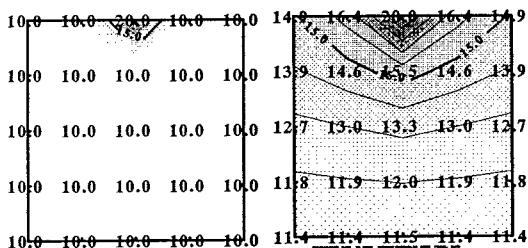


図-4 初期状態 (0[sec.])

図-5 6000[sec.]

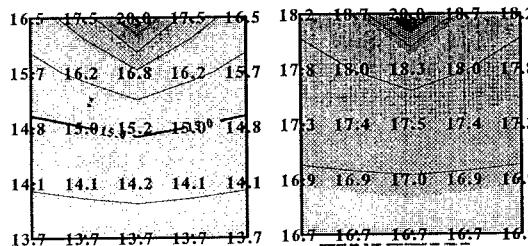


図-6 12000[sec.]

図-7 24000[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)

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)]

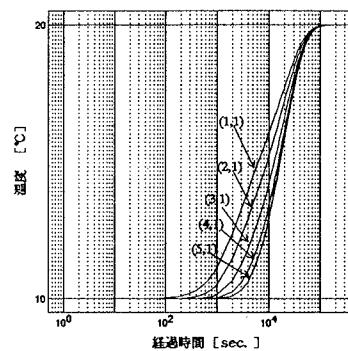


図-3 経過時間に伴う第1列の温度変化

図-8 36000[sec.]

図-9 90000[sec.]

図-10 120000[sec.]

図-11 180000[sec.]

図-12 240000[sec.]

図-13 300000[sec.]

図-14 360000[sec.]

図-15 420000[sec.]

図-16 480000[sec.]

図-17 540000[sec.]

図-18 600000[sec.]

図-19 660000[sec.]

図-20 720000[sec.]

図-21 780000[sec.]

図-22 840000[sec.]

図-23 900000[sec.]

図-24 960000[sec.]

図-25 1020000[sec.]

図-26 1080000[sec.]

図-27 1140000[sec.]

図-28 1200000[sec.]

図-29 1260000[sec.]

図-30 1320000[sec.]

図-31 1380000[sec.]

図-32 1440000[sec.]

図-33 1500000[sec.]

図-34 1560000[sec.]

図-35 1620000[sec.]

図-36 1680000[sec.]

図-37 1740000[sec.]

図-38 1800000[sec.]

図-39 1860000[sec.]

図-40 1920000[sec.]

図-41 1980000[sec.]

図-42 2040000[sec.]

図-43 2100000[sec.]

図-44 2160000[sec.]

図-45 2220000[sec.]

図-46 2280000[sec.]

図-47 2340000[sec.]

図-48 2400000[sec.]

図-49 2460000[sec.]

図-50 2520000[sec.]

図-51 2580000[sec.]

図-52 2640000[sec.]

図-53 2700000[sec.]

図-54 2760000[sec.]

図-55 2820000[sec.]

図-56 2880000[sec.]

図-57 2940000[sec.]

図-58 3000000[sec.]

図-59 3060000[sec.]

図-60 3120000[sec.]

図-61 3180000[sec.]

図-62 3240000[sec.]

図-63 3300000[sec.]

図-64 3360000[sec.]

図-65 3420000[sec.]

図-66 3480000[sec.]

図-67 3540000[sec.]

図-68 3600000[sec.]

図-69 3660000[sec.]

図-70 3720000[sec.]

図-71 3780000[sec.]

図-72 3840000[sec.]

図-73 3900000[sec.]

図-74 3960000[sec.]

図-75 4020000[sec.]

図-76 4080000[sec.]

図-77 4140000[sec.]

図-78 4200000[sec.]

図-79 4260000[sec.]

図-80 4320000[sec.]

図-81 4380000[sec.]

図-82 4440000[sec.]

図-83 4500000[sec.]

図-84 4560000[sec.]

図-85 4620000[sec.]

図-86 4680000[sec.]

図-87 4740000[sec.]

図-88 4800000[sec.]

図-89 4860000[sec.]

図-90 4920000[sec.]

図-91 4980000[sec.]

図-92 5040000[sec.]

図-93 5100000[sec.]

図-94 5160000[sec.]

図-95 5220000[sec.]

図-96 5280000[sec.]

図-97 5340000[sec.]

図-98 5400000[sec.]

図-99 5460000[sec.]

図-100 5520000[sec.]

図-101 5580000[sec.]

図-102 5640000[sec.]

図-103 5700000[sec.]

図-104 5760000[sec.]

図-105 5820000[sec.]

図-106 5880000[sec.]

図-107 5940000[sec.]

図-108 6000000[sec.]

図-109 6060000[sec.]

図-110 6120000[sec.]

図-111 6180000[sec.]

図-112 6240000[sec.]

図-113 6300000[sec.]

図-114 6360000[sec.]

図-115 6420000[sec.]

図-116 6480000[sec.]

図-117 6540000[sec.]

図-118 6600000[sec.]

図-119 6660000[sec.]

図-120 6720000[sec.]

図-121 6780000[sec.]

図-122 6840000[sec.]

図-123 6900000[sec.]

図-124 6960000[sec.]

図-125 7020000[sec.]

図-126 7080000[sec.]

図-127 7140000[sec.]

図-128 7200000[sec.]

図-129 7260000[sec.]

図-130 7320000[sec.]

図-131 7380000[sec.]

図-132 7440000[sec.]

図-133 7500000[sec.]

図-134 7560000[sec.]

図-135 7620000[sec.]

図-136 7680000[sec.]

図-137 7740000[sec.]

図-138 7800000[sec.]

図-139 7860000[sec.]

図-140 7920000[sec.]

図-141 7980000[sec.]

図-142 8040000[sec.]

図-143 8100000[sec.]

図-144 8160000[sec.]

図-145 8220000[sec.]

図-146 8280000[sec.]

図-147 8340000[sec.]

図-148 8400000[sec.]

図-149 8460000[sec.]

図-150 8520000[sec.]

図-151 8580000[sec.]

図-152 8640000[sec.]

図-153 8700000[sec.]

図-154 8760000[sec.]

図-155 8820000[sec.]

図-156 8880000[sec.]

図-157 8940000[sec.]

図-158 9000000[sec.]

図-159 9060000[sec.]

図-160 9120000[sec.]

図-161 9180000[sec.]

図-162 9240000[sec.]

図-163 9300000[sec.]

図-164 9360000[sec.]

図-165 9420000[sec.]

図-166 9480000[sec.]

図-167 9540000[sec.]

図-168 9600000[sec.]

図-169 9660000[sec.]

図-170 9720000[sec.]

図-171 9780000[sec.]

図-172 9840000[sec.]

図-173 9900000[sec.]

図-174 9960000[sec.]

図-175 10020000[sec.]

図-176 10080000[sec.]

図-177 10140000[sec.]

図-178 10200000[sec.]

図-179 10260000[sec.]

図-180 10320000[sec.]

図-181 10380000[sec.]

図-182 10440000[sec.]

図-183 10500000[sec.]

図-184 10560000[sec.]

図-185 10620000[sec.]

図-186 10680000[sec.]

図-187 10740000[sec.]

図-188 10800000[sec.]

図-189 10860000[sec.]

図-190 10920000[sec.]

図-191 10980000[sec.]

図-192 11040000[sec.]

図-193 11100000[sec.]

図-194 11160000[sec.]

図-195 11220000[sec.]

図-196 11280000[sec.]

図-197 11340000[sec.]

図-198 11400000[sec.]

図-199 11460000[sec.]

図-200 11520000[sec.]

図-201 11580000[sec.]

図-202 11640000[sec.]

図-203 11700000[sec.]

図-204 11760000[sec.]

図-205 11820000[sec.]

図-206 11880000[sec.]

図-207 11940000[sec.]

図-208 12000000[sec.]

図-209 12060000[sec.]

図-210 12120000[sec.]

図-211 12180000[sec.]

図-212 12240000[sec.]

図-213 12300000[sec.]

図-214 12360000[sec.]

図-215 12420000[sec.]

図-216 12480000[sec.]

図-217 12540000[sec.]

図-218 12600000[sec.]

図-219 1266000