

降雨入渗对深层滑坡稳定性影响研究

孙建平, 刘青泉*, 李家春, 安翼

中国科学院力学研究所, 北京 100190

* 联系人, E-mail: qqliu@imech.ac.cn

收稿日期: 2007-06-11; 接受日期: 2008-05-19

中国科学院知识创新方向项目(编号: KJCX2-SW-L1-4)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2002CB412703)资助项目

摘要 采用有限元方法和极限平衡法建立了边坡渗流与稳定性分析耦合模型, 合理考虑了降雨入渗引起的边坡重力场和孔隙水压力场的变化, 以及土体的软化现象. 运用该模型, 对重庆万州农机技校滑坡体丰雨年雨季渗流场及稳定性进行实例分析, 探讨了降雨对滑坡体渗流场及稳定性的影响. 结果表明当降雨入渗引起坡体渗流场显著变化, 特别是引起大范围的孔隙水压力升高时, 最容易导致深层滑坡失稳.

关键词

降雨入渗
饱和-非饱和渗流
裂隙
地下水位
安全系数

降雨是诱发滑坡的主要因素之一, 一般来讲雨水入渗将会引起滑坡体内渗流场变化, 导致孔隙水压力上升、基质吸力减小、容重增大, 同时, 由于岩土体含水量的增大还会导致岩土软化等, 使得边坡滑移面剪应力增大、抗剪强度减小, 从而容易造成滑坡体失稳^[1-4].

过去对降雨入渗引起的浅层滑坡(深度 1~2 m)研究较多, 一般认为一场降雨引起的雨水入渗对滑坡体的影响主要是浅层的, 容易引起浅层滑坡^[4-8]. 土体初始含水量、雨型等都会对浅层滑坡产生重要影响. 一些研究者也对降雨条件下膨胀土边坡的稳定性进行了研究^[9-11], 主要考虑膨胀土表层的裂隙分布对雨水入渗的影响. 由于膨胀土裂隙往往也是在表层范围内, 尽管裂隙的存在增大了雨水的入渗, 但通常也大都只是引起浅层滑坡. 降雨对深层滑坡(深度为 5~20 m)的影响非常复杂, 如滑坡体内的大孔隙、裂隙等可以提供水分快速运移的通道, 补给地下水^[12-14], 从而影响坡体的稳定性. 目前关于降雨对深层滑坡渗流场及稳定性影响的较为详细的定量研究比较少, 是一个值得深入探讨的理论和工程课题.

本文力图建立能够充分反映降雨入渗引起的渗流场变化和岩土体性质变化的稳定性分析模型和方法, 通过探讨降雨入渗过程引起的边坡重力场和孔隙水压力场的变化, 以及土体的软化现象, 进而合理分析降雨对滑坡体稳定性的影响. 并以重庆万州农机技校滑坡体^[15]为例, 根据重庆奉节气象站的降雨监测资料^[16], 对丰雨年雨季滑坡体的渗流场及稳定性进行数值分析, 初步探讨可能引起滑坡体失稳的原因和基本规律.

1 饱和-非饱和渗流模型与算法

1.1 基本方程

滑坡体中地下水位以下为饱和区, 地下水位以上为非饱和区, 降雨入渗过程中, 水分会在非饱和区运动进而影响地下水位, 因此研究滑坡体渗流场需要将两者统一起来考虑, 称之为饱和-非饱和渗流问题. 假设介质在饱和区域的流动满足达西定律, 并将达西定律扩展到非饱和区, 在无源/汇的条件下, 流体在饱和-非饱和和多孔介质中的运动规律可以被描述为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(h) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y(h) \frac{\partial H}{\partial y} \right] = C(h) \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (1)$$

式中 $H = h + z$, H 为总水头; h 在饱和区为孔隙压力水头, 在非饱和区为毛细管压力水头; z 为位置水头; $C(h) = d\theta/dh$ 为比水容重, 由土水特征曲线确定; θ 为体积含水量; K_x 和 K_y 分别为土体水平方向和垂直方向的渗透系数, 在非饱和区是孔隙水压力的函数.

1.2 饱和-非饱和渗流有限元方法

由于方程(1)为非线性方程, 求解复杂, 故采用迦辽金有限元法求解^[17]. 将渗流域按三角形单元离散, 假定单元内总水头与节点总水头的近似关系为

$$H(x, y, t) = \sum_{i=1}^3 N_i(x, y) H_i(t), \quad (2)$$

其中 $N_i = \frac{1}{2A}(a_i + b_i x + c_i y)$, $i = i, j, m$. 式中 A 为三角形面积, a_i , b_i 和 c_i 由三角形顶点坐标确定^[17].

由于 N_i 仅在以 i 为公共结点的所有单元组成的区域(用 S_i 表示)内不为 0, 故仅对 S_i 积分. 由于 H_i , N_i 在不同单元有不同的表达式, 故按各单元逐个积分, 然后求和, 从而得出

$$\sum_e \iint \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} K_x(h) \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} K_y(h) \frac{\partial H}{\partial y} - C(h) \frac{\partial H}{\partial t} N_i \right] dx dy = 0, \quad (3)$$

(3)式中与 $C(h)$ 有关的项反映了三角形单元含水量的变化. 由于土水特征曲线具有高度非线性, 采用 $C(h) = d\theta/dh$ 对方程在时间上进行离散时, 会造成流入单元的水分与单元水分的增加不守恒^[18]. 为了克服这一困难, 取 $C(h_i) = (\theta_i^{t+\Delta t} - \theta_i^t) / (h_i^{t+\Delta t} - h_i^t)$, 同时采用质量集中矩阵, 将三角形单元水分质量集中在 3 个节点上, 从而克服方程求解震荡和不收敛问题^[19]. 从而对于某个单元 e , 经过变换积分和整理, 可以得到以下矩阵方程:

$$\frac{K_x}{4A} \begin{pmatrix} b_i b_i & b_i b_j & b_i b_m \\ b_j b_i & b_j b_j & b_j b_m \\ b_m b_i & b_m b_j & b_m b_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_i \\ H_j \\ H_m \end{pmatrix} + \frac{K_y}{4A} \begin{pmatrix} c_i c_i & c_i c_j & c_i c_m \\ c_j c_i & c_j c_j & c_j c_m \\ c_m c_i & c_m c_j & c_m c_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_i \\ H_j \\ H_m \end{pmatrix}$$

$$+\frac{A}{3}\begin{pmatrix} C(h_i) & 0 & 0 \\ 0 & C(h_j) & 0 \\ 0 & 0 & C(h_m) \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \frac{dH_i}{dt} \\ \frac{dH}{dt} \\ \frac{dH_m}{dt} \end{pmatrix}=0, \quad (4)$$

式中 $\bar{K} = \frac{1}{3}(K(h_i) + K(h_j) + K(h_m))$.

对整个渗流域求出各单元的(4)式, 再对相同点求和, 即可得到求解全区域未知量的方程组, 其简化形式为

$$[D]\{H\} + [B]\left\{\frac{dH}{dt}\right\} = 0. \quad (5)$$

采用隐式时间格式, 则有

$$\left[D^{t+\Delta t} + \frac{B^{t+\Delta t}}{\Delta t}\right]\{H^{t+\Delta t}\} = \frac{B^{t+\Delta t}}{\Delta t}\{H^t\}, \quad (6)$$

由于系数矩阵 $[D]$, $[B]$ 都依赖于 $H^{t+\Delta t}$, 而 $H^{t+\Delta t}$ 又是未知量, 故需要采用迭代求解^[20,21].

1.3 模型验证

为检验饱和-非饱和渗流模型的可靠性, 本文采用文献[22]中介绍的砂槽模型试验资料进行了渗流场分析. 文献[22]介绍了赤井浩一等作者的砂槽模型长 315 cm, 宽 23 cm, 高 33 cm. 模型材料为均匀砂, 孔隙率为 0.44, 饱和渗透系数为 3.3×10^{-3} m/s, 非饱和砂土的饱和度、吸力、相对渗透系数关系如表 1 所示. 初始条件采用上下游水位均为 10 cm 的平衡态, 在时间 0 s, 上游水位骤升至 30 cm, 计算结果(实线)与试验结果(黑点)比较见图 1 所示, 可以看出, 计算结果与试验值符合良好, 说明本文建立的渗流模型可以很好模拟坡体内的饱和-非饱和和渗流过程.

表 1 砂土的土水特征关系

饱和度	吸力/kPa	相对渗透系数/ k_0
1	0	1
0.82	0.325	0.97
0.64	0.65	0.94
0.50	0.91	0.20
0.45	1.0	0.13
0.18	10.0	0.01

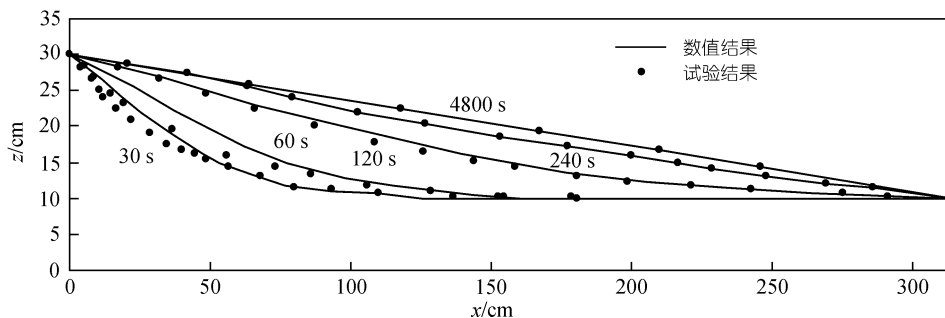


图 1 自由水面数值解与沙槽模型试验结果比较

2 边坡稳定性分析模型

极限平衡法是最广泛采用的稳定性分析方法, 并通过长期的工程应用验证了这一方法的有效性, 该方法可以简便地考虑降雨入渗引起的重力场、孔隙水压力场变化以及土体软化的影响. 本文采用满足所有静力平衡条件的极限平衡法, 以土条为隔离体, 其受力分析如图 2 所示.

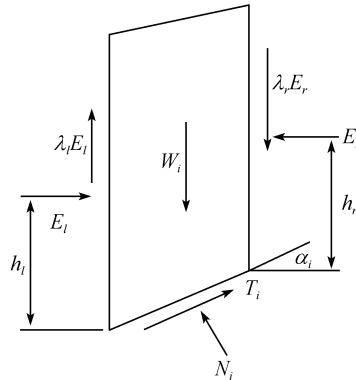


图 2 土条受力分析图

根据力平衡条件得

$$E_r = \frac{\left[\begin{aligned} &(W_i - c_i l_i \sin \alpha_i / F + U_i \tan \varphi_i \sin \alpha_i / F)(\tan \varphi_i \cos \alpha_i / F - \sin \alpha_i) \\ &- (-c_i l_i \cos \alpha_i / F + U_i \tan \varphi_i \cos \alpha_i / F)(\cos \alpha_i + \tan \varphi_i \sin \alpha_i / F) \\ &+ E_l (\cos \alpha_i + \tan \varphi_i \sin \alpha_i / F - \lambda_l \tan \varphi_i \cos \alpha_i / F + \lambda_l \sin \alpha_i) \end{aligned} \right]}{\left[\cos \alpha_i + \tan \varphi_i \sin \alpha_i / F - \lambda_r \tan \varphi_i \cos \alpha_i / F + \lambda_r \sin \alpha_i \right]}, \quad (7)$$

式中 W_i 为土条自重, c_i 为黏聚力, φ_i 为摩擦角, U_i 为土条底部水压力, l_i 和 α_i 分别为土条底部长度和倾角, F 为安全系数, E_l 和 E_r 分别为土条左右两侧水平作用力的大小.

以土条的底部中点为取矩中心, 建立土条的力矩平衡方程. 假定 N_i 作用在土条底部中点, 当计算土条较宽时, 土条重心作用线不一定通过土条底部中点, 因此要考虑重力对力矩的影响:

$$h_r = \frac{E_l}{E_r} \left(h_l - \frac{\Delta x}{2} \tan \alpha_i + \lambda_l \frac{\Delta x}{2} \right) + \frac{W_i}{E_r} (x_G - x_l) + \frac{\Delta x}{2} (\lambda_r - \tan \alpha_i), \quad (8)$$

式中 x_G 为土条重心横坐标, x_l 和 x_r 分别为土条左右侧面横坐标, Δx 为土条宽度, h_l 和 h_r 分别为土条左右两侧作用点的位置. 左右边界处力的大小、作用点均已知, 通过(7)和(8)式由每个土条左侧力的大小、作用点求右侧, 依次递推, 直到右边界为止, 通过限定右边界力的大小和作用点位置进行求解, 最终求得安全系数 F .

3 实例分析

3.1 农机技校滑坡体概述

农机技校滑坡体位于重庆市万州区沙河子片区, 滑坡体前缘临长江二级支流长生河, 为三峡工程一期水位影响范围. 近年来, 农机技校滑坡体出现变形迹象, 滑坡体上建筑物普遍出

现拉裂现象, 并在继续发展. 滑坡体东西长 340 m, 南北宽 425 m, 地形坡角一般为 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$, 面积 105200 m^2 , 滑体平均厚度 14.20 m , 体积 1496680 m^3 , 属于巨型滑坡. 图 3 为滑坡体中 3-3 地质剖面^[15], 已知滑体的天然重度为 20.8 kN/m^3 , 饱和重度为 21.0 kN/m^3 . 滑带土的抗剪强度指标, 天然状态下: $c = 20\text{ kPa}$, $\varphi = 10^{\circ}$; 饱和状态下: $c = 15.6\text{ kPa}$, $\varphi = 9.27^{\circ}$.

3.2 降雨资料及坡体计算条件

根据奉节气象站 1957~1988 年共 32 年间每年雨季(5~10 月)降雨量及每年最大一次连续降雨量资料分析^[16], 1982 年雨季降雨量最大(图 4), 为 1396.4 mm , 是多年雨季降雨量平均值 877.8 mm 的 1.59 倍; 而最大一次连续降雨也发生在 1982 年 7 月, 雨量为 307.6 mm . 吴梦喜等人^[22]通过分析得出: 1982 年雨季降雨量为 40.7 年一遇, 雨季最大一次降雨为 83.9 年一遇. 故本文采用 1982 年雨季的降雨监测资料来模拟整个雨季降雨过程, 以反映最可能诱发滑坡的丰雨年降雨对边坡渗流场及稳定性的影响.

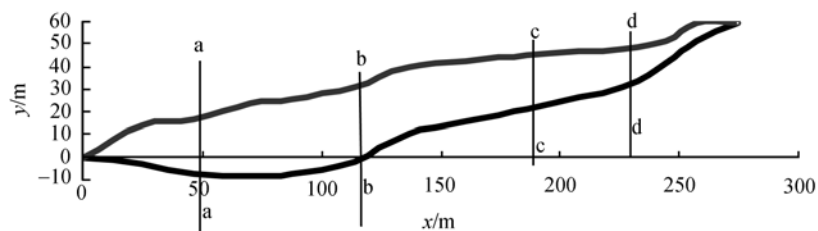


图 3 农机技校滑坡体 3-3 地质剖面

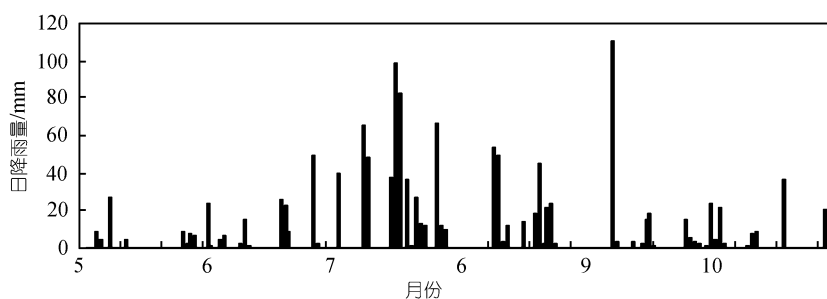


图 4 奉节气象站 1982 年雨季日降雨量

由于缺少实际地下水位的监测资料, 假定图 3d-d 断面处地下水位距滑动面 7.6 m , 且在整个计算过程中保持不变, 近似反映滑坡体后缘对滑坡体地下水的补给; 滑坡体前缘由于与河流相接, 计算时取定水头; 滑坡体表面接受降雨补给, 取流量边界, 当降雨强度大于入渗率时, 坡面取孔隙水压力为 0, 多余水分以坡面流的形式排走; 滑坡体底滑面为不透水边界. 滑坡区地下水以松散岩类孔隙水为主, 地层岩性以粉质黏土为主, 夹砂泥岩碎块石. 根据现场注水试验测定, 滑坡体渗透系数为 $0.8\sim 1.5\text{ m/d}$. 计算时假定滑坡体为均匀粉质黏土, 饱和渗透系数为 1.0 m/d , 非饱和渗透系数与孔隙水压力关系及土水特征曲线采用工程类比法^[23], 如图 5 所示.

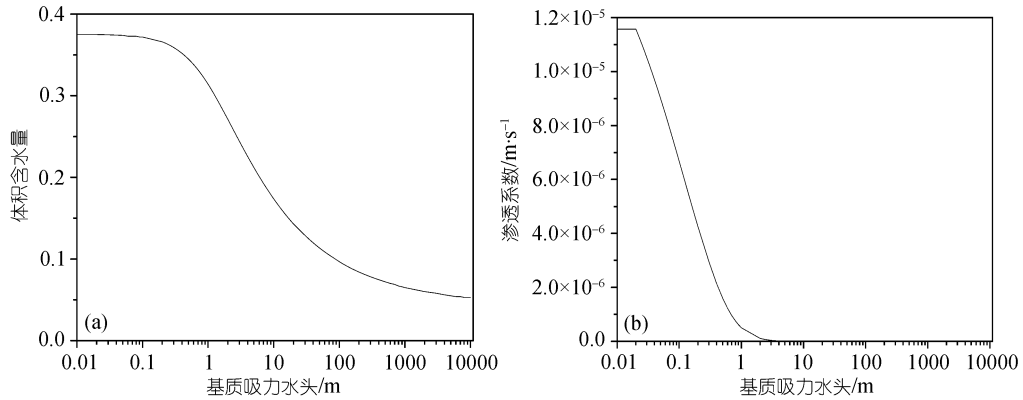


图5 非饱和渗透系数与孔隙水压力关系及土水特征曲线采用工程类比法
(a) 土水特征曲线; (b) 非饱和区渗透系数与孔隙水头关系

3.3 模拟计算结果及分析

3.3.1 均匀土体假设模拟

假定滑坡体土体均匀, 没有裂隙及大孔隙存在; 不考虑植被对降雨的截留以及地表蒸发等影响; 同时假定日降雨量均匀分布于 24 h. 采用以上这些假定计算的结果为最不利情况. 采用平衡态的渗流场作为初始渗流场, 然后根据降雨监测资料模拟降雨过程. 图 6 所示为图 3a-a 和 c-c 断面处孔隙水压力分布的模拟结果. 可见, 随着降雨过程, 雨水不断入渗进入坡体内部, 使得坡体上部含水量逐渐增加, 孔压不断增大, 并逐渐影响到下层, 说明降雨引起的入渗是一个由表层逐步向下发展的过程. 同时可以看到, 即使是丰雨年降雨对地下水水位的影响也是很小的. 图 7 为滑坡体安全系数变化情况, 可见滑坡体的稳定性总体趋势是逐渐降低的, 安全系数由最初的 1.052 降低为最终的 1.037, 前期主要是由于雨水入渗引起的土体自重增加造成的, 后期是滑带孔隙水压力的轻微增加和土体自重增加共同作用的结果. 通过图 7 还看到, 7 月末

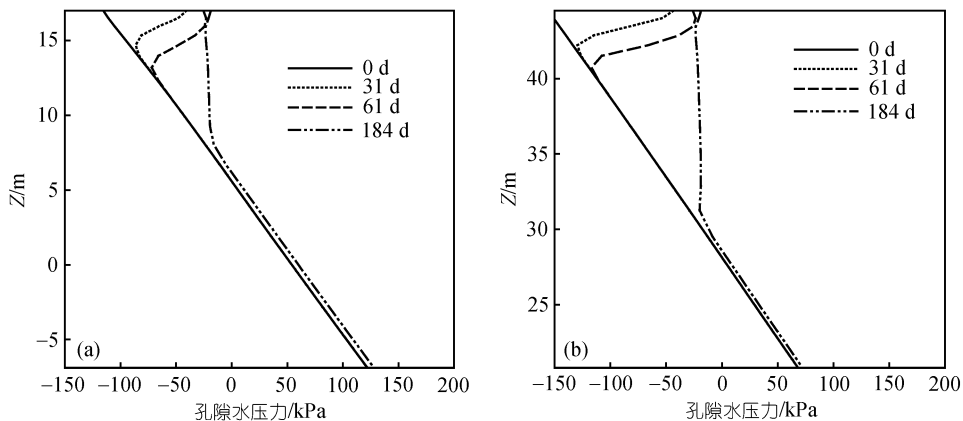


图6 雨季孔隙水压力分布变化情况
(a) a-a 断面; (b) c-c 断面

安全系数比 8 月末低, 这是由 7 月份的大降雨引起的. 但是总体上降雨引起的安全系数降低很小, 最多仅降低了 1.4%.

进一步分析 7 月份渗流场及稳定性情况, 图 8 所示为 a-a 和 c-c 断面处孔隙水压力分布的模拟结果, 图 9(b) 为滑坡体安全系数变化情况. 模拟结果显示, 包含 83.9 年一遇的暴雨情况下, 也仅仅是影响表层的孔隙水压力分布. 通过对渗流场详细分析还发现, 由于图 3d-d 断面至滑坡体顶端土体较薄, 暴雨期间降雨会入渗到滑带, 当暴雨过后, 这部分地下水会向下排泄.

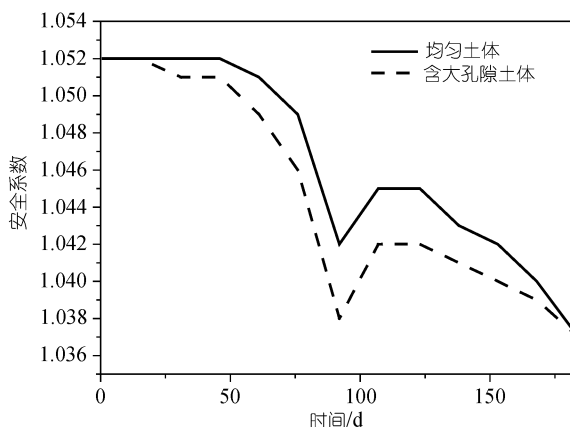


图 7 雨季滑坡体安全系数变化情况

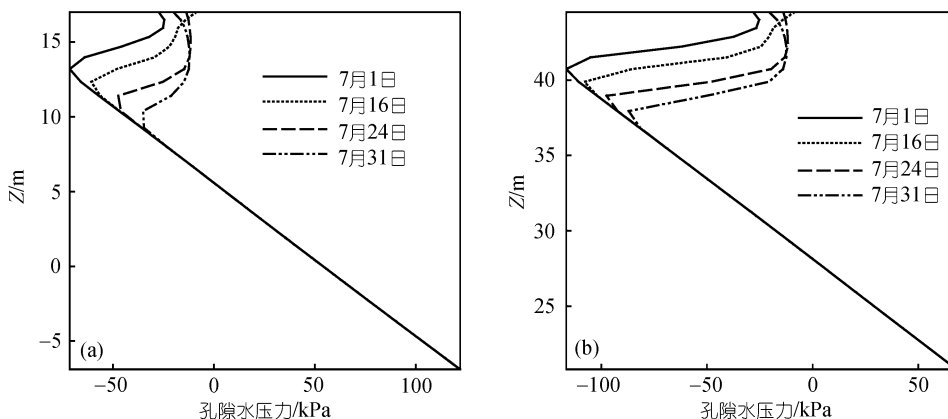


图 8 1982 年 7 月孔隙水压力分布变化情况

(a) a-a 断面; (b) c-c 断面

这就是图 7 和图 9(b) 安全系数先降低后升高的原因.

可见, 对于均质边坡, 降雨的影响主要是浅层的, 影响深度有限, 很难引起深层地下水位的明显变化. 这也从反面说明, 一场降雨引起的地下水位变化, 肯定存在其他的渗流机制, 其中大孔隙渗流、裂隙渗流是最重要、最可能的因素, 本文对这一问题进行了进一步的分析.

3.3.2 含大孔隙土体假设模拟

由于土体介质的复杂性, 土体中可能含有大量的大孔隙. 大的孔隙为雨水的入渗提供了优先路径, 使水分快速地补给到地下水. 由于不可能准确地知道大孔隙的大小及分布情况, 准确地描述大孔隙和水分在其中的渗流情况是非常困难的. 本文仅做初步分析, 假定当日降雨量超过 10 mm 时, 降雨量的 10% 直接补给到地下水, 来近似表示大孔隙的作用. 图 9(c) 所示为 7 月 c-c 断面底滑面孔隙水压力随降雨过程的变化情况, 可见在没有大孔隙时, 滑面处孔隙水

压力没有变化; 当存在大孔隙部分雨水直接补给地下水时, 会使孔隙水压力增大, 同时随着降雨情况的变化略有波动. 在这种情况下, 滑坡体的安全系数如图7和图9(b)所示. 可见大孔隙的存在会引起滑动面孔隙水压力的变化, 从而使滑坡体相对于均匀土体的情况安全系数降低更多, 更加不稳定, 但是总的来说对边坡的稳定性影响也不是很大, 相对均质土体安全系数最多低 0.002. 可见土体中仅含有大孔隙也很难在暴雨情况下引起渗流场的很大变化, 从而诱发滑坡的发生.

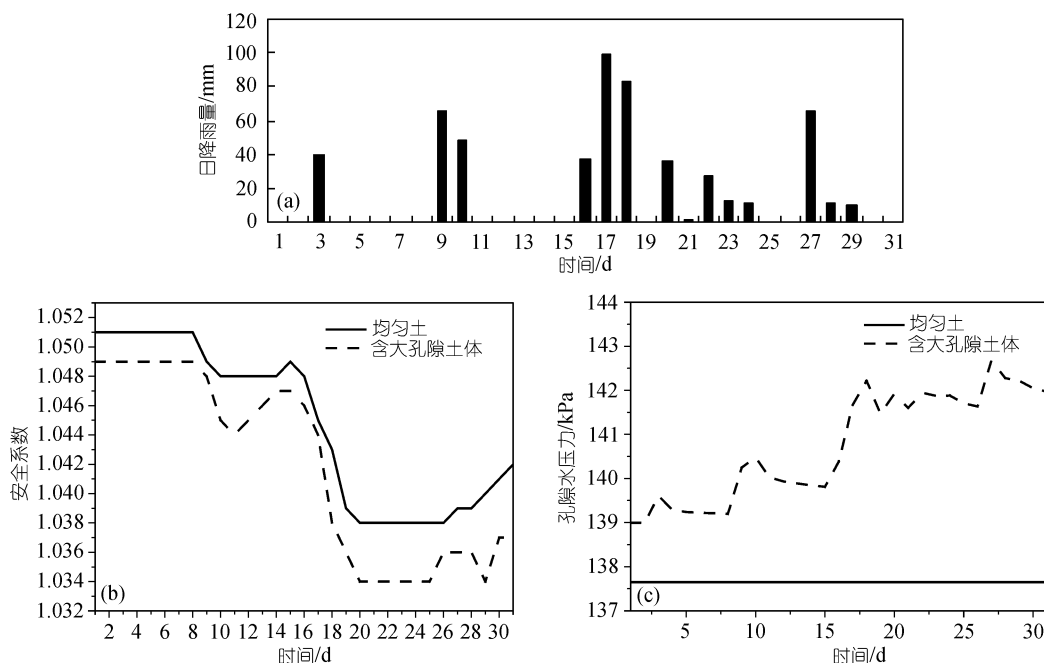


图9 1982年7月降雨对坡体的影响

(a) 7月份日降雨量情况; (b) 均匀土体与含大孔隙土体安全系数对比; (c) b-b断面底滑面均匀土体与含大孔隙土体孔隙水压力变化情况对比

3.3.3 含贯穿裂隙土体假设模拟

对于大量的滑坡体, 由于滑坡体的蠕动会产生大量的贯穿张拉裂隙、剪切裂隙. 当降雨强度大于土体的入渗能力时就会产生坡面流, 坡面流受地形影响在滑坡体表面会产生径流汇集现象^[24], 将会引起大量的水分沿裂隙入渗. 本文考虑极端情况, 假定贯穿裂隙位于图3d-d断面处, 7月16~20日暴雨期间由于坡面流汇集使裂隙中充满水. 图10中实线为均匀坡体7月20日地下水位情况, 虚线为贯穿裂隙充满水情况下7月20日地下水位情况. 可以看出当裂隙充满水时, 在很短的时间内就会使裂隙附近很大范围内水压力升高, 同时贯穿裂隙中的水还对滑坡体有下推力. 这些将对滑坡的稳定性产生非常不利的影响, 是最容易引起深层滑坡的情况. 图11所示为安全系数变化情况, 可见当裂隙充满水时, 坡体稳定性比均质坡体差很多, 安全系数最终小于1, 边坡开始失稳. 所以暴雨期间坡面流沿贯穿裂隙的入渗可能是引起深层滑坡的重要原因.

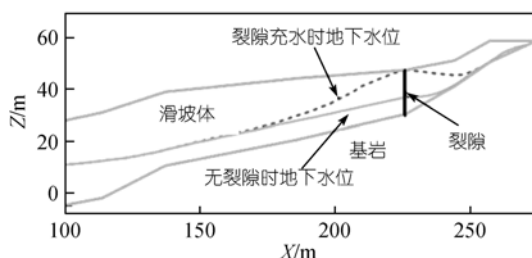


图 10 暴雨情况下, 均匀土体与含贯穿裂隙土体地下水位对比. 坡面流汇集贯穿裂隙充满水, 裂隙附近很大范围内水压力会升高

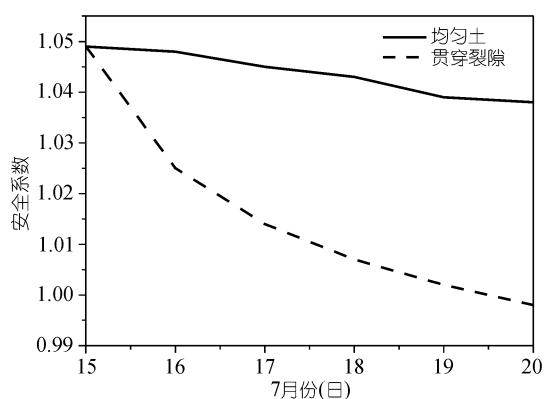


图 11 暴雨情况下, 均匀土体与含贯穿裂隙土体安全系数对比

4 结论

本文采用有限元方法和极限平衡法建立了边坡渗流与稳定性分析耦合模型, 利用 1982 年奉节气象站降雨资料对重庆万州农机技校滑坡体丰雨年雨季渗流场及稳定性进行了初步探讨, 得到如下结论:

(i) 均质边坡, 降雨的影响主要在湿润峰以上部分, 对下层孔隙水压力影响微弱. 对本文算例安全系数由 1.052 降至 1.037. 故可以说, 降雨对均匀坡体的影响范围有限, 多会引起浅层滑坡.

(ii) 当边坡存在大孔隙时, 水分会沿大孔隙快速补给地下水. 与均质边坡相比较, 明显增强了对渗流场和孔隙水压力场的影响, 将大大增强滑坡体的不稳定性, 在本文模拟情况下, 相对均质土体安全系数最多低 0.002, 所以考虑大孔隙对稳定性的影响也非常有限.

(iii) 当边坡存在贯穿裂隙时, 暴雨情况下坡面流沿裂隙迅速入渗, 裂隙附近很大范围内水压力升高, 产生较高水压力, 并逐步影响到边坡一定范围内. 同时裂隙中水压力还对滑坡体产生下推力, 对边坡的稳定最为不利, 最容易引起深层滑坡. 在本文模拟情况下, 暴雨使边坡安全系数小于 1, 深层滑坡发生.

本文研究中, 仅仅假设了单个裂隙的情况, 并对入渗过程和土体做了简化处理, 与真实情

况还有一定差异. 但其研究结果仍然对深化渗流对深层滑坡影响的机理具有重要作用, 并将进一步推动更符合实际复杂情况的研究.

参考文献

- 1 谢守益, 徐卫亚. 降雨诱发滑坡机理研究. 武汉水利电力大学学报, 1999, 32(1): 21—23
- 2 Iverson R M. Landslide triggering by rain infiltration. Water Resour Res, 2000, 36(7): 1897—1910 [\[DOI\]](#)
- 3 徐则民, 黄润秋, 范柱国. 滑坡灾害孕育—激发过程中的水—岩相互作用. 自然灾害学报, 2005, 14(1): 1—9
- 4 吴宏伟, 陈守义, 庞宇威. 雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究. 岩土力学, 1999, 20(1): 1—14
- 5 Ng C W W, Wang B, Tung Y K. Three-dimensional numerical investigations of groundwater responses in an unsaturated slope subjected to various rainfall patterns. Can Geotech J, 2001, 38: 1049—1062 [\[DOI\]](#)
- 6 Ng C W W, Shi Q. A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage. Comput Geotech, 1998, 22(1): 1—28 [\[DOI\]](#)
- 7 Rahardjo H, Li X W, Toll D G, et al. The effect of antecedent rainfall on slope stability. Geotech Geol Eng, 2001, 19: 371—399 [\[DOI\]](#)
- 8 Tsaparas I, Rahardjo H, Toll D G, et al. Controlling parameters for rainfall-induced landslides. Comput Geotech, 2002, 29: 1—27 [\[DOI\]](#)
- 9 姚海林, 郑少河, 陈守义. 考虑裂隙及雨水入渗影响的膨胀土边坡稳定性分析. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 606—609
- 10 袁俊平, 殷宗泽. 考虑裂隙非饱和膨胀土边坡入渗模型与数值模拟. 岩土力学, 2004, 25(10): 1581—1586
- 11 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 1—15
- 12 van Asch Th W J, Buma J, van Beek L P H. A view on some hydrological triggering systems in landslides. Geomorphology, 1999, 30: 25—32 [\[DOI\]](#)
- 13 van Asch Th W J, Hendriks M R, Hessel R, et al. Hydrological triggering conditions of landslides in varved clays in the French Alps. Eng Geol, 1996, 42: 239—251 [\[DOI\]](#)
- 14 Fan P, Liu Q Q, Li J C, et al. Numerical analysis of rainfall infiltration in the slope with a fracture. Sci China Ser E-Tech, 2005, 48: 107—120
- 15 时卫民, 郑颖人. 库水位下降情况下滑坡的稳定性分析. 水利学报, 2004, 3: 76—80
- 16 李晓, 张年学, 廖秋林, 等. 库水位涨落与降雨联合作用下滑坡地下水动力场分析. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3714—3720
- 17 黄俊, 苏向明, 王炜平. 土坝饱和-非饱和渗流数值分析方法研究. 岩土工程学报, 1990, 12(5): 30—39
- 18 Celia, M A, Bouloutas E T. A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation. Water Resour Res, 1990, 26(7): 1483—1496
- 19 Rathfelder K, Abriola L M. Mass conservative numerical solutions of the head-based Richards equation. Water Resour Res, 1994, 30(9): 2579—2586 [\[DOI\]](#)
- 20 Berg P. Long-term simulation of water movement in soils using mass-conserving procedures. Adv Water Resour, 1999, 22(5): 419—430 [\[DOI\]](#)
- 21 Huang K, Mohanty B P, van Genuchten M T. A new convergence criterion for the modified Picard iteration method to solve the variably saturated flow equation. J Hydrol, 1996, 178: 69—91 [\[DOI\]](#)
- 22 吴梦喜, 高连士. 饱和-非饱和土体非稳定渗流数值分析. 水利学报, 1999, 12: 38—42
- 23 Fei C, Keizo U. Numerical analysis of rainfall effects on slope stability. Int J Geomech, 2004, 4(2): 69—78 [\[DOI\]](#)
- 24 Liu Q Q, Li J C. Modeling on runoff concentration caused by rainfall on hillslopes and application in Maoping slope. Pro Nat Sci, 2006, 16(10): 1056—1065 [\[DOI\]](#)