

[文章编号] 1003-4684(2020)05-0092-05

库水位升降及降雨作用下的滑坡稳定性研究

朱 蕾, 夏承志, 习常志

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 为研究涉水滑坡受库水位升降及降雨作用变形机制及稳定性影响,以白家包滑坡为例,采用数值模拟方法,分析其在 145 m、162 m 和 175 m 水位、20 年和 50 年降雨强度、1.2 m/d 和 2.0 m/d 渗透系数等不同工况组合条件下的渗流分布和稳定性系数。结果表明:随库水位上升,白家包滑坡整体趋于稳定状态,且稳定性系数会出现增长趋势;库水位下降,白家包滑坡稳定性系数呈现下降趋势。考虑降雨组合作用,水位下降速率越大,滑坡变形程度越大。

[关键词] 滑坡; 稳定性; 降雨; 库水位升降; 地下水位; 渗流

[中图分类号] TU43 **[文献标识码]** A

三峡工程自 2003 年蓄水运行以来,库区每年都会有 30 m 的水位落差,且三峡库区处于多雨地带,由于三峡水库的调度改变,库水位将呈周期性涨落。伴随着三峡地区强降雨的作用,坡体的水土作用加剧,继而引起坡体的地下水应力场、渗流场的变化,改变了三峡库区滑坡岩土体的应力状态和抗剪强度,从而威胁到库岸滑坡的稳定性。地质构造、地形地貌、地层岩性等综合地质条件是导致滑坡形成和演变的内在因素;库水位升降和大气降雨等情况,是影响滑坡变形的外部因素。因此,在目前的库区地质灾害防治过程中关键性的问题就是进行库水动力及降雨组合特征相关研究。

对于库水位变化作用下的边坡研究,已经有众多学者做了相关工作。杨帆等针对树坪滑坡,采用有限元分析软件分析了三峡库区各蓄水阶段树坪滑坡的渗流场、位移场和稳定性变化规律特征^[1]。曾刚通过运用了渗流和抗剪强度理论,分析了库水位升降作用下的边坡稳定性,得出了坡体渗流场和安全系数随库水位变化的规律^[2]。王力等采用 GEO-studio 软件分析了动水压力型滑坡体在不同库水位条件下的稳定性系数变化情况^[3]。但是,以上研究均只研究库水位的升降作用,并未分析降雨强度下的影响。在考虑降雨条件下的滑坡变形情况研究,已经取得了一定的进展。库水位升降导致地下水位变化叠加降雨作用,将造成坡体岩土力学参数改变、滑体容重变化、水力梯度浮动、孔隙水的变化、动静

水压力增减等^[4-9]。实际上,降雨多具有季节性与随机性,随库水的升降变化,库区滑坡地下水不断补给,对于地下水动力场分析时应考虑为非稳定运动渗流场。采用非稳定渗流分析方法确定出浸润曲线分布,进而研究岩土体参数的弱化区域特征。现阶段的研究,多针对某一诱发因素进行分析,多重因素的下的滑坡变形规律研究相对较少。

以三峡库区秭归县白家包滑坡为例,运用饱和和非饱和渗流理论,对滑坡在库水位升降和降雨条件下的渗流场采用有限元分析软件 Geo-Studio 进行数值模拟,再结合 Morgenstern-Prince 法进行稳定性分析。研究结论分析了滑坡的变形规律和破坏机理,表明了滑体的变形与库水位变化有着密切的联系,且随着库水位升降及降雨情况的改变,滑坡的整体稳定性系数也呈相应的规律性变化。通过上述研究,为三峡库区地质灾害防治等相关工作提供参考。

1 滑坡地质特征

白家包滑坡位于湖北省西部的香溪河畔,滑坡前缘与河流接壤,其海拔约为 120~140 m,后缘土质为粉砂质泥岩,海拔约为 265 m,前缘宽度约为 505 m,掺杂少量碎石块,有大量基岩阻挡,土壤与岩石交界处为分界点,滑坡右侧与左侧分别以山梁、基岩为界,其平均宽度约为 400 m,纵向长度约为 560 m(图 1),整个滑面面积约为 $2.16 \times 10^5 \text{ m}^2$ 。

[收稿日期] 2019-12-30

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(41372363); 三峡后续工作地质灾害防治项目(0001212015CC60005)

[第一作者] 朱 蕾(1997-),女,湖北武汉人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为岩土力学

滑坡平面形态呈短舌状。深层滑体前缘厚 20~30 m,中部厚 47 m,后缘厚 10~40 m,滑体平均厚度 45 m,滑体体积 $9.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。浅层滑体前缘厚 10~20 m,中部厚 35 m,后缘厚 10~40 m,滑体平均厚度 30 m,滑体体积 $6.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。滑坡前缘坡度约为 20° ,中后缘坡度较为平缓,整体坡度约为 $12^\circ \sim 15^\circ$ 。

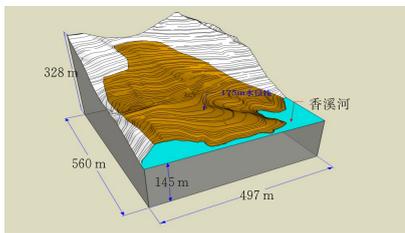


图 1 白家包滑坡三维立体图

白家包滑坡主要土质成分为粉砂质泥岩与泥质粉砂岩、角砾岩,且掺杂有粒径 $0.2 \sim 60 \text{ cm}$ 的碎石块,少量粉质粘土和粘土粒径 $0.1 \sim 2 \text{ cm}$,土石比约为 $7:3$,碎石块形状呈不规则状,土质颜色多为灰色、黄灰色及黄褐色。风化情况比较严重,呈强—中风化,岩土体有薄—中厚层状。该层分布于整个滑坡体,钻探揭露厚 $32.3 \sim 50.0 \text{ m}$ 。

在钻探过程中,测得滑移带的厚度约为 $0.15 \sim 0.25 \text{ cm}$,土质主要为粉砂质泥岩夹杂泥质粉砂岩、角砾岩,颜色为黄色、灰黄色并夹带少量紫红色。勘察结果表明,滑体和滑面之间出现过渐进变化的滑移现象,观察到滑带土中出现摩擦迹象,土体中泥岩等颗粒的磨光痕迹较为清晰。深层滑带土体与浅层带土体相比,滑移现象不能明显观察到,但其土体中

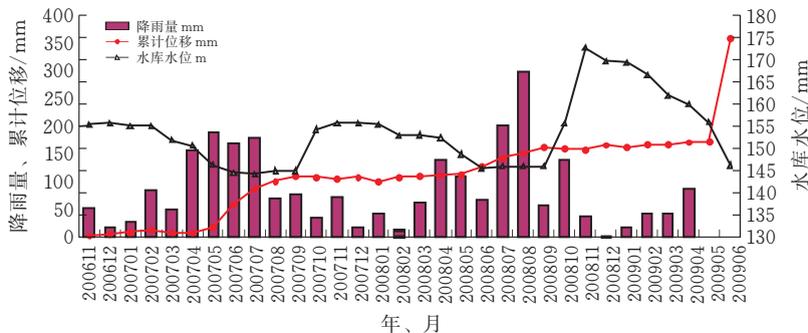


图 3 白家包滑坡累计位移-降雨量-水库水位-时间相关性分析图

2) 库水位的影响分析 由图 3 可知,三峡库区水位逐年呈现不同的波动情况,对应位移曲线分布可看出:蓄水作用时,滑坡的位移增加幅度不大,即无明显的变形;库水位缓慢下降时,滑坡的位移也对应地略微增大,当水位降幅突变,位移也随之跳跃性增长,以此表明滑坡的变形与库水位升降密切相关。每年汛期前,三峡水库需降低水位来预备防洪需要,库水位会在 4—6 月出现下降过程,受自然气候影

含有角砾岩成分不多,且为可塑状。

滑床地层主要为侏罗系下统长石石英砂岩及泥岩,仅滑床前缘为第四系残坡积。后缘及左右两侧为基岩,其产状 $260^\circ \angle 30^\circ$ 。基岩面较为平缓,高程基本与地面高程持平。由地层产状可以判定,白家包滑坡坡体属逆向坡,详细剖面情况见图 2。

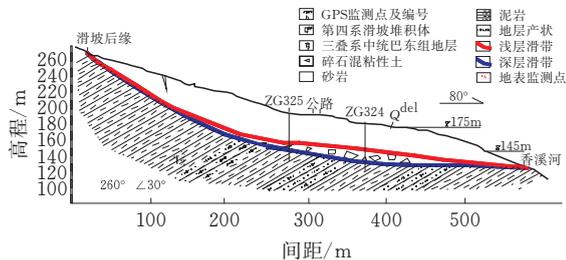


图 2 白家包滑坡地质剖面图

2 滑坡变形机理分析

2.1 滑坡变形的影响因素

根据现场地质调查及近 3 年监测资料分析,白家包滑坡变形与前缘三峡水库水位变化及降雨量具相关性,其近期变形原因如下:

1) 大气降雨的影响分析 从图 3 可以看出,每到汛期降雨季节,白家包滑坡的变形监测曲线就出现一个明显的变形增长阶坎,汛期结束后,变形又逐渐恢复平稳,整个变形监测曲线表现出阶梯状演化特征。因此,这些曲线特征均表明:各监测点的位移变化量与降雨量有一定的相关性,降雨量增加引起滑坡位移变形的增加。每年的汛雨季节均为滑坡变形发展变化显著增加的时段。

响,雨季多发于 6—9 月,此时容易同时出现水位下降和降雨两种影响因素,位移会出现骤增趋势。分析表明,当库水位下降过程中若伴随强降雨的发生,滑坡将会产生明显地变形,甚至发生失稳的可能。

2.2 滑坡形成机理分析

白家包滑体由砾石粘土组成,在水库蓄水阶段的渗透性较差,水渗入至坡体内,库水位与滑体地下水形成水头差,产生动水压力反作用于坡体,增加

了白家包滑坡的整体稳定性。

当库水位下降时,坡体内地下水向外排出,因渗透性差排出缓慢,演化成相反的水头差,动水压力作用于坡体外侧,滑坡的稳定性降低,尤其在水位下降速率增大时,呈现出了弱透水滞后型的变形特征,与此同时,三峡库区又恰逢雨季,降雨入渗滑坡体将进一步抬高地下水水位,增加了地下水与库水位的水头差,进而产生更剧烈的动、静水压力。因此,在降雨或水库蓄水的浸透作用下,滑坡体出现了临空面和岸坡的局部坍方和塌岸。另外,在水库水位的反复涨落时,岸坡塌岸加剧,滑坡前缘阻滑区阻滑力减小,亦可能导致滑坡发生。

3 滑坡渗流场与稳定性分析方法

3.1 滑坡渗流计算

在分析库水位变化和降雨条件工况下,考虑渗流计算边界条件(图4):

1)侧端和底端:滑床侧向及底端分布为基岩,渗透性小,看作为不透水边界;

2)水头端:滑坡前缘浅层滑体被水位线浸泡部分;

3)流量端:取滑坡表面受降雨入渗影响的边界,当降雨水量入渗速度小于降雨强度时,取坡体入渗速度值为流量边界值;当降雨水量入渗速度大于降雨强度时,取降雨强度值为流量边界值计算。

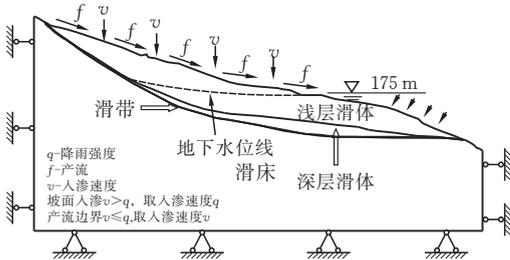


图4 白家包滑坡模型边界条件示意图

将上述边界条件代入饱和-非饱和渗流方程中,根据Geo-Studio有限元分析软件中的SEEP模块即可得到白家包滑坡滑体地下水位分布情况。

3.2 滑坡稳定系数计算

现行滑坡稳定性系数计算中,多半采用毕肖普法、瑞典圆弧法、简布法、Morgenstern-Price法等,也有学者针对滑坡的动态渐进破坏过程,提出了相关强度折减法^[10-13]。Morgenstern-Price法满足力和力矩平衡方程,相对传统条分法更严密,但计算繁琐。针对滑坡边界模型,采用了陈昌富^[14]提出改进之后非微分形式的Morgenstern-Price法,根据滑体沿滑动方向上的力与力矩平衡条件,推导出边坡安全系数、比例系数及抗滑力等表达式,通过简单迭代

过程即可获得坡体的安全系数,更便于工程人员的更便于计算求解。

4 滑坡数值模拟分析

4.1 滑坡模型建立

针对白家包滑坡采用GEO-SLOPE软件对其地质剖面进行单元网格划分,根据其高程分布,考虑145~175 m的水位线分布,建立渗流模型见图5。

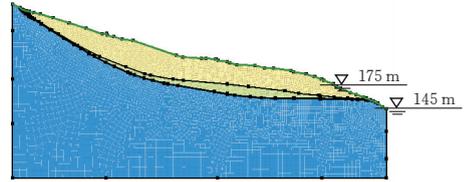


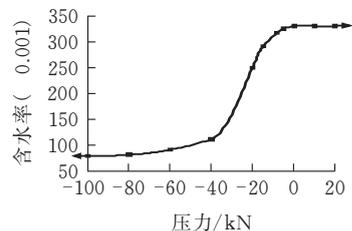
图5 白家包滑坡计算模型图

4.2 计算参数确定

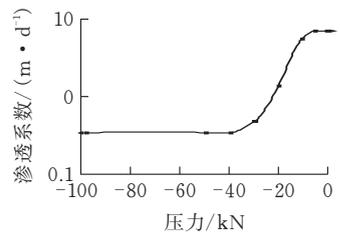
依据滑坡地质勘察报告的建议值,类比于其他相似条件滑坡的岩土力学指标,确定出白家包滑坡滑体计算参数见表1,对应的滑体渗透函数曲线及水土特征曲线见图6。

表1 滑体计算参数表

项目	数值
容重/(kN·m ⁻³)	21.5
粘聚c/kPa	35
摩擦角φ/(°)	23
弹模E/MPa	16.7
泊松比μ	0.21
渗透系数/(m·d ⁻¹)	2.6



(a)水特征曲线



(b)渗透函数曲线

图6 滑体土曲线

4.3 计算工况及荷载组合确定

计算工况及荷载组合见表2。

4.4 渗流及稳定性计算分析

根据相关渗流理论计算出白家包滑坡不同工况组合下的地下水位分布见图7,从图可以看出,库水

位下降速率直接影响滑坡内渗流场的分布情况,而降雨对滑坡的地下水位影响不大,且库水位下降速率越快,水位线凸起越明显。

在库水位从 175 m 下降至 145 m 过程中,考虑降雨的工况组合,滑坡稳定性系数均具有明显的下降趋势,从 1.14 跌落至 1.09 时,又有略微的上升趋势

势,根据滑坡工程相关评价标准[15]可以判定,此时滑坡处于基本稳定状态。从不同工况组合情况(图 8)分析来看:叠加暴雨情况下,白家包滑坡稳定性系数会骤减,遭遇恶劣天气,可能会有失稳的可能性;从工况 3 和工况 4 分布来看,高水位下降时,滑坡的稳定性受不同降雨强度的影响较小。

表 2 计算工况及荷载组合

水库水位	工况编号	荷载组合内容
静止水位	1	自重+地表荷载+175 m 水位
	2	自重+地表荷载+库水位从 175.0 m 降至 145.0 m
	3	自重+地表荷载+库水位从 175 m 水位降至 145.0 m+50 年一遇暴雨
水位降落	4	自重+地表荷载+库水位从 175 m 水位降至 145.0 m+20 年一遇暴雨
	5	自重+地表荷载+库水位从 162.0 m 降至 145.0 m
	6	自重+地表荷载+库水位从 162.0 m 降至 145.0 m+50 年一遇暴雨
	7	自重+地表荷载+库水位从 162.0 m 降至 145.0 m+20 年一遇暴雨

工况 2、3、4 下降速率为 1.2 m/d;工况 5、6、7 下降速率为 2.0 m/d

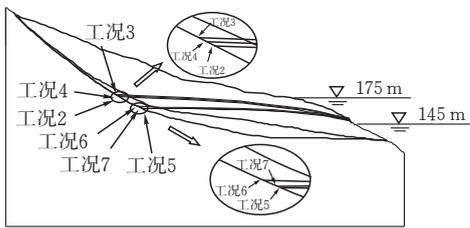
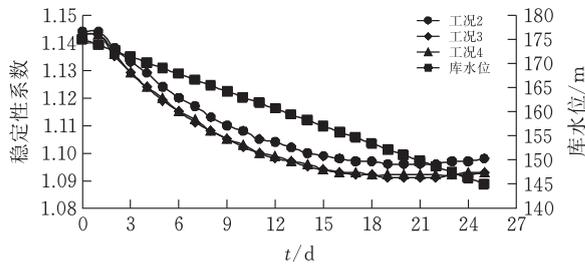
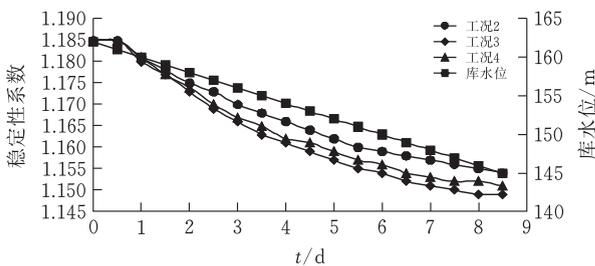


图 7 滑坡在各工况下地下水位变化示意图

针对白家包滑坡的稳定性系数计算采用基于极限平衡的 Morgenstern-Prince 法,经计算可得,考虑工况一在自重及地表荷载作用下的稳定性系数为 1.144,其他工况组合情况详见图 8 和图 9。



(a)库水位 175 m 降至 145 m 工况下



(b)库水位 162 m 降至 145 m 工况下

图 8 稳定性系数分布图

在库水位从 162 m 下降至 145 m 过程中,此时库水位的下降速率从 1.2 m/d 增加到 2.0 m/d,在水位差产生的动水压力 and 不同降雨情况联合作用

下,滑坡的稳定性系数变化各有不同,最不利时下降至 1.15 左右,滑坡仍处于稳定状态。从不同工况组合(图 9)情况分析来看:增大库水位下降速率时,滑坡受到动水压力作用,稳定性系数不断降低。从工况 5—工况 7 研究可得,随降雨强度越大,稳定性系数下降的幅度越大,滑坡越容易失稳。

5 结论

1)白家包滑坡为动水压力型滑坡,在水库蓄水初期,库水位上升,滑坡内部土压力增大,此时库水位高于滑体内地下水位线,水位差产生的动水压力作用于阻滑段,反压于坡体,因此滑坡整体稳定性增加。

2)当库水位下降时,白家包滑坡整体稳定性不断减小,地下水位线呈凸起向下弯曲趋势,当下降速率越大,弯曲也越明显。由于水土间的相互作用力,会产生浮托减重效应,作用于滑体的阻滑段,故白家包滑坡稳定性系数有先减小后略有增大趋势。增大库水位下降速率后,降雨作用将直接影响稳定性变化。

3)采用数值分析方法,模拟了白家包滑坡随库水位升降和降雨联合作用下的组合情况,得到了滑体地下水位线及稳定性系数的变化规律,为三峡库区后期库水动力及降雨组合相关研究起到了一定的参考作用。

[参 考 文 献]

[1] 杨帆,汤明高.三峡水库蓄水条件下树坪滑坡变形特征及稳定性分析[J].水电能源科学,2017,35(3):142-145,133.

- [2] 曾刚.库水升降作用下水库库岸滑坡稳定性分析[J].三峡大学学报(自然科学版),2011,33(4):15-18.
- [3] 王力,王世梅.库水位骤降条件下动水压力型滑坡稳定性分析[J].水电能源科学,2018,36(12):117-120.
- [4] 梁学战,陈洪凯.库水位升降条件下不同渗透性的滑坡体稳定性变化规律[J].中国地质灾害与防治学报,2012,23(4):20-26.
- [5] 李永康,许强,董远峰,李松林.库水位升降作用对动水压力型滑坡的影响—以三峡库区白家包滑坡为例[J].科学技术与工程,2017,17(18):18-24.
- [6] 卢书强,易庆林,易武,等.库水下降作用下滑坡动态变形机理分析—以三峡库区白水河滑坡为例[J].工程地质学报,2014,22(5):869-875.
- [7] 夏承志,刘珉玮,邹先进.蓄水作用下的滑坡破坏机理研究[J].湖北工业大学学报,2019,34(5):88-91,95.
- [8] Committee on Reservoir Slope Stability. Reservoir Landslides: Investigation and Management[R]. Paris, International Commission on Large Dams,2002.
- [9] 卢应发,黄学斌,刘德富.边坡力的分布特征和稳定性分析[J].岩土工程学报,2017,39(7):1321-1329.
- [10] 卢应发,杨丽平,刘德富.一种新的节理本构模型及几种新的滑坡稳定系数计算方法[J].岩石力学与工程学报,2013,32(12):2431-2438.
- [11] 夏承志,张凌晨,邹先进,等.基于部分强度折减法的白果树滑坡稳定性分析[J].湖北工业大学学报,2019,34(4):86-89,98.
- [12] Guo M W, Ge XR, Wang S L. Slope stability analysis under seismic load by vector sum analysis method[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2011,3(3):282-288.
- [13] LIU Yan-zhang,GE Xiu-run,LI Chun-guang,et al.Stability analysis of slope and dam foundation based on vector method safety factor [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(10):2130-2140.
- [14] 陈昌富,朱剑锋.基于 Morgenstern-Price 法边坡三维稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2010,29(7):1473-1480.
- [15] 中华人民共和国国土资源部.GBT32864-2016.滑坡防治工程勘查规范[S].北京:中国标准出版社,2006.

Study on the Stability of Landslide under the Action of Water Level Rise and Fall and Rainfall

ZHU Lei, XIA Chengzhi, XI Changzhi

(School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to study the deformation mechanism and stability of Wade landslide affected by the rise and fall of reservoir water level and rainfall, the seepage distribution and stability coefficient of Baijiabao Landslide under different combination conditions such as 145m, 162m and 175m water level, rainfall intensity in 20 and 50 years, permeability coefficient of 1.2m/d and 2.0m/d were analyzed by numerical simulation. The results show that with the rise of reservoir water level, Baijiabao Landslide tends to be stable as a whole, and the stability coefficient tends to increase; with the decline of reservoir water level, the stability coefficient of Baijiabao Landslide tends to decrease. Considering the combined effect of rainfall, the greater the rate of water level decline, the greater the degree of landslide deformation.

Keywords: landslide; stability; rainfall; reservoir water level rise and fall; groundwater level; seepage

[责任编辑:裴琴]