

# 基于有限元法的滑坡地下水渗流场模拟分析

李红军<sup>1</sup>, 王 旭<sup>2</sup>

(1. 中船勘察设计研究院, 上海 200333; 2. 中交第一公路勘察设计研究院, 陕西 西安 710000)

**摘 要:** 水库库岸滑坡是人类工程活动经常遇到的重大工程问题之一, 滑坡中的地下水对坡体的稳定系数起着决定性的作用。三峡库区水库蓄水之后, 库水位在 175 ~ 145m 水位之间周期性波动, 库岸滑坡地下水渗流状态发生较大改变, 可能引起滑坡等岩土体失稳现象的发生, 因此深入研究库水位变化条件下的滑坡地下水渗流场特征对评价滑坡的稳定性具有重要意义。以某库岸滑坡为实例, 利用有限元方法对库水位上升及下降情况下的地下水渗流场变化特征进行了模拟分析, 研究表明, 库水位变化对该滑坡地下水渗流场的影响明显, 该成果对于防治滑坡灾害的发生具有一定的参考作用。

**关键词:** 有限元方法; 库水位变化; 饱和与非饱和渗流; 地下水渗流场; 库岸滑坡

**中图分类号:** TD824.71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004—5716(2009)05—0027—03

## 1 概述

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

边坡(含滑坡)变形破坏的发展及其相应的稳定状态取决于边坡本身所赋存的地质环境条件, 当边坡所赋存的地质环境发生变化时, 边坡变形破坏发展与稳定状态必然相应地发生变化, 故水库库岸滑坡除具有一般山地滑坡的基本特征外, 又有其特殊的一面。其特殊性在于它的活动与库水位的升降有很大的关系。一方面水库的蓄水过程导致坡体浸水体积增加, 滑面上的有效应力减少或抗滑阻力减少, 部分滑带饱水后强度降低; 另一方面库水位骤降时, 由于坡体中地下水位下降相对滞后, 导致坡体内产生超孔隙水压力。所有这些都可能对滑坡的稳定产生不良的影响。

随着三峡水库蓄水以及蓄水后的正常运行, 库水位在 175 ~ 145m 水位之间大幅度和周期性涨落将对库区内滑坡区地下水动力场产生剧烈变化, 不仅会使原有滑坡体复活率增高, 也必然会产生众多的新生滑坡地质灾害。因此, 如何科学地确定库水位变动条件下滑坡地下水渗流场及其变化, 是进行库岸滑坡稳定性分析的基础与关键。基于此, 本文以某库岸滑坡为例, 通过建立二维饱和—非饱和渗流方程, 研究模拟了库水位上升和下降情况下的滑坡地下水暂态渗流场, 对于防治滑坡灾害的发生具有一定的参考作用。

## 2 库水位变化时的滑坡饱和—非饱和渗流场数值模拟

### 2.1 滑坡饱和与非饱和渗流模型

根据三峡库区库水位调控方案, 库水位将在 175 ~ 145m 周期波动。当库水位上升时, 初始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, 随着库水位上升, 初始库水位以上滑体内孔隙水压力也逐渐增加, 土体由非饱和变为饱和状态; 当库水位下降时, 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<sup>[1]</sup>为:

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

式中:  $k_x, k_y$  ——水平和垂直方向的饱和渗透系数;

$w$  ——水的密度;

$g$  ——重力加速度;

$m_w$  ——比水容量, 定义为体积含水量  $w$  对基吸力  $(u_a - u_w)$  偏导数的负值:

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

渗流边界条件为:

水头边界

$$k \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_1 = h(x, y, t) \quad (3)$$

流量边界

$$k \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_2 = q(x, y, t) \quad (4)$$

根据上述基本原理,编制了相应的有限元程序,计算不同时间段的渗流浸润线和结点水头。

### 2.2 库水位边界条件的处理

为考虑库水位变化(上升或下降)对地下水渗流场的影响,需要给出库水位与时间关系曲线和可能的已知水头节点(本文以离散点给出),计算中程序按照时间线性插值求取水头的高程,然后自动识别已知水头节点并做相应处理。

## 3 实例分析

为研究库水位变动时库岸滑坡地下水渗流场特征,本文以某典型库岸滑坡为例,采用编制的有限元程序进行了具体模拟分析。

该库岸滑坡滑体物质组成为黄褐色粘土夹碎块石,块石多数为泥灰岩。滑床基岩的渗透系数很小。区内的地下水与库水位有密切的水力联系,受库水位变动的影响密切。

### 3.1 渗流计算模型

根据库岸滑坡的工程地质特征,选择的主滑剖面作为渗流计算的主剖面。二维有限元网格模型如图 1 所示,共划分 896 个单元,1268 个节点。

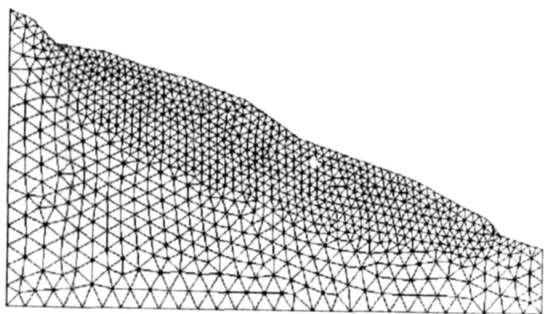


图 1 渗流计算有限元网格模型

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,175 ~ 145m 水位为库水位分阶段变动边界,库水位以上为零流量边界,库水位以下为定水头边界。

### 3.2 渗流计算参数

渗流问题在选取了适当合理的数学模型后,能否得到准确的求解在很大程度上取决于渗流力学特性和参数的准确性。目前,对非饱和土的水力特性还没有通过实验方法进行研究。因此,滑坡体的非饱和渗透系数采用了工程类比法,根据滑体的饱和渗透系数大小和土的粒径分布规律推求其渗透函数。实验测定滑体饱和渗

透系数为 0.8m/d。

### 3.3 渗流计算工况

根据三峡水库蓄水和水库运行情况,确定本次模拟采取的库水位上升和下降的速度均为 1m/d,程序中以已知水头节点的形式作为边界条件给出。计算工况为:

(1)库水位从 145m 升至 175m 及其后 30d 为计算时间段,上升速度为 1m/d。

(2)库水位从 175m 降至 145m 及其后 30d 为计算时间段,下降速度为 1m/d。

### 3.4 初始渗流场模拟

渗流计算须给出初始渗流场,即水位平稳阶段的地下水渗流场是水库水位上升及下降时地下水渗流模拟的基础。

首先利用现河水水位枯水期的地下水观测水位计算单宽剖面上的稳定流量,因枯水期的降水量很小,基本没有入渗补给,所以该流量为剖面上部补给量;进而用稳态法(稳定流)模拟出 145m 以及 175m 初始库水位时滑坡体内的地下水位线,如图 2 和图 3 所示。此后,各渗流计算时段都取上一时段末的各单元水头分布作为计算时的初值。

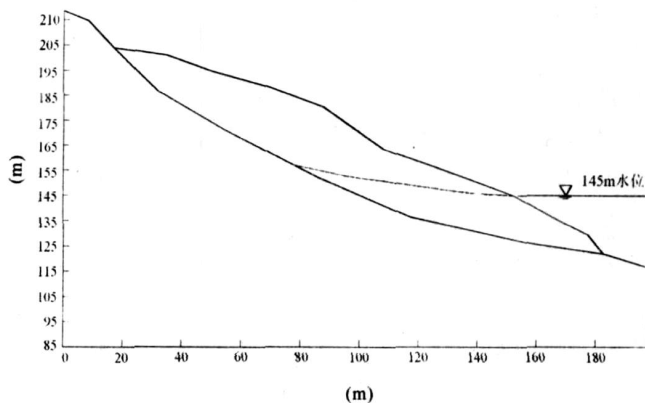


图 2 滑坡初始地下水位线(145m)

### 3.5 渗流模拟结果分析

(1)库水位上升时的地下水渗流场变化特征:根据渗流模拟结果,蓄水 0d(初始水位为 145m)、11d、20d、30d、50d(水位升至 175m 后稳定 30d)时的地下水渗流场变化特征见图 4。图 4 表明,当水位上升时,库水向坡体内入渗速度小于库水位上升速度,于是,滑坡体内地下水都会出现“倒流”现象,从而地下水浸润线都有略向左弯曲的趋势,且随着水位上升,浸润线弯曲程度越大,说明地下水位的变化滞后于库水位变化的程度加大;在库水位升至 175m 后,随着时间的进行,由于地下

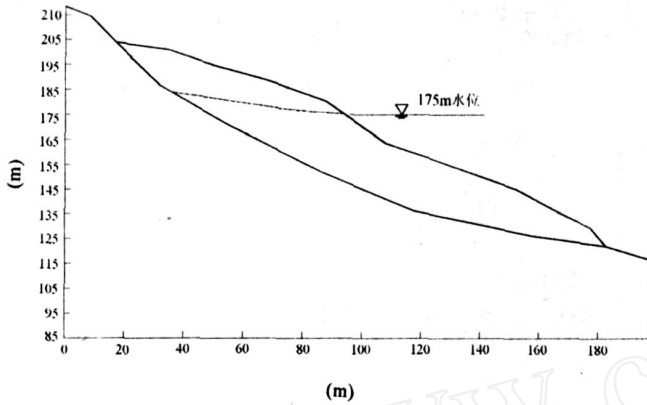
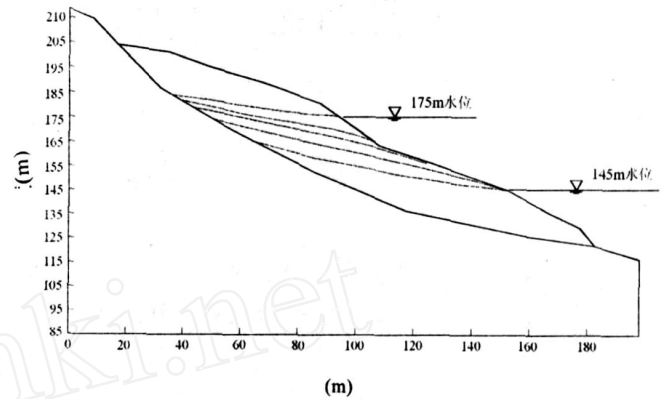
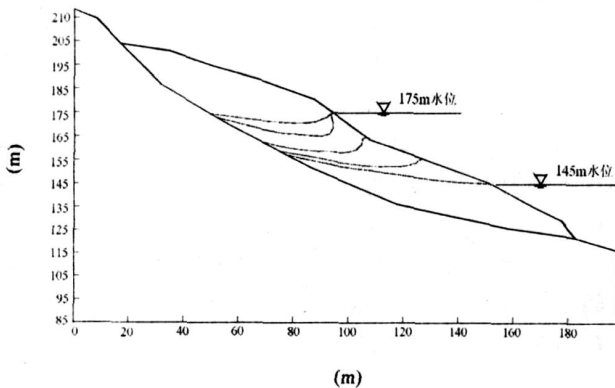


图3 滑坡初始地下水位线(175m)

图5 库水位下降过程中的渗流浸润线  
(时间分别为 0, 10, 19, 30, 60 d 时)

水位的滞后性,坡体内的地下水浸润线会逐渐提升,最终将趋于稳定(稳定流状态),不再变化。

图4 库水位上升过程中的渗流浸润线  
(时间分别为 0, 11, 20, 30, 60d 时)

(2)库水位下降时的地下水渗流场变化特征:根据渗流模拟结果,库水位下降 0 天(初始水位为 175m)、10d、19d、30d、60d(水位降至 145m 后稳定 30d)时的地下水渗流场变化特征见图 5。

由图 5 可以看出,当库水位下降时,坡体内地下水浸润线略凸。

库水位下降稳定( $t = 30d$ ,水位降至 145m)后的一段时间内,由于地下水位的滞后性,坡体内的地下水位会继续降低,直到达到一个稳定值(稳定流状态),不再变化。这与实际情况相符。

对比库水位上升和下降时的地下水浸润线可知,对于相同水位,库水位上升时比库水位下降时地下水位低。此现象与库水位上升时比库水位下降时滑坡稳定

系数大的结论相吻合。

#### 4 结论

(1)在实际库水位变化的条件下,边坡体内地下水渗流场是一个动态非稳定渗流场。本文采用饱和和非饱和渗流理论,通过工程地质类比确定滑体的非饱和渗透系数,进而通过饱和和非饱和渗流的有限元模拟分析得到了库水位变化情况下库岸滑坡地下水渗流场的变化特征,这对于确定滑坡的稳定性变化规律及失稳机理具有重要的参考作用。

(2)当水位上升时,滑坡体内地下水会出现“倒流”现象,浸润线都有略向左弯曲的趋势,在滑体前缘产生较大的静水压力,改变了滑坡的稳定性。滑坡体地下水渗流自由面在初期变化都很快,随着时间的进行,渗流自由面最终将趋于稳定。

(3)当水位下降时,滑坡体地下水浸润线在初期变化较快,将会产生较大的动水压力,降低滑坡的稳定性。

#### 参考文献:

- [1] 陈崇希,林敏.地下水动力学[M].中国地质大学出版社,1998.
- [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.
- [3] 刘新喜,夏元友,张显书,等.库水位下降对滑坡稳定性的影响[J].岩石力学与工程学报,2005,24(8):1439-1444.
- [4] 彭刚,罗先启,田斌.黄腊石滑坡非饱和非稳定渗流分析[J].武汉水利电力大学学报,1999,21(3):201-204.
- [5] 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.
- [6] 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.