

库水位骤降影响下岸坡稳定性分析研究

何宁¹ 唐珏凌²

(1. 甘肃电投炳灵水电开发有限责任公司, 临夏 731600;

2. 成都工业职业技术学院, 成都 610213)

摘要: 库水位骤降是引起库区岸坡失稳的一个重要因素, 为分析库水位骤降条件下岸坡稳定性的变化, 利用刚体极限平衡中条分法计算原理, 对库水位骤降条件下的滑动力矩及抗滑力矩进行分析, 以某抽水蓄能下水库为例, 采用数值模拟软件 SEEP-W 中渗流模块, 研究库水位骤降情况下岸坡渗流及孔隙水压力的变化, 并依据 SWOPE-W 模块, 对水位骤降条件下的岸坡稳定性进行分析计算。计算结果表明: 随着库水位的下降, 岸坡稳定性系数总体呈现先减小后增大的趋势, 但增大的量值较小, 最终稳定性系数趋于稳定。

关键词: 库水位骤降; 数值模拟; 稳定性系数; 刚体极限平衡

中图分类号: TV139.1; TU457; TV74 **文献标识码:** A

ANALYSIS AND STUDY ON THE INFLUENCE OF SUDDEN DROP OF RESERVOIR WATER LEVEL ON THE STABILITY OF LOWER BANK SLOPE

HE Ning¹, TANG Jue-ling²

(1. Gansu Power Investment Group Bingling Hydropower Company Development Co., Ltd, Linxia 731600, China;

2. Chengdu Vocational & Technical College of Industry, Chengdu 610213, China)

Abstract: The sudden drop of reservoir water level is an important factor that causes the bank slope instability. In order to analyze the changes of bank slope stability under the condition of sudden drop of reservoir water level, the sliding moment and anti-sliding moment under the condition of sudden drop of reservoir water level are analyzed based on the calculation principle of rigid body limit equilibrium middle strip division method. Taking a reservoir under pumped storage energy as an example, the seepage module of the numerical simulation software SEEP-W is adopted. The changes of seepage force and pore water pressure of bank slope under the condition of water level plummeting are studied, and the stability of bank slope under the condition of water level plummeting is analyzed and calculated according to SWOPE-W module. The calculation results show that with the decrease of reservoir water level, the bank slope stability coefficient decreases first and then increases, but the increasing value is small, and the final stability coefficient tends to be stable.

Key words: reservoir water level plummeting; numerical simulation; stability coefficient; rigid body limit equilibrium

1 引言

随着我国大力兴建水利设施,各种水库、抽蓄电站的建成,库区岸坡稳定性的研究越来越重要,其中库水位骤降时工况是引起库区边坡失稳的重要因素^[1-2]。

在库水位骤降条件下,渗透力作用使得坡体下滑力增大,极易诱发岸坡失稳破坏。1963 年在意大利 Vajoint 水库,在库水位骤降情况下库区岸坡发生大规模滑坡^[3];三峡水库自 2003 年试验蓄水以来,由于水位骤降发生过多次崩塌、滑坡事件^[4]。由于库水位骤降而引起的崩塌、滑坡等地质灾害造成了巨大的人员及经济损失的案例数不胜数^[5-7]。针对库水位骤降影响下岸坡稳定性分析,国内外学者进行了很多研究,主要有极限平衡分析法、强度折减法等。如鲁芄等^[8]基于降雨历史曲线,利用数值模拟软件对库水位骤降工况下滑坡渗流场及应力场进行数值模拟;郭子正等^[9]对降雨及水位骤降工况下滑坡的稳定进行分析,并利用灰色模型对滑坡稳定性系数进行预测;钟启明等^[10]基于非饱和土抗剪强度理论,将水位骤降工况下的渗流分析结果与极限平衡法相结合,得出库水位骤降会引起岸坡稳定性系数减小,但随着超静孔隙水压力的消散,岸坡稳定性逐渐增强的结论。此外将库水位骤降工况与非饱和土理论结合,并采取有限元、离散元等分析手段对岸坡稳定性进行分析也取得了被广泛认可的结果^[11-14]。刘钊等^[15]基于有限元法对库水位变化下渗流场进行瞬态分析,得出的自由水面线和孔隙水压力耗散等结果,并应用工程实例进行验证分析。

本文基于刚体极限平衡中条分法计算原理,对库水位骤降条件下的滑动力矩及抗滑力矩进行分析,采用数值模拟软件 SEEP-W 中渗流模块,研究库水位骤降情况下岸坡渗流力及孔隙水压力的变化,并依据 SWOPE-W 模块,对水位骤降条件下的岸坡稳定性进行分析计算。

2 非稳态渗流计算原理

2.1 非稳态渗流原理

库水位骤降情况下,堆积体边坡土壤孔隙中的水分也将随着水库水位的降落而排出,当堆积体渗透性较差时,边坡内浸润线的降落速度将滞后于坡外水位的降落速度,因此库水位降落后,边坡内仍维持较高的浸润面,孔隙水压力也维持在较高水平。这种情况下有利于堆积体边坡的坡外水压力随着水位的下降逐渐减小,另外边坡附近边坡稳定的渗流

动水压力逐渐增大,所以水位骤降情况下边坡的稳定性下降较快。

水位降落过程非稳定渗流作用下的边坡,渗透坡降较高,渗流方向指向边坡外侧。渗流作用产生渗透力可由下式计算:

$$f = \gamma_w J \quad (1)$$

式中: f 为渗透力; γ_w 为容重; J 为渗透坡降。水位降落过程中,边坡内渗透坡降值增加,导致渗透力同步增大,渗透力的增加势必会影响土体边坡的整体抗滑稳定性。

综上所述,水位骤降导致临水边坡滑坡的主要原因是,边坡内孔隙水压力未及时消散,坡外水压力因水位下降而减小。

2.2 非稳态渗流的计算模型

基于上述原理,引用有限单元法计算渗流场,在整个分析过程仍然在以条分法为基础。在考虑渗流作用的条分法计算边坡的稳定性时,孔压的计算是至关重要的。本文以土骨架为研究对象,假定在水位骤降的短时间内,渗透性较差的土体骨架未发生变化,其条分法计算原理及公式按有效重度和渗透力关系分析土条滑动力矩和抗滑力矩。条单元划分比较多,单个土条很窄,土条底面用直线代替圆弧。取单个土条单元 acfd,单元受力情况如图 1 所示。

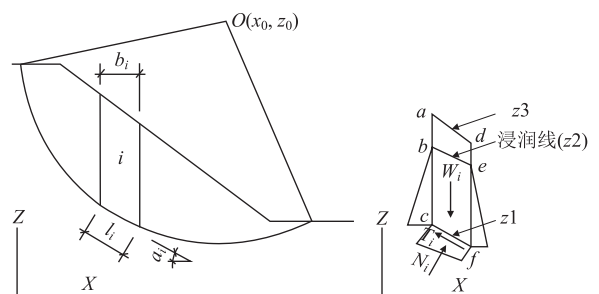


图 1 土条单元示意图

其中滑动力矩:

$$\sum_{i=1}^n M_i = \sum_{i=1}^n W_i R \sin \alpha_i + M_{L1} + M_{Nr} \quad (2)$$

式中, W_i 为单个土条本身的自重力; R 为圆弧半径; α_i 为第 i 个土条底部坡角; M_{L1} 为第 1 个土条左侧对圆心的力矩; M_{Nr} 为第 N 个土条右侧水压力对圆心的力矩。

抗滑力矩:

$$T_i = \sum \left\{ c_i l_i + \left[\cos \alpha_i W_i - u_i l_i + \sin \alpha_i (-F_{W_i} + F_{W_r}) \right] \tan \varphi_i \right\} \quad (3)$$

式中, c_i 、 φ_i 为第 i 个土条的土层的粘聚力和摩擦

角; l_i 为土条底部长度; u_i 为土条底部水压力; F_{wl} 、 F_{wr} 分别表示土条左、右侧水压力的合力。由式(2)

和式(3)得到用土条边界力考虑渗流的安全系数公式(4):

$$K = \frac{\sum R \{ c_i l_i + [\cos \alpha_i W_i - u_i l_i + \sin \alpha_i (-F_{wl} + F_{wr})] \tan \varphi_i }{\sum_{i=1}^n W_i R \sin \alpha_i + M_{l1} + M_{Nr}} \quad (4)$$

3 岸坡稳定性数值分析

3.1 工程地质条件

某抽水蓄能电站下库布置在峡谷内,通过在河道上、下游筑坝拦挡形成下水库。下水库区河道长度约 3.6 km,该段河流总体上流向 NE45°,局部呈“S”形拐弯。河谷大致呈不对称“V”字形,道路处河谷宽约 50~80 m,局部拐弯段宽度最大可达 350 m,谷深 190~255 m。上游处(下水库 B 拦沙坝)河底高程约 2 013 m,下游处(下水库 A 拦河坝)河底高程约 1 953 m,河底坡降约 1.7%。

河谷两岸为高低不平的低山丘陵,山体边坡整体下陡上缓,陡坡段整体基岩出露,坡脚有崩坡堆积物分布。库区出露的地层有奥陶系下统变质砂岩、

加里东中期花岗岩、第四系全新统冲洪积砂卵石、崩坡积碎石土等。

3.2 数值模拟计算模型

根据该抽蓄设计文件,最大连续满发电量时间为 6 h,即在抽蓄正常运营期间,其正常蓄水位 2 012 m 变至死水位 1 982 m 用时最快为 6 h,水位高差约为 30 m,即下水库库水位下降速率为 5 m/h。

选取下水库库区内一崩塌堆积体进行计算,考虑库水位骤降工况时,天然状态下其位于浸水线之下的土体选取饱和土体的 c 、 φ 、 γ 值,位于浸水线之上的土体采用天然状态下的 c 、 φ 、 γ 值为稳定性计算参数。其在暴雨、地震工况下的计算参数同上述极限平衡法一致。具体包括如下:①工况 1:天然+水位骤降;②工况 2:暴雨+水位骤降;③工况 3:地震+水位骤降。稳定性计算参数如表 1 所示。

表 1 稳定性计算参数取值

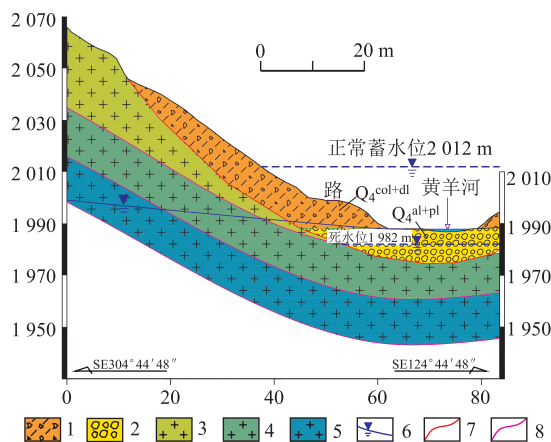
岩性	风化程度	渗透系数 $k/M \cdot s^{-1}$	干密度 $/g \cdot cm^{-3}$	弹性模量/GPa	泊松比	内聚力/MPa	内摩擦角/ $^{\circ}$
花岗岩	强风化	5.90E-5	2.52	4	0.32	0.3	30
	弱风化	4.70E-6	2.64	10	0.28	1	40
	微新岩体	8.30E-7	2.67	14	0.25	3	46
崩坡积碎石土	全风化	3.00E-2	1.82	2	0.3	0	34

3.3 岸坡稳定计算结果

基于该崩塌堆积体剖面(图 2),对库水位骤降工况下边坡稳定性进行耦合计算分析,库水位下降速率为 5 m/h,利用模拟软件中条分法对库水位下

降时堆积体边坡进行局部搜索,并将库水位从 2 012 m 下降至 1 982 m 过程分为 5 个阶段,分析其稳定性系数随库水位骤降时的变化规律,计算过程及稳定性系数变化规律分析如下。

利用模拟软件非稳态渗流分析模块对崩塌堆积体纵剖面进行建模处理,其模型如图 3 所示。



1. 崩坡积碎石土; 2. 冲洪积砂卵石; 3. 强风化花岗岩; 4. 弱风化花岗岩; 5. 微风化花岗岩; 6. 地下水位线; 7. 推测接触界线; 8. 推测风化带下限

图 2 崩塌堆积体地质剖面图

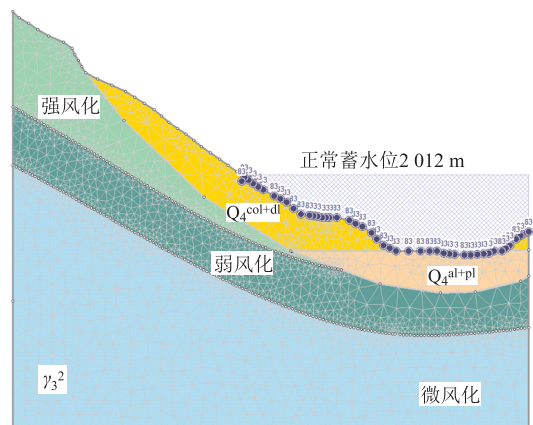


图 3 非稳态渗流模型

库水位降落高差为 30 m,将模型中正常蓄水位至死水位过程分为 5 个阶段,每个阶段历时 1 h,库

水位下降 6 m,计算结果示意图如图 4 所示。

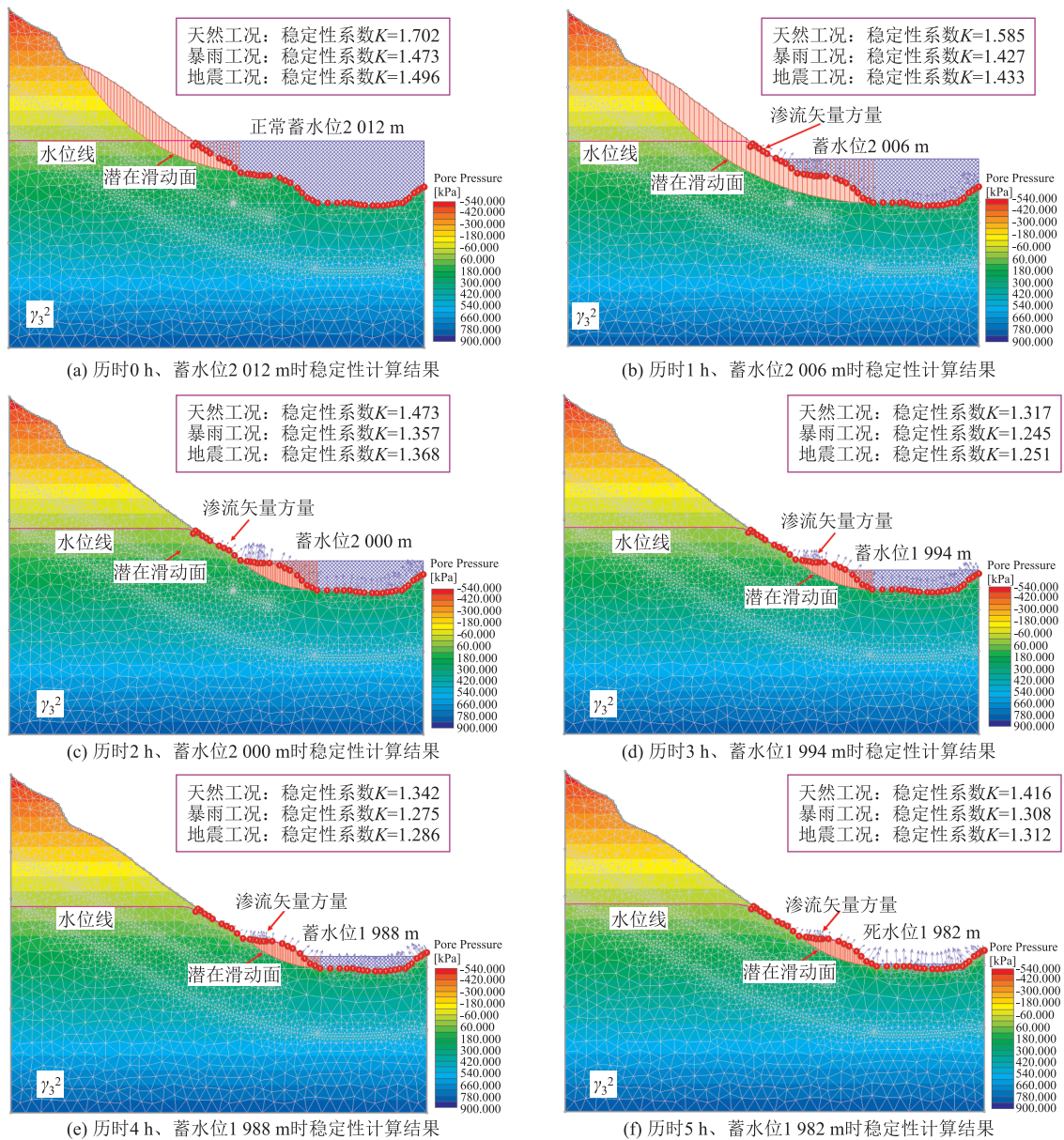


图 4 数值分析计算过程示意图

经过对库水位骤降工况下堆积体稳定性分析,得知崩塌堆积体在水位骤降整个过程中其稳定性系数均大于 1.15,堆积体处于稳定状态。通过软件模拟可知边坡安全稳定性系数在水位下降初期呈减小趋势,随着历时 3h、蓄水位到 1 994 m 时,堆积体安全稳定性系数又逐渐增大。其最小安全系数随蓄水位变化如图 5 所示。

在库水位降至死水位期间,作用于坡表面的库水压力指向坡内,相当于堆积体的一部分“抗滑力”。坡体的渗透系数较小,在库水位骤降期间,坡内地下水排出较慢,即产生非饱和不稳定渗流场并对堆积

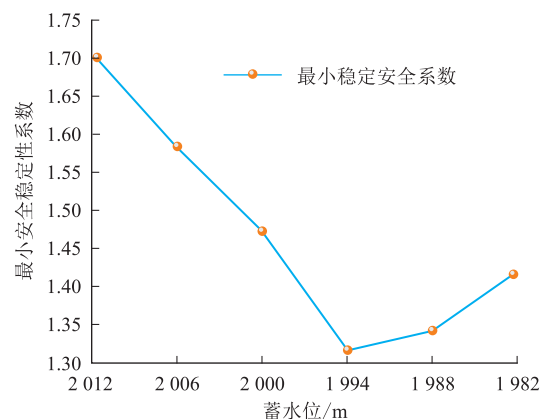


图 5 最小稳定性安全系数随蓄水位变化关系

体作用渗透压力,相当于堆积体的一部分“下滑力”。“抗滑力”减小“下滑力”增大,则堆积体边坡稳定性系数降低。当库水位降至一定程度之后,坡内地下水慢慢排出,孔隙水压力减小,不稳定渗流场逐渐变为稳定渗流场,渗透压力也逐渐降低,则堆积体边坡稳定性系数增高,即如上图5所示的变化趋势。

4 讨论

库水位骤降工况下岸坡稳定性研究成果较多^[9,16-17],但多是以非饱和理论为切入点,对岸坡稳定性进行分析,没有考虑非稳态条件下,滑动力矩和抗滑力矩的关系。本文对非稳态渗流情况下土体滑动力矩与抗滑力矩进行推导,建立了非稳态渗流计算模型,并利用数值分析手段对一工程实例进行验证分析,得出库水位骤降情况下不同历时阶段的岸坡稳定性系数,对库水位骤降工况下岸坡稳定性的计算有指导意义。

5 结论

本文基于非稳态渗流理论,利用数值模拟软件对库水位骤降条件下岸坡稳定性进行研究,最终得出以下结论:

(1) 基于非稳态渗流原理,考虑了渗流力在岸坡中的作用,对土体滑动力矩与抗滑力矩进行分析,建立了非稳态渗流的岸坡稳定性计算模型。

(2) 以某抽水蓄能电站下水库为例,对库水位骤降工况下岸坡稳定性进行分析,结果显示随着库水位的下降,岸坡稳定性系数总体呈现先减小后增大的趋势,但增大的量值较小,最终稳定性系数趋于稳定。

参考文献

- [1] 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(08):1439-1444.
- [2] Evelyn A. Roeloffs. Fault stability changes induced beneath a reservoir with cyclic variations in water level[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth,1988,93(B3):2017-2124.
- [3] 徐永强,祁小博,张楠. 基于降雨与库水位耦合的三舟溪滑坡渗流模拟及稳定性分析[J]. 水文地质工程地质,2016,43(5):111-118.
- [4] 卢博,郭永成,赵二平,等. 库水位变化和降雨条件下边坡渗流特性及稳定性分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2017,39(2):54-59.
- [5] 邓建辉,马水山,张保军,等. 清江隔河岩水库茅坪滑坡复活机理初探[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(10):1730-1737.
- [6] 王学武,许尚杰,党发宁,等. 水位骤降时的非饱和坝坡稳定性分析[J]. 岩土力学,2010,31(09):2760-2764.
- [7] 贾苍琴,黄茂松,王贵和,等. 水位骤降对土坡稳定性的影响分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2008,36(3):304-309.
- [8] 鲁芃,王世梅,郭振,等. 库水位日降幅对白家包滑坡稳定性影响分析[J]. 人民长江,2017,48(9):50-53+69.
- [9] 郭子正,殷坤龙,唐扬,等. 库水位下降及降雨作用下麻柳林滑坡稳定性评价与预测[J]. 地质科技情报,2017,36(4):260-265+270.
- [10] 钟启明,霍家平,刘若星. 库水位骤降对非饱和坝坡稳定性的影响[J]. 水利水电科技进展,2012,32(6):84-86.
- [11] Oh S, Ning L. Slope stability analysis under unsaturated conditions: Case studies of rainfall-induced failure of cut slopes [J]. Engineering Geology,2015,(184):96-103.
- [12] HOEK E, MARINOS P, BENISSI M. Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation [J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment,1998,57(2):151-160.
- [13] Fredlund D G, Morgenstern N R. Constitutive relations for volume change in unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal,1976,13(3):261-276.
- [14] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R. Stress state variables for unsaturated soils[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE,1977,103(5):447-466.
- [15] 刘钊,柴军瑞,陈兴周,等. 库水位骤降时坝体渗流场及坝坡稳定性分析[J]. 西安理工大学学报,2011,27(4):466-470.
- [16] 钟启明,霍家平,刘若星. 库水位骤降对非饱和坝坡稳定性的影响[J]. 水利水电科技进展,2012,32(6):84-86.
- [17] 彭艳丽. 库水位骤降对坝坡稳定性的影响研究[J]. 陕西水利,2013,182(3):135-136.

作者简介: 何宁(1982—),男,工程师,主要从事水利水电开发管理工作。E-mail:hehahaha@163.com