

库水位下降对滑坡体稳定性的影响

廖红建^{1,2}, 盛谦², 高石夯¹, 许志平¹

(1. 西安交通大学 土木工程系, 陕西 西安 710049; 2. 中国科学院 岩土力学重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 以三峡水利工程为背景, 针对长江三峡库区水位的周期性调节对库岸边坡稳定性可能产生的种种不利影响, 计算了在库水位下降期间, 滑坡体稳定性受库水位下降速度影响的变化情况。结合库水位下降期间不同渗透系数滑坡体的实际渗流场, 对滑坡体稳定性进行了数值计算分析, 得到了库区降水速度和渗透系数与边坡稳定性之间的变化规律, 对库区边坡稳定性的研究有一定的参考作用。

关键词: 工程地质; 库水位; 滑坡体; 稳定性; 渗透系数

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)19 - 3454 - 05

INFLUENCE OF DRAWDOWN OF RESERVOIR WATER LEVEL ON LANDSLIDE STABILITY

LIAO Hong-jian^{1,2}, SHENG Qian², GAO Shi-hang¹, XU Zhi-ping¹

(1. Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The reservoir water level in the Yangtze River Three Gorges Reservoir area is adjusted periodically, so the stability of the landslides on both banks is affected seriously. Under the background of the Three Gorges irrigation projects, the influence of drawdown speed of water level on the stability of landslide was analyzed. The variation of the landslide stability at different time during water level drawdown was analyzed considering the actual seepage fields. Through numerical calculation, the relationships of the landslide stability, the seepage coefficient and drawdown speed were obtained. It has some referential values for the study on the sliding stability of slope.

Key words: engineering geology; reservoir water level; landslide; stability; permeability coefficient

1 引言

水库库岸滑坡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, 由此掀开了库岸滑坡研究的新篇章。

水库库岸滑坡集普遍性、危害性和特殊性于一体, 与一般山地滑坡相比, 有其特殊的一面。其特

殊性在于水库库岸斜坡的活动与水库水位的变化、库水波浪的冲刷及库水的浸泡有很大的关系; 同时, 还具有重要的学术、经济、环境及社会意义。因此, 人类进行大中型水利水电工程建设必须对库岸滑坡的研究予以足够重视, 且有必要进行深入研究^[1-5]。

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, 包括初期蓄水。文[6]经过对水库滑坡的分析及其实测研究认为, 浸水、库水位急剧降低和降雨, 是水库滑坡形成的主要因素。另外, 在对滑坡的调查中发现, 水

收稿日期: 2004 - 10 - 19; **修回日期:** 2004 - 11 - 15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50379043); 中国科学院岩土力学重点实验室基金资助项目(Z110302)

作者简介: 廖红建(1962 -), 女, 博士, 1985年毕业于西安建筑科技大学土木工程系工业与民用建筑专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩土工程材料的本构关系及边坡稳定性分析等方面的教学与研究工作。E-mail: hjliao@xjtu.edu.cn.

位快速下降会引起迎水坡面的滑坡。由于洪水过后，河道、水库与运河的水位会快速下降，海水在一次潮汐中也会发生水位的快速下降。在水位下降过程中，除非边坡内的孔隙压力能和外部降水一样快速消失，否则，坡体内将受到高剪切力而有滑坡的危险^[7]。

在我国，1958 年修建的河北省岳城水库蓄水后，于 1968 和 1974 年因库水位降落，而在坝中段和南段各发生 259 和 210 m 长的大滑坡^[8]。现在正在建设的长江三峡水库是一个狭长的河道型水库，库区淹没涉及湖北、重庆的 27 个县(市、区)，水位抬升近百米。水库建成后采用“冬蓄夏泄”的水位调度方式，水位调幅变化可达 30 m。水库自低水位蓄至正常蓄水位，然后自正常蓄水位放至低水位，这种变化将直接干扰两岸渗流场。如果库水位快速降落，两岸特别是松散介质中沿江一带地下水水位回升之后来不及同库水位同步降落，高、低水位之间的水体所产生的向坡体外渗透的渗透压力是对滑坡体稳定极为不利的因素，更是水电事业中不容忽视的安全问题。随着我国水电事业的蓬勃发展，越来越多的库岸边坡面临着上述问题。

本文以三峡水利工程为背景，结合三峡工程库区奉节县的部分地质勘察报告^[9, 10]，针对长江三峡库区水位的周期性调节对库岸边坡稳定性可能造成的影响，对具有不同渗透系数材料的滑坡体，进行了在不同库水位下降速度下的稳定性计算分析。采用边坡稳定性分析软件 Geo-Slope，计算了在三峡水库库水位下降 30 m 期间，滑坡体稳定性随不同库水位下降速度的变化情况。通过结合库水位下降期间的实际渗流场，对滑坡体稳定性进行了分析，得到了库区降水速度和渗透系数与边坡稳定性之间的对应关系，对库区边坡稳定性的研究有一定的参考价值。

2 计算理论

2.1 渗流计算基本理论及渗透系数确定

地下水运动的连续性方程，可以从质量守恒的角度来考虑，即渗流场中的水在某一单元体中的增减速率等于进出该单元体流量速率之差，运用达西定律，可以推得如下：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

式中： H 为总水头； k_x ， k_y 分别为 x ， y 方向的渗

透系数(m/s)； Q 为施加的边界流量(m³/s)； θ 为体积水含量； t 为时间(s)。

当水流过土体中的时候，一部分水要驻留在土体结构中，驻留的水量是孔隙水压力和土体结构特征的函数。对渗流分析来说，定义水量驻留部分的体积和总体积的比值为体积水含量，用公式表示为

$$\theta = V_w / V \quad (2)$$

式中： V_w 为水的体积(cm³)， V 为总的体积(cm³)。

当饱和度是 100% 的时候，体积水含量等于土壤的孔隙率。

体积水含量的改变依赖于应力状态的改变和土体的性质。在渗流计算中，假定总应力是不变的，且孔隙气压力也保持不变，这意味着体积水含量的改变仅仅依赖于孔隙水压力的改变。

体积水含量 θ 与孔隙水压力 u_w 的关系曲线如图 1 所示，用公式可表示为

$$\partial \theta = m_w \partial u_w \quad (3)$$

式中： m_w 为体积水含量驻留曲线的斜率， u_w 为孔隙水压力。

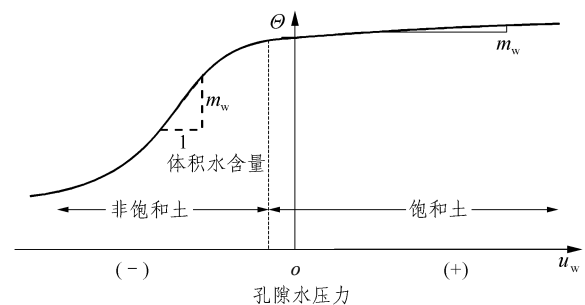


图 1 体积水含量 θ 与孔隙水压力 u_w 的关系曲线

Fig.1 Relationship between θ and u_w

由于渗透系数(水力传导率)是表示土体导水能力的一个参数，水力传导系数依赖于体积水含量，而体积水含量又是孔隙水压力的函数，因此，渗透系数是体积水含量的函数，故孔隙水压力的间接函数。又由于用实验手段获得非饱和土的渗透系数比获得土-水特征曲线要复杂得多，因此，人们发展了许多由土-水特征曲线预测渗透系数的方法。

在本文计算中，渗透系数的确定，首先根据实用土木工程标准规范中岩土体的渗透等级分类^[11]，选择了渗透系数从 $7.5 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-7}$ m/s 的 4 个数量等级；然后采用软件提供的标准试验参数，选取了对应的 4 种基本土-水特征曲线，确定了 16 种

不同的渗透系数(见表 1), 分别进行了数值分析, 以此反映渗透系数对滑坡体稳定性的影响。

表 1 计算选取的渗透系数

Table 1 Permeability coefficients for calculation

土名	计算选取的渗透系数/(m·s ⁻¹)			
标准砂	7.5×10 ⁻⁴	5.0×10 ⁻⁴	2.5×10 ⁻⁴	1×10 ⁻⁴
砂	7.5×10 ⁻⁵	5.4×10 ⁻⁵	2.5×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵
细砂	7.5×10 ⁻⁶	4.3×10 ⁻⁶	2.5×10 ⁻⁶	1×10 ⁻⁶
淤泥	7.5×10 ⁻⁷	5.0×10 ⁻⁷	2.5×10 ⁻⁷	1×10 ⁻⁷

在式(1)中, 当稳定渗流情况下, 所有时间内流入和流出一个单元的流量是相同的, 式(1)的右边为 0, 即

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad (4)$$

总水头可以定义为

$$H = \frac{u_w}{\gamma_w} + y \quad (5)$$

式中: γ_w 为水的重度(N/m³), y 为高程(m)。

将式(5)代入式(3)可得

$$\partial \Theta = m_w \gamma_w \partial (H - y) \quad (6)$$

将式(6)代入式(1), 可以得到非稳定渗流情况下控制方程(高程是常数, $\partial y = 0$)为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (7)$$

利用有限元方法, 最后可以得到有限元的渗流控制方程为

$$(\Delta t [K] + [M]) \{H_1\} = \Delta t \{Q_1\} + [M] \{H_0\} \quad (8)$$

式中: Δt 为时间增量, $[K]$ 为单元特征矩阵, $[M]$ 为单元质量矩阵, $\{H_1\}$ 为时间增量末尾的水头值, $\{Q_1\}$ 为时间增量末尾的节点流量, $\{H_0\}$ 为时间增量初的水头值。

2.2 稳定性计算理论及渗流计算模型

在边坡稳定性计算中, 采用的是极限平衡法中的摩根斯坦 - 普赖斯法^[12]。摩根斯坦 - 普赖斯法中假设条间正应力和剪应力之间有一个相对于滑坡体横坐标的函数关系, 这里选用的是一个半正弦函数, 恰好满足滑坡体的左右边界条间力为 0 的条件。

在 Geo-Slope 软件的应用中, 首先在 Seep 程序

中作暂态渗流问题的分析, 得到各个不同时间下渗流场的水头分布; 然后将渗流场中的水头值输入到边坡稳定性计算软件 Geo-Slope 中。在该软件中用条分法计算滑动体的稳定性系数。

计算过程中, 为了将 Seep 中的有限元水头值转换到 Geo-Slope 中, 首先将 Seep 中的有限元网格引入到 Geo-Slope 中, 在此网格上重新建立稳定性分析的模型, 包括滑动面的确定和土体的条分数目和方法; 然后在每一个潜在的滑动面上, 找出各土条的底面中心点, 并找到底面中心点所在的土体单元。利用 Seep 传递给 Geo-Slope 所有的节点水头信息, Geo-Slope 找到各土条底面中点在其单元中的相对坐标及其相应的插值函数矩阵, 从而利用以下方程计算出底面中心点处的水头值, 即

$$h = \langle N \rangle \{H\} \quad (9)$$

式中: h 为局部坐标下的水头(m), $\langle N \rangle$ 为插值函数向量, $\{H\}$ 为节点处的水头向量。

这样, 就将动态的渗流场与极限平衡分析结合了起来。

结合三峡工程库区奉节县的部分地质勘察报告^[9, 10], 采取如图 2 所示的计算剖面 and 渗流计算模型。图中边界处空心小圆圈表示的边界条件为外界水利条件。在本文的计算模型中, 即为给定的 3 种不同库水位下降速度的情况, 而且认为, 如果计算点处的高程高于库水位, 则该点的流量为 0。由于是计算渗流场的动态变化, 计算点上不能一次达到平衡, 因此, 如果计算中某点的计算水头大于该点的坐标, 则下一次迭代中定义该点水头为竖直方向坐标值, 直到水头值与坐标值相符为止。其他未作说明的边界定义为不透水边界。

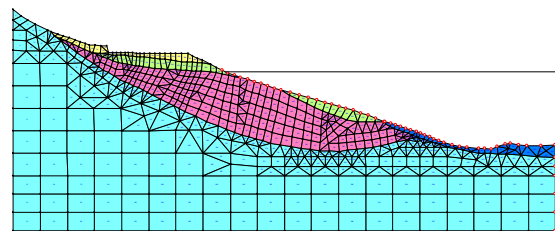


图 2 渗流计算模型示意图

Fig.2 Calculating model of seepage

3 数值计算与分析

为了解库水位的变动对滑坡体稳定性的影响, 本文结合三峡水利工程, 设计库水位从 175 m 下降到 145 m, 落差为 30 m, 且分别假定在 1, 2 和 3

个月期间下降, 即降水速度分别为 1.00, 0.50 和 0.33 m/d, 以此来分析库水位下降速度对滑坡体稳定性的影响。

计算中假定每种算例中滑坡体的渗透系数是相同的, 共选取了表 1 所示的 16 种渗透系数, 计算了其在 3 种不同库水位下降速度下的渗流场, 渗流场的计算步长为 12 h(43 200 s), 计算时间分别为 2, 4 和 8 个月。

对 16 种不同渗透系数的滑坡体在 3 种库水位下降速度下, 共 48 种渗流场的滑坡体进行稳定性分析, 对同种渗透系数下的滑坡体比较了在不同库水位下降速度时滑坡体的稳定性变化情况。计算结果如图 3~6 所示。由计算结果可知, 对于标准砂来说, 由于渗透系数为 $k = 7.5 \times 10^{-4}$ m/s 与 $k = 5.0 \times 10^{-4}$ m/s, 以及 $k = 2.5 \times 10^{-4}$ m/s 与 $k = 1.0 \times 10^{-4}$ m/s 在不同降水速度下得出的曲线很接近, 故只在图中作

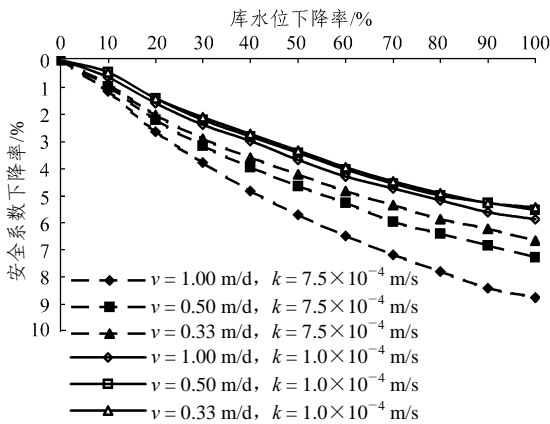


图 3 标准砂的库水位下降率与安全系数下降率的关系
Fig.3 Relationship between reservoir water level descending rate and safety factor descending rate of standard sand

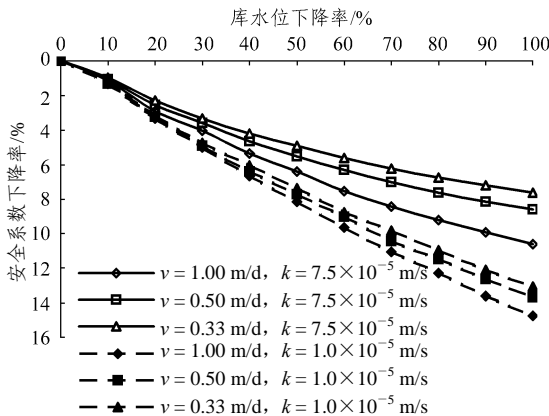


图 4 砂的库水位下降率与安全系数下降率的关系
Fig.4 Relationship between reservoir water level descending rate and safety factor descending rate of sand

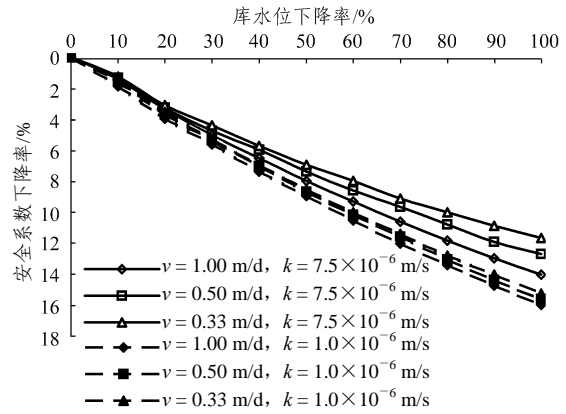


图 5 细砂的库水位下降率与安全系数下降率的关系

Fig.5 Relationship between reservoir water level descending rate and safety factor descending rate of fine sand

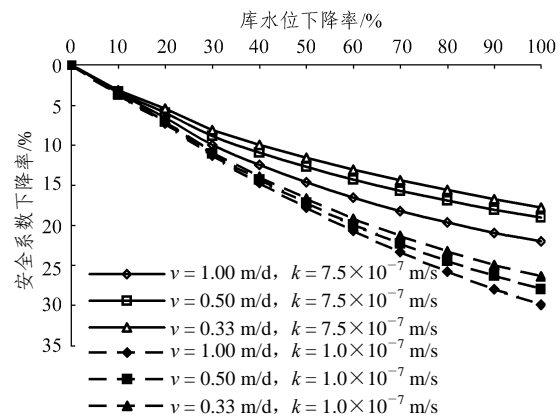


图 6 淤泥的库水位下降率与安全系数下降率的关系

Fig.6 Relationship between reservoir water level descending rate and safety factor descending rate of silt

出了 $k = 7.5 \times 10^{-4}$ m/s(最大值)和 $k = 1.0 \times 10^{-4}$ m/s(最小值)时的计算结果。同样, 对于其他 3 种砂、土材料, 为了清楚起见也只给出渗透系数为最大值和最小值的计算结果。

从图 3~6 可以看出, 滑坡体稳定性的变化趋势与滑坡体的渗透系数密切相关。无论是何种砂、土材料的滑坡体, 在相同的渗透系数下, 安全系数下降率皆随着库水位下降速度的增大而明显增加。在不同的库水位下降速度下, 其稳定性的变化曲线都是相似的。从砂到淤泥, 随着滑坡体材料渗透系数的减小, 安全系数下降率增大。对于每种材料的滑坡体, 随着库水位下降率的增加, 安全系数下降率也明显增大。但对于渗透系数越大的滑坡体, 在不同的库水位下降速度下安全系数值相近, 即对稳定性的影响较小。在相同的库水位下降率下, 随着滑坡体材料渗透系数的减小, 安全系数下降率越来越大, 从计算结果来看, 淤泥的安全系数下降率几乎是标准砂的 3 倍以上。由此可见, 在工程中应针对

不同渗透系数的滑坡体, 在出现不同情况的库水位变化时, 进行相应的防治措施。

4 结 论

通过分析, 本文得到了以下结论:

(1) 在库水位下降阶段, 滑坡体稳定性的变化趋势与滑坡体的渗透系数密切相关。随着滑坡体材料渗透系数的减小, 安全系数下降率越来越大。在相同的库水位下降率下, 淤泥的安全系数下降率几乎是标准砂的 3 倍以上。对于每种材料的滑坡体, 随着库水位下降率的增加, 安全系数下降率也明显增大。

(2) 库水位下降速度对安全系数的大小也有一定的影响。对于具有相同渗透系数的滑坡体, 随着库水位下降速度的增大, 安全系数下降率都明显增加。在不同的库水位下降速度下其稳定性的变化曲线都是相似的。但是, 对于渗透系数越大的滑坡体, 在不同的库水位下降速度下, 安全系数值相近, 即对稳定性的影响较小。

参考文献(References):

- [1] 崔政权, 李 宁. 边坡工程——理论与实践最新发展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.(Cui Zhengquan, Li Ning. Slope Engineering — New Development of Theory and Practice[M]. Beijing: China Water Power Press, 1999.(in Chinese))
- [2] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京: 水利出版社, 1980.(Pan Jiazheng. Stability Against Sliding of Building and Landslide Analysis[M]. Beijing: China Water Conservancy Press, 1980.(in Chinese))
- [3] Duncan J M. State of the art: limit equilibrium and finite element analysis of slopes[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 22(7): 577 - 596.
- [4] Lam L, Frelund D G. A general limit equilibrium model for three-dimensional slope stability analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30: 905 - 919.
- [5] 朱冬林, 任光明, 聂德新, 等. 库水位变化下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 water level[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2002, (3): 6 - 9.(in Chinese))
- [6] 中村浩之. 论水库滑坡[J]. 水土保持通报, 1990, 10(1): 53 - 64.(Nakamura K. On reservoir landslide[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1990, 10(1): 53 - 64.(in Chinese))
- [7] Bishop A W. The use of the slip circle in the stability analysis of slope[J]. Geotechnique, 1955, 5(1): 7 - 17.
- [8] 毛昶熙, 段祥宝, 李祖贻, 等. 渗流数值计算与应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1981.(Mao Changxi, Duan Xiangbao, Li Zuyi, et al. Numerical Calculation and Analysis in Seepage[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1981.(in Chinese))
- [9] 长江勘测规划设计研究院. 三峡工程库区奉节县新城城区护岸工程可行性研究报告[R]. 武汉: 长江勘测规划设计研究院, 2000.(Yangtze River Reconnaissance, Programming and Designing Academy. Feasibility research report of retaining wall engineering at new Fengjie City zone in Three Gorges area[R]. Wuhan: Yangtze River Reconnaissance, Programming and Designing Academy, 2000.(in Chinese))
- [10] 长江水利委员会综合勘测局. 长江三峡工程库区奉节县白衣庵滑坡治理规划阶段工程地质勘察报告[R]. 武汉: 长江水利委员会综合勘测局, 1999.(General Investigation Bureau of Changjiang Water Resources Commission. Geological reconnaissance report of Baiyi'an landslide managing and programming phase engineering in Fengjie County, Three Gorges area[R]. Wuhan: General Investigation Bureau of Changjiang Water Resources Commission, 1999.(in Chinese))
- [11] 王颖波. 实用土木工程标准规范[M]. 西安: 西安地图出版社, 2001.(Wang Yingbo. Applied Standard Criterion in Civil Engineering[M]. Xi'an: Xi'an Maps Press, 2001.(in Chinese))
- [12] Morgenstern N R, Price V E. The analysis of the stability of general slip surface[J]. Geotechnique, 1965, 15(1): 79 - 93.