

库水位涨落对库岸滑坡稳定性的影响

罗红明^{1,3}, 唐辉明², 章广成², 徐卫亚³

1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北武汉 430071

2. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

3. 河海大学岩土工程研究所, 江苏南京 210098

摘要: 三峡水库正常蓄水后, 库水位在 175~145 m 之间周期性波动, 滑坡地下水渗流状态将会发生较大的改变, 可能导致滑坡失稳。因此, 研究库水位周期性波动下滑坡的稳定性具有十分重要的意义。提出了土水特征曲线的多项式约束优化模型和采用饱和—非饱和渗流数值模型。以赵树岭滑坡为例, 利用有限元数值计算了库水位在 175~145 m 之间波动下地下水渗流场, 将计算得到的孔隙水压力用于滑坡的极限平衡分析, 探讨了库水位上升和下降对库岸滑坡稳定性的影响。研究表明: 多项式优化模型可以很好地拟合非饱和土的土水特征曲线; 库水位上升时滑坡稳定性系数总体逐渐增大, 库水位下降时滑坡稳定性系数总体逐渐减小; 无论是库水位上升还是下降到库水位 155 m 时, 其稳定性系数最小; 同一库水位下, 库水位上升时的稳定性系数比下降时的稳定性系数大。

关键词: 库水位涨落; 土水特征曲线; 饱和—非饱和渗流; 库岸滑坡; 稳定性评价。

中图分类号: P642

文章编号: 1000—2383(2008)05—0687—06

收稿日期: 2008—02—25

The Influence of Water Level Fluctuation on the Bank Landslide Stability

LUO Hong-ming^{1,3}, TANG Hui-ming², ZHANG Guang-cheng², XU Wei-ya³

1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China

3. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hehai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China

Abstract: The water level will periodically fluctuate between 145 and 175 m since normal water level storage in Three Gorges reservoir, while the ground water seepage of landslide will be subject to great changes, which may lead to landslide instability. So it is of great significance to study the influence of water level fluctuation on the bank landslide stability. In this paper, a polynomial constrained optimized model for soil-water characteristic curve is put forward and the saturated-unsaturated seepage flow numerical model is applied. In addition, Zhaoshuling landslide is taken as an example, water seepage fields are simulated by using finite element method with the water level fluctuation between 145 and 175 m. The transient pore water pressures are used for limit equilibrium analyses of landslides with taking the effects of suction on shear strength of unsaturated soils into consideration. Then we discuss the effect of the fluctuation of water level in Three Gorges reservoir on the bank landslide stability. The result shows that a polynomial constrained optimized model may well fit the characteristic curve of soil and water of unsaturated soil. The stability coefficient increases gradually in general along with reservoir water level rise and the stability coefficient decreases gradually in general along with the fall of reservoir water level. However, when the reservoir water level reached 155 m, whether it rises from 145 m or falls from 175 m, the stability coefficient is smallest; while the stability coefficient in period of reservoir water level rising from 145 m to 175 m is larger than that in period of falling from 175 m to 145 m.

Key words: water level fluctuation; characteristic curve of soil and water; saturated and unsaturated seepage; bank landslide; stability evaluation.

基金项目: 中国地质调查局“鄂西恩施地区滑坡形成机制与危险性评价”项目 (No. 1212010640604)。

作者简介: 罗红明 (1980—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事岩土体稳定性评价和岩土工程数值模拟方面的研究工作。

E-mail: luohongming1980@126.com

水库库岸滑坡的稳定性研究对确保水电工程建设的顺利进行及其正常运营具有重大意义。特别是意大利瓦依昂水库滑坡事件之后,各国学者及地质工程师开始重视人类工程活动与周围地质环境之间的相互作用,由此掀开了滑坡研究的新篇章。

由于水库调度运营,库岸边坡外的水位常处于变动之中,岸坡内外水分的相互补给使岸坡内渗流场不断变化,从而使岸坡内的孔隙水压力场也处在不断的变化之中,进而影响到岸坡的稳定性(刘才华等,2005;刘新喜等,2005;张文杰等,2006)。岸坡失稳多是由岸坡外水位的这种变动引起的。有关文献报道了 Roosevelt 湖附近地区 1941—1953 年发生的一些滑坡,结果发现有 49% 发生在 1941—1942 年的蓄水初期,30% 发生在水位骤降 10~20 m 的情况下,其余为发生在其他时间的小型滑坡;在日本,大约 60% 的水库滑坡发生在库水位骤降时期,其余 40% 发生在水位上升时期,包括蓄水初期。随着三峡水库 2002 年的蓄水以及蓄水后的正常运行,库区水位变化将对库区内滑坡的稳定性产生重要影响。因此,研究三峡库区库水位下降和上升作用下滑坡的稳定性问题既是一个复杂的理论课题,也是一个重大的工程应用问题。本文以三峡库区巴东县赵树岭滑坡为例,采用饱和—非饱和数值模拟方法计算了库水位上升和下降情况下的地下渗流场,将计算得到的孔隙水压力用于滑坡的极限平衡分析,探讨了库水位下降和上升对滑坡稳定性的影响。

1 饱和—非饱和渗流模型

根据三峡库区库水位调控方案,库水位在 175~145 m 波动,非饱和区土壤水的运动和饱和区水的运动是相互联系,将两者统一起来即所谓饱和与非饱和问题。当采用水头 h 作为控制方程的因变量,对于各向异性的二维饱和—非饱和渗流控制方程为(张培文等,2003):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right] = m_w \rho_w g \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (1)$$

式(1)中: k_x, k_y 分别为水平和垂直方向的饱和渗透系数; ρ_w 为水的密度; g 为重力加速度; m_w 为比水容量,定义为体积含水量 θ_w 对基质吸力 $(u_a - u_w)$ 偏导数的负值:

$$m_w = - \frac{\partial \theta_w}{\partial (u_a - u_w)}. \quad (2)$$

渗流边界条件如下,
水头边界:

$$k \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\Gamma_1} = h(x, y, t). \quad (3)$$

流量边界:

$$k \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q(x, y, t). \quad (4)$$

2 赵树岭滑坡的渗流场数值模拟

2.1 赵树岭滑坡的基本特征

赵树岭滑坡(唐辉明等,2002;胡新丽等,2006)总体上为巨型勺状滑坡,是经多次局部滑移和弯曲倾倒滑移形成的综合滑体。赵树岭滑体平面上呈不太规则的长方形,中前部大致等宽。滑体东西宽约 550 m,南北长约 900~950 m,面积约 $50 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。滑体表面总体呈阶梯状,400 m 以上为滑坡后缘陡坡。

滑坡区物质总体上可分为一个大层,即表层崩滑体层和基岩。表层崩滑体层主要由岩体经滑移形成的块裂、碎裂岩、含泥碎块石及碎块石组成,主要来源于 T_2b^3 。基岩则以 T_2b^2 紫红色粉砂质泥岩、泥质粉砂岩为主。崩滑体层最大厚度约 50~65 m。最低一个滑带位于 T_2b^3/T_2b^2 界面附近,该滑带形状上基本与地形起伏一致前部及中部较缓后部及下部较陡(图 1)。

地层岩性、地质结构、地形地貌、人类工程活动、地震、降雨等几个因素在短时间内不会改变滑坡整体稳定的状况。水文地质条件是一个随时间变化的因素,特别是三峡水库蓄水及水位波动,将极大地改变滑坡体内的水文地质条件,是影响滑坡整体稳定性的重要因素。

2.2 赵树岭滑坡渗流计算模型

根据赵树岭滑坡的工程地质特征,选择赵树岭

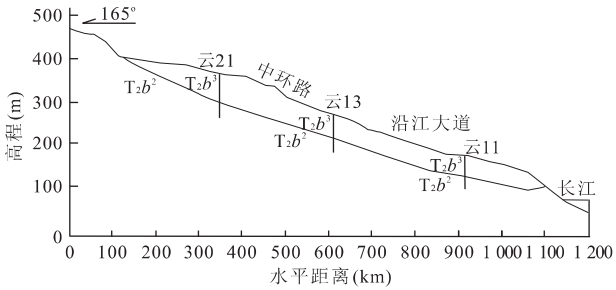


图 1 赵树岭滑坡典型工程地质剖面图

Fig. 1 Engineering geological profile of Zhaoshuling slope

滑坡主滑剖面作为渗流计算主剖面. 采用 Geo-slope 软件 SEEP/W 进行模拟. 渗流边界为: 滑面为隔水边界即为零流量边界, 库水位以上为零流量边界, 库水位以下为定水头边界. 二维有限元模型如图 2 所示, 共划分 828 个单元, 891 个节点.

2.3 渗流计算工况

本文按照三峡水库蓄水后运营时水位调节方案, 设计边界水头函数如下, 水位上升时:

$$H(t) = \begin{cases} 145 + t, & t \in (0 \sim 30 \text{ d}) \\ 175, & t \in (30 \sim 160 \text{ d}) \end{cases} \quad (5)$$

水位下降时:

$$H(t) = \begin{cases} 175 - 0.25t, & t \in (0 \sim 120 \text{ d}) \\ 145, & t \in (120 \sim 240 \text{ d}) \end{cases} \quad (6)$$

2.4 非饱和渗流计算参数的确定

对于非饱和土, 土水特征曲线的数学模型并不是唯一的. 土的类型不同, 所得出的数学模型也有所不同. 依据其数学表达式的形式可分为 4 类: (1) 对数函数的幂函数形式表达的数学模型 (Fredlund and Xing, 1994); (2) 幂函数形式的数学模型 (刘晓敏等, 2001); (3) 土水特征曲线的分形模型 (徐永福和董平, 2002); (4) 对数函数形式的数学模型 (蒋刚等, 2001). 上述 4 类数学模型都是关于基质吸力的函数, 而且在 $\phi = \phi_b$ 处, 4 类数学模型的函数皆有定义且存在 n 阶导数, 因此, 可以将 4 类土水特征曲线的数学表达式在 $\phi = \phi_b$ 处展开为 Taylor 级数.

戚国庆和黄润秋 (2004) 提出了在进气值 ϕ_b 处按 Taylor 级数展开的多项式数学模型, 并与陕北黄土实测的土水特征试验对比, 该数学模型拟合效果较好, 无需确定经验参数, 简单、易于使用. 土水特征曲线一般可以写成以下表达式:

$$\theta = A_0 + A_1\phi + A_2\phi^2 + \cdots + A_n\phi^n, \quad (7)$$

当 $\theta = \theta_s$ (饱和含水量) 时, 基质吸力 $\phi = 0$, 带入

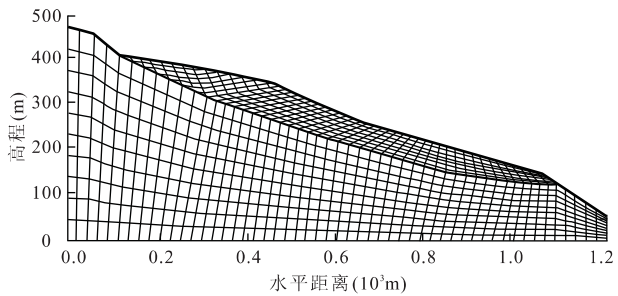


图 2 赵树岭滑坡计算有限元网格

Fig. 2 Finite element mesh for analysis of Zhaoshuling slope

上式得 $A_0 = \theta_s$, 则:

$$\theta = A_s + A_1\phi + A_2\phi^2 + \cdots + A_n\phi^n, \quad (8)$$

式 (8) 中体积含水量 θ 的取值范围为: $\theta \in [0, \theta_s]$, 基质吸力 ϕ 的取值范围为 $\phi \in [0, \phi_{\max}]$. 为了使系数 $\{A\}$ 能够最大程度拟合土水特征曲线, 笔者借助 Microsoft Excel 提供的“规划求解”工具能够很好的解决这个问题.

表 1 是赵树岭滑坡的实验数据, 采用多项式约束优化模型对该滑坡土水特征曲线和非饱和渗透参数进行了计算 (图 3).

根据以上优化模型得到体积含水量 (θ) 与基质吸力 (ϕ) 多项式数学模型为:

$$\theta = -0.530e - 8\theta^4 + 9.17e - 6\theta^3 - 4.54\theta^2 + 8.24e - 5\theta + 0.348. \quad (9)$$

因为 $C(\phi) = \frac{\partial \theta}{\partial \phi}$, 故容水度为:

$$C(\phi) = -2.12e - 7\theta^3 + 2.91e - 5\theta^2 - 9.08\theta + 8.24e - 5. \quad (10)$$

非饱和渗透系数同样采用多项式形式的约束优化模型进行求解, 得到下式:

表 1 赵树岭滑坡的基质吸力 (ϕ)、体积含水量 (θ) 与相对渗透系数 k_r 的关系表

Table 1 Relationship of matrix suction, water content and relative permeability coefficient on Zhaoshuling slope

ϕ (kPa)	θ	k_r
80.1	0.034 8	0.000 562
50.0	0.069 6	0.001 070
40.3	0.104 4	0.005 990
33.7	0.139 2	0.020 400
29.3	0.174 0	0.052 600
0.0	0.348 0	1.000 000

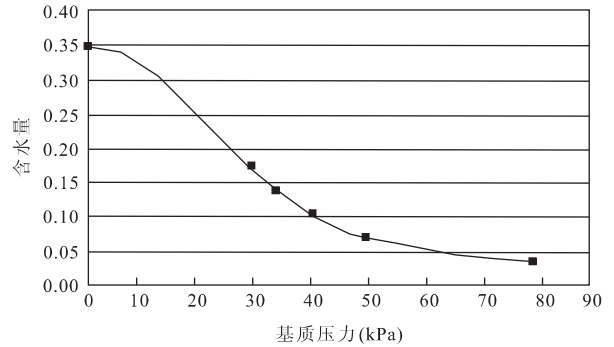


图 3 约束优化与试验数据对比

Fig. 3 Contrast chart of holistic constrained optimization and test data

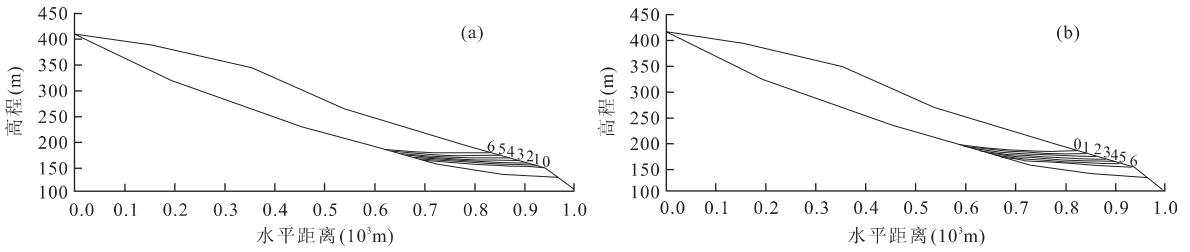


图 4 库水位上升(a)和下降(b)中地下水不同时刻的浸润线

Fig. 4 Groundwater infiltration lines for different time of reservoir water level raise (a) and (b) level drawdown

$$k_r = 8 \times 10^{-8} \phi^4 - 2 \times 10^{-5} \phi^3 + 1.8 \times 10^{-3} \phi^2 - 0.0694 \phi + 1. \quad (11)$$

2.5 渗流模拟结果

(1)库水位上升时地下水渗流特征. 图 4a 中, 曲线数字 0,1,2,3,4,5,6 分别代表初始条件、蓄水 5,10,15,20,25 d 和 30 d 后地下水位位置. 图 4a 表明,当水位上升时,滑坡体内地下水都会出现“倒流”现象,从而浸润线都有略向左弯曲的趋势,地下水位的变化明显滞后于库水位上升;滑坡体地下水自由面在初期变化都很快,随着时间的进行,自由面最终将趋于稳定.

(2)库水位下降时地下水渗流特征. 图 4b 中, 曲线数字 0,1,2,3,4,5,6 分别代表初始条件、蓄水 20,40,60,80,100 d 和 120 d 后地下水位位置. 图 4b 表明,当水位下降时,地下水位的浸润线有略向下弯曲,地下水位变化滞后于库水位下降;滑坡体地下水自由面在初期变化都很快,随着时间的进行,自由面最终将趋于稳定.

3 库水位涨落对滑坡稳定性的影响

3.1 非饱和强度理论

根据 Terzaghi 的有效应力概念,土体内的剪应力仅能由土体的骨架所承担,土体的抗剪强度理应表示为法向有效应力的函数. 因此,饱和土体的 Mohr-Coulombbb 强度准则的表达式为:

$$\tau_f = C' + \sigma' \text{tg}\phi' = C' + (\sigma - u_w) \text{tg}\phi', \quad (12)$$

式(12)中: τ_f 为破坏面上的剪应力; C' 为有效粘聚力; σ 和 σ' 分别是总法向应力和有效法向应力; u_w 为破坏面上的水压力; ϕ 为有效内摩擦角.

工程实践证明,Mohr-Coulomb 有效应力破坏准则适用于饱和土,在非饱和土力学中一般用 $(\sigma - u_a)$ 、 $(u_a - u_w)$ 两个独立应力变量来描述非饱和土的应力状态,所以非饱和抗剪强度也表示成这两个独

立变量的函数. Fredlund 用延伸的 Mohr-Coulombbb 公式表示非饱和土的抗剪强度:

$$\tau_f = C' + (\sigma - u_a) \text{tg}\phi' + (u_a - u_w) \text{tg}\phi^b, \quad (13)$$

式(13)中: $(\sigma - u_a)$ 为破坏面上的净法向应力; $(u_a - u_w)$ 为破坏面上的基质吸力; ϕ^b 表示抗剪强度随基质吸力而增加的速率,数值由固结排水三轴试验获得. 从式(3)可以看出,当土体饱和时,孔隙水压力 u_w 等于孔隙气压力 u_a ,因此基质吸力 $(u_a - u_w)$ 等于零,从而平滑过渡为饱和土的抗剪强度公式. 数值分析中为了便于计算,可以假定 ϕ^b 为常数,并通过变换的取值大小来考察基质吸力对滑坡稳定性的影响.

3.2 考虑基质吸力影响剩余推力法

基于非饱和土力学理论的边坡稳定性极限平衡分析方法则是建立在非饱和土体引伸的 Mohr-Coulomb 强度准则基础上的. 对于库水位升降作用下的滑坡稳定性分析,不仅考虑饱和区内由于库水位波动引起的地下水压力变化对滑坡稳定性的影响,而且考虑非饱和区基质吸力变化对滑坡稳定性的影响.

本方法所用的非饱和滑坡稳定性分析方法是基于饱和滑坡稳定分析中的剩余推力法进行扩展得到的. 在非饱和区除了要加上负孔隙水压力引起的部分抗剪强度还要考虑不同饱和度情况下的土的容重的变化. 另外还有含水量不同对非饱和介质材料抗剪强度参数的影响,为了简化问题,这里不考虑强度参数的折减.

如公式(13)所示,如果令

$$C = C' + (u_a - u_w)_f \text{tg}\phi^b, \quad (14)$$

则公式(14)可以写成:

$$\tau_f = C + (\sigma_f - u_a)_f \text{tg}\phi^b, \quad (15)$$

式(15)从形式上与饱和 Mohr-Coulombbb 公式相同,这样就可以采用分析饱和和边坡稳定性的方法来计算非饱和和边坡的稳定性. 在大多数情况下,孔隙气压力 u_a 为大气压力,即 $u_a = 0$. 具体计算时应注意 C

是一个变化的参数,在饱和区,我们可以直接采用有效粘聚力,在非饱和区,利用式(15)求得.

剩余下滑力在计算滑坡推力和稳定性时,假定该滑面取单位宽度计算,不计两侧摩擦力和滑体自身挤压力;滑动面和破裂面分别按直线计算,整体呈折线滑动.并假定每一条块剩余下滑力方向与条块底部滑面平行.在主滑剖面上取序号为*i*的一个条块(如图 5)分析其受力情况.其上作用有垂直荷载(W_i)和水平荷载(Q_i),前者如重力和工程荷载等,后者指向坡外的水平向地震力 $K_c W_i$ 及水压力 U_i 等.该条块承受了上一分条的剩余下滑力 E_{i-1} 、倾角 α_{i-1} ,以及本条块的剩余下滑力 E_i 的反力、倾角 α_i ,底部为垂直潜滑面的反力 N_i 、扬压力 U_i 及切反力 T_i .通过 $\sum x_i=0, \sum y_i=0$,进行联立求解可得.

第*i*块的下滑力为:

$$T_{\text{下}} = W_i \sin \alpha_i + K_c W_i \cos \alpha_i + (U_{i-1} - U_{i+1}) \cos \alpha_i + E_{i-1} \cos (\alpha_{i-1} - \alpha_i). \tag{16}$$

第*i*块的抗滑力为:

$$T_{\text{抗}} = \left[W_i \cos \alpha_i - U_i - K_c W_i \sin \alpha_i - (U_{i-1} - U_{i+1}) \sin \alpha_i + E_{i-1} \sin (\alpha_{i-1} - \alpha_i) \right] \tan \phi' + C_i l_i. \tag{17}$$

在非饱和区,式(17)中 U_{i-1}, U_i, U_{i+1} 均为基质吸力,实际上每个点的基质吸力都不相等,假设同一直线上的基质吸力呈线性分布,这样可以类似于饱和区静水压力分布规律来分析非饱和区基质吸力分布.

稳定性系数为

$$K = \frac{T_{\text{下}}}{T_{\text{抗}}}, \tag{18}$$

具体计算滑坡推力时,采用减小抗滑力法.所以第*i*条块的下滑力为

$$E_i = W_i \sin \alpha_i + K_c W_i \cos \alpha_i + (U_{i-1} - U_{i+1}) \cos \alpha_i - \frac{1}{K} T_{\text{抗}} + E_{i-1} \lambda_i, \tag{19}$$

$$\lambda_i = \left[\cos (\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \frac{\tan \phi_i}{k} \sin (\alpha_{i-1} - \alpha_i) \right]. \tag{20}$$

式(20)中: λ_i 为传递系数.通过反复迭代计算得最后一个条块剩余下滑力为 0 时的稳定性系数即为所求.

3.3 滑坡稳定性评价

采用上述方法计算赵树岭滑坡在库水位上升和下降过程中稳定性,其稳定性如图 6 所示.

由图 6 可知:145 m 库水位上升到 175 m 库水位,滑坡稳定性总体逐渐增大,但在 150 m 库水位上

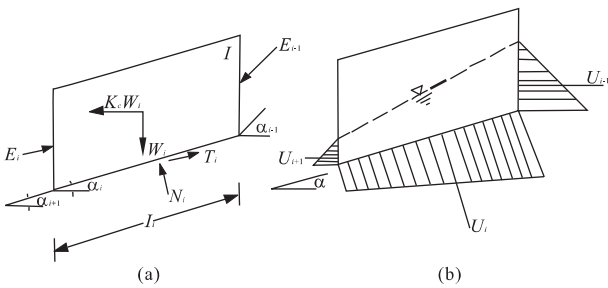


图 5 第*i*条块受力分析
Fig. 5 Force analysis of slice

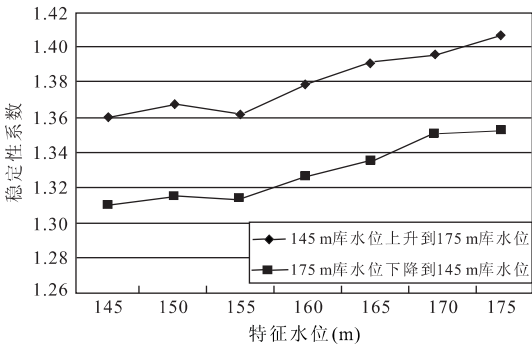


图 6 库水位变化过程中不同特征水位的稳定性系数
Fig. 6 Stability factor of different water level with reservoir water level fluctuation

升到 155 m 库水位时,滑坡稳定性系数略有减小.175 m 库水位下降到 145 m 库水位,滑坡稳定性总体逐渐减小,但在 155 m 库水位下降到 150 m 库水位时,滑坡的稳定性系数略有增大;库水位上升过程中,滑坡体内地下水都会出现“倒流”现象,从而浸润线都有略向左弯曲的趋势,库水位对滑坡前缘产生较大的静水压力,有利于滑坡的稳定;而在库水位下降过程中,地下水力梯度增大,对滑坡产生较大的渗透压力,不利于滑坡的稳定.库水位变化中滑坡稳定性变化情况反常的原因都是与滑坡的滑面形状有关.库水位上升和下降过程中,同一特征水位情况下库水位上升时的稳定性系数比下降时的稳定性系数大.

4 结论

通过饱和—非饱和渗流场模拟及其影响下的滑坡稳定性分析评价,得到如下结论:

(1)提出了土水特征曲线的多项式形式的约束优化模型,该模型不仅可以拟合非饱和渗透系数与基质吸力的函数关系,而且简单实用.

(2)当水位上升时,滑坡体内地下水都会出现“倒流”现象,从而浸润线都有略向左弯曲的趋势;滑坡体地下水自由面在初期变化都很快,随着时间的进行,自由面最终将趋于稳定;当水位下降时,滑坡体地下水自由面在初期变化都很快,随着时间的进行,自由面最终将趋于稳定。

(3)库水位上升时滑坡稳定性系数逐渐增大,但在 150 m 库水位上升到 155 m 库水位时,滑坡稳定性系数略有减小;库水位下降时滑坡稳定性系数逐渐减小,但在 155 m 库水位下降到 150 m 库水位时,滑坡的稳定性系数略有增大;同一特征水位下,同一特征水位情况下库水位上升时的稳定性系数比下降时的稳定性系数大。

References

- Fredlund, D. G., Xing, A., 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Can. Geotech. J.*, 31: 521—532.
- Hu, X. L., Tang, H. M., Ma S. Z., et al., 2006. Numerical simulation of the 3D landslide stability in Three Gorges area based on NMR. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(2): 279—284 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, G., Lin, L. S., Liu, Z. D., et al., 2001. Analysis method for slope stability considering unsaturated soil strength and its application. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 20(A01): 1070—1074 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. H., Cheng, C. X., Feng, X. T., 2005. Study on mechanism of slope instability due to reservoir water level rise. *Rock and Soil Mechanics*, 26(5): 669—773 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. M., Zhao, H. L., Wang, L. J., 2001. Research on soil water character of unsaturated pulverescent clay by experiment. *Underground Space*, 21(5): 375—378 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. X., Xia, Y. Y., Lian, C., et al., 2005. Research on method of landslide stability valuation during sudden drawdown of reservoir level. *Rock and Soil Mechanics*, 26(5): 1427—1436 (in Chinese with English abstract).
- Qi, G. Q., Huang, R. Q., 2004. A universal mathematical model of soil-water characteristic curve. *Journal of Engineering Geology*, 12(2): 182—186 (in Chinese with English abstract).
- Tang, H. M., Ma, S. Z., Liu, Y. R., et al., 2002. Stability and control measures of Zhaoshuling landslide Badong County, Three Gorges reservoir. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(5): 621—625 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. F., Dong, P., 2002. Fractal models for the soil-water characteristics of unsaturated soils. *Rock and Soil Mechanics*, 23(4): 400—405 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P. W., Liu, D. F., Huang, D. H., et al., 2003. Saturated-unsaturated unsteady seepage flow numerical simulation. *Rock and Soil Mechanics*, 24(6): 927—930 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. J., Zhan, L. T., Ling, D. S., et al., 2006. Influence of reservoir water level fluctuations on stability of unsaturated soil banks. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 40(8): 1365—1370, 1428 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 胡新丽, 唐辉明, 马淑芝, 等, 2006. 基于 NMR 的库区滑坡三维稳定性数值模拟. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(2): 279—284.
- 蒋刚, 林鲁生, 刘祖德, 等, 2001. 考虑非饱和土强度的边坡稳定分析方法及应用. *岩石力学与工程学报*, 20(A01): 1070—1074.
- 刘才华, 陈从新, 冯夏庭, 2005. 库水位上升诱发边坡失稳机理研究. *岩土力学*, 26(5): 669—773.
- 刘晓敏, 赵慧丽, 王连俊, 2001. 非饱和粉质粘土的土水特性试验研究. *地下空间*, 21(5): 375—378.
- 刘新喜, 夏元友, 练操, 等, 2005. 库水位骤降时的滑坡稳定性评价方法研究. *岩土力学*, 26(5): 1427—1436.
- 戚国庆, 黄润秋, 2004. 土水特征曲线的通用数学模型研究. *工程地质学报*, 12(2): 182—186.
- 唐辉明, 马淑芝, 刘佑荣, 等, 2002. 三峡工程库区巴东县赵树岭滑坡稳定性与防治对策研究. *地球科学——中国地质大学学报*, 27(5): 621—625.
- 徐永福, 董平, 2002. 非饱和土的水分特征曲线的分形模型. *岩土力学*, 23(4): 730—734.
- 张培文, 刘德富, 黄达海, 等, 2003. 饱和—非饱和非稳定渗流的数值模拟. *岩土力学*, 24(6): 927—930.
- 张文杰, 詹良通, 凌道盛, 等, 2006. 水位升降对库区非饱和土质岸坡稳定性的影响. *浙江大学学报(工学版)*, 40(8): 1365—1370, 1428.