

库水位下降对滑坡稳定性的影响

刘新喜¹, 夏元友¹, 张显书², 郭瑞清²

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:三峡水库 2003 年蓄水后, 滑坡将可能成为三峡库区最严重的地质灾害之一, 库水位下降和暴雨是导致滑坡的主要因素。根据三峡库水位调控方案考虑库区极端暴雨情况, 利用有限元模拟库水位在 175 ~ 145 m 波动和降雨时红石包滑坡的暂态渗流场, 将计算得到的暂态孔隙水压力分布用于滑坡的极限平衡分析, 并考虑基吸力对非饱和土抗剪强度的影响。探讨不同降雨速度、降雨条件对滑坡稳定性的影响。研究表明: 库水位下降对滑坡稳定性的影响受控于滑坡土的入渗能力和滑坡结构形态, 当暴雨强度为 300 mm/d 时, 红石包滑坡的临界降速 1 m/d。其成果将为库区滑坡治理提供科学依据。

关键词: 岩土力学; 库水位下降; 饱和与非饱和渗流; 滑坡; 稳定性评价

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)08-1439-06

EFFECTS OF DRAWDOWN OF RESERVOIR WATER LEVEL ON LANDSLIDE STABILITY

LIU Xin-xi¹, XIA Yuan-you¹, ZHANG Xian-shu², GUO Rui-qing²

(1. *Institute of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;*

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

Abstract: Landslide is one of the most serious geological hazards in the Three Gorges reservoir regions. Since the reservoir was in operation in 2003, both reservoir water level descending and rainstorm infiltration have become major factors that affect the stability of landslide. According to the water level operation options considering the case of extreme rainfall in the Three Gorges reservoir region, transient seepage due to the descending of reservoir water level from 175 to 145 m and rainstorm infiltration is calculated using the finite element method. The transient pore water pressures are then used for limit equilibrium analyses of landslides considering the effects of suction on shear strength of unsaturated soils. The effects of different rainfall speed, various rainfall events on landslide stability are discussed. The results of stability analysis show that the stability of landslides by the drawdown of reservoir water level depends on permeability coefficient of landslides and the structure of landslide. The critical declining velocity of Hongshibao Landslide III is 1 m/d when the rainstorm intensity is 100 mm/d, which will provide scientific basis for the treatment of landslide in Three Gorges reservoir.

Key words: rock and soil mechanics; drawdown of reservoir water level; saturated and unsaturated seepage; landslide; stability evaluation

收稿日期: 2004-04-10; **修回日期:** 2004-06-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49902022); 教育部科学技术研究重点项目(104135); 湖北省自然科学基金资助项目(2004ABA058)

作者简介: 刘新喜(1963-), 男, 2000年于中国地质大学地质工程专业获博士学位, 现为武汉理工大学在站博士后, 主要从事边坡稳定性、渗流方面的研究工作。E-mail: xinxiu1@sina.com.

1 引言

据不完全统计,三峡库区在 175 m 水位范围内共有大小滑坡 1 190 余个,各类变形体更是广泛分布^[1]。特别是三峡水库运营过程中,库水位在 145 ~ 175 m 间周期涨跌时,库水位的周期性变化必将引起地下水位的波动,从而影响库区内崩滑体的稳定性。大量事实表明,90% 以上的边坡失稳与水有关,在边坡失稳的发生过程中,水的作用是一个至关重要的外因。文[2]调查了 Rasevelt 湖附近地区 1941 ~ 1953 年发生的一些滑坡,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,40% 发生在水位上升时期,包括水库蓄水初期。因此,滑坡和边坡失稳将可能会成为三峡库区蓄水后最常见和最严重的地质灾害。

三峡库水位下降对滑坡稳定性的影响是当前滑坡研究领域十分重要的研究课题。目前对三峡库区滑坡稳定性评价和治理设计都是建立在饱和土假设基础上,对暴雨、库水位下降产生滑坡的机理研究较少,已有的工程设计均采用对暂态饱和区及暂态水压力进行假定的方法^[3]。如漫湾水电站折减系数为 0.4,三峡工程采用折减系数 0.3。不同方法采用的边坡暂态水压力分布差别极大,均缺少理论分析及实测数据的支持。研究库水位从 175 m 至 145 m 骤降时,渗流自由面(或浸润线)的确定也缺乏理论依据。为此,本文通过建立二维饱和与非饱和渗流方程,研究库水位下降时滑坡暂态渗流场,建立渗流作用下的非饱和土滑坡稳定性评价数学模型,探讨不同降雨速度、降雨条件对滑坡稳定性的影响。

2 红石包滑坡 的基本特征

红石包滑坡 位于红石包滑坡的东北部,叠加于深层软弱带之上,属于堆积层滑坡。当三峡水库蓄水至 175 m 标高时,滑体基本上被水浸没。因此,三峡水库蓄水后对滑坡稳定性的影响最为严重。滑体均为棕红色、灰黄和黄褐色粘土夹碎、块石,块石大多数为含泥质灰岩和泥灰岩,块径 1 ~ 3 m,个别较大,滑体厚度 10 ~ 30 m。深层软弱带厚 1 ~ 3 m,为灰黄、土黄、灰白色粘土夹碎、块

石,以及 2 侧的挤压破碎带组成。下部为中生代三迭系巴东组三、四段泥灰岩、碳质泥岩、粉砂质泥岩组成。滑体高程为 145 ~ 182 m,区内水文地质条件简单,地下水主要来源于大气降雨和地面给排水。

影响红石包滑坡 稳定性的因素中,除地层岩性、地质结构和地形地貌外,水文地质条件对滑坡稳定性影响极大,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,暴雨和地震为 2 个难以确定的因素,虽然对滑坡稳定性有一定的影响,但红石包滑坡自形成以来,经历了暴雨与地震的考验,已趋于稳定。因此,单一的暴雨或地震一般不会引起滑坡整体重新失稳破坏。三峡水库蓄水后,水的软化作用降低了斜坡岩土体及滑动面的物理力学性质,特别是库水位在 175 ~ 145 m 周期性波动时,还会产生动水压力作用于滑动岩体,降低斜坡的稳定性。因此,库水位下降是影响红石包滑坡稳定性的重要因素。

3 库水位下降时滑坡饱和与非饱和渗流场数值模拟

3.1 滑坡饱和与非饱和渗流模型

基于以上对红石包滑坡 水文地质条件的研究,滑坡的地下水位就是库水位。因此,库水位以上滑坡体处于非饱和,库水位以下滑体是处于饱和状态,随着库水位下降,滑体孔隙水压力也逐渐消散,土体由饱和变为非饱和状态,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^[4]为

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

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 对基吸力 $(u_a - u_w)$ 偏导数的负值,即 $m_w = -\frac{\partial \theta_w}{\partial (u_a - u_w)}$ 。

边界条件为:

(1) 水头边界

$$k \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\Gamma_1} = h(x, y, t) \quad (2)$$

(2) 流量边界

$$k \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q(x, y, t) \quad (3)$$

3.2 渗流计算模型

根据红石包滑坡的工程地质特征,选择红石包滑坡的主滑剖面,方位 NE47°,滑体长 135 m,标高为 146~182 m,滑体为第四纪冲积层,滑面为砾质粉质粘土。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。初始水头为 175 m。二维有限元网格剖分共剖分 6 390 网格单元,6 584 个节点,如图 1 所示。

3.3 渗流计算工况

三峡水库的运营状况直接影响库区滑坡的稳定性。根据三峡水库调控方案,每年 11 月到次年 2 月为枯水期,库水位从 175 m 降至 145 m 时,降速约为 1~2 m/d,对红石包滑坡而言,滑坡堆积层

的饱和渗透系数达 5 m/d,因此,很难出现骤降的情况。初步确定库水位下降速度为 1,2 m/d。根据巴东县历年来的气象资料,并考虑极端降雨情况,确定暴雨强度分别为 100,200,300 mm/d。计算工况为:

工况 1:无降雨,库水位从 17 m 降至 145 m 标高,库水位下降速度分别为 1,2 m/d;

工况 2:暴雨与库水位下降同时发生,且降雨强度分别为 100,200,300 mm/d,库水位从 17 m 降至 145 m 标高,库水位下降速度分别为 1,2 m/d。

3.4 渗流计算参数

目前,对三峡库区滑坡非饱和土性状还没有通过实验方法进行研究,因此,滑体和滑带的非饱和和渗透系数只能采用工程类比法,根据滑体和滑带饱和和渗透系数大小和土的粒径分布规律推求其渗透函数,如图 2,3 所示。实验测定滑带土饱和渗透系数为 1.3×10^{-2} m/d,滑体饱和渗透系数为 5 m/d。

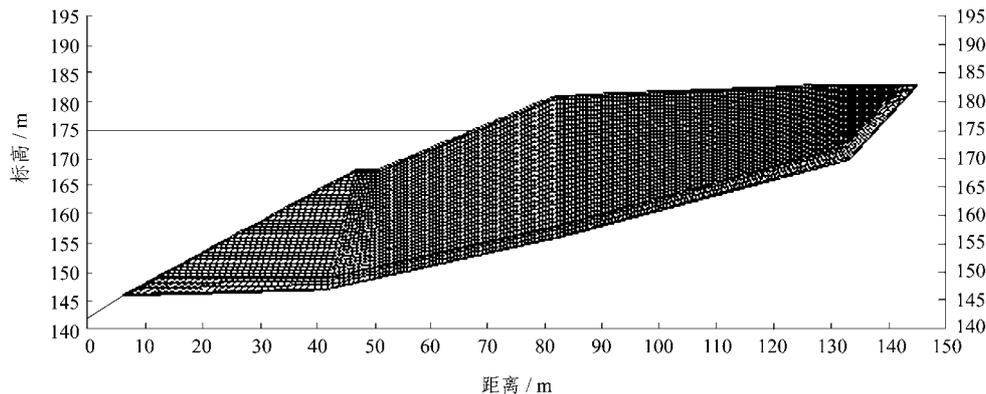
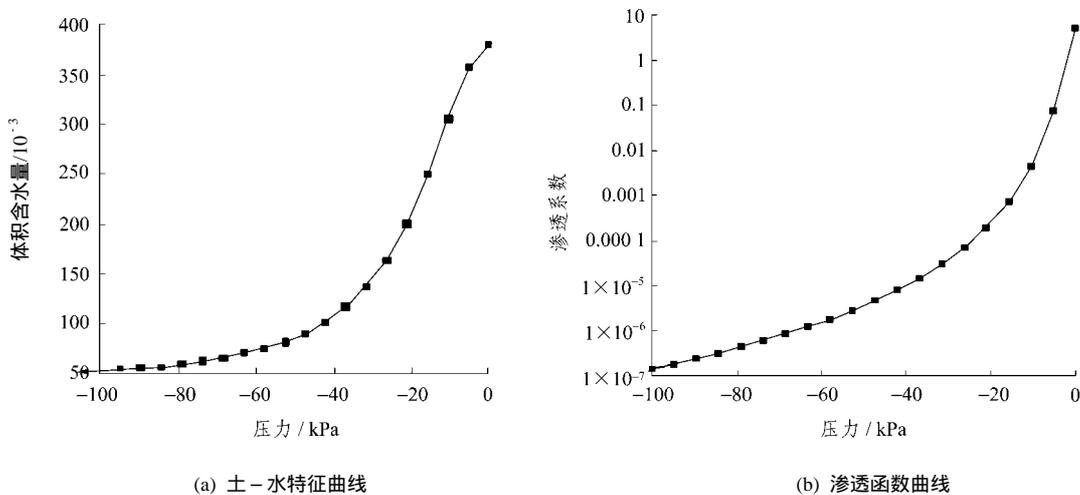


图 1 渗流分析有限元网格

Fig.1 Finite element mesh for the analysis of seepage



(a) 土-水特征曲线

(b) 渗透函数曲线

图 2 滑体土-水特征曲线及渗透函数曲线

Fig.2 Soil-water characteristic curve and permeability function for landslide body

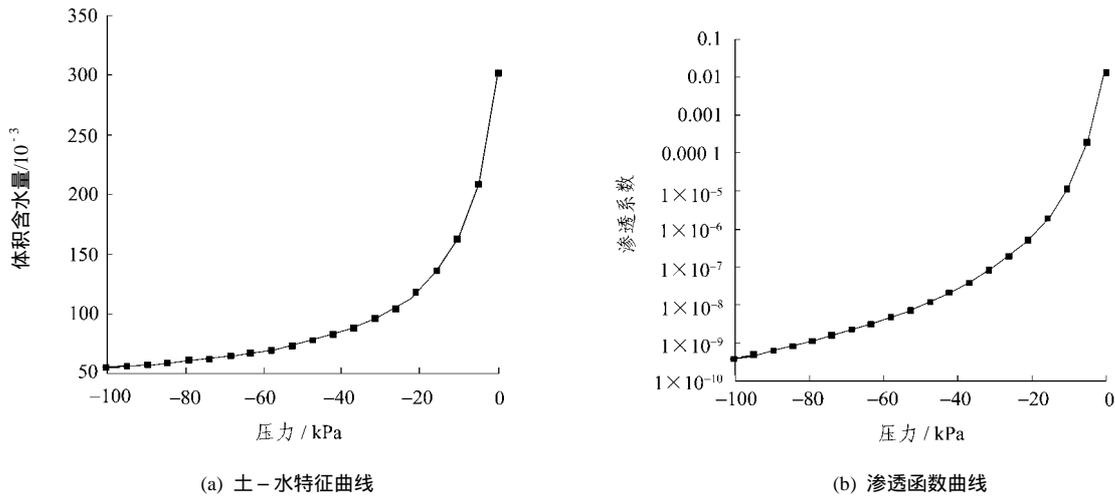


图3 滑带土-水特征曲线及渗透函数曲线

Fig.3 Soil-water characteristic curve and permeability function for slip surface

3.5 数值模拟结果

(1) 不同降速条件下滑坡的瞬态渗流场变化规律

图4为不同降速下滑坡渗流浸润线的变化规律，降速越大，渗流浸润线就变得愈陡。

(2) 降雨对滑坡渗流场的影响

图5(a)为降速为1 m/d，时间为16 d的滑坡孔隙水压力等值线，基吸力的变化0~-78 kPa，且

变化的范围从159~182 m标高。图5(b)为暴雨强度为200 mm/d，以同样降速1 m/d，时间为16 d的滑坡孔隙水压力等值线。降雨使基吸力降低到-40 kPa，且范围变得很小，渗流浸润线抬升。由图5(b)可知，滑坡库水位标高为175 m，红石包滑坡后缘标高仅182 m，由于滑坡堆积层饱和渗透性系数较大，暴雨很容易渗透到滑体，并使滑体的基吸力降低，渗流浸润线抬升。

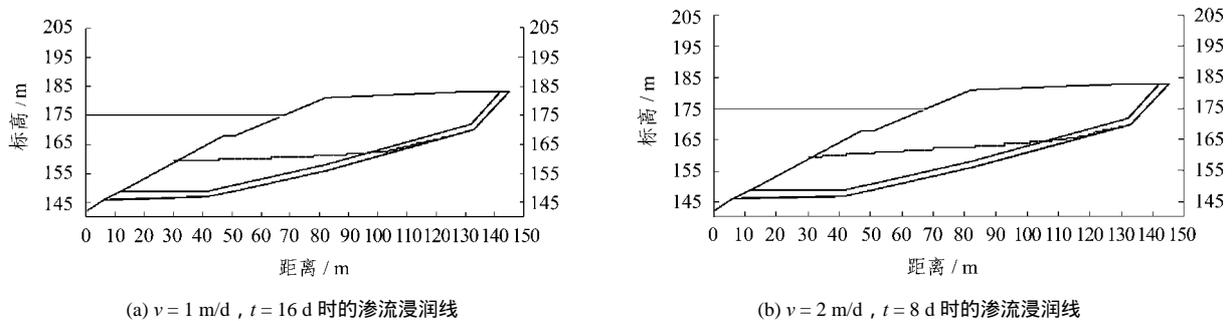


图4 不同降速下的渗流浸润线

Fig.4 Infiltration lines for different drawdown velocities

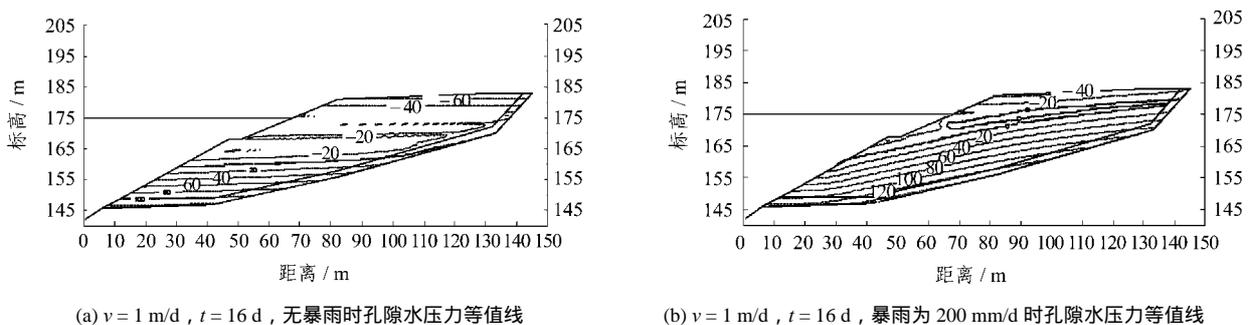


图5 不同降雨强度时孔隙水压力等值线

Fig.5 Contour of pore water pressures for different rainfalls

4 饱和与非饱和渗流滑坡稳定性评价

库水位下降和降雨产生的渗流场进行数值模拟表明, 在渗流浸润线以上的土的孔隙水压力为负值(即基吸力), 且随着降雨量和降雨持时的增加将使滑坡含水量增大, 从而降低了孔隙中的基吸力大小。库水位的下降将使滑坡体孔隙水压力段时间难以消散, 影响滑坡的稳定性。基吸力对非饱和土抗剪强度的影响国内外进行了许多研究^[5-9], 在此, 采用岩土界广泛认可的文[10]提出的非饱和土强度公式来表达。已经证明在抗剪强度公式中采用 2 个应力状态变量, 即净法向应力($\sigma - u_a$)和基吸力($u_a - u_w$)是实际应用中最有力的组合, 其抗剪强度表示为

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (4)$$

式中: c' , φ' 为常规意义下的有效应力强度参数; σ 为法向总应力; u_a 为孔隙气压力, 在本文稳定性分析时, 认为孔隙水压力为大气压力, 即 $u_a = 0$; u_w 为孔隙水压力; φ^b 为基吸力增加引起抗剪强度增加的曲线的倾角, 也是基吸力的函数, 本文假设其为常数, 并由类比法确定。

基于基吸力的滑坡稳定性评价采用规范认可的极限平衡方法, 具体的计算方法有 Janbu 法、Bishop 法、Spencer 法、Sarma 法、Morgenstern-Price 法和剩余推力法等。此处采用 Janbu 法评价库水位下降对滑坡稳定性的影响, 通过库水位下降时饱和与非饱和渗流数值模拟得到的滑坡中暂态孔隙水压力分布用于滑坡极限平衡分析, 滑坡土强度参数如表 1。

表 1 滑坡土的强度参数

Table 1 Strength parameters of soil in landslide

岩组	有效粘聚力 c' / kPa	有效内摩擦角 $\varphi' / (^\circ)$	$\varphi^b / (^\circ)$	天然干容重 $\gamma_d / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	饱和容重 $\gamma_{sat} / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$
崩滑堆积土	35	36	18	22	24
滑带土	23	14	10	19	22

4.1 库水位下降速度对滑坡稳定性的影响

根据对红石包滑坡的渗流分析, 由于滑坡体的渗透性较好, 当降速小于滑体饱和和渗透性系数时, 虽然降速增加, 但滑坡稳定性降低幅度不大。当降速为 1 m/d, 经过 10 d 库水位降到 165 m 标高, 滑坡稳定性系数为 1.27; 当降速为 2 m/d, 只需 5 d

库水位便可降到 165 m 标高, 此时滑坡的稳定性系数为 1.23。由图 6 可知, 滑坡稳定性的变化是从大到小再增大的变化趋势, 且在库水位降低 15 ~ 20 m 时滑坡的稳定性最低。

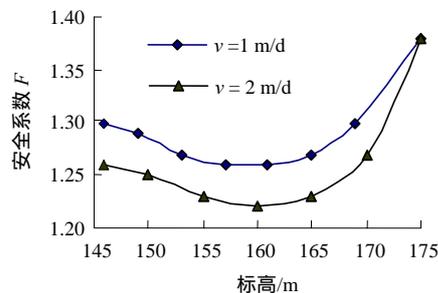


图 6 滑坡稳定性与降速的关系

Fig.6 Relationship between stability of landslide and descending velocities of reservoir water level

4.2 降雨强度对滑坡稳定性的影响

根据巴东县历年来降雨资料, 考虑极端降雨情况, 分别考察降雨强度为 100, 200, 300 mm/d, 降速为 1 m/d, 且降雨与库水位下降同时进行时的滑坡稳定性, 如表 2。由表 2 可知, 在降速为 1m/d 和无雨情况下, 滑坡是处于稳定状态; 在连续暴雨强度为 100 mm/d 作用下, 滑坡处于基本稳定状态; 当暴雨强度达到 300 mm/d 时, 滑坡失稳, 且滑坡发生在库水位以下 10 ~ 20 m 标高处。由此可知, 红石包滑坡在暴雨强度 300 mm/d 时, 临界降速为 1 m/d, 滑坡临界标高 163 m。因此, 红石包滑坡的饱和和渗透系数远大于暴雨强度, 暴雨很容易入渗, 从而降低滑坡中基吸力, 并使滑坡地下水位抬升, 动水压力增大, 降低滑坡稳定性。

表 2 降雨强度对滑坡稳定性的影响

Table 2 Effects of rainfall intensity on stability of landslide

工况	标高/ m					
	171	167	163	159	155	151
无雨	1.32	1.29	1.27	1.26	1.27	1.28
100 mm/d	1.21	1.12	1.11	1.08	1.08	1.07
200 mm/d	1.17	1.09	1.07	1.03	1.03	1.00
300 mm/d	1.12	1.04	1.00	0.97	0.95	0.93

4.3 降雨持时对滑坡稳定性的影响

节 4.2 讨论的是降雨与库水位下降同时进行的情形, 而实际上库区降雨是间断的, 此处考虑极端降雨情况: 库水位下降速度为 1 m/d, 暴雨强度为

100 mm/d, 持续时间为 5, 10, 15 d。由表 3 可知, 当暴雨强度为 100 mm/d 时, 暴雨时持续时间较短对滑坡的稳定性不显著, 主要是潜在滑移面埋藏较深、地下水位在短时间内难以抬高。这也进一步说明降雨对滑坡稳定性的影响与滑坡的结构有关。但若降雨通过滑坡中的裂隙渗透, 就会改变滑坡的渗流特性, 对滑坡稳定性产生较大的影响。

表 3 降雨持时对滑坡稳定性的影响

Table 3 Effects of rainfall duration on stability of landslide

工况	标高/m					
	171	167	163	159	155	151
5 d	1.245	1.217	1.199	1.196	1.201	1.214
10 d	1.244	1.210	1.197	1.195	1.200	1.212
15 d	1.244	1.205	1.177	1.161	1.190	1.210

5 结 论

库水位下降和降雨导致滑坡已是公认的事实, 但是由于模型和参数研究较为困难, 以致目前量化研究尚少。利用饱和与非饱和渗流理论通过工程类比法确定了红石包滑坡的土-水特征曲线, 由此确定滑坡土的非饱和渗透函数。进行三峡水库库水位下降暂态饱和与非饱和滑坡渗流的有限元分析, 应用非饱和土抗剪强度理论, 建立了库水位下降滑坡稳定性分析数学模型, 采用 Janbu 法分析库水位下降和降雨时滑坡的瞬态安全系数, 通过研究得出如下结论:

(1) 库水位下降将使滑坡的稳定性降低, 降速对红石包滑坡的稳定性影响主要由滑坡土的入渗能力来控制, 当降速小于滑坡土的饱和渗透系数时, 滑坡中渗流浸润线变化较平缓, 降速增大对滑坡稳定性的影响较小。

(2) 在滑坡地下水位较浅时, 暴雨入渗容易使滑坡地下水位上升, 同时暴雨入渗使滑坡中基吸力减小, 因此, 随着暴雨强度的增加, 滑坡的稳定性降低。通过对红石包滑坡的渗流数值模拟, 在极端暴雨强度 300 mm/d 时, 库水位下降的临界降速为 1 m/d。

(3) 红石包滑坡的渗流数值模拟与稳定性研究表明, 库水位下降使滑坡安全系数变化由大到小再增大的过程, 滑坡失稳通常发生在库水位下降 10~20 m 处, 这与前人的研究成果相吻合。

运用饱和与非饱和渗流理论研究三峡水库库水位

下降对滑坡稳定性的影响是一种新的尝试。今后, 需加强对库区第四纪崩积土、巴东组易滑地层、滑带土等的土-水特性曲线进行实验研究, 对三峡库区非饱和土强度特性、库水位下降和暴雨在滑坡中的水文响应等的研究将是库区蓄水后滑坡稳定性研究的关键。

参考文献(References):

- [1] 崔政权, 曾新平. 长江三峡工程库区库岸稳态及崩、滑体专论[R]. 武汉: 水利部长江水利委员会综合勘测局, 1996.(Cui Zhenquan, Zeng Xinping. Monograph on bank stability, bank collapse and landslide of the Three Gorges reservoir area[R]. Wuhan: Bureau of Investigation and Survey of Changjiang Water Resource Commission, Ministry of Water Resources, 1996.(in Chinese))
- [2] 朱冬林, 任光明, 聂德新等. 库水位变化对水库滑坡稳定性影响的预测[J]. 水文地质工程地质, 2002, (3): 6-9.(Zhu Donglin, Ren Guangming, Nie Dexin, et al. Effecting and forecasting of landslide stability with the change of reservoir voter level[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2002, (3): 6-9.(in Chinese))
- [3] 黄润秋, 戚国庆. 非饱和渗流基质吸力对边坡稳定性的影响[J]. 工程地质学报, 2002, 10(4): 343-348.(Huang Runqiu, Qi Guoqing. The effect of unsaturated soil suction on slope stability[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(4): 343-348.(in Chinese))
- [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[J]. 岩土力学, 1999, 20(1): 1-14.(Wu Hongwei, Chen Shouyi, Pang Yuwei. Parametric study of effects of rain infiltration on unsaturated slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(1): 1-14.(in Chinese))
- [5] 沈珠江. 广义吸力与非饱和土的统一变形理论[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(2): 1-9.(Shen Zhujiang. Generalized suction and unified deformation theory for unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(2): 1-9.(in Chinese))
- [6] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 1-15.(Bao Chenggang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 1-15.(in Chinese))
- [7] Lam L, Fredinnd D G, Barbour S L. Transient seepage model for saturated-unsaturated soil systems: a geotechnical engineering approach[J]. Can. Geotech. J., 1987, 24: 565-580.
- [8] Alonso E, Gens A, Lioret A, et al. Effect of rain infiltration on the stability of slopes[J]. Unsaturated Soils J., 1995, 1: 241-249.
- [9] 陈守义. 考虑入渗和蒸发影响的土坡稳定性分析方法[J]. 岩土力学, 1997, 18(2): 8-12.(Chen Shouyi. A method of stability analysis taken effects of infiltration and evaporation into consideration for soil slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, 18(2): 8-12.(in Chinese))
- [10] Fredlund D G, Rahardjo H. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.(Fredlund D G, Rahardjo H. Unsaturated Soil Mechanics[M]. Translated by Chen Zhongyi. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.(in Chinese))