

高速滑坡中的热效应分析

鲁晓兵¹, 矫宾田¹, 张金来¹, 王淑云¹, 崔鹏²

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 从理论和数值分析两方面讨论滑坡滑带内热致孔隙压力及其对高速滑坡的影响。首先给出土体动力平衡方程、热和孔压的产生与耗散方程构成的热-水压-力学模型, 然后在该模型基础上讨论滑带(局部化剪切带)产生的条件, 对滑带宽度的演化及影响因素进行分析, 最后探讨土体变形产生热而导致高孔隙压力及低摩擦系数的问题。结果表明, 当热软化效应超过应变硬化效应后, 失稳就将发生。失稳后, 土体发生剪切局部化变形, 在滑坡的滑面内产生剧烈变形。一般情况下, 滑带宽度是变化的, 其变化对滑带内应变、应变率有很大的影响, 从而导致滑带内孔隙压力、温度等的明显变化。滑坡的加速运动是由于剪切带中材料的变形, 热被集中于剪切带内, 而导致其中孔隙压力的快速上升和土体强度的快速下降引起的。

关键词: 岩土力学; 高速滑坡; 热效应; 剪切带

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)03-0424-06

THERMO-EFFECT ON HIGH-SPEED LANDSLIDE

LU Xiao-bing¹, JIAO Bin-tian¹, Zhang Jin-lai¹, WANG Shu-yun¹, CUI Peng²

(1. *Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;*

2. *Chengdu Institute of Mountain Hazard and Environment, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China*)

Abstract: The effects of the thermal and the pore pressure generated by high-speed landslide are discussed. First, the controlling equations that govern the thermo-pore-mechanical phenomenon in high-speed landslide are given. Second, the initiation conditions of slide-band (shear band) and the evolution of the band are discussed. At last, the generation and diffusion of the thermal and pore pressure which may cause the obvious decrease of friction coefficient in slide-band are analyzed by numerical simulation. The results show that the instabilization, which is the precursor of the forming of slide-band, initiates once the thermo-softening effect overcomes the strain-hardening effect. After instabilization the localized shear strain becomes severe. Generally, the bandwidth develops with time, which can cause severe changes of the strain and the strain ratio in the band. The drastic changes of strain and strain ratio can cause distinct increase of pore pressure and temperature in the band. The accelerated motion is caused by material strain softening, which further promotes the material strain-rate softening inside the shear band. Owing to the speed of initiating process, heat is trapped inside the shear band, which leads rapidly to the increase of pore pressure, total loss of strength, and uninhibited sliding motion on a small-friction or frictionless base.

Key words: rock and soil mechanics; high-speed landslide; thermo-effect; shear band

1 引言

高速滑坡因其剧烈及滑程远, 常常造成灾难。

为研究高速滑坡的机理, 研究者们曾提出过多种机制^[1-7], 但存在各种争议。如高速滑坡是由于热致汽化引起滑坡体强度降低的机制^[6,7], 但是没有在现场和实验中发现有汽化现象发生的证据。文[8]用一

收稿日期: 2003-06-23; 修回日期: 2003-09-01

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年基金资助项目(40025103); 国家自然科学基金资助项目(10202024)

作者简介: 鲁晓兵(1969-), 男, 博士, 1990年毕业于成都科技大学力学系, 现任副研究员, 主要从事岩土力学的研究工作。E-mail: xblu@imech.ac.cn.

维滑块力学模型分析表明, 即使汽化不发生, 产生的热也可以导致剪切带内的高孔隙水压, 从而导致有效应力降低和摩擦力降低。同时也有许多关于孔隙流体压力与摩擦热关系的讨论^[9~11]。前述的这些分析没有明确提出热致孔隙压力的物理机制。文[12~14]提出了一组描述滑坡中快速变形剪切带运动的方程, 但考虑的剪切带宽度是固定的。

本文讨论剪切带的产生及随剪切带演化时热的建立以及其对摩擦系数降低、孔压增加的影响, 并由此导致高速滑坡的过程和机理。首先描述控制方程及定解条件; 然后通过小扰动分析得出失稳条件; 最后通过一个简单的本构关系讨论剪切带宽度的变化规律及主要控制因素, 并通过数值方法给出摩擦系数的软化过程。

2 基本方程的建立

文[15]根据 Vaiont 滑坡的滑动面上的粘土样实验研究表明, 如果增加剪切速度, 动摩擦角 j_{dyn} 可以降到 4.4° 。摩擦系数可以表达成应变和应变率的函数^[16]为

$$m = m_t + (m_p - m_t) \frac{1}{1 + a_1 \dot{g}} \quad (1)$$

$$m_t = m_p + (m_{sta} - m_{dyn}) \frac{1}{1 + a_2 g} \quad (2)$$

式中: $m_{sta} = \tan j_{sta}$; $m_{dyn} = \tan j_{dyn}$; $m_p = \tan j_p$; j_{sta} , j_{dyn} , j_p 分别为慢剪时的残余摩擦角、快剪时的残余摩擦角和峰值摩擦角; a_1, a_2 为常系数; \dot{g} 为弹性和塑性的总应变率。

粘土中的剪切带厚度一般为几百微米, 拟静态载荷条件下可以认为是完全排水的^[17]。在快速剪切载荷条件下, 排水状况是由孔隙水压的产生与扩散决定的, 可由质量守恒和 Darcy 定律导出为

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(c_v \frac{\partial p}{\partial z} \right) + I_m \frac{\partial q}{\partial t} \quad (3)$$

式中: q 为温度; p 为孔隙压力; c_v, I_m 分别为固结系数和孔压温度系数。根据文[12], 孔压温度系数由热膨胀系数 a 和压缩系数 c 决定。

假设孔隙水和粘土颗粒处于热平衡状态, 由能量平衡可得热产生与扩散方程为

$$\frac{\partial q}{\partial t} = k_m \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} + C_1 t \dot{g}^p \quad (4)$$

式中: C_1 为塑性功热转换系数; t 为剪应力; \dot{g}^p 为塑性应变率; z 为垂直于坡面的坐标; k_m 为 Kelvin

系数^[16], 该系数为反映水-土混合物热传导的参数, 与粘土的微结构和固结状态有关, 如在完全排水和缓慢升温条件下, 正常固结粘土体积一般收缩, 而超固结粘土的体积一般膨胀^[18, 19]。

假设弹性剪应变可以忽略, 则有

$$\dot{g}^p = \dot{g} = \frac{\partial v}{\partial z} \quad (5)$$

式中: v 为平行于坡面的速度。

剪切带内的动量平衡方程为^[10]

$$(1-n)r_s \frac{\partial^2 g}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = -Kn^2 \frac{\partial g}{\partial t} \quad (6)$$

式中: n 为空隙率; r_s 为土的密度; $K = r_s g / k$, g 为重力加速度, k 为 Darcy 渗透系数。

归纳起来, 所考察问题的数学模型为

$$\left. \begin{aligned} (1-n)r_s \frac{\partial^2 g}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} &= -Kn^2 \frac{\partial g}{\partial t} \\ \frac{\partial q}{\partial t} &= k_m \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} + C_1 t \dot{g} \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(c_v \frac{\partial p}{\partial z} \right) + I_m \frac{\partial q}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

设本构方程为应变、应变率和温度的函数为

$$t = f(g, \dot{g}, q) \quad (8)$$

边界条件为

$$p(\pm\infty, t) = 0, \quad q(\pm\infty, t) = q_0 \quad (9)$$

式中: q_0 为初始温度分布。

初始条件为

$$p(z, 0) = 0, \quad q(z, 0) = q_0, \quad \left(\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)_{z=0, L} = 0 \quad (10)$$

速度的边界条件为

$$v(0, t) = 0, \quad v(d_B, t) = v_d(t) \quad (t > 0) \quad (11)$$

式中: L 为计算区域的长度, d_B 为剪切带宽。

3 小扰动分析

为了寻找从均匀变形到不连续变形的转折点, 即剪切失稳导致剪切带产生的条件, 可考察下面形式的解^[20]:

$$\begin{cases} g = g_0 + g' \\ q = q_0 + q' \\ p = p_0 + p' \end{cases} \quad (12)$$

式中: g_0, q_0, p_0 为式(7)的一组解; g', q', p' 为小扰动量, 且有

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{g}' &= \mathbf{g}^* e^{a\mathbf{i} + ibz} \\ \mathbf{q}' &= \mathbf{q}^* e^{a\mathbf{i} + ibz} \\ \mathbf{p}' &= \mathbf{p}^* e^{a\mathbf{i} + ibz} \end{aligned} \right\}, \left. \begin{aligned} |\mathbf{g}^*| &\ll |\mathbf{g}_0| \\ |\mathbf{q}^*| &\ll |\mathbf{q}_0| \\ |\mathbf{p}^*| &\ll |\mathbf{p}_0| \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中： \mathbf{a} ， \mathbf{b} 分别为扰动的频率和波数；各量左上方的“ \cdot ”代表该量为小扰动量。

对式(8)进行微分运算，可得

$$d\mathbf{t} = R_0 d\mathbf{g} - Q_0 d\mathbf{q} + H_0 d\mathbf{g} \quad (14)$$

其中，

$$R_0 = \left(\frac{\partial \mathbf{t}}{\partial \mathbf{g}} \right)_0, Q_0 = - \left(\frac{\partial \mathbf{t}}{\partial \mathbf{q}} \right)_0, H_0 = \left(\frac{\partial \mathbf{t}}{\partial \dot{\mathbf{g}}} \right)_0 \quad (15)$$

则有

$$\mathbf{t}^* = R_0 \mathbf{g}^* - Q_0 \mathbf{q}^* + \mathbf{a} H_0 \mathbf{g}^* \quad (16)$$

将式(12)，(13)，(16)代入式(7)，得

$$\left. \begin{aligned} [\mathbf{r}_s \mathbf{a}^2 + \mathbf{b}^2 (R_0 + \mathbf{a} H_0) + K n_0^2 \mathbf{a}] \mathbf{g}^* - \mathbf{b}^2 Q_0 \mathbf{q}^* &= 0 \\ [C_1 t_0 \mathbf{a} + K \dot{\mathbf{g}}_0 (R_0 + \mathbf{a} H_0)] \mathbf{g}^* - (C \dot{\mathbf{g}}_0 Q_0 + \mathbf{r}_s c_v \mathbf{a} + \mathbf{I} \mathbf{b}^2) \mathbf{q}^* &= 0 \\ (\mathbf{a} + c_v \mathbf{b}^2) \mathbf{p}^* - \mathbf{I}_m \mathbf{a} \mathbf{q}^* &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

要使方程有解，则系数行列式的值应为零，整理后为

$$\mathbf{r}_s^2 c_v \mathbf{a}^3 + A_1 \mathbf{a}^2 + A_2 \mathbf{a} + \mathbf{I} R_0 \mathbf{b}^4 = 0 \quad (18a)$$

其中，

$$A_1 = (\mathbf{r}_s c_v H_0 + \mathbf{r}_s \mathbf{I}) \mathbf{b}^2 + \mathbf{r}_s C_1 \dot{\mathbf{g}}_0 Q_0 + \mathbf{r}_s c_v K n_0^2 \quad (18b)$$

$$A_2 = \mathbf{I} H_0 \mathbf{b}^4 + K n_0^2 \mathbf{I} \mathbf{b}^2 + K n_0^2 C \dot{\mathbf{g}}_0 Q_0 + \mathbf{r}_s c_v \mathbf{b}^2 R_0 - C_1 t_0 Q_0 \mathbf{b}^2 \quad (18c)$$

采用如下的无量纲变量，将式(18a)无量纲化为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{a} &= \frac{c_v R_0}{\mathbf{I}} \bar{\mathbf{a}}, \mathbf{b}^2 = \frac{\mathbf{r}_s c_v^2 R_0}{\mathbf{I}^2} \bar{\mathbf{b}}^2, A = \frac{c_v H_0}{\mathbf{I}}, \\ B &= \frac{C_1 t_0 Q_0}{\mathbf{r}_s c_v R_0}, C = \frac{C_1 \mathbf{I} \dot{\mathbf{g}}_0 Q_0}{\mathbf{r}_s c_v^2 R_0}, D = \frac{K n_0^2 \mathbf{I}}{\mathbf{r}_s c_v R_0} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中： \mathbf{a} ， \mathbf{b} 上的短横线表示无量纲； A ， B ， C ， D 均为无量纲参数。

将式(19)代入到式(18a)，可得

$$\bar{\mathbf{a}}^3 + (\bar{\mathbf{b}}^2 + C + A \bar{\mathbf{b}}^2 + D) \bar{\mathbf{a}}^2 + [(1 - B + D) \bar{\mathbf{b}}^2 + A \bar{\mathbf{b}}^4 + DC] \bar{\mathbf{a}} + \bar{\mathbf{b}}^4 = 0 \quad (20)$$

寻找 $\bar{\mathbf{a}}$ 为正值的条件，即失稳条件，最大值 $\bar{\mathbf{a}}_m$ 和 $\bar{\mathbf{b}}_m$ 必须满足的条件为

$$\frac{d\bar{\mathbf{a}}}{d\bar{\mathbf{b}}^2} = 0 \quad (21)$$

即

$$\bar{\mathbf{b}}_m^2 = - \frac{(A+1)\bar{\mathbf{a}}_m^2 + (1-B+D)\bar{\mathbf{a}}_m}{2(A\bar{\mathbf{a}}_m + 1)} \quad (22)$$

由 $\bar{\mathbf{b}}_m^2 > 0$ ，可得

$$0 < \bar{\mathbf{a}}_m < \frac{B-D-1}{1+A} = \bar{\mathbf{a}}^* \quad (23)$$

式中： $\bar{\mathbf{a}}^*$ 为一个最大特征扰动频率。

根据式(20)和(23)，可求得 $\bar{\mathbf{a}}_m$ 的方程为

$$f_1 = f_2 \quad (24)$$

其中，

$$f_1 = 4[\bar{\mathbf{a}}_m^3 + (C+D)\bar{\mathbf{a}}_m^2 + DC\bar{\mathbf{a}}_m](A\bar{\mathbf{a}}_m + 1) \quad (25)$$

$$f_2 = [(A+1)\bar{\mathbf{a}}_m^2 + (1-B+D)\bar{\mathbf{a}}_m]^2 \quad (26)$$

一般情况下 $C > 0$ ，由式(24)~(26)可得 $\bar{\mathbf{a}}_m$ 取正值的条件为

$$B = \frac{C_1 t_0 Q_0}{\mathbf{r}_s c_v R_0} > 1 \quad (27)$$

式(27)表明，当热软化效应超过应变硬化效应后，失稳就产生了。失稳后，土体发生剪切局部化变形，在滑坡的滑面内产生剧烈变形。一般情况下，剪切带宽度是变化的，其变化对滑面内应变、应变率有很大的影响，从而对滑面内孔隙压力、温度等也产生明显的影响。

4 剪切带宽演化及对孔压等的影响

现在对一种简单本构条件下的情况直接求解 p, q, g ，期望能对剪切热孔压摩擦软化现象加深了解。可得控制方程的无量纲形式^[21]为

$$\left. \begin{aligned} \frac{(1-n)\mathbf{r}_s k_m \dot{\mathbf{g}}_k}{t_k} \frac{\partial^2 \bar{\mathbf{g}}}{\partial \bar{t}^2} - \frac{\partial^2 \bar{\mathbf{t}}}{\partial \bar{z}^2} &= - \frac{K n^2 k_m \mathbf{q}_k}{f t_k^2} \bar{\mathbf{g}} \\ \frac{\partial \bar{\mathbf{q}}}{\partial \bar{t}} &= \frac{\partial^2 \bar{\mathbf{q}}}{\partial \bar{z}^2} + \frac{C_1 \bar{\mathbf{t}} \bar{\mathbf{g}}}{2} \\ \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{t}} &= \frac{c_v}{k_m} \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial \bar{z}^2} + \frac{\mathbf{I}_m \mathbf{q}_k}{p_k} \frac{\partial \bar{\mathbf{q}}}{\partial \bar{t}} \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

式中： $\bar{p} = p/p_k$ ； $\bar{q} = q/q_0$ ； $\bar{g} = g/\dot{g}_k$ ； $\bar{t} = t/t_k$ ； $\bar{z} = z/d_k$ ， d_k 取为 $t_k \cdot k_m$ 。一般地， n 为 10^{-1} ， K 的单位为 $10^{9-10} \text{ kg/m}^3 \text{ s}$ ， \mathbf{r}_s 的单位为 10^3 kg/m^3 ， k_m 的单位为 $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ， \mathbf{q}_k 的单位为 10^{1-2} ， t_0 的单位为 10^{6-7} Pa ， $\dot{\mathbf{g}}_k$ 的单位为 $10^{-1}/\text{s}$ ， p_k 的单位为 10^{5-6} Pa ， c_v 的单位为

$10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, I_m 的单位为 10^4 Pa / 。在后面的方程中, 无量纲变量上的 “ - ” 号将被略去。

饱和砂土剪切带的模型可简化为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} &= 0 \\ \frac{\partial q}{\partial t} - \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} &= \frac{C_1 t \dot{g}}{2} \\ \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} &= \frac{c_v}{k_m} \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial z^2} + \frac{I_m q_k}{p_k} \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

$$z=0, \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (30a)$$

$$z = d(t), p_{d-} = p_{d+}, q_{d-} = q_{d+} \quad (30b)$$

$$\frac{\partial q}{\partial z} \Big|_d = \frac{\partial q}{\partial z} \Big|_{d+} \quad (30c)$$

$$v \Big|_{d-} = RV(t) \quad (30d)$$

$$t = 0, p = p_0(z), q = q_0(z) \quad (30e)$$

式中: $R = v_0 / d_k \dot{e}_k$, \dot{e}_k 为特征应变率; $p_0(z)$ 和 v_0 分别为初始孔压分布和初始扰动速度; $V(t)$ 为无量纲边界速度, 且有 $t = 0$ 时 $V = 1$ 。

剪切带之外的变形与之内的相比可以忽略, 于是剪切带之外的孔压和温度满足的条件为

$$p(t, z) = 0, q(t, z) = B \quad (31)$$

式中: B 为假设的均匀分布的温度。

假设本构关系的线性形式为

$$t = \dot{g} + 1 - q \quad (32)$$

将式(32)代入式(29)可得关于 q 的非齐次方程, 其解可表示为

$$q = \exp[H(t)] \left(q_1 + \int_0^t e^{-H(\tau)} \tau \frac{t-1}{2} d\tau \right) \quad (33)$$

式中: $H(t) = \int_0^t \frac{\dot{g}}{2} dh$, h 为积分变量, 且有

$$t(t) = 1 - q_d(t) \quad (34)$$

q_1 需满足的方程为

$$\frac{\partial q_1}{\partial t} - \frac{\partial^2 q_1}{\partial z^2} = \frac{t q_1}{2} \quad (35)$$

为处理动边界 $d(t)$, 先考察初始边界条件为

$$x=0, \frac{\partial q_1}{\partial z} = 0 \quad (36)$$

$$x = d_s, \frac{\partial q_1}{\partial z} = S(t) \quad (37)$$

$$t = 0, q_1 = q_0(z) \quad (38)$$

式中: d_s 为一个虚设的大于 $d(t)$ 的固定边界, $S(t)$ 为直接设定的与 $z = d(t)$ 处条件匹配的一个函数, 满足式(30c), (30d)。

满足式(30e)的 q 的解可用余弦级数表示为

$$q = e^{H(t)} \frac{1}{d_s} \left[C_0 + \int_0^t S(h) e^{-H(h)} dh - d_s \int_0^t \tau \frac{1-\tau}{2} e^{-H(\tau)} d\tau \right] + \frac{2}{d_s} \sum_1^\infty \exp[H(t) - a_n^2 t] \left\{ C_n + (-1)^n \int_0^t S(h) \exp[a_n^2 h - H(h)] dh \cos a_n z \right\} \quad (39)$$

式中: $a_n = n\pi/d_s$, $0 < x < d_s$, C_n 为常系数。

$$C_n = \int_0^{d_s} q_0(x) \cos(a_n x) dx \quad (40)$$

式中: x 为积分变量。

式(30d)要求下式得到满足:

$$RV(t) = v \Big|_{d-} = \int_0^d \dot{e} dz = \frac{2}{d_s} \sum_1^\infty \exp[H(t) - a_n^2 t] \left\{ C_n + (-1)^n \int_0^t S(h) \exp[a_n^2 h - H(h)] dh \right\} \frac{d_s}{n\pi} \left[\sin \frac{a_n d(t)}{d_s} - \frac{a_n d(t)}{d_s} \cos \frac{a_n d(t)}{d_s} \right] \quad (41)$$

剪切带之外的解可得

$$q = \int_0^t [q^*(t-h) - B] \frac{z}{2\sqrt{\pi h^3}} \exp\left(-\frac{z^2}{4\pi}\right) dh \quad (42)$$

式中: $B = \text{const}$, 且忽略边界的影响; $q^*(t)$ 为 $z = 0$ 处的孔隙水压力。

因此, 就出现 4 个未知函数 $q^*(t)$, $S(t)$, $d(t)$ 及 $t(t)$, 可由式(34), (39), (41), (42)求得。由求得的 q 可得 p , t 。

将式(34)及条件 $\dot{e} \Big|_{y=d} = 0$ 代入式(41), 则式(41)变为

$$RV(t) = \int_0^d [q - q_d(t)] dz \quad (43)$$

在常速度边界条件下将式(43)对时间 t 进行偏微分后, 得

$$\frac{\partial q}{\partial z} \Big|_d d(t) \frac{\partial d}{\partial t} = \frac{Rt(t)}{2} + \frac{\partial q}{\partial y} \Big|_d - d(t) \frac{\partial q_d}{\partial t} \quad (44)$$

$\partial p / \partial z \neq 0$ 且 $d(t) \neq 0$, 故式(44)可写为

$$\frac{\partial d}{\partial t} = \left(\frac{t \dot{g}(t)}{2} + \frac{\partial^2 \bar{q}}{\partial z^2} - \frac{\partial q}{\partial t} \Big|_d \right) \Big/ \frac{\partial q}{\partial z} \Big|_d \quad (45)$$

当 $\dot{\epsilon} > 0$ 时, $\partial q / \partial z|_d$ 在剪切带之内必须为负。
 另外, 因为 $\partial q / \partial t|_d = \partial^2 q / \partial z^2|_d$, 则式(45)可写为

$$\frac{\partial d}{\partial t} = \left(\frac{t\bar{g}}{2} + \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 q}{\partial z^2}|_d \right) / \frac{\partial q}{\partial z}|_d \quad (46)$$

很明显, $t\bar{g}/2$ 总是正值, 因此控制着剪切带的减小。但是, 通常存在着简单单调减小的孔压分布, 即

$$\frac{\partial^2 q}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 q}{\partial z^2}|_d < 0 \quad (47)$$

从式(47)中可以看出剪切带内的孔压消散使剪切带扩大。在求出 q 后, 可以容易地求出 p , 进而求得 \dot{g}, t 。由于分析中采用的是很简单的本构关系, 与实际有较大的差别, 但本节分析有助于定性地了解所讨论的问题。如果采用符合实际的较复杂的本构关系, 则需要数值分析。

现在对式(29)进行数值计算, 采用的本构方程^[22]为

$$t = Ag^m \dot{g}^n p^l \quad (48)$$

在本文计算中, 上述参数取值为: $E_r = 4 \times 10^2 \text{ Pa}$, $r = 2.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $K = 2 \times 10^6 \text{ kg/m}^3\text{s}$, $C_1 = 1.0$, $m = 0.2 \sim 0.6$, $n = 0.2$, $l = 0.01$ 。中心点的初始应变率较其他点高 5%。

由于没有现场实测资料, 在实验室内很难完成此类实验, 故在这里主要定性考察滑带上的热和摩擦效应。考察土坡 200 m 深度下有一个滑带, 以此确定初始应力状态的参数。通过数值模拟, 得到滑带内摩擦系数、孔隙压力和热的变化。结果表明, 在剪切作用下, 应变、应变率和热被集中于剪切带中, 导致孔隙压力快速增加, 摩擦系数快速下降, 从而导致快速滑坡(图 1~3)。该结论与文[15]的结论相近。

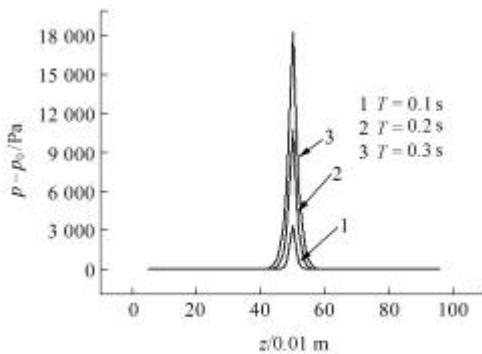


图 1 孔隙压力的变化

Fig.1 Variation of pore pressure

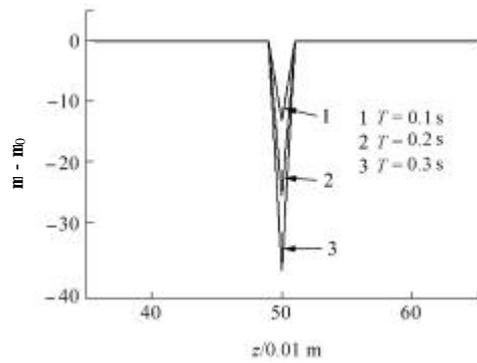


图 2 摩擦系数的变化

Fig.2 Variation of friction coefficient

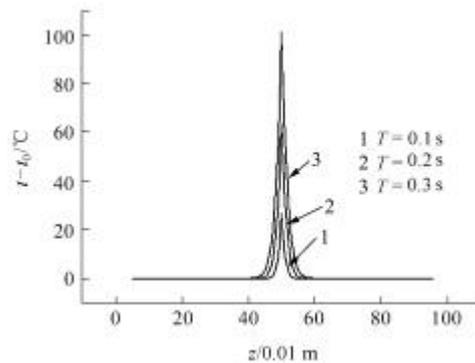


图 3 温度的变化

Fig.3 Variation of temperature

5 结 语

本文的分析表明, 当土的软化效应超过硬化效应时, 失稳就发生了。失稳发生后, 变形高度集中于剪切带内, 导致高应变和高应变率, 从而导致高孔压和温度上升, 使得滑带内摩擦系数急剧降低, 为高速滑坡创造了条件。剪切带的发展是由孔隙水压的消散和砂土强度降低共同决定的, 前者使剪切带扩大而后者使其减小。文中还给出了数值解答, 印证了剪切带内温度急剧上升和摩擦系数急剧下降的结论。

参考文献(References):

[1] 刘忠玉, 马崇武, 苗天德等. 高速滑坡远程预测的块体运动模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 742-746. (Liu Zhongyu, Ma Chongwu, Miao Tiande, et al. Kinematical block model long run-out prediction for high-speed landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 742-746. (in Chinese))

[2] 程谦恭, 胡厚田, 胡广韬等. 高速岩质滑坡临冲与峰残强降复合启程加速动力学机理[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 173-176. (Cheng Qiangong, Hu Houtian, Hu Guangtao, et al. A study

- of complex accelerated dynamics mechanics of high speed landslide by elastic rocky impulse and peak residual strength drop[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 173–176.(in Chinese)
- [3] 邢爱国, 胡厚田, 杨明. 大型高速滑坡滑动过程中摩擦特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 522–525.(Xing Aiguo, Hu Houtian, Yang Ming. Experimental study of frictional properties in large high speed landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 522–525.(in Chinese))
- [4] 邢爱国, 高广运. 大型高速滑坡近程空气动力学效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 778–783.(Xing Aiguo, Gao Guangyun. Study on the effect of aerodynamics of large high speed landslide in short-range stage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 778–783.(in Chinese))
- [5] 胡广韬, 张珂, 毛延龙. 滑坡动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1995.(Hu Guantao, Zhang Ke, Mao Yanlong. Landslide Dynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995.(in Chinese))
- [6] Hibib P. Production of gaseous pore pressure during rock slides[J]. Rock Mechanics, 1975, (7): 193–197.
- [7] Goguel J. Scale-dependent rockslide mechanisms, with emphasis on the role of pore fluid vaporization[A]. In: Voight B ed. Developments in Geotechnical Engineering[C]. New York: Elsevier, 1978. 693–705.
- [8] Voight B, Faust C. Frictional heat and strength loss in some rapid landslides[J]. Geotechnique, 1982, 32(1): 43–54.
- [9] Lachenbruch A H. Frictional heating fluid pressure and the resistance to fault motion[J]. Geophys. Res., 1980, 85: 6 097–6 112.
- [10] Mass C W, Smith L. Pore-fluid pressures and frictional heating on a fault surface[J]. Pure and Appl. Geophys., 1985, 122: 583–607.
- [11] Prisco D C, Imposimato S, Vardoulakis I. Mechanical modeling of drained creep triaxial tests on loose sand[J]. Geotechnique, 2000, 50(1): 73–82.
- [12] Vardoulakis I. Catastrophic landslides due to frictional heating of the failure plane[J]. Mech. Cohesive Frictional Mat., 2000, (5): 443–467.
- [13] Vardoulakis I. Thermo-poro-mechanical analysis of rapid fault deformation[A]. In: Proc. 4th Int. Conf. Micromechanics of Granular Media. Sendai[C], Rotterdam: A. A. Balkema, 2001. 273–280.
- [14] Vardoulakis I. Deformation of water saturated sand: II. the effect of pore-water flow and shear banding[J]. Geotechnique, 1995, 46(3): 457–472.
- [15] Tika T E, Hutchinson J N. Ring shear tests on soil from the variant landslide slip surface[J]. Geotechnique, 1999, 49(1): 59–74.
- [16] Vardoulakis I. Dynamic thermo-poro-mechanical analysis of catastrophic landslides[J]. Geotechnique, 2002, 52(3): 157–171.
- [17] Saada A S, Bianchini G F, Liang L, et al. Bifurcation and shear bands propagation in saturated clays[J]. Geotechnique, 1994, 44(1): 35–64.
- [18] Modarissi H, Laloui L A. Thermo-visco-plastic constitutive model for clays[J]. Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., 1997, 21(3): 313–335.
- [19] Sultan N. Etude du comportement thermo-mécanique de l'argile de Boom: expériences et modélisation[Ph. D. Thesis][D]. Paris: ENPC, CERMES, 1997.
- [20] Lu X B. On the instability of saturated soil[J]. Int. J. Engrg. Sci., 2001, 39(9): 963–972.
- [21] Lu Xiaobing, Yang Zhengsheng, Zhang Jiahua. The evolution of shear bands of saturated soil[J]. Int. J. Non-Mechanics, 2000, 35(1): 21–26.
- [22] Lu Xiaobing. The influence of strain gradient on the shear band in saturated soil[J]. Iranian J. of Science and Technology, 2003, 6(1): 45–68.