

Discussion of the Influence of the Sliding Surface Shape on Slope Stability under Rainfall and Water Level Change of Reservoir

Qiuming Song

Hubei Geological Survey Foundation Engineering Co. Ltd., Wuhan Hubei
Email: 335941860@qq.com

Received: Sep. 1st, 2019; accepted: Sep. 11th, 2019; published: Sep. 18th, 2019

Abstract

Based on the FEM analysis of unsaturated seepage of slope and strength of unsaturated soil, adopted the assumption of rigid body limit equilibrium, we compose a calculation program called USSP. By using the program, the variations of safety of landslides of which the slice is up concave and line under rainfall and water level change of reservoir are researched, and the impact of permeation, buoyancy and rainfall to glide force and antislice force are also analyzed. The results show that: to the slide which slice is up concave, the impact of buoyancy is significant and related closely to water change, and the most dangerous condition is stable high water level. To the slide which slice is line, the impact of permeation is significant and related closely to water change too, and the most dangerous condition is at the beginning of reaching the low water level.

Keywords

Slope, Unsaturated Seep, Stability

降雨与库水升降时滑面形态对滑坡稳定性影响探讨

宋秋明

湖北省地质勘察基础工程有限公司, 湖北 武汉
Email: 335941860@qq.com

收稿日期：2019年9月1日；录用日期：2019年9月11日；发布日期：2019年9月18日

摘要

本文将基于边坡非饱和渗流的有限元分析结果，将非饱和土强度公式引入剩余推力法，建立边坡稳定性系数计算方法，编制计算程序USSP。应用计算程序，选取三峡库区滑面形态为下凹和直线型两种滑坡，定量分析了降雨入渗、库水变动对滑坡下滑力和阻滑力的影响。结果表明：下凹型滑坡浮托减重效应占主导地位，引起的下滑力和阻滑力变化较大，与库水变动关系密切；稳定高水位时最危险。直线型滑坡渗透作用占主导地位，与库水变动关系密切；刚降至低水位时最危险。

关键词

边坡，非饱和渗流，稳定性

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 概述

三峡库区库岸边坡的稳定影响着工程正常运营和人民生命财产的安全。边坡稳定的影响因素从内因看有滑面形态，岩土体强度等；常见外因有降雨和库水升降。因此，探索上述因素对边坡稳定性的影响规律具有一定的实际意义。

边坡稳定性评价分析方法包括刚体极限平衡法[1]和数值方法[2]。当前，对边坡稳定性分析中主要考虑的因素有土体容重、粘聚力及内摩擦角等，如彭小云等[3]基于灰度关联分析法分析了影响高边坡稳定的因素，结果显示重力及滑动面的强度参数是影响边坡稳定的主要因素。廖珊珊[4]分析了土体容重、粘聚力、内摩擦角、坡高、坡率和地下水位线位置等因素对边坡稳定性的影响，发现随着地下水位线的升高，边坡的稳定性逐渐变差。蒲朝钦等[5]等基于FLAC3D分析了不同影响因素对层状岩质边坡稳定性的安全系数敏感程度。发现摩擦角、内聚力、容重、泊松比与边坡安全系数的变化规律接近于线性变化，对边坡稳定性影响权重从小到大依次为泊松比、容重、内聚力、摩擦角。

从已有研究来看，针对滑面形态对稳定性影响的研究偏少。因此，针对三峡库区滑面形态为下凹和直线型两个典型滑坡，基于非饱和土渗流和强度理论，采用刚体极限平衡法，分析降雨和库水变动对滑坡下滑力和阻滑力的影响。

2. 基本理论和方法

本文边坡稳定性系数计算思路是，首先采用有限元法计算边坡在降雨和库水升降条件下的非饱和和渗流场，然后基于渗流场计算边坡土体受到的渗透力，再将非饱和土强度公式融入剩余推力法，主要考虑的荷载为土体自重(饱和土体采用浮容重)和渗透力，并分别统计这些力对稳定性系数的定量影响。所涉及的主要理论分述如下。

2.1. 非饱和土渗流

目前，多采用Richards方程[6]作为非饱和土渗流模型：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(h) \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y(h) \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] = C(h) \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1)$$

方程的定解条件为:

① 边界条件:

$$\begin{aligned} \phi|_{S_1} &= \phi_b(x, y, z, t) \\ k_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \cos(n, x) + k_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \cos(n, y)|_{S_2} &= q \end{aligned} \quad (2)$$

② 初始条件

$$\phi|_{t=0} = \phi_0(x, y, z) \quad (3)$$

式中 x, y 为坐标, y 轴竖直向上为正; ϕ 为总水头; ϕ_0 为初始时刻势函数(或称水头函数); $C(h)$ 为容水度; k_x, k_y 为 x, y 方向上的渗透系数; S_1 为水头已知的边界, S_2 为流量已知的边界; q 为边界上流量, n 为边界外法线方向。

对降雨入渗边界的处理方式: 先按真实的降雨边界进行一次试算, 如果坡面节点水压力大于 0, 则将坡面降雨流量边界改为水头边界, 水头为坡面节点的 y 坐标, 重新计算, 并将结果作为该时步的最终结果, 然后再进行下一时步的计算。

2.2. 非饱和土强度

采用 Fredlund [7] 提出的基于双应力状态变量的非饱和土的抗剪强度表达式:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi + s \tan \varphi^b \quad (4)$$

式中, τ_f 为土体抗剪强度; c 为土体粘聚力; σ 为滑面的法向应力; φ 为土体摩擦角; s 为吸力; φ^b 为非饱和土摩擦角。

3. 滑坡稳定性系数计算及讨论

在降雨和库水升降条件下, 本节针对滑面形态为下凹和直线两种形态的滑坡, 分别其计算稳定性系数变化过程。考虑的工况为两种:

工况一: 仅库水变化。变化规律概化如下: 从 9 月 1 日开始, 以 0.4 m/d 的速率经历 75 天上升到 175 m 水位; 从 11 月 15 日开始, 在 175 m 水位稳定 148 天后, 至次年 4 月 10 日; 从 4 月 11 日开始, 以 0.3 m/d 的速率经历 40 天水位降落到 163 m 水位; 从 5 月 21 日开始, 以 1.2 m/d 的速率经历 15 天水位降落到 145 m 水位; 从 6 月 5 日开始, 在 145 m 水位稳定 87 天, 至 8 月 31 日。次工况无降雨。

工况二: 库水保持在 145 m 不变; 降雨按 100 mm/d, 持续 3 天考虑。

计算参数如表 1 所示。

Table 1. The material parameters of landslide
表 1. 滑坡材料参数表

| 分区 | 干容重 kN/m ³ | 饱和容重 kN/m ³ | C kPa | φ 度 | φ^b 度 | k_s m/d |
|----|--------------------------|---------------------------|----------|----------------|------------------|--------------|
| 滑体 | 18 | 22 | 13 | 19.6 | 5 | 10 |
| 滑带 | 17 | 21 | 10 | 14 | 5 | 0.1 |

3.1. 滑带为下凹型滑坡

滑坡几何形态如图 1 所示。

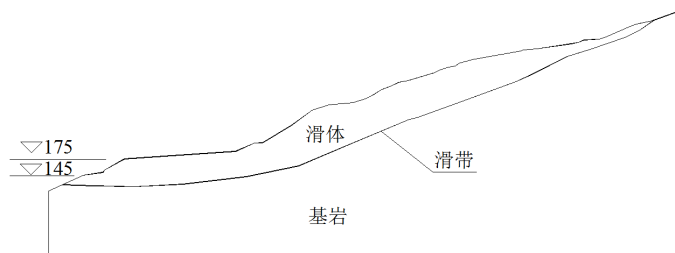


Figure 1. The section of landslide
图 1. 滑坡剖面图

1) 工况一安全系数变化规律

由图 2 可知, 安全系数变化规律是: 随着水位抬升, 安全系数逐步下降; 当水位升到 175 m 高程后, 安全系数仍然降低, 但速率减缓, 至 175 m 水位最后时刻, 降至最低; 后随水位下降安全系数有所提高。安全系数变化快慢与库水升降速率有密切联系, 水位升降速率越大, 则安全系数变化越快。安全系数变幅约为 0.07, 在 175 m 高程终止时刻最低。

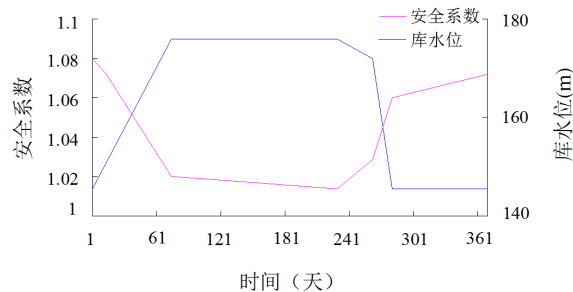


Figure 2. The changes of slope safety under condition 1
图 2. 工况一安全系数变化过程

2) 工况一浮托减重作用分析

当滑面形态一定时, 由边坡滑体的干容重引起的下滑力是一个常数, 本滑坡约为 280,442 kN。库水浮力会同时降低下滑力、阻滑力。下面分别给出浮托减重作用引起的下滑力和阻滑力降低的力与干容重下滑力的比值(百分数)随时间变化过程。

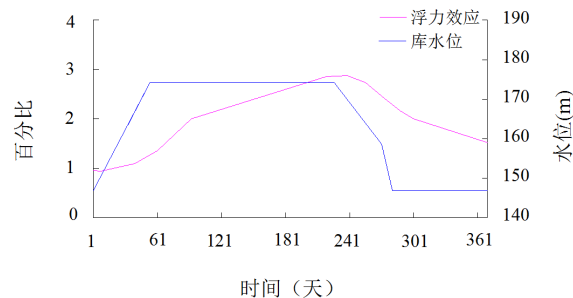


Figure 3. The change of glide force versus deadweight glide force
图 3. 下滑力增量与自重下滑力比值变化过程

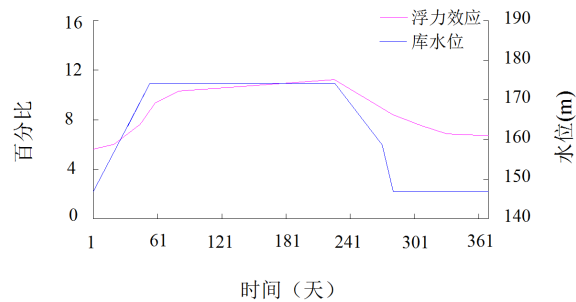


Figure 4. The change of antislip force versus deadweight antislip force
图 4. 阻滑力增量与自重下滑力比值变化过程

由图 3 和图 4 可知,阻滑力变化幅度比下滑力变化大,下滑力变幅约为 3%,而阻滑力变幅约为 8%。水位上升对滑坡稳定不利。下滑力和阻滑力变化与库水升降有明显相关性。

另外,尽管水位上升时,向坡内有一定的渗透力有利于边坡稳定,但效果不明显。根据计算结果,渗透力引起的下滑力增量约为自重下滑力的 10^{-4} 量级;阻滑力增量约为自重下滑力的 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 量级。浮托减重效应占据上风。

3) 工况二安全系数变化规律

工况二安全系数变化规律见图 5,可以看出降雨对安全系数有不利影响,但降低幅度不大,安全系数从 1.079 降到 1.075,随后逐步回升。

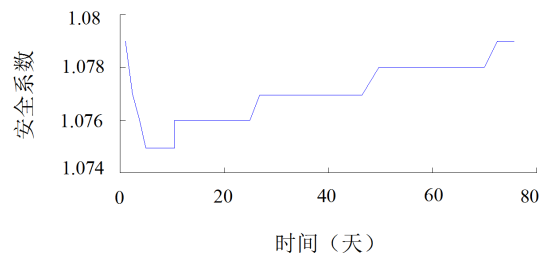


Figure 5. The change of safety under condition 2
图 5. 工况二安全系数变化过程

4) 工况二降雨入渗影响分析

降雨入渗对边坡稳定性不利的的影响主要有增加土体自重(即本文所说的水的附加重力)、产生不利水荷载(渗透力)、降低土体强度。从计算所得数据来看,入渗水分并未到达滑面。因为,3 天累积的降雨总量不过 0.3 m (单位长度上),相对于滑体厚度(约 30 m)而言非常小,水分在入渗过程中早被消耗殆尽(用于饱和或增加土体含水率),尽管会降低滑带土体吸力,但十分有限。采用连续均质模型,也无法模拟水分通过集中渗透通道快速到达滑带。因此这种计算模型,很难真实的反映水分对土体强度的降低效果。

由计算所得数据,水的附加重力引起的阻滑力和下滑力变化不大,下滑力一直保持在 4500 kN 左右;而阻滑力一直保持在 4050 kN 左右。可以看到,下滑力略大于阻滑力,体现了不利影响,但总体来讲,受降雨影响不大。另外,降雨渗透力引起的下滑力和阻滑力的增量,与自重下滑力相比约为 10^{-4} 左右,与自重引起的阻滑力之比约为 10^{-5} 左右。这些均是因为降雨总量相对较小。从计算结果来看,降雨对安全系数的影响很小,与实际情况有较大出入,需要进一步探索其原因。

3.2. 滑带为直线型边坡

滑坡几何形态如图 6 所示。

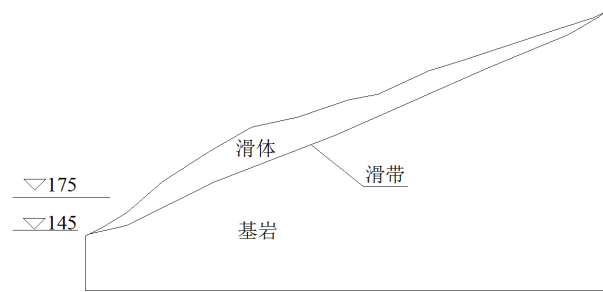


Figure 6. The section of landslide
图 6. 滑坡剖面图

1) 工况一安全系数变化规律

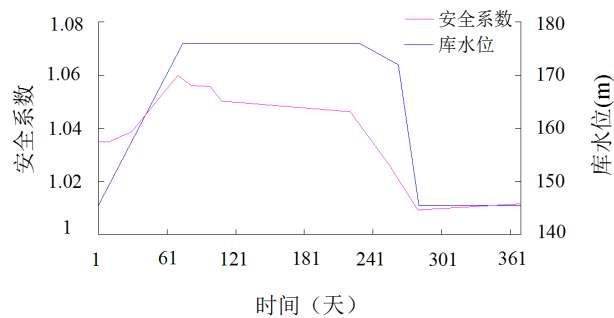


Figure 7. The changes of slope safety under condition 1
图 7. 工况一安全系数变化过程

由图 7 可知, 安全系数变化规律是: 随着水位抬升, 安全系数逐步提高; 当水位升到 175 m 高程不变后, 安全系数有所回落; 后随水位下降, 安全系数加速降低; 水位到达 145 m 高程后, 安全系数又有所提高。安全系数变幅约为 0.06, 在刚降至 145 m 时最低。

2) 工况一浮托减重作用分析

该滑坡自重下滑力约为 66,683 kN。浮托减重作用引起的下滑力和阻滑力降低的力与干容重下滑力的比值(百分数)随时间变化过程分别见图 8 和图 9。

由图 8 和图 9 可知, 阻滑力变化幅度比下滑力变化小, 下滑力变幅约为 3%, 而阻滑力变幅约为 2%。水位上升对滑坡稳定有利。

工况一中, 渗透力引起的下滑力增量、阻滑力增量变化规律见图 10 和图 11。

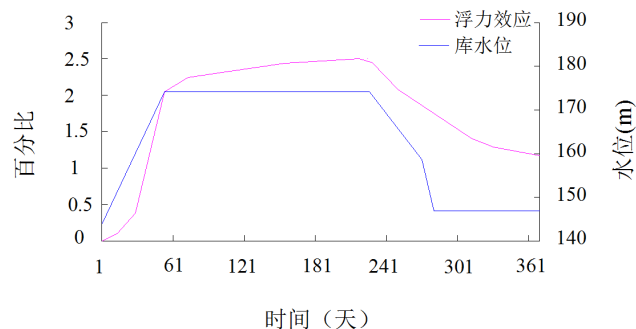


Figure 8. The change of glide force versus deadweight glide force
图 8. 下滑力增量与自重下滑力比值变化过程

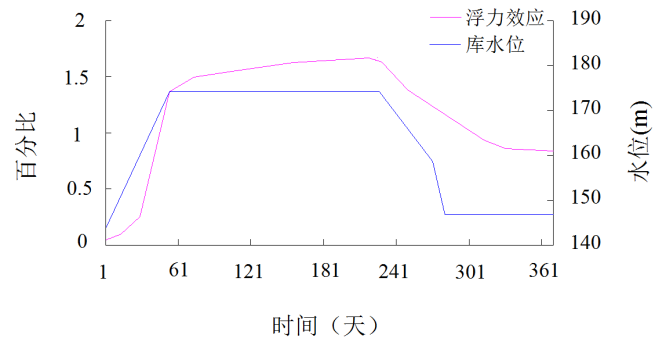


Figure 9. The change of antislip force versus deadweight antislip force
图 9. 阻滑力增量与自重下滑力比值变化过程

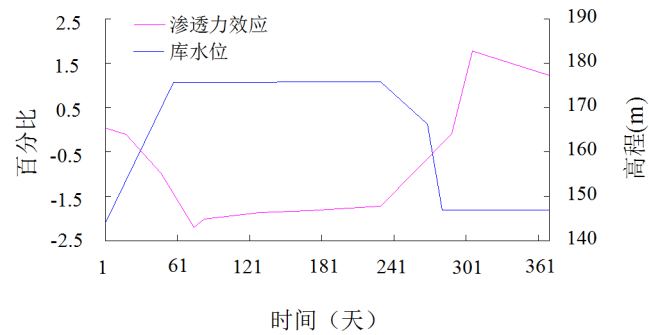


Figure 10. The change of glide force versus deadweight glide force
图 10. 下滑力增量与自重下滑力比值变化过程

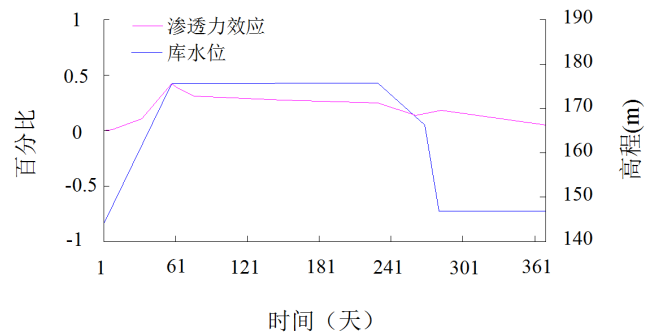


Figure 11. The change of antislip force versus deadweight antislip force
图 11. 阻滑力增量与自重下滑力比值变化过程

由图 10 和图 11 可知，阻滑力变化幅度不大，约为 0.5%，且渗透力增加了阻滑力；而下滑力变幅较大，从-2.5%~2.5%，而且水位上升至 175 m 并持平时，对下滑力起到的是降低作用，水位下降至 145 m 并持平时，对下滑力起到的是增大作用。

4. 结语

本文针对三峡库区滑面形态为下凹和直线型两个典型滑坡，基于非饱和土渗流和强度理论，采用刚体极限平和法，分析了降雨和库水变动对滑坡下滑力和阻滑力的影响。结果表明：下凹型滑坡浮托减重效应占主导地位，引起的下滑力和阻滑力变化较大，与库水变动关系密切；稳定高水位时最危险。而直线型滑坡渗透作用占主导地位，与库水变动关系密切；刚降至低水位时最危险。

参考文献

- [1] 王俊萍, 温霞, 贾婷立. 基于刚体极限平衡法的不同透水条件岸坡稳定性研究[J]. 建材与装饰, 2018, 551(42): 187-189.
- [2] 刘勇. 基于改进极限平衡法的非饱和边坡稳定分析[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(8): 40-45+68.
- [3] 彭小云, 张婷, 秦龙. 高陡边坡稳定性的影响因素分析[J]. 西北建筑工程学院学报(自然科学版), 2002, 19(3): 14-17.
- [4] 廖珊珊, 张玉成, 胡海英. 边坡稳定性影响因素的探讨[J]. 广东水利水电, 2011(7): 31-34+40.
- [5] 蒲朝钦, 余红兵, 李继业, 等. 层状岩质边坡安全系数敏感性分析[J]. 工程爆破, 2018, 24(4): 14-18.
- [6] Richards, L.A. (1931) Capillary Conduction of Liquids in Porous Mediums. *Physics*, **1**, 318-333.
<https://doi.org/10.1063/1.1745010>
- [7] Fredlund, D.G. and Morgenstern, N.R. (1977) Stress State Variables for Unsaturated Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, **103**, 447-466.