doi: 10.19388/j.zgdzdc.2022.04.09

引用格式:田凯,姚品品,铁永波,等.地下水渗流场对库区滑坡稳定性影响的数值模拟——以白马库区羊角滩滑坡为例[J]. 中国地质调查,2022,9(4):74-81. (Tian K,Yao P P,Tie Y B, et al. Numerical simulation analysis of the influence of groundwater seepage field on the stability of landslide in reservoir: A case study in Yangjiaotan landslide of Baimaku area[J]. Geological Survey of China,2022,9(4):74-81.)

地下水渗流场对库区滑坡稳定性影响的数值模拟 ——以自马库区羊角滩滑坡为例

田凯1,姚品品2,铁永波1,徐伟1

(1.中国地质调查局成都地质调查中心,四川 成都 610081; 2.中国地质大学(武汉)工程学院工程学院,湖北 武汉 430070)

摘要:针对库水位变化条件下滑坡的稳定性定量评价复杂问题,考虑降雨和库水位变化对地下水渗流场变化规 律的影响机制,采用饱和-非饱和渗流的基本理论,运用渗流模拟有限元法,对重庆市武隆区羊角滩滑坡在6种 不同工况下的库区滑坡的稳定性开展了模拟研究。结果表明:①降雨工况下,降雨对地下水渗流场都有影响,滑 坡中部位置受地下水位影响最大,前后部影响小,降雨条件下,滑坡稳定性随着降雨历时的增加而变小,到达一定 阶段后,滑坡已经滑动,滑坡稳定性系数不再变化;②库水位工况下,主要影响滑坡前缘,地下水位是随库水位变 化而迅速变化的,随着库水位的上涨,滑坡稳定性系数呈现先减小后增大的趋势;③地下水位的骤升对浮托作用 影响有限,对压坡作用影响较大,同时降低了渗流力的影响,对滑坡稳定起到了积极作用,地下水位的骤降增大了 渗流力,减弱了前缘库水位的压坡作用,滑坡失稳的可能性最大。可为库区该类滑坡的稳定性现状及发展趋势预 判提供科学依据。

0 引言

降雨入渗与水库蓄水引起库水位的抬升及水 库调度,导致库水位大幅度升降,使水库沿岸岸坡 地下水渗流场发生重大改变,是水库滑坡等地质灾 害发生的主要诱因^[1]。降雨入渗导致水库岸坡地 下水渗流场变化的数值模拟问题本身就是水文地 质工程地质的难题,而水库蓄水引起库水位的抬升 及水库调度导致库水位大幅度升降使这一难题更 加复杂^[2-3]。因此,模拟降雨入渗与水库蓄水引起 库水位的抬升及水库调度导致库水位大幅度升降 联合作用下的滑坡地下水渗流场,成为当前水文地 质工程地质界研究的一个热点内容^[4]。

地下水渗流场数值模拟的主要任务是求解水 头函数,确定渗流自由面和渗流量等渗流状态,其 方法主要有有限单元法、边界元法和有限差分 法^[5-6]。用有限元方法分析地下水渗流问题时,若 计算涉及到渗流自由面以及溢出面情况,由于渗流 自由面(浸润线)所处的位置事先不确定,渗流流域 范围便具有不确定性,这将导致边值问题中具有未 定的边界,使得求解地下水渗流场问题由原本一个 简单的线性问题变成事先部分边界条件不确定的 复杂边界线性问题^[7-9]。本文主要方法是通过迭 代运算不断修改渗流自由面的位置,直至计算结果

收稿日期: 2022-04-27;修订日期: 2022-07-22。

基金项目:中国地质调查局"川西地区特大地质灾害链调查(编号:DD20221746)"项目资助。 第一作者简介:田凯(1984—),男,工程师,主要从事工程地质、地质灾害方面的研究工作。Email:617876394@qq.com。 通信作者简介:姚品品(1986—),男,工程师,主要从事水利水电工程项目管理方面的工作。Email:250078459@qq.com。

满足渗流自由面上的边界条件,获得足够接近实际 情况的解答,最终确定渗流自由面位置,计算工作 量很大是这种通过多次迭代运算最终确定自由面 位置方法的明显缺陷^[10]。

本文以重庆乌江白马库区上游羊角滩滑坡为 例,结合区域水文地质工程地质资料^[8],通过调查 试验得到模拟计算所需参数,从饱和/非饱和渗流 的基本理论出发,讨论了渗流模拟有限元法的基本 原理,给出了降雨入渗与水库水位升降联合作用下 的渗流控制方程及有限元求解方法,利用 Geostudio 软件 SEEP 模块建立水文地质结构概念模型进行模 拟,并对模拟结果进行分析,为今后类似工程实际 应用提供一定的参考依据。

1 研究区概况

羊角滩滑坡位于重庆市武隆区白马镇乌江白 马库区上游,库区白马航电枢纽工程已于 2019 年 正式开工建设,滑坡位于该枢纽工程上游 6.7 km, 其稳定性直接影响着白马航电枢纽工程的修建 (图1)。因此,本文选取羊角滩滑坡进行降雨和库



图 1 羊角滩滑坡区域位置 Fig. 1 Location of Yangjiaotan landslide

水位变化条件下的地下水渗流场模拟分析,对滑坡 稳定性进行定量评价。 后缘高程 367 m,前缘高程 159 m,纵向长 1 066 m, 平均宽 372 m(后缘最小宽度 51 m,前缘最大宽度 541 m),面积 33.9×10⁴ m²,平均厚度 19.9 m,体积

羊角滩滑坡平面呈长舌形,主滑方向 NE14°,

672×10⁴ m³(图 2)。据该滑坡的长期水文监测资料,库水位变化对滑坡后缘影响较小,因此选取滑坡距乌江0~725 m的范围进行模拟。图 3 为滑坡地质剖面。

· 76 ·

通过已有勘查资料进行斜坡地质分层:①分 布于滑坡上部的崩坡积层(Qh^{dl+col}),主要成分为灰 岩碎块石土,最大厚度约41 m;②分布于滑坡体内 部的滑坡堆积层(Qh^{del}),主要为黏土夹少量碎石, 最大厚度29.5 m;③滑坡前缘分布于滑坡剪出口 外侧河漫滩,为河流冲积堆积(Qh^{al+dl}),成分以粉 细砂为主,细一中粒结构,较松散;④发育志留系 下统龙马溪组(S₁l)浅黄、灰绿色砂质页岩。YJ01 为钻孔,YJ03、YJ06、YJ09 为水文长期观测孔。



图 2 羊角滩滑坡地质简图 Fig. 2 Geological stetch map of Yangjiaotan landslide



Fig. 3 Landslide geological section map

一定精度要求的情况上进行的细致剖分,其中滑体的剖分较详细,而滑床的剖分较稀疏。滑坡建模及有限元网格剖分见图4,斜坡地质剖面分为4层。



滑坡计算模型的建立

2

(1)滑体表部中等渗透带。位于滑坡中部的坡



体内部,为滑体表部强渗透带内的透镜体,下接弱 渗透的黏土层,岩土体渗透性一般。

(2)滑体下部弱渗透带。为后期形成的羊角滩 滑坡的次级滑动带,位于滑坡的前缘,分布范围为 海拔175~255 m,以类似透镜体的形式位于滑 体下部。弱渗透带北端为滑坡前缘的剪出口,南 端与滑体表部中等渗透带相连接,下伏基岩为滑 床。岩土体的渗透性较差。

(3)滑坡前缘的强渗透带。分布于滑坡剪 出口外侧河漫滩,为河流冲积堆积层,成分以粉 细砂为主,层薄,下伏基岩,斜坡地下水主要通过 该层向乌江进行排泄,地下水埋深相对较浅。

(4) 基岩(不透水层)。表1为各个地层渗 流模拟岩土体的饱和渗透系数。

表1 渗流模拟岩土体饱和渗透系数取值

Tab. 1 Saturated permeability coefficient value of seepage simulation rock – soil

岩土体的类型	饱和渗透系数/ $(m \cdot s^{-1})$
含灰岩碎块石土	1.2×10^{-6}
黏土夹少量碎石	5.6 $\times 10^{-8}$
粉细砂	2.3×10^{-5}

2.1 初始条件和边界条件

在计算降雨前滑坡体的地下水位线时,首先需 要根据勘察资料确定出初始水位。当乌江水位为 161 m时,滑坡后部地下水位线倾角为9°,由此可 以反算出滑坡左边界的水头边界为 249 m。因此, 在降雨前可以设定初始条件:滑坡体左边界为 249 m 水头边界,滑坡右侧为乌江水位。然后,再模拟计 算滑坡体降雨入渗期间引起的瞬态渗流及地下水 位变化,通过在滑坡表面 SEEP 中定义边界函数来 模拟降雨过程。

(1)入渗边界。假设降雨区域覆盖滑坡体表面,通过函数定义为单元流量边界。通过设计单位 节点流量一时间的函数来确定降雨的大小和时间, 通过定义某一时刻的单元流量来实现降雨强度的 变化,动态模拟降雨入渗的过程。

(2)模型两侧。在滑坡右侧按定水头边界条件 确定水位高程,左侧也按定水头边界条件水位高程。

(3)模型底面。假设滑床基岩的渗透性很小, 滑床底部的边界条件可以设为不透水的边界条件。

2.2 模型参数的选取

根据 Geostudio 软件 SEEP/W 自带的函数, 用土水特征曲线来研究非饱和土的含水率和土 体基质吸力的关系,依据软件提供的土的渗透性 函数来定义非饱和土的渗透性。在各种工况下, 所研究滑坡共有3种岩土类型,所以选择碎块石 土、黏土、粉细砂3种土的特性函数。本文选用 Fredlund&Xing方法函数。根据现场地表注水试 验和钻孔注水实验结果,可以得到模拟区域3种 材料的土 – 水特征曲线及渗透函数曲线(图5)。



(a) 滑体碎块石土

图 5-1 土 - 水特征曲线及渗透函数曲线

Fig. 5 – 1 Soil – water characteristic curve and permeability function curve







3 数值计算结果分析

3.1 模拟工况

选取 YJ1、YJ3、YJ6、YJ9 为观测孔,与正常水 位工况模拟计算结果作对比,然后逐步调整各渗透 带的水文地质参数,直至满足模拟精度为止。据重 庆武隆 1951~2018 年实测降水量资料统计,历年 最大日降水量为 157.54 mm(2003 年 6 月 24 日), 以此作为特殊暴雨工况。根据水库实际营运条件, 滑坡渗流计算采取下列 6 种计算工况。

(1)工况1。当前天然161 m河水位,该工况 下前缘库水位为161 m,水位线下边界为固定水头 边界,水位线以下为零水头边界,后缘为249 m水 头边界,基岩面为零流量边界。

(2) 工況 2。暴雨、久雨 + 161 m 河水工況(以161 m 河水位为初始,降雨 4 d),该工况下前缘库

水位为161 m,水位线下边界为固定水头边界,水位 线以下为零水头边界,后缘为249 m水头边界,基 岩面为零流量边界,上表面库水位线以上为降雨边 界。

(3) 工况 3。183 m 正常库水位工况,该工况下 前缘库水位为 183 m,水位线下边界为固定水头边 界,水位线以下为零水头边界,后缘为 249 m 水头 边界,基岩面为零流量边界。

(4) 工况 4。暴雨、久雨 + 193 m 洪水位工况 (以193 m 河水位为初始,降雨 4 d),该工况下前缘 库水位为 193 m,水位线下边界为固定水头边界,水 位线以下为零水头边界,后缘为 249 m 水头边界, 基岩面为零流量边界,上表面水位线以上为降雨边 界。

(5) 工况 5。182 m 水位升至 193 m 洪水位工况(以 182 m 河水位为初始,4 d 后升至 193 m),该工况为暴雨情况下,库水位在 4 d 时间内从 183 m

洪水位降至182 m水库正常蓄水位。

(6) 工況 6。193 m 洪水位骤降至 183 m 水位 工况(以 193 m 河水位为初始,4 d 后降至 183 m), 该工况为库水位在4 d 时间内从 193 m 洪水位降至 183 m 水库正常蓄水位。

本文主要研究的是降雨和库水位这2个因素 对滑坡地下水渗流的影响。通过对模拟结果的分 析可知,库水位变化主要影响滑坡前缘,库水位的 高低控制着地下水位的高低,库水位的升降控制着 地下水位的升降,且地下水位是随库水位变化而迅 速发生变化的;降雨对整个滑坡的水位变化都有 一定的影响,而且滑坡中部地下水位变化影响趋于 最大,前后部影响趋于较小。

滑坡地下水渗流场的变化会引起其稳定性系数的变化,通过利用地下水渗流场模拟的结果得出 最危险滑动面,用毕肖普法对羊角滩滑坡稳定性进 行了简单计算,并分析渗流场变化对滑坡稳定性的 影响。物理力学参数选取见表2。

表 2 滑坡岩土物理力学参数综合建议值

Tab. 2 Comprehensive suggested value table of geophysical and mechanical parameters of landslide

重度/(kN・m ⁻³)			有效应力剪切强度			
天然状态 饱和状态 -	天然状态		饱和状态			
	饱和状态 -	C∕kPa	φ/(°)	C/kPa	φ∕(°)	
21.28	23.16	26.5	26.4	21.6	23.3	

3.2 模拟结果分析

采用毕晓普法进行计算,只考虑地下水位的不同对滑坡稳定性的影响。经计算,稳定性系数计算结果见表3和图6。

表 3	各工况	.稳定性计算	「结果
Tab. 3	Stability	calculation	results

of

various working conditions

					_
工况	第1天	第2天	第3天	第4天	
工况1	1.410	_	_	—	
工况2	1.351	1.312	1.243	1.222	
工况 3	1.274		—	—	
工况4	1.367	1.324	1.258	1.225	
工况5	1.275	1.297	1.314	1.393	
工况6	1.281	1.242	1.206	1.158	



Fig. 6 Most dangerous slip surface and stability coefficient under different working conditions

通过对表 3 和图 6 的分析,可以得出以下结论。

(1)不同库水位对滑坡稳定性的影响不同,随 着库水位的上涨,滑坡稳定性系数呈现先减小后增 大的趋势。分析其原因,是因为滑坡稳定性的变化 主要受到浮托作用、压坡作用和渗流力作用的影 响。该实例中,库水位的变化主要对滑坡前缘影响 较大,前缘为阻滑段,当上部土层重力越大时,抗滑 力与下滑力的差值越大,阻滑作用越强,滑坡越稳 定。库水位变化对滑坡稳定性的影响正是通过这 种方式进行的。初始阶段,随水库库水位的上升, 水面以下土层比例将增大,水的浮托作用同比增 大,在计算公式中体现为滑面反力减小,阻滑作用 力降低,滑坡稳定性趋于减小;当达到一个特定值 后,如果库水位继续增加,库水便会起到一定的压 坡作用,使阳滑作用得到增强,滑坡的稳定性将会 增加。同时,水库库水位的上升还会减小滑坡中的 水力的梯度值,使地下水渗流力趋于减小,有利于 滑坡的稳定性。

(2)在降雨条件下,滑坡稳定性随着降雨历时 的增加而趋于变小,到达一定阶段后,滑坡稳定性 系数不再变化。本文对161 m 水位(工况2)和193 m 水位(工况4)进行了历时4 d 的稳定性计算。由表 3(工况2 和工况4)结果可以看出,初始阶段稳定 性系数减小幅度不大,随着降雨时间的增加,稳定 系数将迅速减小,之后慢慢地趋于稳定。分析其原 因是:降雨入渗补给地下水需要一定的时间,当降 雨入渗补给地下水时,水面上升,地下水渗流速度 加大,滑坡的稳定性将迅速降低,之后地下水渗流 情况趋于稳定,稳定性系数也就不再发生变化。

(3) 库水位从 183 m 上升到 193 m 的过程中, 随着库水位的上涨,滑坡的稳定性有所增加。分析 其原因是:183 m 水位时,滑坡前缘阻滑段已经被 库水淹没,而随着水位上涨,浮托作用将不再增大, 而压坡作用却不断增大,同比水位的抬升,滑坡内 水力梯度趋于减小,渗流力趋于减小,接近库岸处 的部位甚至出现水体的倒流;这些因素都会使得 滑坡稳定性有所增大。

(4)库水位从 193 m 下降至 183 m 的过程中, 滑坡的稳定性明显趋于减小。分析其原因是:水 库水位下降时,水库水压坡作用趋于减小,同时滑 体内水力梯度增大,渗流力逐渐增大;这些因素都 将导致滑坡的稳定性变差,因此滑坡稳定性迅速趋 于减小。

4 结论

本文对6种工况进行了数值模拟,并在模拟基础上对滑坡的稳定性进行了分析,得到的主要结论如下:

(1)该滑坡最危险潜在滑动面位置受地形地 貌的影响较大,各种工况下,范围和位置变化相对 较小。

(2)不同的水位情况下,随着降雨时间的增加, 滑坡稳定性逐渐趋于减小,最后趋于一个定值;降 雨入渗需要一定量的时间,因此最开始滑坡稳定性 减小相对较小。

(3)随着库区水位的升高,滑坡稳定性趋于减 小,当水位到达一定值的时候,滑坡稳定性将随着 水库的水位升高而趋于增大。

(4)地下水位的骤升对滑坡稳定性的影响要视 具体情况而定。地下水位的骤升对浮托作用并没 有太大影响,但对压坡作用影响比较大,同时降低 了地下水渗流力的影响,因此,地下水位骤升不仅 没有使滑坡失稳的可能性进一步增大,反而对滑坡 稳定起到了积极的作用。

(5)当地下水骤降时,滑坡稳定性系数趋于最小。 地下水位的骤降增大了其渗流力,降低了前缘库水位 的压坡作用,但并未减弱地下水本身的浮托作用,因此 在此工况下,滑坡失稳的可能性趋于最大。

参考文献(References):

- [1] 熊珅,易武,王力,等. 三峡库区八字门滑坡变形破坏机理分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2019,30(5):9-18.
 Xiong S, Yi W, Wang L, et al. Analysis of deformation and failure mechanism of Bazimen landslide in Three Gorges Reservoir Area[J]. Chin J Geol Hazard Control,2019,30(5):9-18.
- 【2】 张丽艳. 唐山陡河水库凤山地下水渗流场探测分析[J]. 陕西水利,2019(6):64-65,68.
 Zhang L Y. Detection and analysis of groundwater seepage field in Fengshan of Tangshan Douhe Reservoir[J]. Shaanxi Water Resour,2019(6):64-65,68.
- [3] 朱致远. 大型水库滑坡稳定性受降雨的影响分析[J]. 建筑技术开发,2017,44(13):123-124.
 Zhu Z Y. Analysis on influence of landslide stability of large reservoir on rainfall[J]. Build Technol Dev, 2017,44(13):123 -

124.

- [4] 王焕,黄海峰. 某水库滑坡在降雨作用下的稳定性模拟分析[J]. 三峡大学学报:自然科学版,2016,38(5):46-52.
 Wang H, Huang H F. Simulation analysis of reservoir landslide stability under rainfall condition[J]. J China Three Gorges Univ: Nat Sci,2016,38(5):46-52.
- [5] 李再会,闫武,廖朝贵,等.重庆南川一武隆铝土矿矿物学、地球化学特征[J]. 沉积与特提斯地质,2012,32(3):87-100.
 Li Z H, Yan W, Liao C G, et al. Mineralogical and geochemical characteristics of the Nanchuan—Wulong bauxite deposit in Chongqing[J]. Sediment Geol Tethyan Geol,2012,32(3):87-100.
- [6] 常晓军,王德伟,唐业旗.中国滑坡降雨试验的研究现状与发展趋势[J]. 沉积与特提斯地质,2010,30(1):98-102.
 Chang X J, Wang D W, Tang Y Q. Simulation experiments of the rainfall induced landslides in China; insights and foresights[J].
 Sediment Geol Tethyan Geol,2010,30(1):98-102.

- [7] 万志杰.不同蓄水速度条件下库区岸坡变形体渗流特征研究[J].三峡大学学报:自然科学版,2019,41(S1):145-149.
 Wan Z J. Seepage characteristics of bank slope deformable body in reservoir area under different water storage speed conditions[J]. J China Three Gorges Univ: Nat Sci, 2019,41(S1): 145-149.
- [8] 姚品品.乌江白马航电枢纽羊角滩滑坡渗流场模拟[D].武汉:中国地质大学(武汉),2011.
 Yao P P. Seepage Field Simulation of Yang Jiao Tan Landslide[D].
 Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan),2011.
- [9] Pradhan B, Lee S. Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models [J]. Environ Earth Sci, 2010, 60(5):1037-1054.
- [10] Yilmaz I. A case study from Koyulhisar (Sivas Turkey) for landslide susceptibility mapping by artificial neural networks[J]. Bull Eng Geol Environ, 2009,68(3):297 – 306.

Numerical simulation study of the influence of groundwater seepage field on the stability of landslide in reservoir: A case study in Yangjiaotan landslide of Baimaku area

TIAN Kai¹, YAO Pinpin², TIE Yongbo¹, XU Wei¹

 Chengdu Center of China Geological Survey, Sichan Chengdu 610081, China; 2. Engineering College, China University of Geosciences, Hubei Wuhan 430070, China)

Abstract: Aiming at the complex problem of quantitative evaluation of the landslide stability under the condition of reservoir water level change, the authors in this paper considered the influence mechanism of rainfall and reservoir water level changes on groundwater seepage field, and adopted the basic theory of saturated - unsaturated seepage and seepage simulation finite element method to simulate the Yangjiaotan landside stability in the reservoir area under 6 different conditions. The results show that: ① Rainfall has an impact on the groundwater seepage field, with the greatest impact in the middle of the groundwater level and little impact on the front and back. Under rainfall conditions, the stability of the landslide decreases with the increase in rainfall duration. The landslide began to slip after reaching a certain stage, and the landslide stability coefficient keep unchanged. (2) Under the condition of the reservoir water level, the front edge of the landslide was mainly affected, and groundwater level changes rapidly with the change of the reservoir water level. The landslide stability coefficient shows a trend of first decreasing and then increasing with the rising reservoir water level. (3) The sudden rise of the groundwater level has limited impact on the floating effect, but it has a greater impact on counter poising. Besides, it also reduces the impact of the seepage force, which has a positive effect on the stability of the landslide. The sudden drop of the groundwater level increases the seepage force, weakening the effect of leading - edge reservoir water level on counter posing, so the possibility of landslide instability is greatest. The research results can provide a scientific basis for the prediction of the current stability and development trend of such landslides in the reservoir area.

Keywords: Yangjiaotan landslide; groundwater seepage field; numerical simulation; stability evaluation

(责任编辑:沈效群)