

# 降雨入渗作用下土质斜坡稳定性的数值分析

陈芳<sup>1</sup>, 田凯<sup>2</sup>

(1. 江西省水利科学研究院, 南昌 330029; 2. 成都地质矿产研究所, 成都 610081)

**摘要:**为分析研究降雨入渗作用下斜坡的稳定性,采用 Phase2 有限元软件,运用二维渗流数值模拟计算方法,建立能考虑渗流场对斜坡稳定性影响的数值模型,对降雨条件下的斜坡位移场、应力场和孔压场的变化情况进行分析。研究表明:降雨入渗会导致土质斜坡中土体孔隙水压力增加、基质吸力减小、土体的抗剪强度降低,影响了该斜坡的稳定性;随着降雨时间的增长,斜坡的安全系数会减小;当斜坡位移最大时,雨水继续下渗,表层坡体的基质吸力开始有所增加,下渗的水随着地下水饱和区流出,土体的含水量则相应的有所减小,容重也减小,土质斜坡稳定性又得到了延缓。

**关键词:**道路工程;降雨入渗;数值模拟;稳定性分析;渗流场

**中图分类号:** TU441.33

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-5485(2013)12-0069-05

众所周知,大气降雨在一定程度上会触发和打破斜坡原本的力学平衡,从而造成斜坡的变形甚至失稳破坏。目前国内外学者<sup>[1-5]</sup>对降雨入渗作用下斜坡稳定性影响研究主要有2方面的问题:第一,多考虑斜坡表层自重的增加以及入渗深度内负孔隙水压力的减小,忽略影响斜坡失稳的其他因素,以致不能全面分析斜坡的稳定性;第二,采用自行编制的软件程序进行斜坡稳定性计算,由于程序的针对性和复杂性,很难得到推广。本文通过对降雨引起该斜坡的变形滑动进行了现场的技术勘探、调研、监测和土工试验,进行数值模拟计算分析,全面分析降雨入渗作用下斜坡稳定性变化规律,为今后斜坡失稳的预测和治理措施提供参考。

危险的滑源区C区关键部位进行了研究分析,斜坡土体较为松散而且成分较为复杂,下部基岩为泥岩与砂岩互层,鉴于此,将滑源区斜坡体概化为3部分:表层滑坡体的土质层、下部滑床基岩岩体层以及中间的强风化破碎带。图1为斜坡地质剖面图。

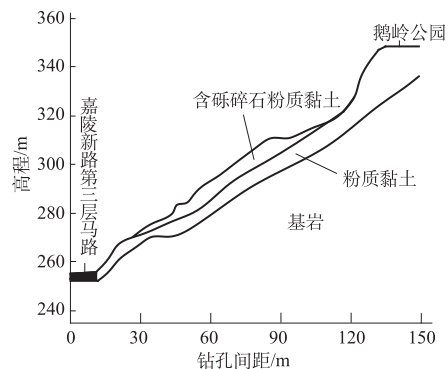


图1 斜坡地质剖面图

Fig. 1 Geological profile of slope

## 1 土质斜坡稳定性的数值计算

### 1.1 斜坡概况

重庆嘉陵新路斜坡滑源区,长约107 m,横向宽约428 m,倾向为330°,坡角为45°,近东西走向,上陡下缓,纵向上呈含台阶状折线型,地形南高北低。该斜坡滑源区的覆盖土层除了局部段表层有0.3~3.5 m厚的填土层外,其余主要为块碎石夹粉质黏土组成,厚0.3~11.4 m;中间为一条强风化基岩破碎带;下面主要为侏罗系中统沙溪庙(J<sub>2</sub>)紫红色泥岩夹砂岩。根据现场的地调资料,斜坡变形破坏主要产生于坡体前缘和中后部,文中选取斜坡体最为

### 1.2 计算模型及计算参数

#### 1.2.1 本构模型的选取

选取 van Genuchten-Mualem 非饱和水分特征模型<sup>[6]</sup>,对降雨条件下饱和-非饱和渗流问题进行分析。

#### 1.2.2 模型参数的选取

(1) 岩土体参数的选取见表1。

(2) 饱和土渗透系数:参考经验数据得各层饱和渗透系数的范围:第1层含砾(碎石)粉质黏土  $4.19 \times 10^{-5} \sim 6.95 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ;第2层粉质黏土

表 1 岩土体物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of rock and soil for calculation

岩性	饱和密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	体积模量/ MPa	剪切模量/ MPa	黏聚力/ MPa	内摩擦 角/( $^{\circ}$ )	抗拉强度/ MPa	泊松比
含砾(碎石)粉质黏土	2 030	1.19	1.19	14.67	13.81		0.25
粉质黏土	2 550	3.28	1.78	35.49	1.90	0.57	0.27
基岩	2 560	5.23	2.84	37.45	3.25	0.94	0.28

$8 \times 10^{-9} \sim 5.5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ; 第 3 层 基岩  $1 \times 10^{-13} \sim 5.5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 。地下初始水位在 3.6 ~ 3.8 m 之间。

(3) 非饱和土渗透系数: 根据斜坡组成岩土体的饱和渗透系数大小和土的粒径分布规律推求其渗透函数, 该斜坡土-水特征曲线和渗透性函数均调用 SEEP/W 软件数据库里面相关土层的函数曲线。

(4) 降雨参数的选取: 等降雨持续时间 24 h 下, 选取降雨强度 2, 4, 6, 8, 10, 12 mm/h。等降雨强度 10 mm/h 下(根据该地区降雨历时资料日最大降雨量 192.9 mm, 选取保守值 10 mm/h)下, 选取持续降雨时间分别为 8, 16, 24, 32, 40 h。

#### 1.2.3 初始条件

仅考虑土体自身重力产生的初始应力场与孔压场, 不考虑其本身构造应力的影响, 将天然情况下变形斜坡的稳定分析计算所得的数据, 其中包括斜坡的初始应力、斜坡的初始孔隙水压力的分布作为降雨条件下岩土体渗流的初始条件。

#### 1.2.4 边界条件

(1) 位移边界条件: 靠近嘉陵江的(模型的左侧)一侧为水位在 3.7 m 的限制边界, 通过 Phase2 软件实现, 顶部下部采用不透水的限制边界, 右部水位 18.4 m 的限制边界, 而降雨边界的坡面则采用流量的边界, 施加在斜坡体表面的节点, 采用节点数据流量来进行控制。

(2) 应力边界条件: 初始应力场采用自重应力场, 加速度为  $10 \text{ m/s}^2$ 。

(3) 渗流边界条件: 坡面为自由渗流面, 其余为不透水边界。

### 1.3 计算方案

#### 1.3.1 假设条件

(1) 将斜坡岩土体看成宏观性连续体以及各向同性的力学模型, 从而不考虑该变形斜坡岩土体内部的裂隙微观性等缺陷带来的影响。

(2) 采用弹塑性的力学模型。

(3) 岩土体的屈服破坏服从摩尔-库伦准则。

#### 1.3.2 数值计算流程

(1) 根据现场实际工程地质情况数据, 将图 1 工程地质剖面图的变形区域简化, 建立符合现场工程地质相关条件的数值模型。图 2 为网格模型, 计

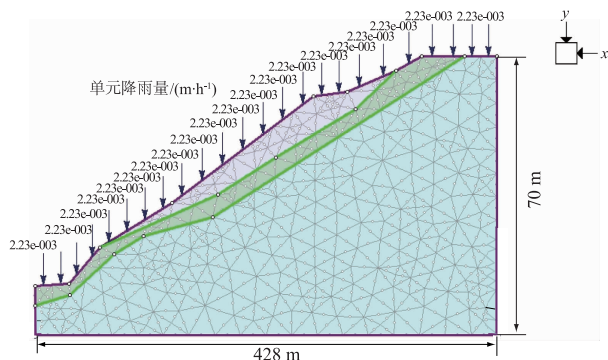


图 2 降雨渗流作用下斜坡有限元计算模型

Fig.2 Finite element model of slope under rainfall infiltration

算网格由 541 个单元, 140 个节点组成, 模型的坐标系  $x$  轴方向为滑坡体的滑动方向,  $y$  轴方向为滑坡体高程的竖直方向, 滑坡模型在纵向方向长 107 m, 横向方向长 428 m, 在竖直方向高 70 m, 高程的范围在 240 ~ 310 m, 上层滑坡体含砾碎石粉质黏土厚度 0.0 ~ 3.5 m, 中间破碎带粉质黏土 3.4 ~ 5.0 m, 如图 2 所示。

(2) 计算天然静力条件下计算出初始孔压场, 运用 Phase2 软件的流固耦合计算模式, 输入相关函数, 施加降雨模型的边界条件, 计算得出降雨下斜坡安全性系数。

## 2 数值计算结果分析

为便于分析该斜坡的位移变化量, 在数值模型潜在变形土体表面 JY-1 和潜在滑带面上 JY-2 设立 2 个监测点(如图 3)。选取降雨持续 24 h, 降雨强度分别为 2, 4, 6, 8, 10, 12 mm/h 的 6 种降雨条件, 计算出 2 个监测点的位移值, 统计生成图 4(a) 的等降雨持续时间 24 h 下位移与降雨强度曲线图。在等降雨强度 10 mm/h, 降雨持续时间 8, 16, 24, 32, 40, 48 h 的 5 种降雨条件下, 计算出 2 个监测点位移值, 统计生成图 4(b) 的等降雨强度 10 mm/h 下位移与降雨持续时间曲线图。根据

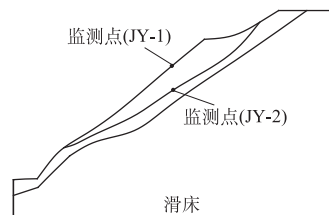


图 3 监测点布置图

Fig.3 Layout of monitoring points

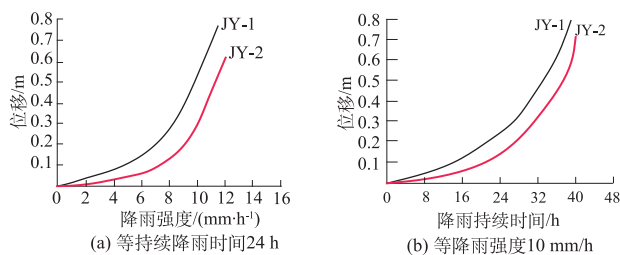


图 4 测量位移与降雨强度和降雨持续时间的关系

Fig.4 Relation of displacement respectively with rainfall intensity and rainfall duration

该地区降雨历时资料日最大降雨量 192.9 mm (保守值 10 mm/h), 选取降雨强度 10 mm/h, 分析降雨持续时间 24 h 非饱和土位移、应力、孔压场、剪应变增量。

## 2.1 位移场计算结果分析

图 5 为总位移云图, 由图可知当降雨量达到 10 mm/h 的时候, 土体中部陡峭处最大位移达到 0.48 m, 在滑坡的中部位移量最大, 由中部至前缘部位逐渐减小, 并且随着深度的增加位移量也逐渐减小。滑坡的滑覆面 1/4 圆弧状 (类似圆弧状), 沿着土层和破碎带分界线向下蠕滑变形, 并在中部和前部逐渐贯通, 在较大的降雨强度下, 最大位移处发生拉裂破坏, 从而向前挤压的推移式滑动。土体受水饱和和容重的增加导致下滑力增加, 使该斜坡处在不稳定或欠稳定状态之中。

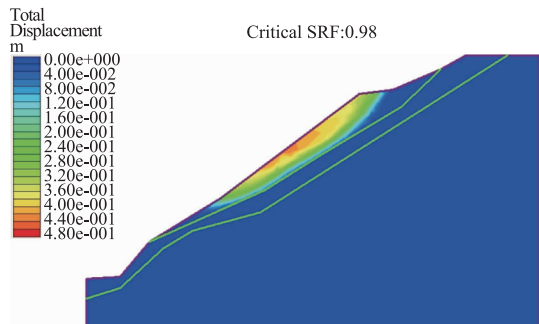


图 5 总位移云图

Fig.5 Nephogram of total displacement

## 2.2 应力场计算结果分析

图 6 为斜坡在此降雨强度下的最大主应力云图和最小主应力云图。由图 6(a) 可知, 坡体内最大主应力为 3.45 MPa, 且由坡面往坡面内部呈层状分布几乎与坡面平行且随深度的增大而增大, 在斜坡后缘小范围内出现了负值, 可见后缘存在拉应力, 其值为 0.15 MPa, 降雨条件下可能发育拉裂缝。由图 6(b) 可知, 坡面最小应力场分布往坡体内呈层状分布, 随深度的增加而增加, 在斜坡体后部有较大范围的拉应力区域, 最大的拉应力值由 0.19 MPa 上升到 0.3 MPa, 表示斜坡比较容易发生拉裂破坏, 这与

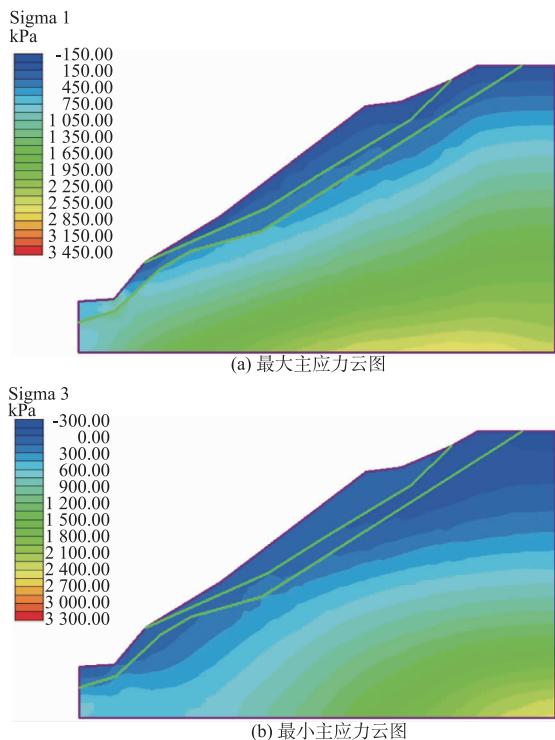


图 6 主应力云图

Fig.6 Nephogram of principal stress

位移计算结果相吻合。

## 2.3 孔压场计算结果分析

图 7 和图 8 分别为孔隙水压力云图和压力水头云图。由图 7 可知, 斜坡孔隙水压力呈层状分布, 由坡体到内部逐渐增大, 最大值为 1.15 MPa, 对应的最大水头值为 115 m, 随着地下水位面升高, 地下水对于斜坡体的托浮力也在增加, 导致斜坡应力不断减小, 不利于斜坡稳定。同时, 随着降雨的入渗使土体饱和度增加, 最不利情况下会接近 100%, 导致斜坡体的滑体自身重度的增加, 有效应力减小, 抗剪强度减小, 进而引发斜坡体的失稳。

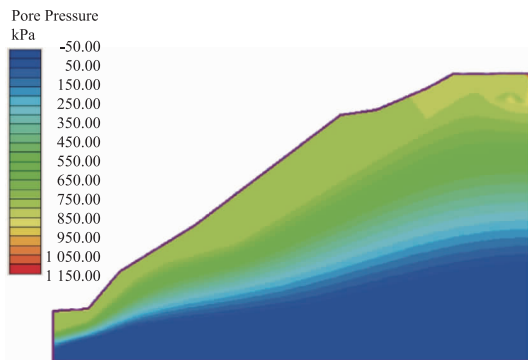


图 7 孔隙水压力云图

Fig.7 Nephogram of pore water pressure

## 2.4 剪应变增量的计算结果分析

图 9 为斜坡体最大剪应变云图, 由图可知, 最大剪应变值为 0.36, 主要集中在斜坡与破碎带的接触



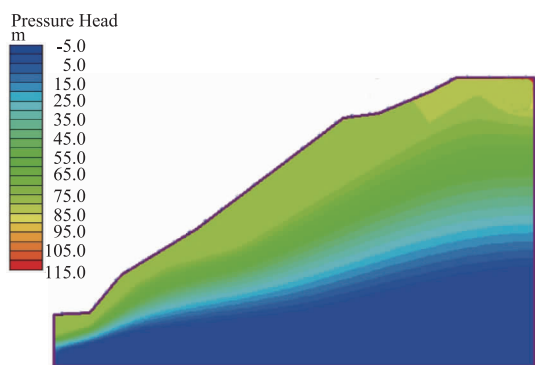


图8 压力水头云图

Fig.8 Nephogram of pressure head

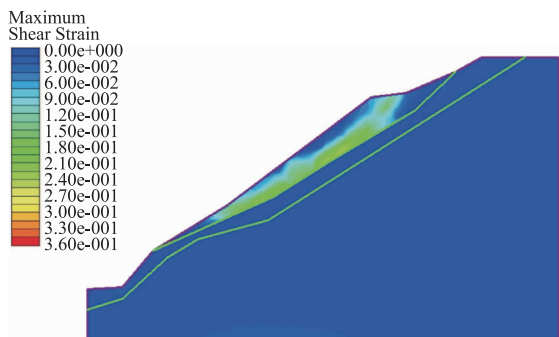


图9 最大剪应变云图

Fig.9 Nephogram of maximum shear strain

面上,降雨条件下斜坡体肩部发生剪切破坏,形成贯通面,造成斜坡失稳。图10为斜坡体塑性应变云图,由图可知,最大塑性应变值为0.16,主要集中在肩部潜在滑动带的接触处。此外,斜坡体上部由拉应力产生的塑性应变在图中也得到了体现。

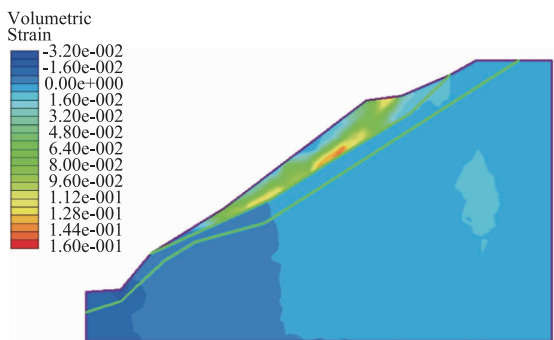


图10 降雨状态下塑性应变云图

Fig.10 Nephogram of plastic strain under rainfall infiltration

### 3 结 语

从上述结果可知:

(1) 在斜坡土体中降雨入渗会引起土体孔隙水压力增加,基质吸力减小,造成土体的抗剪强度降

低,影响了该斜坡的稳定性。

(2) 入渗会直接导致土体的含水量增大,斜坡土体的容重增加,黏聚力和内摩擦角减小,滑动面摩擦因数减小,土体所受到的剪力增大,导致斜坡的安全系数减小到0.98。

(3) 在降雨过程中,降雨时间越长也会导致斜坡的安全系数会减小,文中只表示了最不利斜坡稳定的降雨强度和降雨时间;在斜坡位移达到最大值的时候,降雨的雨水继续下渗,坡体表层的基质吸力开始有所增加,下渗的水随着地下水饱和区流出,土体的含水量则相应的有所减小,容重也减小,该斜坡的稳定性又得到了舒缓。

### 参考文献:

- [1] HOEK E, BROWN E T. Empirical Strength Criterion for Rock Masses[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1980, 106(9): 1013 - 1035.
- [2] 周家文, 徐卫亚, 邓俊晔, 等. 降雨入渗作用下斜坡的稳定性分析[J]. 水利学报, 2008, 39(9): 1066 - 1073. (ZHOU Jia-wen, XU Wei-ya, DENG Jun-ye, et al. Analysis of Slope Stability under Intensive Rainfall[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(9): 1066 - 1073. (in Chinese))
- [3] 吴长富, 朱向荣, 尹小涛, 等. 强降雨条件下土质斜坡瞬态稳定性分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 386 - 391. (WU Chang-fu, ZHU Xiang-rong, YIN Xiao-tao, et al. Analysis of Soil Slope's Transient Stability under Intensive Rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 386 - 391. (in Chinese))
- [4] 周建军, 徐瑞春, 柳景华. 大岩淌边坡降雨-应力-非饱和渗流研究[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(6): 77 - 81. (ZHOU Jan-jun, XU Rui-chun, LIU Jing-hua. Coupling Rainfall-Stress-Unsaturated Seepage for Dayantang[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(6): 77 - 81. (in Chinese))
- [5] 周桂云, 李同春. 饱和-非饱和非稳定渗流作用下岩质边坡稳定性分析[J]. 水电能源科学, 2006, 24(5): 79 - 82. (ZHOU Gui-yun, LI Tong-chun. Rock Slope Stability Analysis under Saturated-Unsaturated Seepage[J]. Water Resources and Power, 2006, 24(5): 79 - 82. (in Chinese))
- [6] VAN GENUCHTEN M T. A Closed Form Equation for Prediction the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1979, 44(5): 892 - 898.

(编辑:姜小兰)

## Numerical Analysis of Soil Slope Stability Under Rainfall Infiltration

CHEN Fang<sup>1</sup>, TIAN Kai<sup>2</sup>

(1. Jiangxi Hydraulic Research Institute, Nanchang 330029, China;

2. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, China)

**Abstract:** Finite element software Phase2 together with two-dimensional seepage numerical calculation method was used to build a numerical model in consideration of the influence of seepage field on slope stability. The displacement field, stress field and pore water pressure field were analyzed. The result indicated that rainfall infiltration resulted in the increase of pore water pressure in the soil, and decreases of matrix suction and shear strength. As rainfall duration increased, slope's safety factor reduced. As slope displacement reached the maximum, matrix suction of the slope surface began to increase due to the further infiltration of rain. And as the water draining through the groundwater saturation zone, the water content and bulk density of soil decreased, which delayed the effect on slope stability.

**Key words:** road engineering; rainfall infiltration; numerical simulation; stability analysis; seepage field

=====

(上接第 64 页)

state of rock slope elastoplasticity. Two seismic waves with the same peak acceleration but different periods and durations were input. The peak accelerations of seismic motion parameters and the mechanism of seismic response for accumulative plastic strain, both widely used in seismic design, were analyzed in consideration of the natural frequency of slope. Result shows that the seismic accumulative plastic strains are distinct when inputting seismic waves with the same peaks but different periods and durations; although the peaks are the same, the seismic effect varies given different durations and spectral characteristics. As a result, in the calculation for slope seismic design, the seismic wave should be chosen discreetly, varying from one case to another, otherwise it would cause unreal seismic safety evaluation result.

**Key words:** rock slope; seismic response; duration of seismic wave; accumulative plastic strain

=====

(上接第 68 页)

and leads to geological hazards. Several methods of slope stability analysis, namely, Sarma Method, Imbalance Thrust Force Method, and Linear Sliding Surface Method, are compared in this paper. With the bedding rock slope at the bridge foundation of Shujiacao Bridge of Yichang-Badong Highway as an example, the rock slope stability was analyzed by these three methods. The analyzed results were compared with the actual rock mass structure and damage of this bedding rock slope. The comparison shows that: the result by Sarma method consists well with the actual situation of slope failure, it is more suitable for analyzing bedding rock slope with joint fissures; whereas the calculation result of Imbalance Thrust Force Method is larger, and Linear Sliding Surface Method is conservative and smaller.

**Key words:** bedding rock slope; Sarma method; imbalance thrust force method; linear sliding surface method; slope stability assessment