

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2017.02.04

库水位下降和降雨对重庆万州下坪滑坡稳定性的影响

张夏冉¹, 殷坤龙¹, 李 辉², 夏 辉¹, 付小林³

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北 武汉 430074; 3. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 三峡库区库岸有众多滑坡发育, 受库水位升降和降雨影响, 滑坡稳定性状态处于变化之中。为研究滑坡稳定性变化规律, 以万州区下坪滑坡为例, 采用极限平衡法与概率分析法, 分析了库水位从 159 m 降至 145 m 阶段该滑坡的稳定性状态。在设置库水位降速时考虑现状值与期望值两种情况, 从降雨量和降雨持续时间两个角度考虑 50 年一遇降雨条件。分析结果表明: (1) 在增大库水位下降速率的条件下, 下坪滑坡稳定性降低, 破坏概率变大。(2) 在相同的降雨时间内, 单日降雨量越大, 滑坡稳定性降低越快; 在库水位降速与单次总降雨量一定时, 降雨持续天数越长, 滑坡稳定性最差。(3) 单次总降雨量一定时, 滑坡破坏概率随降雨天数增加而增大, 其速率表现为由快变慢, 稳定性系数随降雨天数增加而减小, 其速率表现为由快变慢。(4) 从定性和定量两方面分析, 在 1.2 m/d 降速 + 14 d 降雨条件下, 下坪滑坡稳定性状态最差, 处于低危险性、基本稳定状态。

关键词: 三峡库区; 滑坡; 降雨; 破坏概率

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2017)02-0022-08

Influence of drawdown of reservoir water level and rainfall on Xiaping landslide stability

ZHANG Xiaran¹, YIN Kunlong¹, LI Ye², XIA Hui¹, FU Xiaolin³

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;

2. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;

3. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: There are many landslides developed on the bank of the three gorges reservoir. Affected by the variation of the reservoir water level and rainfall, the stability of the landslides is in change. The Xiaping landslide in Wanzhou district is taken as an example to study the variation of the stability of the landslide. Analyzing the stability of the Xiaping landslide during the water level drops from 159 m to 145 m with the method of the limit equilibrium method and probability analysis. The present value and the expected value are taken into the consideration when set up the reservoir drawdown. And the rainfall condition of once every 50 years is related to rainfall and the duration of rainfall. The results showed that: 1. The stability of the Xiaping landslide decreases and the failure probability increases with the increase of the rate of the reservoir water level. 2. The greater the daily rainfall becomes, the faster the stability of the landslide decreases, during the same rainfall time. And when the decline rate of the reservoir water level and the single total rainfall are same, the longer the rainfall last, the worse the stability of the landslide. 3. When the total rainfall is certain, the increase rate of the failure probability goes slow and the decrease rate of the stability goes slow, with the increase of the rainfall duration. 4. Analyzing the stability of the Xiaping landslide from two aspects of qualitative and quantitative, the

收稿日期: 2016-07-07; 修订日期: 2016-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41572292); 中国地质调查局三峡库区地质灾害监测预警项目(0431203)

第一作者: 张夏冉(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为岩土体工程性质与稳定性。E-mail: zhangxiaran@edu.cug.cn

通讯作者: 殷坤龙(1963-), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事地质灾害预测预报与风险研究。E-mail: yinkl@cug.edu.cn

state is the worst, which can be divided into the low risk and general stable state, under the conditions that the rate of the reservoir drawdown is 1.2 m/d and the rainfall duration is 14 days.

Keywords: three gorges reservoir; landslide; rainfall; failure probability

0 引言

三峡库区库岸有众多滑坡发育,库岸滑坡长期受库水位升降和降雨影响,滑坡稳定性状态处于变化之中,并且根据统计,降雨是诱发滑坡的重要因素,众多学者对降雨与滑坡的关系进行了研究,张珍等^[1]详细分析了重庆地区几十年内的 577 个滑坡的降雨与滑坡的历史资料,详细研究了降雨与滑坡的关系。高华喜等^[2]对区域性滑坡与降雨量进行偏相关分析,与降雨强度进行相关分析以及与降雨时间进行了系统地统计分析,建立了诱发区域性滑坡的临界降雨强度与有效降雨量阈值。严绍军等^[3]通过对某滑坡分析得到,降雨导致滑体重量增加而降低滑坡稳定性小于孔隙水压增加对稳定性的影响,超孔隙水压力的存在大幅提高了剩余下滑力值。张桂荣等^[4]针对三峡库区库水位调控方案和极端降雨情况,对秭归县八字门滑坡在不同降雨强度的滑坡稳定性进行分析,研究表明降雨更容易引起浅层滑坡与局部滑坡。邓宏艳等^[5]在某近坝库岸滑坡长期监测资料的基础上,对降雨主导型库岸滑坡变形的时空分布特征进行了研究。张玉等^[6]对降雨条件下大型滑坡的稳定性进行了分析,发现降雨持续时间的增长导致坡体稳定性降低。唐红梅等^[7]整理大量重庆地区降雨诱发滑坡资料,对降雨因子、累积降雨因子、前期降雨衰减系数与滑坡发生与否及滑坡发生数量之间进行系统的相关分析。尚敏等^[8]分析白水河滑坡变形趋势时,对降雨强度和降雨持续时间进行了考虑。

众多研究表明,以概率分析的方法评价滑坡稳定性状态,对力学参数的变异性进行考虑,可以得到相对客观的结果^[9]。周春梅等^[10]将概率统计的理论运用在剩余推力法上,推导了滑坡破坏概率的模型,分析了浙江张村滑坡的破坏概率,分析结果表明连续降雨致地下水位抬升,其破坏概率增大。王宇等^[11]以白水河滑坡为例,建立滑坡渐进破坏的模糊概率模型,研究了降雨条件下滑坡渐进破坏的时空演化规律。魏雨溪,李先福^[12]基于破坏概率分析方法,对三峡库区某滑坡的稳定性进行了评价,研究表明破坏概率分析方法可以降低参数随机性等对滑坡稳定性评价结果的影响。李原宝等^[13]采用极限平衡法和破坏概率分析方法,对极端降雨条件下万州区四方碑滑坡的库水位降速阈值进行了分析。

降雨对滑坡的影响应从降雨量和降雨持续时间两个角度进行考虑,本文采用极限平衡的定量计算与破坏概率的定性分析,对增大库水降速以及不同降雨条件下的万州区下坪滑坡的稳定性进行分析。

1 概率分析方法

影响滑坡稳定性的因素众多,建立滑坡稳定性系数与滑坡个影响因素的关系如下:

$$F = g(x_1, x_2, x_3, x_4, \dots) \quad (1)$$

其中, F 为极限平衡法求解的滑坡稳定性系数, $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots$ 是影响滑坡稳定性的各种不确定性因素,如滑坡几何边界,抗剪强度指标,滑坡体容重等,由于滑坡体的不均匀性,参数也呈现随机分布特征。

蒙特卡洛法通过大量的重复性抽样计算来实现概率分析,具有受条件限制小的特点^[14],其基本原理是依据随机变量的概率分布特征,在模型中采用随机产生的输入参数,对稳定性 F 进行求解,经过大量重复求解,结果达到预期精度时,获得稳定性结果样本值 A ,当 A 个随机结果样本中有 B 个样本值小于1,当 A 足够大时,可以得到滑坡的破坏概率为:

$$P_f = P[F < 1] = B/A \quad (2)$$

本文利用 SLOWPE/W 软件内置的蒙特卡洛法对滑坡稳定性进行概率分析。

2 滑坡基本特征

2.1 滑坡地质特征

下坪滑坡位于三峡库区万州区,滑坡的平面形态为舌形,剖面形态为直线型,滑坡主轴长约 340 m,平均宽度约 310 m,滑坡平均厚度 13 m。滑坡现有分布面积为 $14.6 \times 10^4 \text{ m}^2$,体积约 $336 \times 10^4 \text{ m}^3$,属土质滑坡。典型地质剖面见图 1。

滑体为崩坡积物,主要成分为粉质粘土夹砂泥岩碎块石。滑带土以软塑—可塑、饱和状态粉质粘土组成,含砂量较低,遇水强度降低,局部滑动面痕迹明显,具有光滑镜面和清晰擦痕。滑床主要由侏罗系中统上沙溪庙组砂质泥岩、泥质砂岩(J_2s)基岩层组成,岩性较弱,裂隙较发育,岩层连续性较好。

2.2 滑坡变形特征

滑坡形成后经过发展,表面地貌发生了轻微变化,

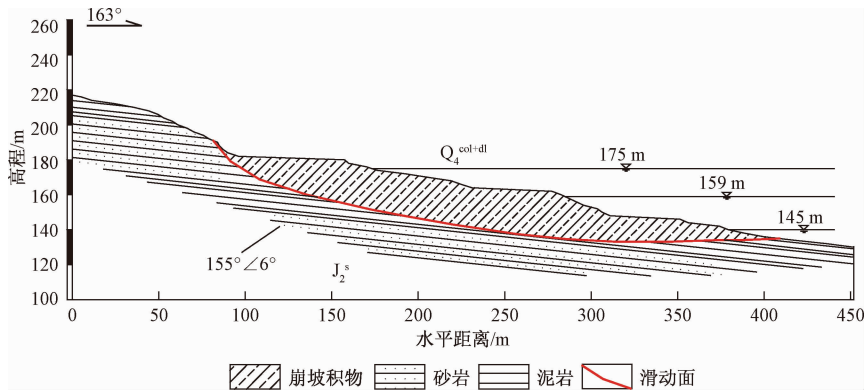


图 1 下坪滑坡地质剖面图
Fig.1 Geological profile of the Xiaping landslide

坡度变缓,在三峡水库蓄水之前滑坡体上有变形,主要是集中在滑坡体中上部的坡度较大部位。蓄水位达到 175 m 之后,野外调查发现滑坡前缘、中部及后缘均有变形迹象。前缘库水位附近(约 152.54 m)局部地段有宅基地,滑坡前缘宅基地有局部垮塌变形现象。滑坡中部至左侧前缘有一条原码头公路,以挡土墙护坡,现已废弃,滑坡中部公路有变形下沉现象,滑坡中部房屋有墙体和地面开裂变形下错现象。在水库水位变化以及降雨作用下,滑坡整体处于蠕滑变形状态,并有逐步加剧趋势。

3 库水降速及降雨工况

下坪滑坡中前部处于库水变动带内,调查发现,在库水位下降阶段,滑坡有局部变形,且出现暴雨时,变形迹象明显,因此本文主要考虑库水位下降和降雨的共同作用。

3.1 库水位降速

根据三峡水库调度方案,水库水位从 175 m 降至 145 m,其中 175 ~ 159 m 阶段库水位降速缓慢,对滑坡影响较小,159 ~ 145 m 阶段水位降速明显增大,对滑坡的影响也增大。本文仅对库水位 159 ~ 145 m 阶段的降速进行考虑。

根据目前的水位降速和三峡水库调度期望降速,设置水位降速分别为现状降速 0.6 m/d、期望降速 1.2 m/d。分别设置工况见表 1。

表 1 库水位降速取值

Table 1 The rate of the reservoir drawdown		
工况	水位变化范围	水位降速/(m · d ⁻¹)
1	159 m 降至 145 m	0.6
2	159 m 降至 145 m	1.2

备注:工况 2 中,159 ~ 155 m 每天下降 1.0 m;155 ~ 151.4 m 连续 3 天每日下降 1.2 m;151.4 m ~ 145 m 每天下降 1.0 m。

3.2 降雨

降雨诱发库岸滑坡变形的重要因素,滑坡堆积物为非饱和状态,降雨入渗时增大滑体重度,降低滑带抗剪强度^[15-16]。降雨对滑体的影响受到滑体入渗能力和降雨强度两个方面制约。滑体入渗能力跟滑体物质组成与结构有关。降雨强度较小时,降雨全部渗入滑体中;而当降雨强度较大时,一部分降雨渗入滑体中,另一部分降雨来不及渗入到滑体的非饱和层,直接汇集成地表径流,沿着滑坡表面的冲沟排入长江中。降雨强度体现在降雨量和降雨持续时间两个方面。库水位在 159 ~ 145 m 阶段在每年的 4 ~ 6 月期间,对该阶段的降雨从以下方面进行考虑:

(1) 单次总降雨量

根据万州区 1960 ~ 2013 年 54 年内降雨量统计和降雨强度重现期分析,4 ~ 6 月期间,50 年一遇降雨强度值一般在 280 mm 左右。

(2) 单次降雨持续时间

图 2 为万州区 54 年内 4 ~ 6 月期间降雨持续天数与出现次数的关系。

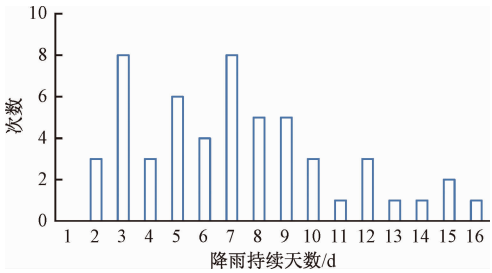


图 2 万州区 54 年降雨持续时间与频率
Fig.2 Duration and frequency of rainfall in Wanzhou district during 54 years

根据图 2 中的关系,选取持续天数为 3 d、7 d 为降雨工况,另根据计算工况 2,设定整个库水位下降过程

一直降雨,持续时间为 14 d。同时分析时将无降雨条件与降雨条件下滑坡稳定性进行对比。由此设置降雨工况见表 2,3 d、7 d、14 d、0 d 降雨强度分别对应强、中、弱和无降雨。

表 2 降雨计算工况

Table 2 Calculation conditions of rainfall				
强度	强	中	弱	无
天数/d	3	7	14	0
单日降雨量/(mm·d ⁻¹)	93.3	40	20	0

4 滑坡稳定性评价

4.1 滑坡破坏概率

下坪滑坡位于青草背 1 号滑坡前缘,根据《三峡库区重庆市万州区附马桥滑坡群青草背 1 号滑坡治理工程地质勘察报告》,参数取值渗透系数 0.06 m/d,饱和和体积含水量 0.31。

滑坡被长江淹没部分较多,并且滑坡滑带已经形成,因此选择饱和和直剪试验结果作为破坏概率分析的参数,取值见表 3。

表 3 滑动面抗剪强度参数

Table 3 Shear strength parameters of sliding surface				
残余抗剪强度	黏聚力 c/kPa		内摩擦角 φ/(°)	
	均值	标准差	均值	标准差
饱和直剪	22.3	2.78	8.6	0.64

通过计算得到滑坡破坏概率分布图如下:
对比图 3 中(a)、(b)、(c)、(d),有降雨比无降雨条件下滑坡破坏概率明显增大;从(b)、(c)、(d)可以看出,当单次总降雨量相同时,降雨持续时间越久,滑坡破坏概率越大。

从图 4 中同样可以得到,有降雨比无降雨条件下滑坡破坏概率明显增大;当单次总降雨量相同时,降雨持续时间越久,滑坡破坏概率越大。

对比图 3 和图 4,当降雨条件相同时,水位降速增大使得滑坡破坏概率增大,影响更加明显。50 年一遇降雨破坏概率见表 4。

表 4 50 年一遇降雨滑坡破坏概率(%)

Table 4 Failure probability of landslide with rain once in 50-year(%)		
降雨持续时间/d	水位降速/(0.6 m·d ⁻¹)	水位降速/(1.2 m·d ⁻¹)
3	9.12	12.84
7	10.7	16.24
14	13.82	29.32

无降雨条件下滑坡破坏概率见表 5。

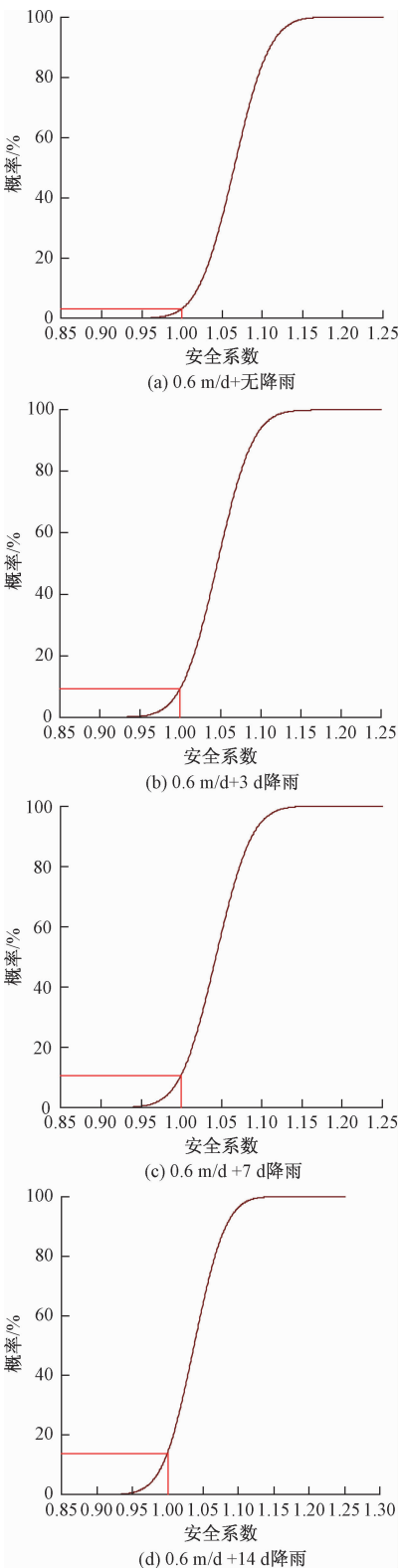


图 3 0.6 m/d 降水下滑坡稳定性系数
概率分布函数
Fig.3 The probability distribution function of the
landslide stability coefficient at the velocity
of water level drawdown of 0.6 m/d

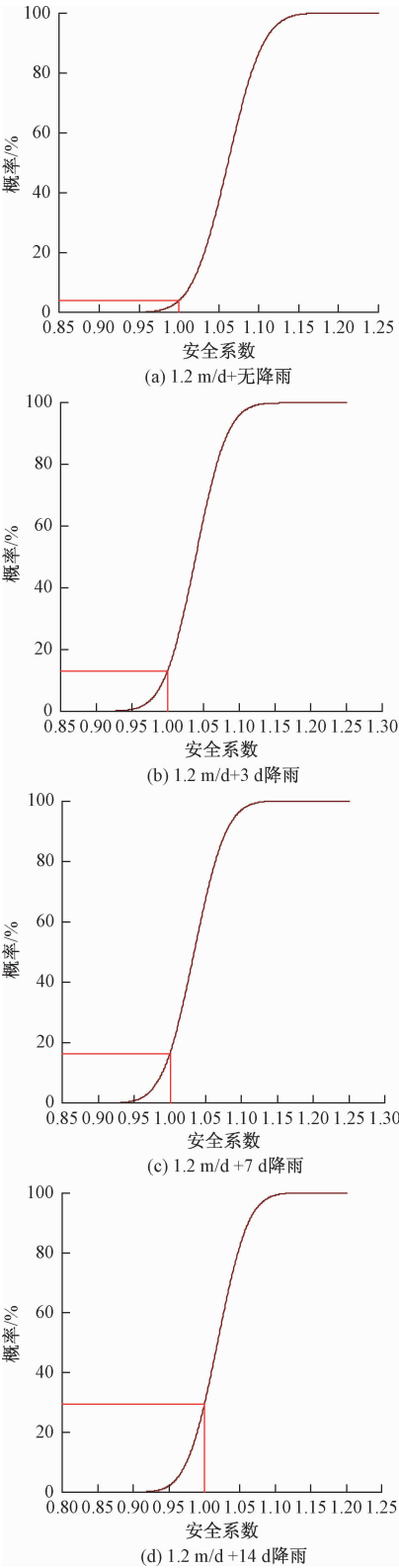


图4 1.2 m/d 降速下滑坡稳定性系数
概率分布函数

Fig.4 The probability distribution function of the landslide
stability coefficient at the velocity of water
level drawdown of 1.2 m/d

表5 无降雨滑坡破坏概率(%)

Table 5 Failure probability of landslide without rainfall(%)

降雨持续时间/d	水位降速/(0.6 m · d ⁻¹)	水位降速/(1.2 m · d ⁻¹)
0	3.1	4

通常边坡的破坏概率评判标准^[13]: $P_f < 5\%$, 边坡稳定; $5\% < P_f < 30\%$, 边坡处于低危险性; $30\% < P_f < 60\%$, 边坡处于中等危险性; $60\% < P_f < 90\%$, 边坡处于高危险性; $90\% < P_f$, 边坡必然破坏。由计算结果可以看出, 当处于无降雨条件时, 水库水位以 0.6 m/d 和 1.2 m/d 下降时, 滑坡破坏概率均小于 5%, 处于稳定状态。当有降雨时, 滑坡处于低危险性状态。1.2 m/d + 14 d 降雨时滑坡破坏概率最大, 接近 30%。

滑坡破坏概率与降雨持续天数关系见图 5。

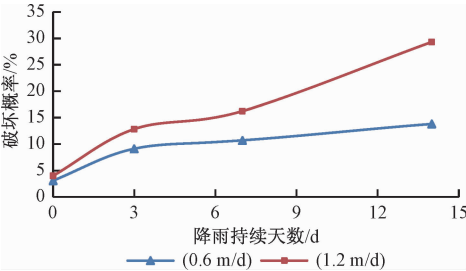


图5 滑坡破坏概率与降雨持续天数关系

Fig.5 Relationship between failure probability of the
landslide and the rainfall duration

从图 5 中可以看出:

(1) 对比降速为 0.6 m/d 和 1.2 m/d 两种情况下滑坡的破坏概率, 可以得到, 在其他条件相同时, 水库水位降速增大, 滑坡破坏概率增大。

(2) 图 5 中显示, 两条曲线都随降雨持续天数的增加而上升, 可见, 当滑坡上单次总降雨量一定时, 持续时间越久, 滑坡破坏概率越大, 且变大趋势由快变慢。

对于以上规律, 分析认为, 滑坡土体在持续降雨作用下含水量增加, 滑坡上层土体重度增大; 降雨入渗至地下水, 使得地下水位上升, 当库水位下降时, 由于滑体土渗透性差, 滑坡内的地下水不能及时排水, 在滑坡中形成了较大的动水压力, 下滑力增大, 滑坡下滑趋势增大。

总降雨量一定, 当降雨持续时间为 3 d 时, 每天降雨量为 93.3 mm, 大于滑体渗透系数, 此时降雨最大限度的入渗的同时还会从地表汇集从冲沟等直接排入长江; 降雨持续时间为 7 d 和 14 d 时, 降雨强度小于滑坡入渗能力, 降雨全部入渗进入滑体。降雨持续时间越

久,地下水位保持高水位的时间也会越久,因而导致形成持续的指向滑坡前缘的动水压力,滑坡破坏概率增大。

4.2 不同降雨期滑坡稳定性

由勘察报告得到了下坪滑坡的计算参数见表 6。

表 6 下坪滑坡计算参数

Table 6 Parameters of the Xiaping landslide

土体类别	天然容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	饱和容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
滑体	20.5	20.8	—	—
滑带	—	—	16.0	11.0

采用 SLOPE/W 程序中的 M-P 法对不同水位降速和降雨条件下滑坡的稳定性系数进行求解,结果见图 6。

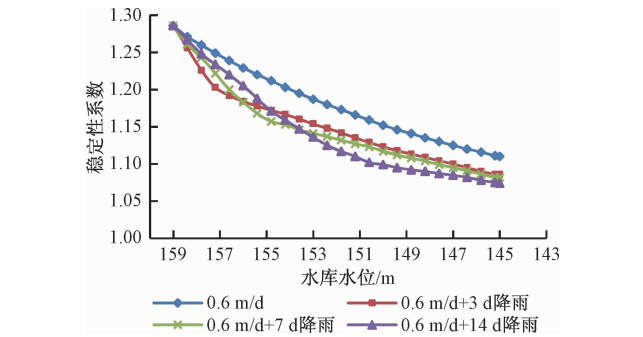


图 6 0.6 m/d 降速下滑坡稳定性系数

Fig. 6 Landslide stability coefficient at the velocity of water level drawdown of 0.6 m/d

图 6、图 7 为滑坡稳定性计算结果,从图中可以看出,降雨条件下滑坡稳定性明显降低。滑坡稳定性随着水库水位的下降而下降,当水库水位下降至 145 m 时,稳定性系数最小;从图中还可以看出来,当单次总降雨量相同时,单日降雨量越大,稳定性系数曲线下降越快,当降雨停止时,稳定性系数变化曲线会出现拐点,即下降速率变缓,降雨持续时间越长,滑坡稳定性系数越小。相同的降雨持续时间,单日降雨量越大滑坡稳定性系数下降越快。

表 7 稳定性系数最小值

Table 7 The minimum value of stability coefficient

降雨时期/d	0	3	7	14
0.6 m/d 降速	1.11	1.086	1.082	1.074
1.2 m/d 降速	1.106	1.077	1.070	1.050

滑坡稳定性系数与降雨持续天数关系见图 8。

从图 8 中可以看出：

(1) 对比降速为 0.6 m/d 和 1.2 m/d 两种情况下滑坡的稳定性系数最小值,可以得到,水库水位降速增

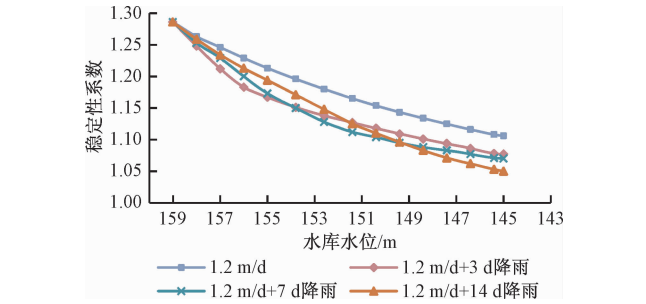


图 7 1.2 m/d 降速下滑坡稳定性系数

Fig. 7 Landslide stability coefficient at the velocity of water level drawdown of 1.2 m/d

大,滑坡稳定性下降。

(2) 图中显示两条曲线都随降雨持续天数的增加而下降,由此得到的结论是,单次总降雨量一定时,持续时间越久,稳定性系数越小,且下降趋势由快变慢,表现在图中为曲线由陡变缓。

分析认为,单次总降雨量一致,持续时间越长,降雨对滑坡稳定性的影响越大,雨水持续入渗,滑体保持饱水状态,降雨增大了滑体重量,降低了滑带土的强度,当降雨入渗至滑体含水层时,滑坡地下水位线上升,滑体内水位滞后于滑坡前缘长江水位,指向坡外的水压力增大,增大滑坡下滑趋势。

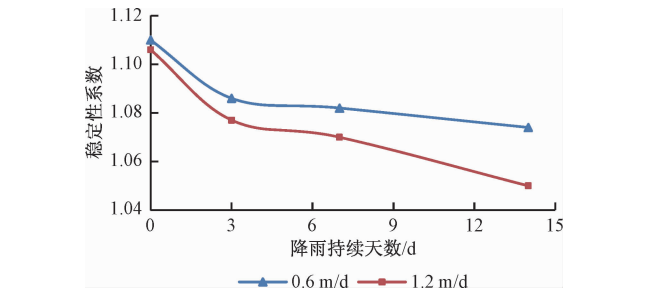


图 8 滑坡稳定性系数最小值与降雨持续天数关系

Fig. 8 Relationship between the minimum stability coefficient of landslide and rainfall duration

根据模拟计算结果滑坡在 1.2 m/d + 14 d 降雨时稳定性系数最小,为 1.05,对应表 8 可得滑坡在此工况下处于基本稳定状态。

表 8 滑坡稳定性状态分级^[17]

Table 8 Classification of landslide stability

滑坡稳定性系数	$F_s < 1.00$	$1.00 \leq F_s < 1.05$	$1.05 \leq F_s < F_{st}$	$F_s \geq F_{st}$
稳定状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

注:据 DB 50/143 - 2003; F_{st} 为滑坡稳定性安全系数。

4.3 模拟分析与水库实际运行过程对比分析

根据 2016 年万州区上半年长江水位及降雨统计

数据,万州区水位降至最低为 146.28 m。取水位降在 159~146.28 m 进行分析,同时将该阶段的降雨作为条件施加在滑坡上。对滑坡的稳定性系数和破坏概率进行计算分析,滑坡稳定性系数最小值为 1.077,出现在水位最低时;破坏概率为 11.28%。根据上文可得滑坡处于低危险性、基本稳定状态。

将计算结果与 0.6 m/d 降速工况进行对比分析,其稳定性系数最小值处于降雨持续天数 7 d 与 14 d 之间,滑坡破坏概率同样处于降雨持续天数 7 d 与 14 d 之间,且差值较小。由统计资料得知该阶段总降雨量为 185.4 mm,日降雨量大于 3 mm 有 11 d,平均日降雨量为 16.9 mm,与 0.6 m/d 降速 + 14 d 降雨条件较为相近。相比可以发现,降雨量越大持续时间越久,滑坡稳定性越差。综合对比得出现状降速条件下的模拟分析结果与三峡水库区实际运行过程水位下降条件下滑坡稳定性状态相近,较为符合工程实际。

将计算结果与 1.2 m/d 降速工况进行对比分析,其稳定性系数最小值与降雨持续天数 3 d 工况相等,且小于 7 d 和 14 d 降雨工况,滑坡破坏概率小于模拟分析的三种降雨持续天数的工况。由此可以看出,在 50 年一遇降雨和水库水位期望降速 1.2 m/d 条件下,下坪滑坡稳定性有所降低。此时滑坡处于低危险性、基本稳定状态。

5 结论

本文采用数值模拟的方法,对降雨及增大水库水位日降幅条件下的下坪滑坡稳定性状态进行分析。得到如下结论:

(1)在库水位下降和降雨条件下,下坪滑坡稳定性随水库水位下降而降低,破坏概率也随之变大。并且滑坡稳定性在降速期望值 1.2 m/d 条件下比降速现状条件下差。

(2)在相同的降雨时间内,单日降雨量越大,滑坡稳定性降低越快;在库水位降速与单次总降雨量一定时,降雨持续时间越久,滑坡稳定性越差。

(3)单次总降雨量一定时,滑坡破坏概率随降雨天数增加而增大,其速率表现为由快变慢,稳定性系数随降雨天数增加而减小,其速率表现为由快变慢。

(4)从定性和定量两方面分析,三峡水库区实际运行过程水位下降条件下处于低危险性、基本稳定状态;在增大水位降速和 50 年一遇降雨条件下稳定性状态变差,其中 1.2 m/d 降速 + 14 d 降雨工况时滑坡稳定性状态最差,此时下坪滑坡处于低危险性、基本稳定

状态。

参考文献:

- [1] 张珍,李世海,马力. 重庆地区滑坡与降雨关系的概率分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3185 - 3191.
ZHANG Zhen, LI Shihai, MA Li. Probability analysis of relationship between landslide and rainfall in Chongqing area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3185 - 3191.
- [2] 高华喜,殷坤龙. 降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 1055 - 1060.
GAO Huaxi, YIN Kunlong. Discuss on the correlations between landslides and rainfall and threshold for landslide early-warning and prediction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 1055 - 1060.
- [3] 严绍军,唐辉明,项伟. 降雨对滑坡稳定性影响过程分析[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(2): 33 - 36.
YAN Shaojun, TANG Huiming, XIANG Wei. Effect of rainfall on the stability of landslides [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(2): 33 - 36.
- [4] 张桂荣,程伟. 降雨及库水位联合作用下秭归八字门滑坡稳定性预测[J]. 岩土力学, 2011, 32(S1): 476 - 482.
ZHANG Guirong, CHENG Wei. Stability prediction for Bazimen landslide of Zigui County under the associative action of reservoir water level fluctuations and rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 476 - 482.
- [5] 邓宏艳,孔纪名. 降雨主导型库岸滑坡变形时空分布特征[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(1): 148 - 154.
DENG Hongyan, KONG Jiming. Spatiotemporal distribution characteristics of reservoir bank landslide deformation driven by rainfall[J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(1): 148 - 154.
- [6] 张玉,徐卫亚,邹丽芳,等. 降雨条件下大型滑坡体渗流稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 833 - 841.
ZHANG Yu, XU Weiya, ZOU Lifang, et al. Analysis of seepage stability of large-scale landslide under rainfall condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 833 - 841.

- [7] 唐红梅,魏来,唐云辉,等. 重庆地区降雨型滑坡相关性分析及预报模型[J]. 中国地质灾害与防治学报,2013,24(4):16-22.
TANG Hongmei, WEI Lai, TANG Yunhui, et al. Correlation analysis and prediction model for rainfall-induced landslide in Chongqing area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(4):16-22.
- [8] 尚敏,徐鑫,Dave Chan,等. 基于降雨渗流场变化的三峡库区白水河滑坡变形机制与预测[J]. 中国地质灾害与防治学报,2016,27(2):26-32.
SHANG Min, XU Xin, Dave Chan, et al. Deformation mechanism and prediction of baishuihe landslide based on the analysis of rainfall seepage field in China Three Gorges Reservoir area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(2):26-32.
- [9] 尹小涛,王水林. 基于可靠度理论的滑坡稳定性及其影响因素分析[J]. 岩土力学,2008,29(6):1551-1556.
YIN Xiaotao, WANG Shuilin. Stability and its influential factors analysis of landslides based on reliability theory [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6):1551-1556.
- [10] 周春梅,殷坤龙. 滑坡破坏概率分析及其在浙江张村滑坡中的应用[J]. 安全与环境工程,2004,11(2):1-4+13.
ZHOU Chunmei, YIN Kunlong, Probability analysis of slope failures and its application for Zhangcun landslide, Zhejiang Province [J]. Safety and Environmental Engineering, 2004, 11(2):1-4+13.
- [11] 王宇,李晓,张搏,等. 降雨作用下滑坡渐进破坏动态演化研究[J]. 水利学报,2013,44(4):416-425.
WANG Yu, LI Xiao, ZHANG Bo, et al. Dynamic progressive failure evolution research on landslide under precipitation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(4):416-425.
- [12] 魏雨溪,李先福. 基于破坏概率分析的滑坡稳定性评价[J]. 路基工程,2014(3):69-73.
WEI Yuxi, LI Xianfu. Stability evaluation for landslide based on failure probability analysis [J]. Subgrade Engineering, 2014(3):69-73.
- [13] 李原宝,李远耀,苏红瑞. 极端降雨条件下水库滑坡稳定性的库水位降速阈值分析[J]. 世界科技研究与发展,2016,38(1):66-70+142.
LI Yuanbao, LI Yuanyao, SU Hongrui. Analysis of reservoir landslide water level's deceleration stability in extreme threshold of condition [J]. World Sci-Tech R & D, 2016, 38(1):66-70+142.
- [14] 陈伟,许强,王朝阳. 蒙特卡洛法在滑坡稳定性可靠度分析中的应用[J]. 路基工程,2011,41(4):135-137.
CHEN Wei, XU Qiang, WANG Chaoyang. Application of Monte Carlo method in reliability analysis of slope stability [J]. Subgrade Engineering, 2011, 41(4):135-137.
- [15] 张群,许强,甯娜. 降雨条件下低缓浅层土质滑坡稳定性影响因素及耦合研究[J]. 水文地质工程地质,2014,41(5):90-94+117.
ZHANG Qun, XU Qiang, NING Na. A study of the stability influence factors and coupling for inclined-shallow soil landslides under the condition of rainfall [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(5):90-94+117.
- [16] 陈君,王浩,戴强. 湖北恩施市降雨引发滑坡灾害的风险评价[J]. 中国地质灾害与防治学报,2016,27(1):15-21.
CHEN Jun, WANG Hao, DAI Qing. Risk assessment of landslide hazard caused by rainfall in Enshi city [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(1):15-21.
- [17] 三峡库区地质灾害防治工作指挥部. 三峡库区地质灾害防治工程地质勘察技术要求[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2014.
The headquarters of the three gorges reservoir geological hazard control work. The geology exploration technical requirements of the three gorges reservoir geological disaster control engineering [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2014.