

Groundwater Seepage Field Numerical Calculation for the Landslide under the Effect of Reservoir Water Level Change

Feng Yong^[1], Wu Cheng-xia^[2], Lv Xiu-juan^[2]

(1. Civil engineering school of Henan University of Technology, Zhengzhou, 450052, China;
2 Henan technical college of construction, Zhengzhou, 450007, China;)

Abstract: After the impoundment of The Three Gorges, the water level changes from 145m to 175m intermittently, the consecutive range of the groundwater seepage filed for landslide along the reservoir along the bank will cause the destabilization of the landslide. Therefore, it is very important to study the law for the landslide groundwater seepage of landslide. In this paper, based on the water level leverage plan of the Three Gorge Reservoir, taking a typical accumulation horizon landslide as an example, the finite element numerical analog computation based on the saturation and non-saturated theories was used to study the groundwater seepage situation under the effect of reservoir change. It is found that the water level change after the reservoir impound had conspicuous effect on the groundwater field of landslide along the reservoir bank, the related conclusions can give important references for the prevention and cure of landslide geological disasters in the Three Gorge Reservoir area.

Keywords: Three Gorge Reservoir area; landslide along the reservoir bank; water level change of reservoir; groundwater seepage field

库水位升降作用下滑坡地下水渗流场数值计算

冯永^[1], 吴承霞^[2], 吕秀娟^[2]

(1. 河南工业大学土木建筑学院, 河南 郑州, 450052; 2. 河南建筑职业技术学院, 河南郑州, 450007)

摘要: 三峡库区水库蓄水之后, 库水位在 145~175m 水位之间周期性升降, 将引起库岸滑坡体内的地下水渗流场发生连续的变化, 可能引发滑坡等岩土体失稳现象的发生。因此, 对库水位升降作用下库岸滑坡地下水渗流场的变化规律进行研究显得十分重要。根据三峡水库水位调控方案, 以库区某典型堆积层滑坡为实例, 利用饱和与非饱和有限元数值模拟方法对其在库水位升降作用下的地下水渗流状况进行了计算。研究表明, 三峡库区水库蓄水后水位变化对库岸滑坡地下水渗流场的影响明显, 该成果对于防治库区滑坡地质灾害具有一定的参考作用。

关键词: 三峡库区; 库岸滑坡; 库水位升降; 地下水渗流场

1 引言

三峡库区沿江存在着众多的老滑坡以及库岸堆积体, 这些岸坡地质体受库水位周期性升降影响很大。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, 由于坡体中地下水下降相对滞后, 导致坡体内产生动水压力, 所有这些都可能对滑坡的稳定性产生不良的影响。

琼斯等^[1]调查了 Roosevelt 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 10~20m 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。

当三峡水库蓄水后, 一个水文年内库水位将在 145~175 m 之间变化, 水位波动幅度达 30m, 不仅会使老滑坡体复活率增高, 也必然会产生水库新生型滑坡地质灾害。而如何科学地确定库水

位升降作用下的滑坡地下水渗流场，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，采用饱和—非饱和有限元数值模拟方法计算了库水位上升和下降作用下的滑坡地下水渗流场，这对于防治库区滑坡地质灾害具有一定的参考作用。

2 库岸滑坡地下水渗流场数值计算

2.1 基本理论及计算模型

三峡库区蓄水后，库水位将在 145~175m 之间周期性升降波动。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，将两者统一起来即为饱和与非饱和问题。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^[2]：

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

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：

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

渗流边界条件为：

水头边界

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

流量边界

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

根据上述基本原理，编制了 Seepage 有限元程序，用以计算库水位升降作用下的滑坡地下水渗流场。

2.2 有限元程序实现中的若干问题

(1) 库水位边界条件的处理

程序可考虑库水位升降对地下水渗流场的影响，以已知水头节点的形式作为边界条件给出。为考虑地下水位随时间的变化情况，需给出水位与时间关系曲线（以离散点给出）和可能的已知水头节点，计算中程序按照时间线性插值求取水头高程，然后自动识别已知水头节点并做相应处理。

(2) 有限元迭代计算的时间步长问题

由于迭代计算过程中，时间步长直接影响到计算收敛速度和精度，故有必要选取一个合理的步长。但是，计算前我们很难综合众多因素确定合理时间步长，且随着地下水水位的变化、非饱和和土体的体积含水量变化，其最佳迭代计算时间步长也在不断改变。为此，程序在迭代过程中采用自动调整时间步长方式予以解决。

3. 工程实例分析

长江三峡库区岸坡除基岩外多为古滑体或松散堆积体，本文以库区一典型松散堆积层滑坡为例，采用有限元法模拟库水位升降作用下库岸滑坡的地下水渗流特征。

该库岸滑坡堆积体物质主要为第四系冲积层的黄褐色和棕红色粘土夹碎石，滑床基岩的渗透系数很小。滑体内地下水与库水位有密切的水力联系，三峡水库蓄水后，由于库水位涨落引起的滑体内地下水位升降将对边坡稳定性产生较大的影响。

3.1 渗流计算模型

根据该库岸滑坡的工程地质特征，选择该滑坡的主滑剖面作为渗流场计算的主剖面。二维有限元网格模型如图 1 所示，共剖分 891 个单元，1136 个节点。

渗流边界为：滑面为隔水边界即零流量边界，175~145m 水位为库水位分阶段（逐日）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。

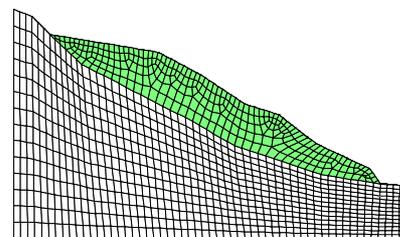


图1 渗流计算有限元网格模型

3.2 渗流计算工况

根据三峡水库调控方案，确定本次模拟采取的库水位上升速度为 1m/d，库水位下降的速度为

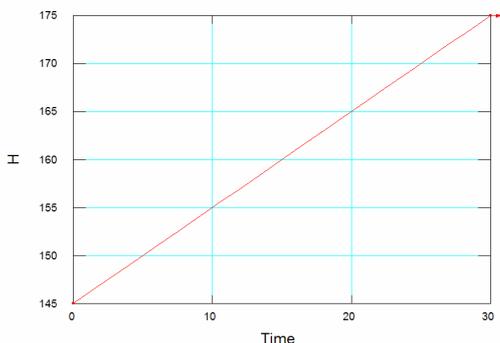


图2 库水位上升过程的水头边界函数

0.5m/d。图 2、图 3 对应库水位上升和下降时的水头边界函数。

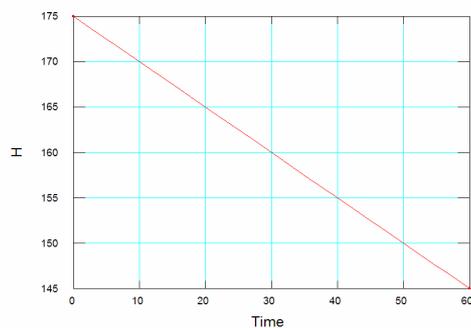


图3 库水位下降过程的水头边界函数

渗流计算工况为：

(1) 库水位上升时：以库水位从 145m 升至 175m 及其稳定后 15 天为计算时间段，上升速度为 1m/d。

(2) 库水位下降时：以库水位从 175m 降至 145m 及其稳定后 15 天为计算时间段，下降速度为 0.5m/d。

3.3 渗流计算参数

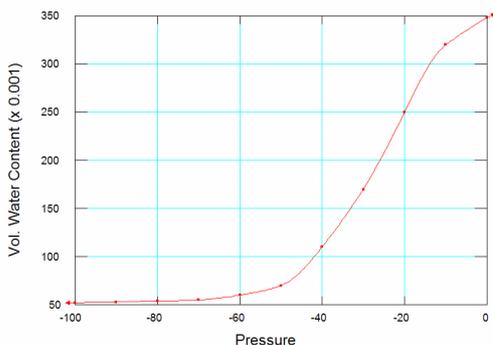


图4 滑体土-水特征曲线

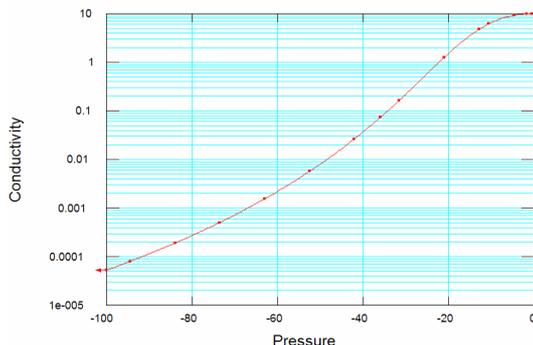


图5 滑体渗透系数函数曲线

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参数的准确性。目前，对三峡库区非饱和土的性状还没有通过实验方法进行研究。因此，滑坡体的非饱和和渗透系数采用了工程类比法，根据滑体的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 4 和图 5 所示。

3.4 渗流场初始条件模拟

对于初始条件，即平稳阶段的渗流场模拟是水库水位上升及下降渗流模拟的基础，其主要是利用稳态法（稳态流）模拟 145m 和 175m 水位

下边坡的地下水位。

对于初始条件（145m 和 175m）下滑坡体内地下水位的确定，通常有三种方法：一是根据钻孔中地下水位的埋深资料，利用插值方法或趋势面分析得到；二是先利用类比方法确定该地区的水力坡度，利用该水力坡度和现今的库水位推算出各单元的地下水位埋深；三是对模型进行稳定流模拟，利用模拟结果作为模型的平稳阶段的地下水位。本文模拟采用了后两种方法，首先利用水力坡度和稳定水位（145m 和 175m）推算出各单元的地下水位埋深，利用该埋深作为初始水头

赋给计算模型各个单元，进行稳定流模拟，模拟后得到稳定水位下该滑坡地下水位初始位置如图6和图7所示。

此后，各渗流计算时段都取上一时段末的水头分布作为计算时的初值。

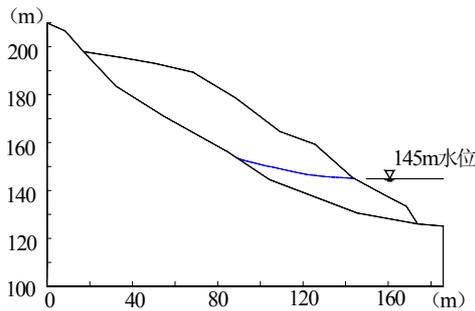


图6 滑坡初始地下水位线 (145m)

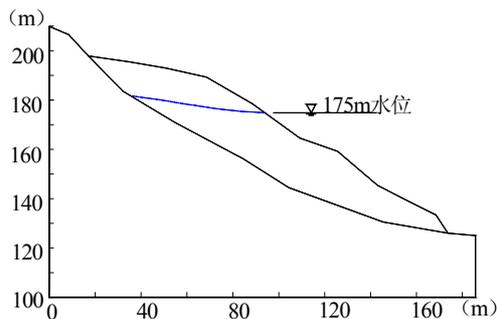


图7 滑坡初始地下水位线 (175m)

3.5 渗流场计算结果分析

(1)库水位上升时的地下水渗流场变化规律
根据渗流计算结果，初始水位 (145m)、蓄水5天、11天、20天、30天、45天 (水位升至175m后稳定15天) 时的地下水渗流场变化规律见图8。

图8表明，在水位上升初期，滑体内临近库水位边界处潜水位变化很快，库水向坡体内入渗速度小于库水位上升速度，于是，在边界处出现“反灌倒流”现象，地下潜水位线 (渗流浸润线) 有略向左弯曲的趋势，这必然在滑坡前缘产生较大的指向坡内的静水压力，这对滑体的稳定是有利的。

而且随着库水位上升，地下潜水位线弯曲程度越大，说明地下水位的滞后于库水位变化的程度加大。在库水位升至175m稳定后，随着

时间的进行，由于地下水位的滞后性，坡体内的地下水渗流自由面 (地下潜水位线) 会逐渐提升，最终将趋于稳定 (达到稳定流状态)，不再变化。

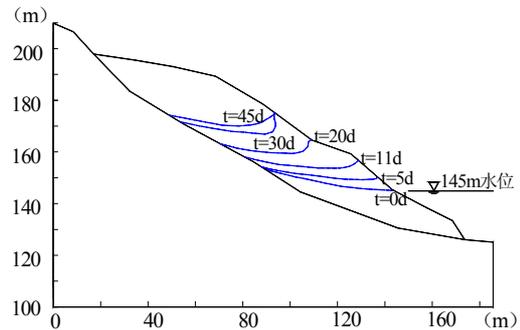


图8 库水位上升过程中 (蓄水时间分别为0, 5, 11, 20, 30, 45d 时) 的渗流浸润线

(2)库水位下降时的地下水渗流场变化规律
根据渗流计算结果，初始下降水位 (175m)、库水位下降20天、38天、50天、60天、75天 (水位降至145m后稳定15天) 时的地下水渗流场变化规律见图9。

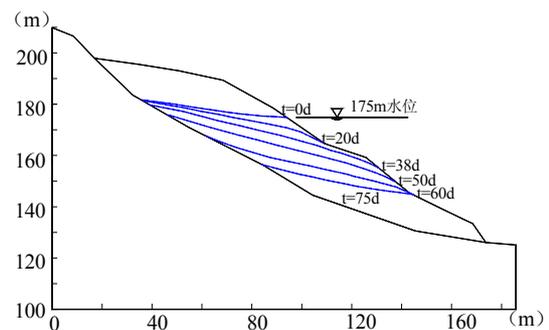


图9 库水位下降过程中 (时间分别为0, 20, 38, 50, 60, 75d 时) 的渗流浸润线

由图9可以看出，当库水位下降时，滑体内临近库水位边界处潜水位变化很快，地下水向坡外排出速度小于库水位下降速度，于是，在边界处水头差很大，出现“落水”现象，坡体内地下潜水位线 (渗流浸润线) 略凸，这必然在滑坡前缘产生较大的指向坡外临空面的渗透压力，从而降低滑坡的稳定性，可能导致滑坡堆积体的复活。

库水位下降稳定 ($t=60d$, 水位降至145m) 后的一段时间内，由于地下水位的滞后性，坡体内的地下水渗流自由面会继续降低，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。

4. 结论

(1)库水位升降是导致库岸滑坡的重要诱发因素。在库水位升降影响下，地下水渗流场是一个动态渗流场。本文采用饱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。进而通过有限元分析计算得到了水位周期性变化下库岸滑坡地下水渗流场的变化规律。

(2)当水位上升时，滑坡体内地下水会出现“反灌倒流”现象，从而地下潜水位线都有略向左弯曲的趋势，对滑体前缘产生较大的指向坡内的静水压力，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，自由面最终将趋于稳定。

(3)当水位下降时，滑坡体内地下水会出现“落水”现象，坡体内地下潜水位线略凸，将会产生较大的指向坡外临空面的渗透压力，降低滑坡的稳定性。

(4)三峡库区水库蓄水及正常运行后改变了库岸滑坡地下水渗流场，对库岸滑坡稳定性影响

及失稳机理研究仍将是今后研究的重要课题。

References (参考文献)

- [1] Zhongcun haozhi, Discussion of reservoir landslide[J], *Journal of water and soil conservation*, 1990, 10 (1): 22-28.
中村浩之, 论水库滑坡[J], 水土保持通报, 1990, 10 (1): 22-28
- [2] Chen Zong-xi, Lin min. Groundwater dynamics[M], *Press of china university of geoscience*, 1998.
陈崇希, 林敏. 地下水动力学[M], 中国地质大学出版社, 1998
- [3] Zheng Ying-ren, Shi Wei-min, Kong Wei-xue. The computation for the seepage force and seepage line under the falling of reservoir level[J], *Chinese journal of rock mechanics and engineering*, 2004, 23 (18): 3203-3210
郑颖人、时卫民、孔位学. 库水位下降时渗透力及地下水浸润线计算[J], 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (18): 3203-3210
- [4] Liu Xin-xi, Xia Yuan-you, Zhang Xian-shu. The effect of the reservoir level falling on the landslide stability[J], *Chinese journal of rock mechanics and engineering*, 2005, 24 (8): 1440~1444.
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): 1440~1444