

# 三峡水库调度对库岸斜坡体内渗透压力与斜坡稳定性影响研究

胡亚波<sup>1,2</sup>, 王丽艳<sup>2</sup>

(1. 武汉市建设委员会, 湖北 武汉 430015; 2. 中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 在分析三峡库区松散堆积斜坡岩土体结构和地下水赋存条件的基础上, 着重探讨了三峡水库水位调节时斜坡中渗透压力的作用方式和强度, 用地下水动力学中潜水渗流理论研究某类边界条件下的渗透压力, 提出斜坡渗透压力评价和计算公式, 从而为客观地评价斜坡的稳定性状况、设计合理的斜坡防治工程及节约工程造价提供依据。

**关键词:** 工程地质; 三峡水库; 渗透压力; 稳定性; 防治工程

**中图分类号:** P 642.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)16-2994-04

## RESEARCH ON EFFECTS OF PERMEABILITY PRESSURE ON SLOPE STABILITY DURING REGULATING WATER LEVEL IN THREE GORGES RESERVOIR

HU Ya-bo<sup>1,2</sup>, WANG Li-yan<sup>2</sup>

(1. Construction Committee of Wuhan City, Wuhan 430015, China;

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

**Abstract:** Based on analyzing rock and earth structure in unconsolidated slopes, the style and intensity of permeability pressure in slopes during regulating water level in the Three Gorges Reservoir are discussed. Due to many unsolved boundary problems in simulating variation of water flow in slope, a new formula for calculating permeability pressure in slope is proposed, by studying on permeability pressure in certain boundary conditions with one-dimensional seepage theory. With this formula variation of phreatic surface and permeability pressure in Beimengou landslide in the Three Gorges Reservoir area, are calculated. The results show this formula is reasonable and effective for certain boundary; and it can provide a basis for appraising the stability condition of slopes and designing control projects.

**Key words:** engineering geology; Three Gorges Reservoir; permeability pressure; stability; control project

### 1 引言

水库水位降落诱发古滑坡的复活在国内外都有实例: 我国黄龙滩水库库岸斜坡出现大量古滑坡的

复活与水库水位下降有关; 1941年前苏联伏尔加格勒的滑坡发生与哈查尔含水层的水力坡度在洪水降落时急剧增大有关。

根据勘察成果资料, 三峡库区稳定性较差的库岸长 441 km, 且城镇库岸段长度也达 400 余公里。

**收稿日期:** 2004-04-16; **修回日期:** 2004-06-07

**作者简介:** 胡亚波(1970-), 男, 硕士, 1998年于中国地质大学工程学院环境地质专业获硕士学位, 现为高级工程师、武汉市建设管理委员会副主任, 主要从事环境地质、地质灾害研究和城市建设管理方面的研究工作。E-mail: hu\_wly@eyou.com.

在人类工程活动较为密集的城镇库岸段, 55.53% 为不同成因的松散堆积(滑坡、崩塌、巫山黄土、崩坡积物、河流阶地沉积等松散堆积物)库岸, 其中稳定性较差的滑坡、变形体库岸长 77.8 km, 占城镇库岸长度的 19.5%。对松散堆积库岸滑坡而言, 由于堆积物成因复杂, 地下水主要是崩坡积、残积潜水, 长江水位升降时滑体内的渗透压力变化是十分复杂的, 三峡水库蓄水后, 库区前缘高程在 175 m 以下的一千多处潜在崩滑体的稳定性状况受库水位变动的影响将不可避免的发生改变, 有可能诱发大量崩滑体失稳, 从而威胁库岸稳定和航运安全。

目前, 用极限平衡方法计算、评价滑坡稳定性状况时, 多数斜坡在不同荷载组合工况时是稳定的, 但是在长江水位由 175 m 降至 145 m 时, 稳定系数  $F_s$  急剧下降, 甚至小于 1, 将不得不动用工程治理。但到底是长江水位由 175 m 降至 145 m 引起的渗透压力是导致斜坡失稳的主要原因, 还是在计算中过分估计了这种作用而引起的, 这一问题关系到一个滑坡是否需要治理, 或者是否可以节约防治工程量, 从而节约投资的问题, 因此, 值得重点研究。

## 2 渗流数值分析

### 2.1 三峡水库水位调度

三峡水库运营后, 水位的调度分为两种情况, 一种是每年 10 月左右洪峰过后, 库水位由常水位 145 m 缓慢的抬升到 175 m, 至次年 4~5 月份, 库水位又调整到 145 m, 这个过程水位的变化一般不超过 0.3 m/d, 由此产生的滑坡体内渗透压力也是较小的; 另外一种情况是洪水期间, 由于在每次洪峰到来之前都要较快的释放库容, 水位的升降幅度取决于两次洪峰之间的时间间隔和洪水量的大小, 以及水库的泄洪能力, 据长江水利委员会提供的数据, 这种水位的骤降过程(175~145 m)一般可按最大 1.2 m/d 考虑。

### 2.2 库岸斜坡体内渗流数值分析

水库水位降落使滑坡体内水力坡度不断变化, 水在土体中流动时, 力图拖曳土粒而消耗能量, 此时水流给予土粒的拖曳力即为渗透压力<sup>[1]</sup>。渗透压力的存在必须同时具备 2 个条件, 即土体中存在水头差, 且地下水有向外流动的趋势<sup>[2]</sup>。渗透压力与岩土体的渗透性、给水度以及含水层厚度密切相关。

渗透压力的大小为

$$F = r_w h l i \quad (1)$$

式中:  $r_w$  为水的容重,  $h$  为渗流带厚度,  $l$  为渗流带长度,  $i$  为水力坡度。

渗透压力是一个动态变化量<sup>[3]</sup>, 用条分法计算稳定性系数时, 各条块中出现最大渗透压力的时间是不同的, 如在水位降落初期, 斜坡前缘的水力坡度最大, 对局部浅层土体有较大破坏作用, 但对斜坡整体稳定性的作用并不是最大的, 只有当整个斜坡水力坡度最大时, 渗透压力对斜坡稳定性影响才最大。因此, 这个渗透压力对斜坡整体稳定性计算有实际意义。极限平衡法没有考虑到这种动态变化过程, 计算结果与实际情况有一定出入, 故应该考虑利用渗流分析法。

假设一坡度为  $\varphi$  的顺向坡, 滑体为松散的残坡积、堆积物, 渗透系数为  $k$ , 给水度为  $\mu$ , 部分滑体位于长江水位变动带内(175~145 m)。由于江水的降落是一个相对缓慢的过程, 将赋存于滑体中的潜水视为一维潜水非稳定流<sup>[4-6]</sup>, 滑坡体的后缘为隔水边界, 前缘为给定水头边界, 可概化为半无限含水层中地下水非稳定运动数学模型, 即

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= a \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} & (0 < x < \infty, t > 0) \\ u(x, 0) &= 0 & (0 < x < \infty) \\ u(\infty, t) &= 0 & (t > 0) \\ u(0, t) &= \Delta h_{0,t} & (t > 0) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:  $u(x, t) = h_{x,t} - h_{0,0}$ ;  $a = \frac{kh_m}{\mu}$  为压力传导系数, 且以滑坡后缘做一映射来解决隔水边界问题。

通过求解微分方程, 得到如下水力坡度计算公式:

$$i_{x,t} = \frac{\Delta h}{x} n - \frac{\Delta h}{x} \sum_{i=1}^n F \left[ \frac{x + \Delta h(i-1)c \tan \varphi}{2\sqrt{a(t-t_{i-1})}} \right] + \frac{\Delta h}{x} \sum_{i=1}^n F \left[ \frac{2l + \Delta h(i-1)c \tan \varphi - x}{2\sqrt{a(t-t_{i-1})}} \right] \quad (3)$$

式中:  $n$  为水位降落天数,  $\Delta h$  为水位降落幅度,  $F(x)$  为江水位对地下水位的的影响函数,  $x$  为滑坡内某一点到长江的距离。

将式(3)代入式(1), 可以求出任意时刻的渗透压力, 从而确定最大渗透压力。

### 3 例证与讨论

#### 3.1 例证

由于对滑体中地下水的的作用认识不足，勘查工作中多忽略了对地下水的调查和试验研究，以至多数滑坡勘查中没有给出渗透系数、给水度等水文地质参数，给计算带来困难。这里只能以有限的例子做对比。

北门沟滑坡位于秭归县境内长江北岸，滑坡体由第四系崩滑堆积层与冲洪积堆积层构成。滑坡后缘位于基岩陡坎下，高程 260 m；前缘为长江漫滩，高程 72 m；滑坡面积 0.12 km<sup>2</sup>，最大厚度 28.7 m，平均厚度 18.5 m，坡度为 30°，渗透系数为 1.0 m/d，给水度为 0.20， $\Delta h$  为 1.2 m， $n$  为 25 d。

根据现有的水文地质剖面图计算水位变动带内的含水层平均厚度为 31 m；依据公式计算压力传导系数；因水库的最高蓄水位为 175 m，故视该水位为地下水的初始水位。

编程<sup>[7-9]</sup>及查表计算各时段地下水水位，并绘制不同时刻潜水水面(见图 1)。计算结果表明，降落初期主要是前缘水体的排出，水面呈前陡后缓状，随着江水位的不断降落，水面趋于—倾斜的直线。依据式(3)计算不同时段的水力坡度，对比结果表明，江水水位降落 25 d 时地下水水力坡度最大，为 0.22，最大渗透压力为 170 kN/m，之后水力坡度逐渐趋缓微倾直线。

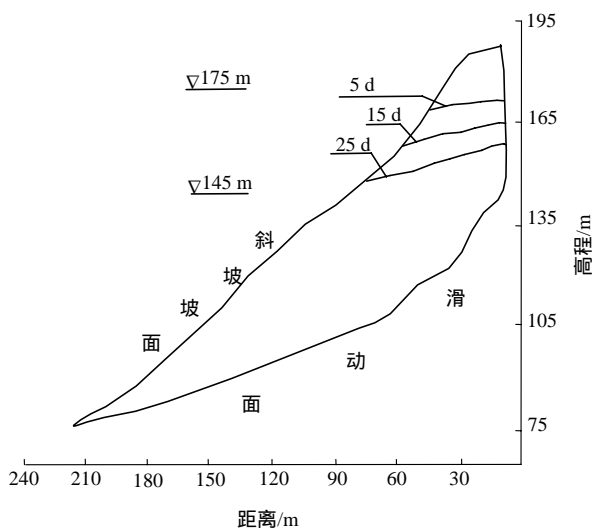


图 1 滑坡体内不同时刻潜水水面图

Fig.1 Phreatic surface at different periods in landslide

将渗透压力考虑为水位由 175 m 骤降至 145 m

的瞬间作用力时，该滑坡的渗透压力为 2 140 kN/m，剩余下滑力为 6 308 kN/m，其渗透压力占到 1/3，显然放大了渗透压力作用。该项目设计阻滑工程的直接费为 995.6 万元，而由此增大的投资将非常可观。

重庆万州安乐寺滑坡，地面高程在 140 ~ 220 m 之间，由二级台阶构成，滑坡体主要由粉质粘土和冲洪积粉砂土组成，厚度不均匀，平均厚度约 23 m，渗透系数取 3 m/d，给水度取 0.25。计算结果为：最大水力坡度约 0.12(坡度 7°)，渗透压力约 90 kN/m，而考虑水位骤降 30 m 时，瞬间渗透压力约为 1 100 kN/m。

需要指出的是：若滑带也在渗透影响带，水位升降的周期性过程对滑带土体具有周期性破坏作用。对斜坡稳定性计算和评价时，滑带土力学参数应选取长期强度或疲劳强度，以更加符合实际情况。

#### 3.2 问题讨论

(1) 斜坡中地下水渗流作用对斜坡稳定性影响很大，应加强对其流态的研究和水文参数的测试工作，同时开展在库水位变动时潜水二维流边界条件处理方法的研究，以便应用有限元等方法以提高计算精度。目前，滑坡勘查中缺乏对水文地质条件的深入分析和研究，不能准确给出计算要求的参数，因此，使用一维潜水非稳定流模型，不失为一种解决问题的思路和办法。

(2) 地下水的运动以水平运动为主是利用一维潜水非稳定流模型模拟随库水位变化斜坡中潜水位的变化过程的前提，因此，斜坡的水文地质条件必需满足 3 个要求，即斜坡上由松散堆积物构成的含水层厚度不小于 30 m；滑动面的倾角不大于 15°；斜坡土体不具有明显的各向异性。

(3) 计算表明，当渗透系数  $k$  小于  $10^{-3}$  m/d 或大于 10 m/d 时，渗透压力作用可以忽略不计。

(4) 条分法计算渗透压力时，滑面形态不同，使不同条块的滑面倾角不同，可以上述公式求最大整个斜坡的水力坡度，再求相应条块下滑力。

(5) 模拟方法和推导的计算公式本身并不存在误差<sup>[10]</sup>，但当地质条件不满足上述 3 个条件时，特别是滑动面的倾角较大时，模拟的结果具有明显的失真性，因此，如何解决边界问题，以便使用二维模型对各种水文地质条件下斜坡中的地下水流进行模拟、计算是下一步研究工作的重点。

## 4 结论和建议

(1) 渗透压力实质上是一个动态变化过程, 各条块中出现最大渗透压力的时间是不同的, 用条分法计算稳定系数时, 应以整个斜坡水力坡度最大时的渗透压力为准。

(2) 在目前还没有较好地解决用二维水流模拟斜坡断块中地下水水流的边界问题的情况下, 对一定水文地质条件下的土质滑坡中地下水可以近似按一维潜水非稳定流模拟<sup>[11]</sup>, 通过求解可以确定各时刻的水力坡度, 从而计算出最大水力坡度, 结合各条块滑面倾角计算得出最大渗透压力。

(3) 该方法得出的渗透压力与计算水位瞬间骤降 30 m 算得的渗透压力差别约一个数量级, 相应的防治方案和投资差别悬殊。

(4) 建议滑坡前期勘察工作中重视对地下水的调查和试验研究, 给出必要的水文地质参数。

### 参考文献(References):

- [1] 柴军瑞, 仵彦卿. 作用在裂隙中的渗透力分析[J]. 工程地质学报, 2001, 1: 29-31.(Chai Junrui, Wu Yanqing. Analyses of permeability pressure in fractures[J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 1: 29-31.(in Chinese))
- [2] 钱家欢. 土力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 1988.(Qian Jiahuan. Soil Mechanics[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1988.(in Chinese))
- [3] 胡亚波, 黄学斌. 长江三峡工程蓄水对链子崖危岩体 T8~T12 缝段稳定性影响研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2002, 27(2): 193-198.(Hu Yabo, Huang Xuebin. Effect of the Three Gorges Project storing on stability of T8-T12 fracture segment of hazardous rocks in Lianziya[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(2): 193-198.(in Chinese))
- [4] 吕文肪, 郭雪宝, 柯葵. 水力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1990.(Lu Wenfang, Guo Xuebao, Ke Kui. Hydraulics[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1990.(in Chinese))
- [5] 陈崇希. 地下水动力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1998.(Chen Chongxi. Groundwater Hydraulics[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1998.(in Chinese))
- [6] 薛禹群. 地下水动力学原理[M]. 北京: 地质出版社, 1986.(Xue Yuqun. Principles of Groundwater Hydraulics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986.(in Chinese))
- [7] 德赛 C S, 克里斯琴 J T. 岩土工程数值方法[M]. 卢世深译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981.(Desai C S, Christian J T. Numerical Methods of Geotechnical Engineering[M]. Translated by Lu Shishen. Beijing: China Architecture and Building Press, 1981.(in Chinese))
- [8] 李俊亭. 地下水流数值模拟[M]. 北京: 地质出版社, 1989.(Li Junting. Numerical Simulation of Groundwater[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989.(in Chinese))
- [9] 陈崇希, 万军伟. 地下水水平井流的模型及数值模拟方法——考虑井管内不同流态[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2002, 27(2): 135-140.(Chen Chongxi, Wan Junwei. A new model of groundwater flowing to horizontal well and numerical simulation approach[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(2): 135-140.(in Chinese))
- [10] Frank T C. T, Zheng S N, William W G. A combinatorial optimization scheme for parameter structure identification in ground water modeling[J]. Ground Water, 2003, 41(2): 156-169.
- [11] Eric M, Ayman A. Ahmed G E. Review of the integrated groundwater and surface-water model (IGSM) [J]. Ground Water, 2003, 41(2): 238-246.