

文章编号:1005-0523(2011)03-0044-05

## 基于非饱和非稳定渗流场的滑坡稳定性分析

郑明新<sup>1</sup>, 张卢明<sup>1,2</sup>, 方 焘<sup>1</sup>, 刘伟宏<sup>1</sup>, 孔祥营<sup>1</sup>

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西南昌 330013; 2. 核工业西南勘察设计研究院有限公司, 四川成都 61006)

**摘要:**以鹰厦铁路K290滑坡为原型, 基于降雨入渗情况下滑坡体呈饱和-非饱和渗流状态下, 通过计算得到坡体孔隙水压力和体积含水量随降雨及地下水位变化的基本规律, 进一步导入SIGMA/W程序并依据坡体孔隙水压力和体积含水量及地下水位变化特征分析了滑坡应力场, 探讨了降雨强度、降雨持时和水位变化对滑坡体稳定性的影响。

**关键词:**滑坡; 非饱和和滑带土; 非非稳定渗流场; 应力场; 稳定性分析

**中图分类号:** TU472

**文献标识码:** A

降雨入渗导致地下水位上升常常诱发滑坡, 主要表现在岩土体由非饱和、非稳定渗流对坡体稳定产生的影响。目前关于滑坡稳定性分析方法主要有极限平衡法、极限位移分析法和有限元法等<sup>[1]</sup>。其中极限平衡法由于简便实用得到了广泛使用, 但该方法将滑动体作为刚性体对待, 没有考虑岩土体的应力应变特性, 并且整个滑动面假定同时达到屈服; 极限位移分析法在一定程度上考虑了土体的应力应变特征, 但只能确定出假定滑动面上的应力场和应变场, 同样不能考虑土体变形及其对稳定性的影响; 而有限元法在坡体稳定性分析时则可以预先假定滑动面位置和形状, 并且可采用非线性弹塑性及剪胀性本构模型来计算边坡体内的应力和应变。鉴于目前对降雨入渗引起的地下水水位变化, 特别是对于非饱和、非稳定渗流时坡体稳定性的研究尚不深入, 有必要从渗流计算出发, 考虑渗流特征并利用SIGMA/W程序开展坡体应力分析, 进而探讨降雨强度、降雨持时和水位变化对滑坡体稳定性的影响。

该文以鹰厦铁路K290滑坡为研究对象, 针对滑坡体水位在降雨入渗情况下的非饱和-饱和-非饱和状态的渗流分析, 在掌握坡体孔隙水压力和体积含水量随降雨和地下水位变化基本规律的基础上, 进一步导入SIGMA/W程序并依据坡体孔隙水压力和体积含水量及地下水位变化特征分析滑坡应力场, 进而探讨滑带土基质吸力随深度和时间的变化规律, 从而确定在非饱和、非稳定渗流作用下坡体的稳定状况。

降雨入渗实质是水分在土体饱气带中的运动, 是一个涉及两相流的过程, 即水在下渗过程中驱替空气的过程。大气降水至地面后, 若地表土层或岩层湿度不大, 在分子引力作用下降水被地表介质吸收成为薄膜水。当薄膜水量达到最大值, 入渗的水则充填土中的毛细裂缝形成毛细水, 即毛细水下渗; 当裂缝开度不均匀时, 毛细水只能填充裂隙开度较小的那部分, 开度较大的部分裂缝仍为空气所占据, 介质处于非饱和状态, 从而形成非饱和渗流。土壤水分入渗大体可分为从地表垂直向下垂直入渗或侧向入渗。干土在积水条件下入渗开始时, 一般入渗率*i*很高; 随着入渗的进行, 入渗率则随之逐渐降低, 即当入渗进行到一定时间后, 入渗率趋于一稳定值, 相当于地表体积含水率 $\theta_0$ 的导水率 $k(\theta_0)$ 。

根据非饱和土中水流动的Darcy定律, 得出非饱和土壤水流动的一般基本微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} k_{wx}(\theta_w) \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_{wy}(\theta_w) \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_{wz}(\theta_w) \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{\partial \theta_w}{\partial t} \quad (1)$$

式中: 渗透系数 $k_w(x, y, z)$ 是含水率 $\theta_w$ 的函数。

收稿日期: 2010-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(50668002, 51068006); 江西省科技支撑项目(2009BSB08701)

作者简介: 郑明新(1966—), 男, 教授, 博士, 研究方向为地质与岩土工程。

Fredlund<sup>[2]</sup>提出使用两个独立应力状态变量 $(\sigma - u_a)$ 和 $(u_a - u_w)$ 来描述非饱和土的应力状态,并认为体积含水率的变化由法向应力 $(\sigma - u_a)$ 和基质吸力 $(u_a - u_w)$ 共同引起,并有

$$d\theta_w = -m_1^w d(\sigma - u_a) - m_2^w d(u_a - u_w) \quad (2)$$

式中: $\sigma$ 为总应力; $u_a$ 为孔隙气压力; $u_w$ 为孔隙水压力; $m_1^w$ 为与法向应力 $(\sigma - u_a)$ 变化有关的水的体积变化系数; $m_2^w$ 为与基质吸力 $(u_a - u_w)$ 变化有关的水的体积变化系数。从而可以得到饱和-非饱和渗流控制方程。其中  
稳态流:

$$\frac{\partial}{\partial x} [k_{wx}(\theta_w) \frac{\partial h}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [k_{wy}(\theta_w) \frac{\partial h}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial z} [k_{wz}(\theta_w) \frac{\partial h}{\partial z}] = 0 \quad (3)$$

非稳态流:

$$\frac{\partial}{\partial x} [k_{wx}(\theta_w) \frac{\partial h}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [k_{wy}(\theta_w) \frac{\partial h}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial z} [k_{wz}(\theta_w) \frac{\partial h}{\partial z}] = \rho_w g m_2^w \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

公式(4)将饱和-非饱和区渗流统一考虑到计算中,不仅使计算结果更接近实际,且给数值计算带来方便。

## 1 滑坡体的基本特征及参数的选取

### 1.1 滑坡的基本特征

滑坡体物质组成为强风化砂泥岩,近似概化为砂质粉土,滑带土为粉质粘土,滑床土为砂质粘土。滑坡概化模型如图1。

### 1.2 计算参数及初始边界条件

1) 土体物理力学参数:滑坡体各层物理力学性质参数依据土工试验并结合已有研究成果<sup>[3]</sup>综合确定,各项非饱和参数见表1。

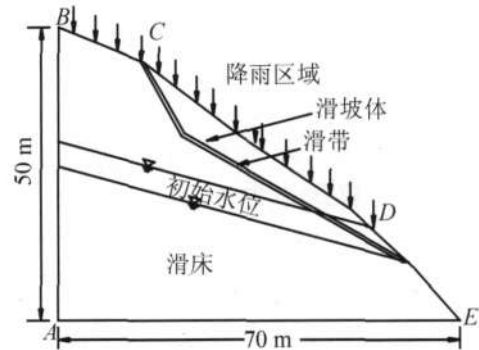


图1 滑坡的断面示意图

Fig.1 Longitudinal section of landslide

表1 非饱和土体物理力学参数一览表

Tab.1 The principal parameters of unsaturated soils

土层名称	天然重度 $\gamma / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	饱和重度 $\gamma_s / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	有效粘聚力 $c' / \text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi' / (^\circ)$	与基质吸力有关的 内摩擦角 $\varphi^b / (^\circ)$
砂质粉土	18	19	8.0	25	20
滑带土	20	22	0.2	15	10
砂质粘土	19	25	10	30	20

2) 初始边界条件:初始左侧地下水位25.0 m高程,右侧10.0 m高程。依据土的渗透性函数(conductivity function)和土水特征曲线<sup>[4-5]</sup>(soil water characteristic curve)来确定滑坡体、滑带土及滑床土的水力学特性参数,见表2。

表2 土的水力学特性的主要参数

Tab.2 Main parameters of hydraulic characteristics of the soil

土的类型	饱和和渗透系数/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	孔隙率	进气值/kPa
砂质粉土(滑坡体)	$4.8 \times 10^{-7}$	0.45	10
滑带土(滑带土)	$3.0 \times 10^{-8}$	0.50	40
砂质粘土(滑床)	$2.0 \times 10^{-5}$	0.40	45

## 2 坡体非饱和和非稳定渗流场和应力场的耦合分析

依据计算得到的饱和-非饱和和渗流场,将孔隙水压力分析结果导入到SIGMA/W分析模块,从而通过

计算可以得到不同降雨强度和水位变化下坡体应力场的变化特征。

### 2.1 有限元网格划分及边界条件

应力场计算网格采用渗流场网格划分,见图2。其中左侧边界采用水平方向位移约束,底部边界采用垂直方向位移约束,模型上部采用自由边界,共划分单元1 434个,节点1 331个。

初始条件:在计算降雨及地下水位变化下坡体的渗流场时,初水位见图1所示。

边界条件:在对瞬态渗流问题进行数值模拟分析时,降雨过程通过选取边界函数取得。取为

1) 模型两侧:地下水位以上边界按零流量边界处理,地下水位以下为常水头边界(地下水位的初始高程)。

2) 入渗边界:在坡体表面假设降雨区域为 $BC$ , $CD$ 取为流量边界或给定水头边界(水位升降时水头小于高程的节点)。当孔隙水压力小于0时为流量边界,反之变为水头边界。通过定义边界函数来实现动态降雨过程的模拟,即设计单位节点流量随时间变化的曲线来模拟动态降雨过程。

3) 模型底面:假设坡体位于不透水基岩上, $AE$ 边界条件为不透水边界条件,即总流量为0。

4) 滑动面:滑动面设为零流量边界。

### 2.2 有限元计算方案

为分析坡体在天然状态和降雨水位变化条件下的位移和应力变化特征,主要分析以下两种工况:

工况1:仅考虑地下水水位的影响,坡体前缘水位保持10.0 m高程,后缘水位保持16.0 m高程,不考虑降雨。

工况2:坡内地下水位变化考虑降雨强度为 $50 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,降雨持时60 d。

### 2.3 应力场计算与结果分析

根据前面计算得到的孔隙水压力场结果,导入到SIGMA/W中,通过计算可分析各工况下坡体位移和应力分布。

在水位不变及无降雨条件下,坡体基本稳定,最大垂直位移为1.2 cm,剪应变主要发生在滑动带土的上部区域(图略)。

从图3可知,在强降雨和地下水位升降条件下,坡体位移和应力发生了显著变化,最大水平位移为

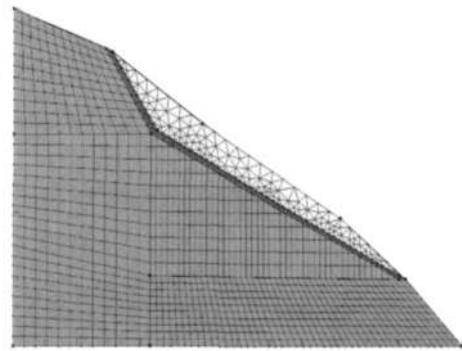


图2 应力场分析的网格划分图

Fig.2 Mesh of stress field analysis

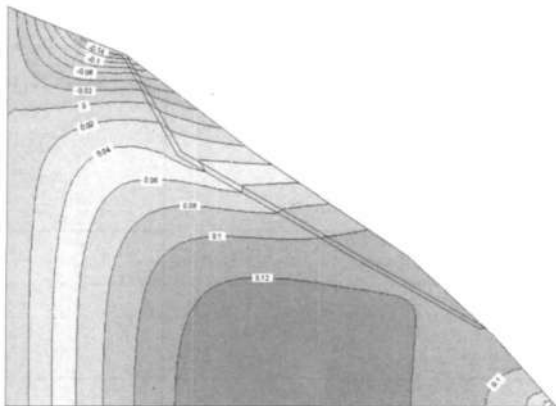


图3 工况2水平位移等值线

Fig.3 Horizontal displacement contour of condition 2

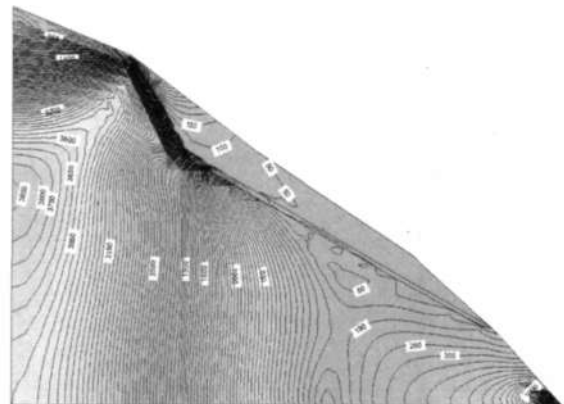


图4 工况2最大剪应力等值线

Fig.4 Maximum shear stress contour of condition 2

14 cm,发生在坡顶滑带裂缝附近。最大垂直位移为8 cm(图略)。从图4可知,降雨及水位变化后,坡体内滑带土(软弱夹层)出现剪应力集中,最大剪应力为2.13 MPa。受剪应力作用,坡体沿软弱夹层发生顺层滑动。从最大剪应变图也可以看出,受降雨及水位变化的影响,随着降雨持时的增加,一定幅值的塑性剪应变区已从坡脚到坡顶沿软弱夹层贯通,坡体将发生浅层滑动。这种情况与 Bolton M. D.等人<sup>[6]</sup>的研究情况较为一致。

### 3 降雨条件下滑坡稳定性分析

在降雨和不同地下水位条件下滑坡饱和-非饱和渗流有限元法得到坡体内瞬态孔隙水压力分布,利用推导的饱和-非饱和土坡稳定性分析的极限平衡条分法<sup>[7-8]</sup>,分别对地下水位、降雨强度、降雨历时三种条件进行分析,计算得到不同降雨条件下相应滑坡的稳定系数。

#### 3.1 地下水位对滑坡稳定性的影响

假设30 d内坡内地下水位从10.0 m上升至16.0 m。坡体稳定系数从1.8降低为1.2,变化规律见图5。从图中进一步可以看出,随着时间的延长,滑坡的稳定系数逐渐减小。

#### 3.2 降雨强度对滑坡稳定性的影响

降雨强度从 $20 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 变化到 $50 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,从图6可以看出,总体上,随着降雨强度的增大,坡体的稳定系数随之降低,但降雨初期稳定系数降低的幅度较大,当降雨强度大于土坡的入渗能力后,超过土体入渗能力的那部分雨水通过坡面径流流走,此时稳定系数随降雨强度变化较小。

#### 3.3 降雨持时对滑坡稳定性的影响

在降雨强度保持不变情况下,降雨持时和边坡的稳定系数关系见图7。从图7可知,前10 d稳定系数降低速度比较快,之后降低较慢。当水位保持稳定时,稳定系数又有所恢复。分析原因是由于降雨前期水位上升,雨水渗入坡体内部导致内部负孔隙水压力大幅度变小、基质吸力减小较大,但在超过一定时间当降雨强度与土体渗透容量相近时,土体液、气压力达到新的平衡并保持一定吸力,又导致稳定系数变化较小。

另据图6和图7可见,在考虑基质吸力基础上,简化Janbu法较普遍极限平衡GLE法和简化Bishop法计算结果更为合理。

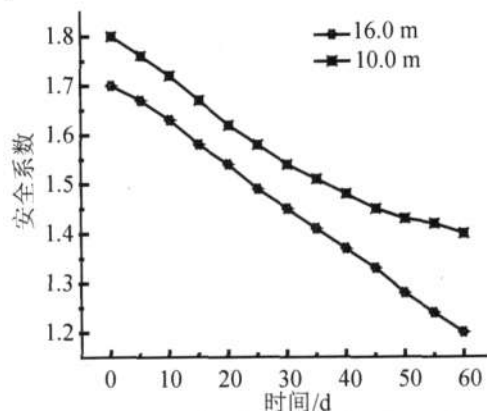


图5 稳定系数随水位变化图  
Fig.5 Safety coefficient with various water levels

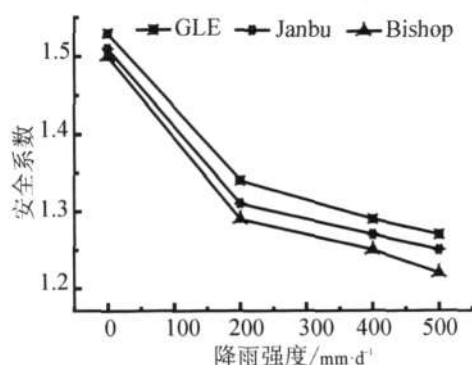


图6 稳定系数随降雨强度变化图  
Fig.6 Safety coefficient with various rainfall intensity

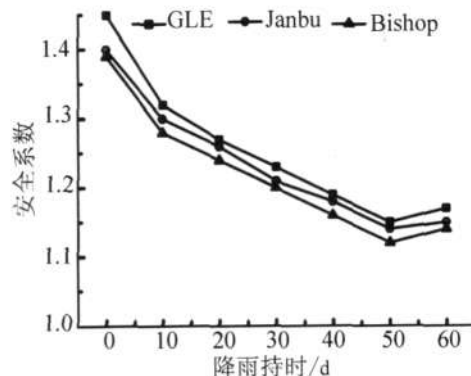


图7 稳定系数随降雨持时变化图  
Fig.7 Safety coefficient with various rainfall duration



## 4 结论

1) 针对鹰厦铁路K290滑坡在降雨入渗下坡体处于饱和—非饱和渗流状态时,依据渗流计算结果并采用SIGMA/W对坡体开展了应力场分析,探讨了降雨强度、降雨持时和水位变化对滑坡体稳定性的影响,得到不同降雨强度和降雨持时对滑坡体稳定性的影响规律。

2) 在考虑基质吸力影响的基础上,采用简化Janbu法、普遍极限平衡GLE法和简化Bishop计算了滑坡在饱和—非饱和渗流状态时的稳定特征,结果表明简化Janbu法计算较普遍极限平衡GLE法和简化Bishop法更为合理。

3) 初步证明当滑坡体在饱和—非饱和渗流状态下,通过计算坡体的孔隙水压力和体积含水量,进一步利用SIGMA/W程序分析滑坡应力特征,是滑坡体非饱和状态稳定性分析的有效途径之一。

### 参考文献:

- [1] MORGENSTERN N R, PRICE V E. The analysis of stability of general slip surfaces [J]. *Geotechnique*, 1965, 15(1): 79-93.
- [2] FREDLUND D G, RAHARDJO H. *Soil mechanics for unsaturated soils* [M]. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1994.
- [3] LIM T T, RAHARDJO H, CHANG M F, et al. Effect of rainfall on matric suctions in a residual soil slope[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33(2): 618-628.
- [4] TINJUM J M, BENSON C H, BLOTZ L R. Soil-water characteristic curves for compacted clays[J]. *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, 2011, 16(11): 1-25.
- [5] 张卢明,郑明新,何敏. 滑坡防治前后滑带土基质吸力特征研[J]. *岩土力学*, 2010, 31(10): 3305-3312.
- [6] BOLTON M D, TAKE W A, WONG P C, et al. Mechanisms of failure in fill slopes after intense rainfall[C]//Lee & Tham. *Proceedings of the International Conference on Slope Engineering*, Hong Kong: Hong Kong University, 2003: 1-25.
- [7] 张卢明. 滑坡防治后滑带土基质吸力特征研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2008.
- [8] 郑明新. 滑坡防治工程效果的后评价方法研究[M]. 南京: 河海大学出版社, 2007.

## Stability Analysis of Unstable Permeability Field and Unsaturated Soil of Landslide

Zheng Mingxin<sup>1</sup>, Zhang Luming<sup>1,2</sup>, Fang Tao<sup>1</sup>, Liu Weihong<sup>1</sup>, Kong Xiangying<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Nuclear Industry Southwest Survey and Design Institute Co. Ltd. Chengdu 61006, China)

**Abstract:** Based on the unsaturated and saturated slip soil with rainfall infiltration, the shear strength of unsaturated slip soil of K290 landslide along the Yingxia railway is analyzed. Then, the basic regularities of pore water stress, volume water content and ground water table are calculated. Furthermore, considering the various water tables, the influence on the parameters of shear strength and the contribution of suction, using SIGMA/W software, the stress field of landslide with the various rain intensity, raining time and the table of water are discussed, which lays a better guide for the analysis on the stability of unsaturated slope.

**Key words:** landslide; unsaturation of slip soil; unstable permeability field; stress field; stability of landslide