

裂隙对非饱和土边坡稳定性的影响

陈铁林¹, 邓 刚², 陈生水¹, 沈珠江^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 清华大学水利系, 北京 100084)

摘 要: 降雨往往导致含裂隙土坡的失稳。在非饱和土广义固结理论的基础上, 对某一边坡进行了变形与孔隙水、孔隙气流动的耦合分析。分析中考虑了非膨胀土和膨胀土边坡中不存在裂隙以及存在裂隙的情况, 并对计算结果进行了对比分析。

关键词: 裂隙; 边坡; 降雨; 非饱和土

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)02-0210-06

作者简介: 陈铁林(1970-), 男, 安徽天长人, 博士后, 主要从事岩土材料本构模型和土工数值计算工作。

Effects of fissures on stability of unsaturated soil slope

CHEN Tie-lin¹, DENG Gang², CHEN Sheng-shui¹, SHEN Zhu-jiang^{1,2}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Landslides of stiff fissured clay often occurred during/after rainfall. Based on the generalized consolidation theory of unsaturated soils, coupled analysis of deformation of soil skeleton and movement of pore water and pore air in stiff fissured clay and swelling soil were performed for a selected slope. In the analysis, the effect of rainfall and existence of fissures was simulated, and the calculated results with and without consideration of existence of fissures in the slope were also compared.

Key words: fissure; slope; rainfall; unsaturated soil

1 一般非饱和土边坡的有限元计算

降雨往往引发超固结粘土边坡和膨胀土边坡的滑坡。超固结土和膨胀土一般为非饱和土, 具有很高的负孔隙水压力。一般来说经过开挖、干湿循环等因素的作用, 在土体内会产生很多的裂隙。在降雨条件下, 这些裂隙可能成为滑坡的诱导因素。因此, 很有必要在数值模拟中考虑裂隙的影响。

一些学者利用饱和土的固结理论研究了超固结土坡中的吸水软化现象^[1~3]。近几年来, 非饱和土的固结理论逐渐被用来分析超固结土坡和膨胀土坡中的滑坡现象^[4,5]。但是, 这些分析中大都没有考虑裂隙的影响。

本项研究利用双变量非饱和土固结理论, 以位移、孔隙水压力和孔隙气压力为变量对一般超固结土边坡和膨胀土边坡进行有限元计算, 对比了有裂隙存在和没有裂隙存在两种情况。

2 非饱和土固结理论

2.1 基本假设

非饱和土固结理论基本假设: ①土体为均质各向同性材料; ②土骨架只有微小应变; ③土颗粒和孔隙水不可压缩; ④孔隙水和气各自连通, 可在各自的压

力梯度下和温度下运动, 且服从 Darcy 定律; ⑤孔隙气体的压缩和溶解分别服从 Boyle 定律和 Henry 定律。

2.2 计算条件

对于雨水入渗对边坡稳定性的影响, 有很多学者进行过研究。参考试验斜坡断面并进行适当简化^[6], 本文计算将采用如图 1 所示的基本断面。直立临空面下的平台段长达 20 m, 这里仅取 8 m。

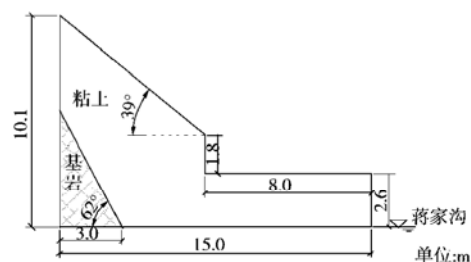


图 1 计算所采用的断面

Fig. 1 Computational cross section

基岩倾角 62°, 坡脚直立临空面高 1.8 m, 坡面倾角 39°。平台段下的地下水位假定与蒋家沟水位持平,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50479031)

收稿日期: 2005-06-29

且保持不变。基岩认为不透水、不可压缩, 不参加有限元计算。

3 本构模型

3.1 土骨架的本构关系

本项研究采用非线性弹性模型^[7]。具体的表达式如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta\sigma_x \\ \Delta\sigma_y \\ \Delta\sigma_z \\ \Delta\tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & 0 \\ d_2 & d_2 & 0 \\ d_2 & d_1 & 0 \\ 0 & 0 & d_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_x \\ \Delta\varepsilon_z \\ \Delta\gamma_{xz} \end{bmatrix} + (d_4\tilde{I} + d_7\tilde{J})\Delta u_w + (d_5\tilde{I} - d_7\tilde{J})\Delta u_a + d_6\tilde{I}\Delta q, \quad (1)$$

$$\text{式中 } \tilde{J} = \frac{[\sigma_x - \sigma_m \quad \sigma_y - \sigma_m \quad \sigma_z - \sigma_m \quad \tau_{xz}]^T}{\tau_\sigma},$$

$$\tau_\sigma = \sqrt{\frac{1}{3}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6\tau_{xz}^2]}, \quad \tau_\sigma$$

为 π 平面上的剪切应力, $\tilde{I} = [1 \ 1 \ 1 \ 0]^T$,

$$d_1 = \frac{E_t(1-\nu_t)}{(1+\nu_t)(1-2\nu_t)}, d_2 = \frac{E_t\nu_t}{(1+\nu_t)(1-2\nu_t)}, d_3 = \frac{E_t}{2(1+\nu_t)},$$

$$d_4 = \frac{E_t\rho_t^s}{3(1-2\nu_t)}, d_5 = 1 - d_4, d_6 = \frac{-E_t\rho_t^d}{3(1-2\nu_t)},$$

$$d_7 = \frac{E_t\rho_{st}^r}{2(1+\nu_t)}, E_t, \nu_t, \rho_t^d, \rho_t^s, \rho_{st}^r \text{ 分别为杨氏模}$$

量、泊松比、剪胀系数、湿胀引起的体积变形系数, 湿胀引起的剪切变形系数。

3.2 控制方程

$$d_1 \frac{\partial^2 \Delta u_x}{\partial x^2} + d_3 \frac{\partial^2 \Delta u_x}{\partial z^2} + (d_2 + d_3) \frac{\partial^2 \Delta u_z}{\partial x \partial z} - [d_4 + \frac{d_7}{\tau_\sigma}(\sigma_x - \sigma_m)] \cdot$$

$$\frac{\partial \Delta u_w}{\partial x} - \frac{d_7}{\tau_\sigma} \tau_{xz} \frac{\partial \Delta u_w}{\partial z} - [d_5 - \frac{d_7}{\tau_\sigma}(\sigma_x - \sigma_m)] \frac{\partial \Delta u_a}{\partial x} + \frac{d_7}{\tau_\sigma} \tau_{xz} \frac{\partial \Delta u_a}{\partial z} - \Delta b_x,$$

$$= \frac{\partial \sigma_x^k}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}^k}{\partial z} + b_x^k + d_6 \frac{\partial \Delta q}{\partial x}, \quad (2a)$$

$$d_3 \frac{\partial^2 \Delta u_z}{\partial x^2} + d_1 \frac{\partial^2 \Delta u_z}{\partial z^2} + (d_2 + d_3) \frac{\partial^2 \Delta u_x}{\partial x \partial z} - [d_4 +$$

$$\frac{d_7}{\tau_\sigma}(\sigma_x - \sigma_m)] \frac{\partial \Delta u_w}{\partial z} - \frac{d_7}{\tau_\sigma} \tau_{xz} \frac{\partial \Delta u_w}{\partial x} -$$

$$[d_5 - \frac{d_7}{\tau_\sigma}(\sigma_x - \sigma_m)] \frac{\partial \Delta u_a}{\partial z} + \frac{d_7}{\tau_\sigma} \tau_{xz} \frac{\partial \Delta u_a}{\partial x} - \Delta b_z,$$

$$= \frac{\partial \sigma_z^k}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}^k}{\partial x} + b_z^k + d_6 \frac{\partial \Delta q}{\partial z}. \quad (2b)$$

3.3 孔隙水和孔隙气的质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(sn) = \text{div}(\frac{k_w}{\rho_w g} \nabla u_w) + \frac{\partial}{\partial z} k_w, \quad (3a)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[(1-s+Hs)n\rho_a] = \text{div}\left(\frac{\rho_a}{\rho_w g} k_a \nabla u_a\right) +$$

$$H \text{div}\left(\frac{\rho_a}{\rho_w g} k_w \nabla u_w\right) + \frac{\partial}{\partial z}(Hk_w \rho_a), \quad (3b)$$

式中, H 为亨利系数。

3.4 吸力状态方程

吸力状态方程可以写为

$$u_a - u_w = P_c(s, n; s_0, n_0), \quad (4)$$

式中, s_0 、 n_0 为初始饱和度和初始孔隙比, s 、 n 为饱和度和孔隙比, $n = n_0 - \varepsilon_v = n_0 + \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z}$ 。

函数 P_c 的表达式可以通过常规的试验测定一般可采用如下表达式:

$$P_c = A_0(s^{-B_0} - 1), \quad (5)$$

式中, A_0 和 B_0 是经验系数。

为了体现土体中的大尺寸的裂缝对降雨条件下边坡稳定性的影响, 在进行网格划分时, 斜坡断面中水平向每 0.5 m 预留一个 0.1 m 宽的裂缝, 给予不同的参数进行计算。断面剖分剖分为 606 个单元, 1953 个结点。全部单元为 8 结点四边形等参单元。

计算断面的材料分裂隙材料和非分裂隙材料两类。非分裂隙材料的渗透系数较小, 取饱和土孔隙水渗透系数 $k_{ws} = 6.0 \times 10^{-7}$ m/s, 干土孔隙气体渗透系数 $k_{as} = 3.0 \times 10^{-5}$ m/s。

两种土的部分土性参数取值见表 1。

表 1 两类土部分土性参数取值

Table 1 Some parameters of two types of soils

类型	G_s	k_{ws} /(m·s ⁻¹)	k_{as} /(m·s ⁻¹)	n	U_{w0} /kPa	U_{a0} /kPa	S
非裂隙土	2.71	6.0×10^{-7}	3.0×10^{-5}	0.4	312.209	0	0.72
裂隙土	2.67	6.0×10^{-4}	3.0×10^{-2}	0.5 2	312.209	0	0.72

研究非饱和土中水、气的渗透性时, 需要考虑降雨强度。原型试验中降雨量较大, 并且在坡面上设置了水平沟, 几乎不产生坡面流, 可以保证雨水充分入渗。但是实际情况下, 在与原型试验相近的降雨条件下, 往往不能保证雨水完全入渗, 通常会产生坡面流过程。通常情况下, 坡面在降雨过程中通常能够保证完全润湿, 也就是坡面吸力(负孔隙水压力)和气压都为 0(相对值, 以一个标准大气压为起点)。因此, 在程序中, 降雨时, 坡面的边界将指定为压强固定边。降雨历时 2 h, 在程序中分为 6 个时间段。程序计算至降雨结束后 7 d, 这段时间分为 9 个时间段。全部历程

总共分 15 个时间段，时间历程情况如表 2 所示。

表 2 计算时间历程

Table 2 The time sequence of computation					
时间历程编号	1	2	3	4	5
时间段长度/s	1500	780	600	900	840
总时间长度/h	0.42	0.63	0.8	1.05	1.28
时间历程编号	6	7	8	9	10
时间段长度/s	900	1680	3600	10800	18000
总时间长度/h	1.53	2	3	6	11
时间历程编号	11	12	13	14	15
时间段长度/s	25200	32400	82800	172800	259200
总时间长度/h	18	27	50	98	170

4 计算结果

为了研究裂隙存在对斜坡在降雨条件下的位移、渗流情况等的影响，在本研究中将分别考察斜坡上存在和不存在裂隙时的情况。

图 2、3 所示分别为有裂隙和无裂隙的情况下降雨进行时（总历时 0.8 h）时斜坡的位移分布和孔隙水压力分布（第 3 期）。

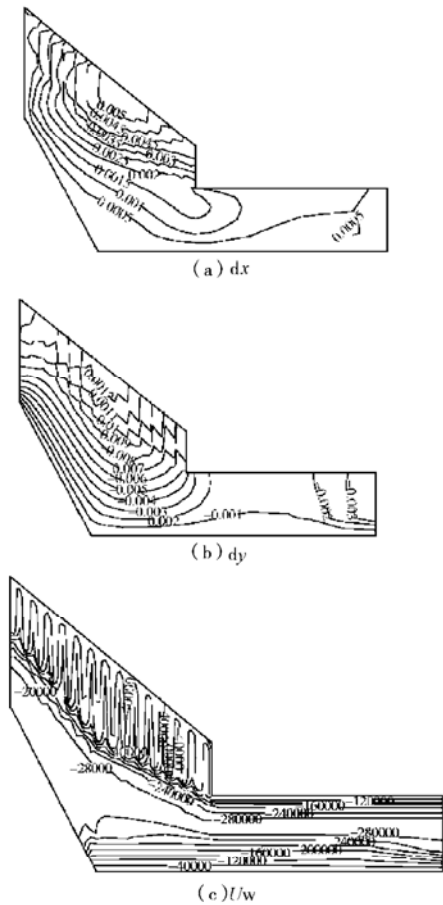


图 2 降雨进行时斜坡位移和孔隙水压力分布（有裂隙）
Fig. 2 The distribution of displacement and pore pressure on the slope(with crannies) when it was raining

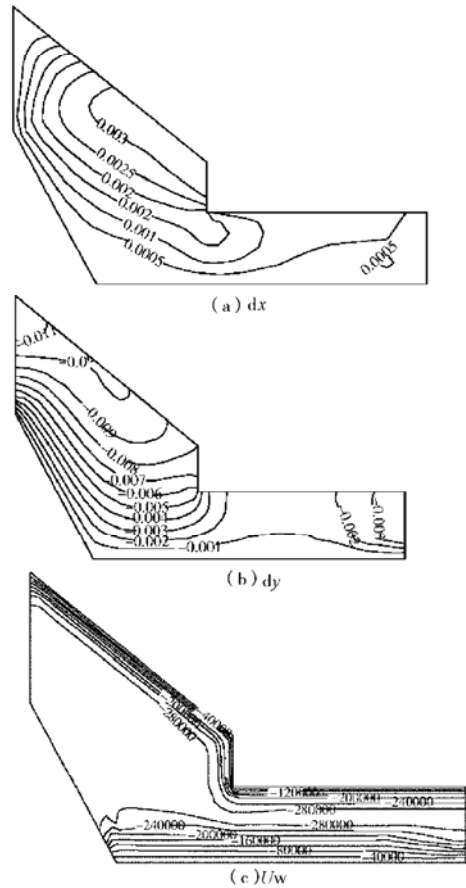


图 3 降雨进行时斜坡位移和孔隙水压力分布（无裂隙）
Fig. 3 The distribution of displacement and pore pressure on the slope(without crannies) when it was raining

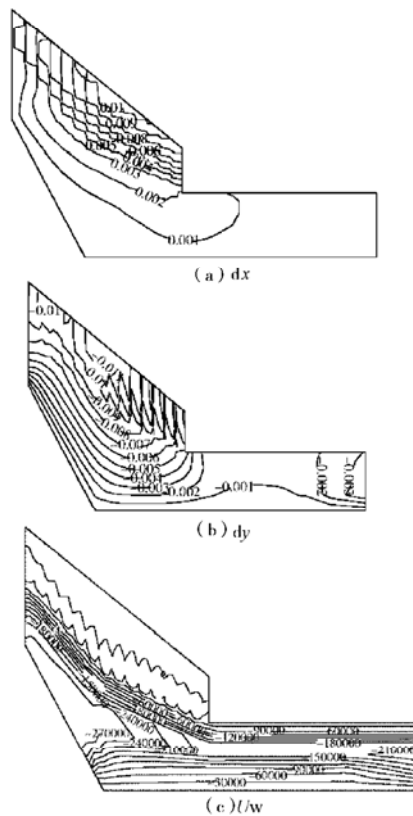


图 4 降雨刚结束时斜坡位移和孔隙水压力分布（有裂隙）
Fig. 4 The distribution of displacement and pore pressure on the slope(with crannies) just after the rain

图 4、5 所示分别为有裂隙和无裂隙的情况下降雨结束后 0.5 h (总历时 2.0 h) 时斜坡的位移分布和孔隙水压力分布 (第 7 期)。

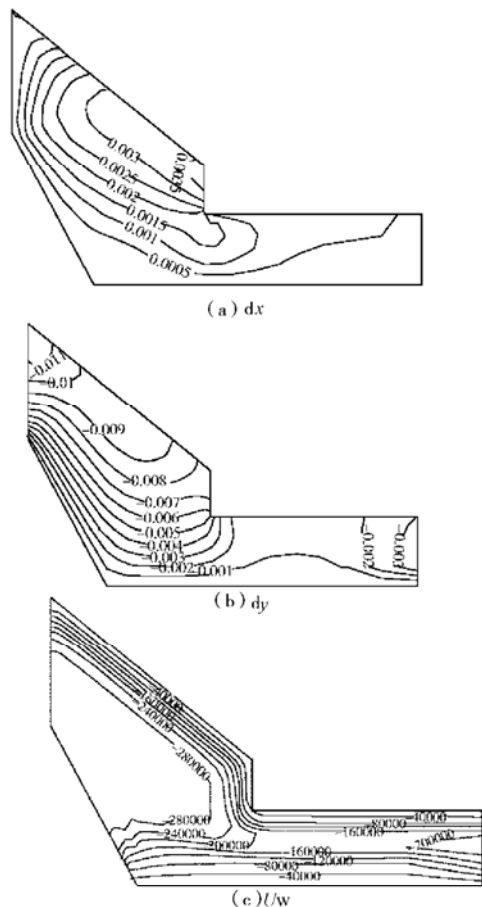


图 5 降雨刚结束时斜坡位移和孔隙水压力分布 (无裂隙)
Fig. 5 The distribution of displacement and pore pressure on the slope(without crannies) just after the rain

图 6、7 所示分别为有裂隙和无裂隙的情况下降雨结束后 9 h 后斜坡的位移分布和孔隙水压力分布 (第 10 期)。

在超固结粘土边坡中, 通常存在较大的吸力, 吸力能够较大幅度的提高土体的抗剪强度。由各图的比较可见, 当超固结粘土边坡中不存在裂隙时, 雨水入渗深度非常有限, 降雨前后位移很小、边坡形态变化较小; 而由于裂隙的存在, 雨水能够沿裂隙快速入渗, 从而浸湿较大的深度, 浸湿区域土体内吸力大量降低, 由于围压较低, 浸湿的超固结粘土边坡会迅速发生一定程度的膨胀。由于浸水后抗剪强度的降低, 在发生膨胀的同时, 土坡会逐渐发生下滑, 侧向位移在降雨结束约 25 h 后达到较大值, 这与文献[6]中原型试验的观测结果比较相近, 图 8 所示为降雨结束 25 h 后 (第 12 期) 斜坡的位移矢量分布和。图 9 所示为降雨结束后 25 h (第 12 期) 时, 斜坡中的负孔隙水压力分布, 由该图可见, 有裂隙的斜坡坡脚处孔隙水压力明显低于初始吸力。

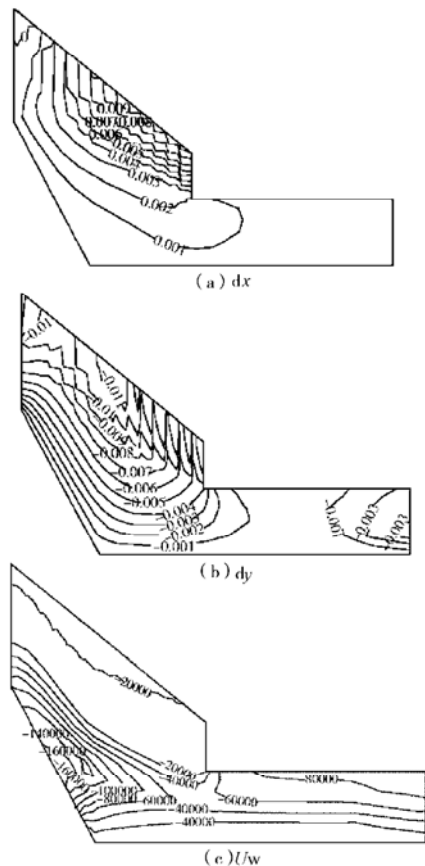


图 6 降雨结束 9 h 后斜坡位移和孔隙水压力分布 (有裂隙)
Fig. 6 The distribution of displacement and pore pressure on the slope(with crannies) 9 h after the rain

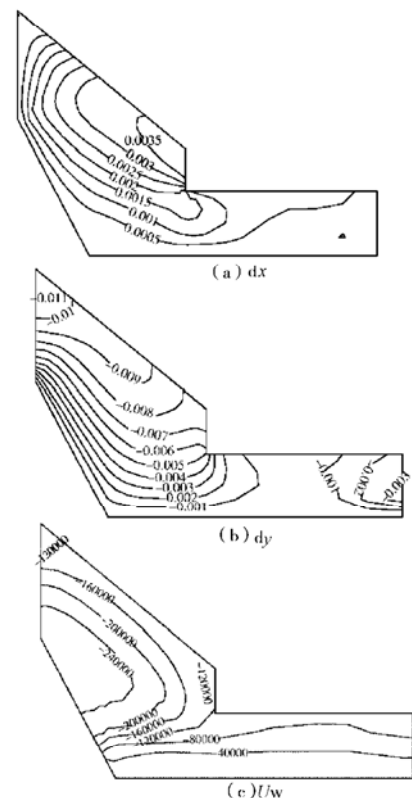


图 7 降雨结束 9 h 后斜坡位移和孔隙水压力分布 (无裂隙)
Fig. 7 The distribution of displacement and pore pressure on the slope(without crannies) 9 h after the rain

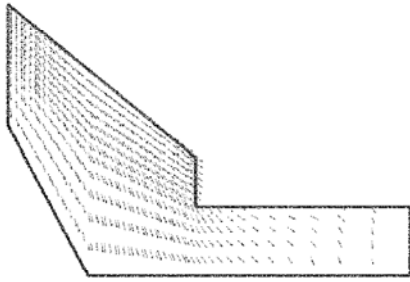


图 8 有裂隙的斜坡在降雨结束 25 h 后的位移矢量分布

Fig. 8 The distribution of displacement vector of the slope (with crannies) 25 h after the rain

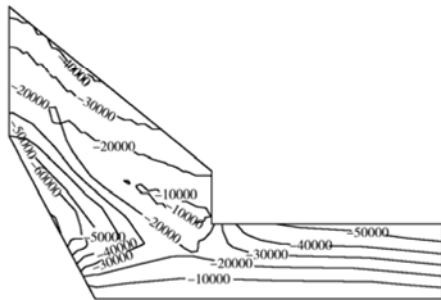


图 9 有裂隙的斜坡在降雨结束 25 h 后的负孔隙水压力分布
(with crannies) 25 h after the rain

5 膨胀土边坡的有限元计算

以上计算中没有考虑膨胀特性, 下面考虑土的膨胀特性, 分别对有裂隙和无裂隙的情况进行计算。

5.1 计算条件

计算中考虑了湿胀引起的体积变形系数 ρ_t^s 和湿胀引起的剪切变形系数 $\rho_{s,t}^r$ 。其它条件与上一算例相同。

5.2 计算结果

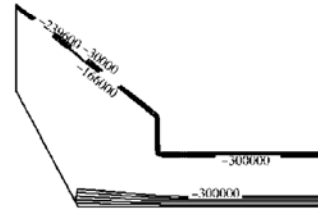
对比无裂隙膨胀土边坡孔隙水压力分布 (图 10) 与无裂隙一般土质边坡的孔隙水压力分布 (图 3、5、7), 可以明显的看出膨胀土边坡中孔隙水压力的升高一般发生在边坡的表面, 不向深部发展。这是由于雨水入渗后, 土体发生膨胀, 孔隙减小, 渗透系数也相应减小。

当膨胀土边坡中含有裂隙时, 降雨初期雨水顺着裂隙很快渗入土体内部 (图 11 (a))。

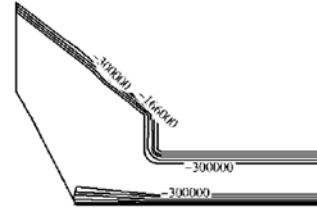
随着雨水的入渗, 裂隙周围的土体吸水膨胀, 使裂隙逐渐闭合, 渗透性随之降低, 在此之后雨水很难渗入土体的内部, 原先渗入裂隙内的水体与边坡表面的水体被相对隔离 (图 11 (b))。

由于裂隙的闭合, 表面的雨水只能渗入边坡的浅部。在土体内部, 原先沿着裂隙渗入的水体向周围扩散, 这种扩散也是发生在相对较为浅层的表面, 而不

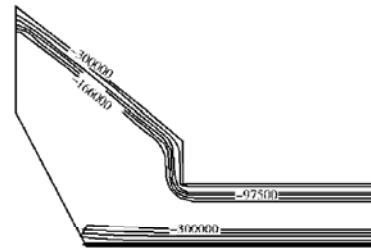
向边坡的深部发展 (图 11 (c))。



(a) 降雨进行时



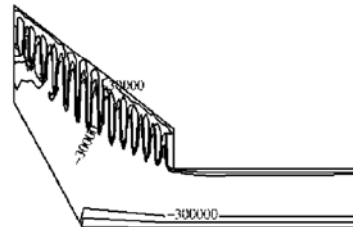
(b) 降雨刚结束



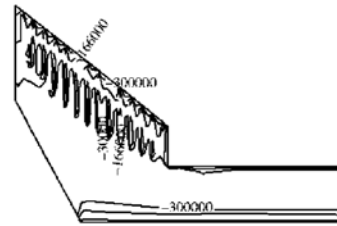
(c) 降雨结束后 9 h

图 10 无裂隙膨胀土边坡中孔隙水压力分布

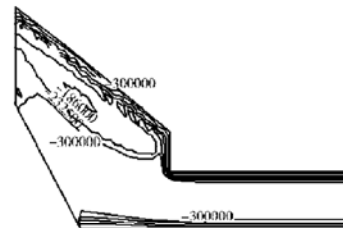
Fig. 10 The distribution of displacement and pore pressure on the slope (without crannies)



(a) 降雨进行时



(b) 降雨刚结束



(c) 降雨结束后 9 h

图 11 有裂隙膨胀土边坡中孔隙水压力分布

Fig. 11 The distribution of displacement and pore pressure on the slope (with crannies)

由以上分析可以看出, 裂隙对膨胀土边坡的雨水入渗有着很重要的影响。膨胀土边坡的雨水入渗只是发生在边坡的表面, 因而多滑坡表现为浅层滑动。

图 12 为降雨引起膨胀土边坡变形的位移矢量图。有裂隙膨胀土边坡的侧向位移大于无裂隙膨胀土边坡的侧向位移。

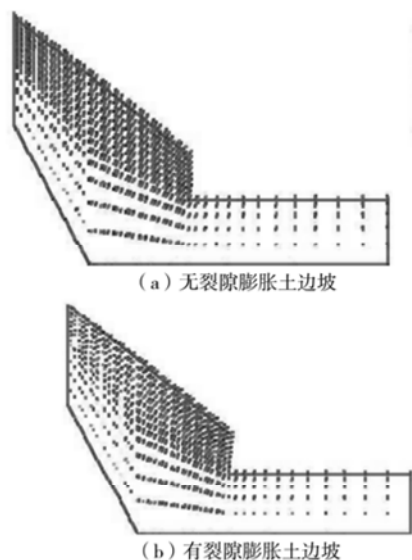


图 12 降雨结束 25 h 位移矢量分布图

Fig. 12 The distribution of displacement vector of the slope 25 h after the rain

6 结 论

无裂隙的超固结土和膨胀土边坡有很小的渗透系数, 因而雨水很难入渗到边坡的内部引发滑坡。对于含有裂隙的超固结土和膨胀土边坡, 雨水沿着裂隙深入到土坡的内部, 导致吸力的降低, 消减了土体的强度, 进而诱发滑坡。本文分析的结果也表明了, 在分

析超固结土和膨胀土边坡稳定时, 考虑裂隙的影响是很有必要的。

参考文献:

- [1] YAMAGAMI T, FENG J Q, JIANG J. A coupled finite element analysis for cut slopes considering swelling and softening effects[C]// Performance and Evaluation of Soil Slopes under Earthquakes and Rainstorms. Dalian, 1998: 166 - 172.
- [2] ADACHI T, et al. Soil-water coupling analysis of progressive of cut slope using a strain softening model[J]. Slope Stability Eng, 1999, I: 333 - 338.
- [3] HOSHIKAWA T, et al. Coupled excavation analysis of vertical cut and slopes in clay[J]. Slope Stability Eng 1999, I: 225 - 231.
- [4] SUN Y, NISHIGAKI M, KOHNO I. A study on stability analysis of shallow layer slope due to raining permeation[C]// Int Conf Unsaturated Soils. Paris, 1995, I: 315 - 320.
- [5] Alonso, et al. Effect of rain infiltration on the stability of slopes[C]// Int Conf Unsaturated Soils. Paris, 1995, I: 241 - 249.
- [6] HU Ming-jian, WANG Ren, ZHANG Ping-cang. Primary research on the effect of rainfall on landslide — take the slope piled by old landslide in Jiangjiagou valley as example[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 454 - 457.
- [7] YANG Dai-quan, SHEN Z J. Study on generalized consolidation theory of unsaturated soils[C]// Proc of the 7th International Conference on Expansive Soils. Dallas, 1992.