

[文章编号] 1003-4684(2019)05-0088-04

蓄水作用下的滑坡破坏机理研究

夏承志, 刘珉玮, 邹先进

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 三峡水库处于正常蓄水运行初期时,库水位将涨落于 145~175m 水位间,在库水位升降引起的剧烈变动下,将会对滑坡产生一系列不良作用,影响到库区滑坡稳定性,诱发滑坡变形。确定卡子湾滑坡的浸润线分布,分别计算降雨和不同蓄水位下的稳定性系数。计算结果表明:随库水位上升,滑坡体浸润线分布也随之上升,在降雨条件下的滑体后缘浸润线分布会受到一定影响;滑坡整体稳定性随库水位上升逐渐减小,联合降雨条件下,滑坡的稳定性系数相对减小。

[关键词] 滑坡; 库水位升降; 降雨; 渗流; 地下水位; 稳定性

[中图分类号] TU43

[文献标识码] A

滑坡是山体受到地震、降雨、开挖等自然和人类活动的扰动,在滑坡自身重力作用下发生变形、蠕动及破坏的一种力学现象,表现为岩土体的变形、破坏、失稳及运动^[1]。库水位循环变动和降雨是导致边坡失稳的重要因素^[2]。我国地质灾害种类繁多,导致每年的经济损失严重,而其中以边坡灾害为主要形式占比 50% 以上^[3]。边坡内含水量的多少及分布规律影响着边坡的稳定,因而库水位的升降和降雨常常是引发滑坡灾害发生的重要原因之一^[4]。在三峡库区,滑坡灾害发生时,不仅能够摧毁坡体上部及周围建筑物,并影响人们的生命财产安全,而且还会降低水库的有效容积^[5]。

年均涨落近 30 m 的库水位,等同于两岸受到库水的侵蚀强度比受到自然洪水的侵蚀强度增强近 100 倍,由此会衍生出一系列的新型滑坡地质灾害^[6-8]。王鹏等^[9]用 Geo-studio 软件计算出了在降雨过程中库水位变化下边坡的渗流作用及其稳定性。但以上研究均未涉及库水位逐渐变化过程中同时发生不同强度降雨的条件下,在对边坡深浅层滑动研究上进一步考虑渗透特性、稳定性等情况^[10]。因此,研究边坡渗流特性与稳定性的分析在考虑降雨及库水位共同作用下是很有必要的。

R. CHOWDHURY^[11]运用极限平衡法对滑坡进行分析,得出将滑动面视为非整体的软弱层,滑坡

上部的滑动体在向下运动时,会对滑坡下部的稳定体或者欠稳定体产生一定的应力作用,当达到临界状态时,滑体下部会造成失稳,由此进一步强调了滑坡受水库水位变化的影响。文宝萍等^[12]分析了涉水滑坡在冲刷作用和浸泡作用下的稳定性,并进一步证实了水的渗透导致滑坡切层段泥岩抗剪强度锐减是影响滑坡稳定性的重要因素,同时证明了水库蓄水对滑坡稳定作用大于降雨对滑坡稳定性的作用。

现阶段影响三峡库区地质灾害最严峻的问题就是涉水、降雨及水库蓄水等条件下引起的滑坡失稳,但目前大多数研究分析都只针对某一外在诱发因素进行,实际上对降雨和库水位联合作用影响下的滑坡变形机理研究相对较少。

笔者以卡子湾滑坡为例,分析了降雨作用以及库水位涨落作用下卡子湾滑坡深浅层边坡的稳定性。研究结论可为库水位及降雨联合作用下边坡的失稳机理和工程治理提供参考,为地质灾害防治工作及滑坡预测预报等相关研究做了进一步的推进工作。

1 计算理论

1.1 浸润线确定

采用相对简化计算方法详见文献^[14],确定浸

[收稿日期] 2019-06-11

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(41372363); 国家重点主任基金(41641027); 三峡后续工作地质灾害防治项目(0001212015CC60005)

[第一作者] 夏承志(1995-),男,湖北鄂州人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为岩土力学的理论

润线,该方法基于以下假定:

- 1)含水层均质、各向同性,侧向无限延伸,具有水平不透水层;
- 2)原始潜水面在库水下降前水平;
- 3)潜水流为一维流;
- 4)库水位以 V_0 的速度等速下降;
- 5)库岸按垂直考虑。

在上述假设条件下,可以得到潜水非稳定运动微分方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{K}{\mu} \frac{\partial}{\partial x} \left(H \frac{\partial h}{\partial x} \right) \tag{1}$$

方程(1)可进一步简化为一维非稳定渗流运动方程(方程(2))(含水层厚度 h 可近似为常数,替换为时段末、时段始潜水流厚度的平均值 h_m)

$$\frac{\partial h}{\partial t} = a \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}, \quad a = \frac{Kh_m}{\mu} \tag{2}$$

利用方程(2)建立数学模型,并应用积分变换和逆变换,可得到并化简微分方程的解:

$$h_{x,t} = \begin{cases} h_{0,t} - V_0 t (0.1091\lambda^4 - 0.7501\lambda^3 + 1.9283\lambda^2 - 2.2319\lambda + 1) & (0 \leq \lambda < 2) \\ h_{0,0} & (\lambda \geq 2) \end{cases} \tag{3}$$

式中: $\lambda = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{\mu}{Kh_m t}}$, 其中 K 为渗透系数, m/d ; h_m 为含水层的平均厚度, m ; 取 $h_m = (h_{0,0} + h_{0,t})/2$, $h_{0,0}$ 为库水下降前的水位, m ; $h_{0,t}$ 为 t 时刻的库水位, m ; t 为库水下降时间, d ; μ 为给水度。

通过分析方程(3)可得知,本方法可确定浸润线在不同降速下的分布特征,在考虑了水位下降速率、渗透系数及给水度等综合因素下,可以更完善地服务于工程应用。

1.2 稳定性计算方法

稳定性计算采用滑坡工程中使用最多的不平衡推力法,在综合考虑水压力的情况,受力情况如图 1 所示,其计算公式如下:

正压力

$$N_i = W_i \cos \alpha_i + P_{i-1} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) + \frac{1}{2} \gamma_w h_{i,\text{上}}^2 \sin \alpha_i - \frac{1}{2} \gamma h_{i,\text{下}}^2 \sin \alpha_i - \frac{1}{2} (\gamma h_{i,\text{上}} + \gamma h_{i,\text{下}}) l_i \tag{4}$$

$$\text{正应力} \quad \sigma_i^n = N_i / l_i \tag{5}$$

$$\text{临界摩阻应力} \quad \tau_i^{\text{crit}} = c_i + \sigma_i^n \tan \varphi_i \tag{6}$$

$$\text{摩阻力} \quad T_i^{\text{crit}} = c_i l_i + N_i \tan \varphi_i \tag{7}$$

抗滑力折减后的摩阻力

$$T_{i,F}^{\text{crit}} = T_i^{\text{crit}} / F \tag{8}$$

下滑力

$$P_i^S = W_i \sin \alpha_i + P_{i-1} \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) + \frac{1}{2} \gamma_w h_{i,\text{上}}^2 \cos \alpha_i -$$

$$\frac{1}{2} \gamma_w h_{i,\text{下}}^2 \cos \alpha_i \tag{9}$$

剩余下滑力

$$P_i = P_i^S - T_{i,F}^{\text{crit}} \tag{10}$$

式中: W_i 表示第 i 块重量; β_i 表示垂直于水平的地表均布荷载; Δ_i 表示沿水平方向均布荷载; l_i 表示条块底边长; α_i 表示水平和条块底边成的夹角; F 为稳定系数; σ_i^n 为法向应力; γ 水表示水比重; $h_{i,\text{下}}$ 表示条块左侧水位; $h_{i,\text{上}}$ 为条块右侧水位; φ_i 分布荷载与水平方向上的夹角。

传统条分法将式(4)~(10)进行多次迭代计算,直至最后一个条块(图 2 中第 n 条块)的剩余下滑力等于 0,满足平衡条件,从而获得稳定系数 F 。

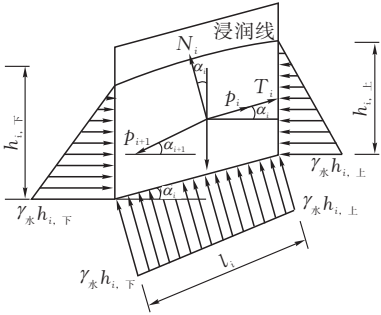


图 1 不平衡推力法受力

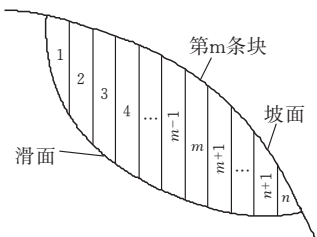


图 2 边坡稳定分析土条块划分

2 工程地质条件

地处归州河左岸的卡子湾滑坡,地理位置为北纬 $31^{\circ} 0' 48''$, 东经 $110^{\circ} 41' 37''$ 。滑坡所在斜坡坡向为 296° ; 坡高达 635 m ; 坡长为 1270 m ; 斜坡呈凸形、阶梯形; 其斜坡坡度在 $15^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 范围; 斜坡为顺向坡结构; 东北向分布的基岩斜坡产状为 $280^{\circ} \sim 320^{\circ} \angle 26^{\circ} \sim 39^{\circ}$, 裂隙产状 $180^{\circ} \angle 82^{\circ}$, $240 \sim 250^{\circ} \angle 46^{\circ} \sim 79^{\circ}$; 分布在南西侧的岩石产状为 $65^{\circ} \angle 66^{\circ}$ 。

卡子湾滑坡整体为岩质滑坡,滑体物质具双层结构,表层为松散堆积碎石土,下部为碎裂岩。预警区和变形影响区构成了卡子湾滑坡的主要变形区,滑坡其他部分为稳定区。预警区为卡子湾滑坡的表层滑坡体,变形影响区为卡子湾滑坡的深部滑坡体。

卡子湾滑坡北部和南部分别发育一条季节性冲沟,冲沟走向北西,滑坡体北部为凸状山脊地形,南部为凹谷斜坡。滑坡宽约 1000 m , 纵长约 1100 m ,

总面积约 $110\times 104\text{ m}^2$,平均滑体厚度 110 m ,总体积约 $12000\times 104\text{ m}^3$ 。其他参数取值如表 1 所示。

表 1 卡子湾滑坡参数表

参数	滑体
容重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	18
粘聚 c/kPa	13
摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	33
弹模 E/MPa	20.8
泊松比/ μ	0.21
渗透系数/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	3

3 实例分析

根据现场调查情况分析,卡子湾滑坡为涉水滑坡,计算稳定性采用条分法,建立条块计算模型(图 3)。

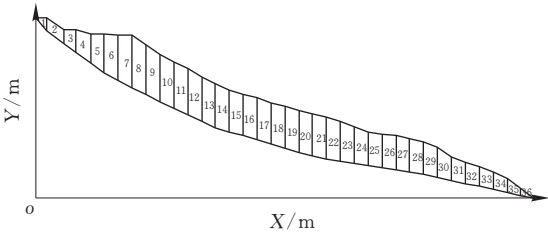


图 3 滑坡条块计算模型

3.1 分析工况

分别计算在 145 m 、 159 m 、 175 m 特征水位及联合不同降雨条件下的滑坡稳定性系数,详见表 2。

表 2 计算工况组合

工况组合编号	工况及编号	
1	1	145 m 水位+20 年一遇降雨
	2	159 m 水位+20 年一遇降雨
	3	175 m 水位+20 年一遇降雨
2	4	145 m 水位+50 年一遇降雨
	5	159 m 水位+50 年一遇降雨
	6	175 m 水位+50 年一遇降雨

3.2 滑坡地下水渗流分析

本研究滑坡地下水的渗流分析以表 2 中工况为例进行分析,经计算以不同降雨条件从 145 m 蓄水至 175 m 时刻的浸润线如图 4、图 5 所示。随着水库蓄水位变化,卡子湾滑坡滑体内浸润线分布均随之变化。从图中可以看出,由于在滑坡体内外形成的水头差,滑坡体内浸润线的涨幅明显滞后于库水位的涨幅,导致浸润线呈现明显的上凸趋势,且伴随降雨强度加大,上凸情况更加明显。

3.3 滑坡稳定性计算评价

对卡子湾滑坡进行条块划分,并计算上述工况组合下的稳定性系数,计算结果如表 3 所示。

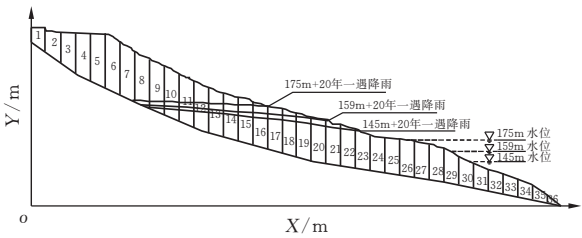


图 4 不同水位线叠加 20 年一遇降雨浸润线分布情况

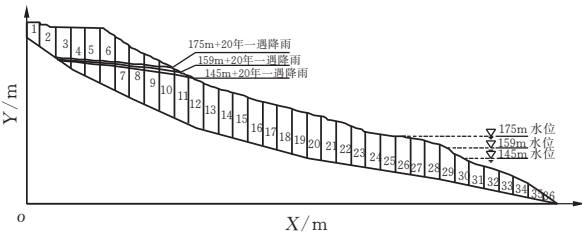


图 5 不同水位线叠加 50 年一遇浸润线分布降雨情况

表 3 稳定性计算结果

工况组合编号	工况编号	稳定系数
1	1	1.289
	2	1.359
	3	1.441
2	4	1.122
	5	1.074
	6	1.040

3.4 变形机理分析

归州河位于卡子湾滑坡前缘,河水的不断冲刷为滑坡变形提供了临空面。其表层滑体主要分布为含碎块石粉质粘土,渗透性较差;滑床结构为侏罗系上统遂宁组砂岩与泥岩互层地层,透水性差,排水不畅,滑体随着雨水的渗透,土体内部空隙被填满而进入饱和状态,使得滑坡体自重加大,进而使下滑力也有一定的增加,滑坡体内含水量急剧增大。岩土体结构遇水浸泡软化,力学强度衰减,进一步影响了堆积体沿下伏岩土界的滑动面产生滑动。

一方面,滑坡前缘部分岩土体由于水位上升受浸泡作用影响,其抗剪强度降低,滑坡的整体稳定性会受到影响。另一方面,受水的浮力作用影响,滑坡前缘涉水滑体阻滑力降低,随之稳定性逐渐下降。由库水位的波动引起冲刷作用也会导致前缘坡体坍塌,影响滑坡体的整体稳定性。

耕植等行为会加快雨水渗透速度,破坏土体内部结构,同样影响着坡体的稳定。修建公路进行了不合理的边坡切脚,也直接引起滑坡体的失稳。

4 蓄水作用下滑坡稳定性分析

工况 1 在 20 年降雨强度的情况下考虑蓄水至

145 m 水位,此时的剩余下滑力为-2207 kN/m(表 4),稳定系数计算结果为 1.44 远大于安全系数 1.05,说明边坡处于稳定状态(图 6);工况 2、工况 3 即在与工况 1 相同降雨条件下,考虑蓄水至 159 m 及 175 m 水位,边坡的剩余下滑力分别为 -1995 kN/m和-1786 kN/m,稳定系数由 1.36 降低为 1.29,充分证明了降雨对坡体的软化作用大大削减了边坡的稳定性,但此时的卡子湾滑坡仍处于稳定状态;工况 4、工况 5 和工况 6 考虑在 50 年降雨强度下蓄水由 145 m 至 175 m 水位的情况。此时,由于水位的急剧上升,坡体产生较大渗透力,且在坡脚处浮托力恒定作用下,坡体的抗阻力随浸水滑面的应力减小而逐渐降低,此时计算所得剩余下滑力为-523 kN/m,稳定性系数降至 1.04,即卡子湾滑坡蓄水至 175 m 水位联合 50 年降雨强度下处于临界状态。对比发现,工况 1-工况 3 与工况 4-工况 6 稳定性系数均处于减小趋势。

表 4 不同工况组合下剩余下滑力

不同工况组合	参数	
	稳定性系数	剩余下滑力/(kN·m ⁻¹)
1	1.44	-2207
2	1.36	-1995
3	1.29	-1786
4	1.12	-1419
5	1.07	-911
6	1.04	-523

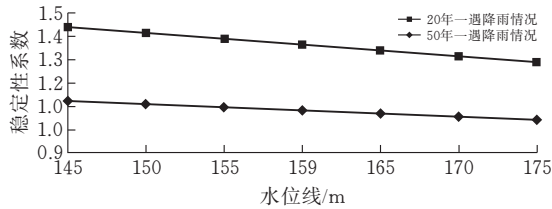


图 6 不同降雨条件下的稳定性系数

5 结论

1)在蓄水及降雨条件下,卡子湾滑坡变形较为明显。变形主要原因是动水压力和降雨效应,在考虑水位陡升联合暴雨叠加的情况下,坡体发生失稳的可能性很大。

2)通过调查和稳定性计算分析,卡子湾滑坡的表层滑坡体变形最为明显,在增大库水位降幅的条件下易产生局部垮塌等变形;分析可知,卡子湾滑坡局部存在变形,整体处于累进性蠕变变形阶段,滑动的可能性较小。

3)本研究区为顺层向斜坡,坡体前缘临空,曾历经多次滑动故产生潜在的薄弱滑动面。在蓄水过程中,坡体沿着滑动面蠕滑变形,结合地表裂缝和建筑

物变形引起的拉裂缝等宏观迹象分析可得,卡子湾滑坡变形机制为蠕滑拉裂式。

[参 考 文 献]

[1] 李世海,冯春,周东.滑破研究中的力学方法[M].北京:科学出版社,2018.

[2] 中村浩之,王恭先.论水库边坡[J].水土保持通报,1990,10(1):53-64,35.

[3] 李媛,孟晖,董颖,等.中国地质灾害类型及其特征——基于全国县市地质灾害调查成果分析[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(2):29-34.

[4] 朱朋,卢书强,薛聪聪,等.库水位升降与降雨条件下边坡的渗流及稳定性分析[J].长江科学院院报,2015,32(11):87-92.

[5] 李卓,何勇军,盛金保,等.降雨与库水位共同作用下近坝库岸边坡边坡模型试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(3):452-459.

[6] 刘传正.三峡库区地质灾害[J].岩土工程界学,2003,6(6):23-25.

[7] 廖巍,刘新喜.三峡库区滑坡稳定性评价研究[J].中国安全科学学报,2004,14(9):104-107.

[8] 陈立松,何沛云.水库周边水位变动引起库岸失稳的成因分析[J].浙江水利科技,2004(4):40-42.

[9] 王鹏,殷坤龙,孟颂颂.增大库水位日降幅联合降雨条件下张家祠堂边坡稳定性分析[J].安全与环境工程,2016,23(5):36-42.

[10] 张珂峰.库水位骤降与降雨条件下深浅层边坡稳定性分析[J].水电能源学,2018,36(11):139-143.

[11] Chowdhury R. Analysis of the vaiont slide-new approach[J]. Rock Mechanics, 1978,11:29-38.

[12] 文宝萍,申健,谭建民.水在千将坪滑坡中的作用机理田.水文地质工程地质,2008,35(3): 12-18.

[13] 代贞伟.三峡库区藕塘特大滑坡变形失稳机理研究[D].长安大学,2016.

[14] 郑颖人,时卫民,孔位学.库水位下降时渗透力及地下水浸润线的计算[J].岩石力学与工程学报,2004(18): 3203-3210.

[15] 卢应发,黄学斌,刘德富.边坡稳定分析条块力一位移法及其应用[J].岩土力学, 2015,36(10):2780-2786.

(下转第 95 页)