

DOI: 10.11779/CJGE2018S2042

三峡库区碎石土质岸坡失稳启动机制研究 ——以龙江红岩子滑坡为例

王林峰¹, 李林刚^{*1}, 杨 洵²

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆市地质矿产勘查开发局南江水文地质工程地质队, 重庆 401147)

摘 要: 三峡水库蓄水后, 滑坡成为三峡库区最严重的地质灾害之一, 库水位下降和降雨是导致滑坡的重要因素。以龙江红岩子滑坡为例, 研究三峡库区碎石土质岸坡失稳启动机制。基于 FLAC^{3D} 渗流分析模块功能和算法对三峡库区龙江红岩子滑坡的机制进行研究。根据龙江红岩子岸坡的地形、地质条件, 建立了龙江红岩子滑坡渗流模拟有限差分计算模型, 并确定了模型合理的水头边界条件。通过编写内置的 FISH 函数对降雨入渗、不同库水位等工况进行模拟, 得到了位移场的变化规律, 分析了不同库水位及降雨条件下碎石土质岸坡的稳定性, 揭示了岸坡在降雨和水位下降过程中的稳定性衰减过程。降雨和水位骤降的共同作用是龙江红岩子滑坡的触发因素。为研究不同库水位和降雨条件下碎石土质库岸滑坡稳定性提供了依据。

关键词: 红岩子滑坡; 库水位; 降雨; 数值模拟

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)S2-0209-06

作者简介: 王林峰(1983-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事地质灾害减灾理论与控制技术研究。E-mail: wanglinfeng@cqjtu.edu.cn。

Instability initiation mechanism of gravel soil slope in Three Gorges Reservoir: case study of Hongyanzi landslide in Wushan county

WANG Lin-feng¹, LI Lin-gang¹, YANG Xun²

(1. Hehai college, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Nanjiang Hydrological Geology Engineering Geological Team, Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 401147, China)

Abstract: After impoundment of the Three Gorges Reservoir, landslides have become one of the most serious geological hazards in this area. These landslides are mainly caused by the declining water levels and rainfall. Taking Hongyanzi landslide in Wushan county as an example, the collapsing initiation mechanism of bank slope combined debris and soil in the areas of Three Gorges Reservoir are studied. Based on the function and algorithm of FLAC^{3D} seepage analysis module, the mechanism of Hongyanzi landslide is investigated. According to the topographical and geological conditions of Hongyanzi bank slope, the construction of seepage simulation of Hongyanzi landslide is realized by using the finite difference method, and reasonable condition of hydraulic head boundary is confirmed for this model. The change rules of the displacement field are drawn by simulating rainfall infiltration and different water level conditions by writing the built-in FISH function. The stability of bank slope combined debris and soil is analyzed under different water level and rainfall conditions. And the declining stability of bank slope is revealed in the process of rainfall and the declining water levels. The triggering factor of Hongyanzi landslide is the combined effects of rainfall and drawdown of water level. These research results provide a basis for studying the stability of debris and soil bank landslides with different reservoir water level and rainfall conditions.

Key words: Hongyanzi landslide; reservoir water level; rainfall; numerical simulation

0 引 言

在库岸滑坡稳定性分析中, 降雨和库水位变化是十分重要的因素, 在长江中上游地区雨季滑坡数量占全年滑坡总数的 87% 以上^[1-3]。大多数学者认为水位下降时, 岸坡内水位线的变化滞后于岸坡外水位的变化,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51408084, 51678097); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0802203); 重庆市教委 2014 年度科学技术研究项目 (KJ1400317)

收稿日期: 2018-07-22

***通讯作者** (E-mail: 971453361@qq.com)

水位上升时土体重度增加,抗剪强度降低是造成岸坡失稳破坏的主要原因^[4-6]。在滑坡形成机理的研究中,许多学者采用数值模拟的方法,借助数值模拟软件研究水位动态工况和降雨工况下的稳定系数变化,取得了理想的效果^[8-9]。因此,滑坡稳定性与降雨量大小及降雨持续时间、库水位升降密切相关。

本文在前人基础上,运用 FLAC^{3D} 渗流分析模块功能及算法对间歇降雨入渗及库水位下降引起的三峡库区碎石土库岸滑坡的启动机制进行研究。

1 工程地质概况及滑坡特征

龙江红岩子滑坡位于巫山县江东龙江 2 社大宁河库岸(见图 1)。滑坡平面呈扇形,滑坡纵长约 180 m,横宽约 170 m,平面分布面积 $3 \times 10^4 \text{ m}^2$,滑体平均厚度约 20 m,体积分约 $60 \times 10^4 \text{ m}^3$,主滑方向 308° 。滑体物质为粉质黏土夹碎石,滑床为泥灰岩。后缘高程约 276 m,前缘约 130 m,滑动面倾角大,属中型土质滑坡。



图 1 红岩子滑坡现场照片

Fig. 1 Photos of Hongyanzi landslide site

龙江红岩子滑坡区属中、浅切割褶皱侵蚀、剥蚀低山深丘地貌。该段库岸地形坡度一般在 $40^\circ \sim 60^\circ$,坡高约 130~350 m。地层主要为第四系全新统人工填土、残坡积土层、崩坡积堆积层、第三系更新统冲洪积土层,基岩为三叠系下统嘉陵江组灰岩。龙江红岩子滑坡区地表水系均属长江水系。

2 滑坡机理研究

2.1 非饱和土的抗剪强度

Fredlund 双应力变量强度理论的非饱和土的抗剪强度表达式为^[10]

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi_b \quad (1)$$

当土接近饱和时,孔隙水压力 u_w 接近孔隙气压力 u_a , 因此基质吸力 $u_a - u_w$ 趋于 0, 式中的基质吸力项消失。这样非饱和土的抗剪强度公式平顺过渡到饱和土的抗剪强度公式。

2.2 FLAC^{3D} 软件饱和和非饱和渗流分析方法^[8,11]

FLAC^{3D} 软件在进行饱和和非饱和计算时,都采用达西定律,在渗流计算过程中,流体压力、饱和度与流体体积改变量的关系式如下:

$$\frac{1}{M} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{n}{s} \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{1}{s} \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (2)$$

式中 M 为比奥模量; n 为孔隙率; t 为时间; ζ 为流体扩散作用引起的单位体积多孔介质中流体体积改变量,当流体不可压缩时,其值等于单元流量改变量。

在进行饱和渗流计算情况下,FLAC^{3D} 软件直接将节点上的饱和度置为 1.0^[11],于是由式(2)得到下一计算时刻节点上孔隙水压力的更新计算公式为

$$\frac{1}{M} \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{s} \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (3)$$

在进行非饱和渗流计算时,FLAC^{3D} 将节点上孔隙水压力等于 0,然后由式(2)得到计算节点饱和度的更新值为

$$\frac{n}{s} \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{1}{s} \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (4)$$

通过上述分析可知,非饱和渗流计算的关键是正确的获得饱和度与负压关系,并根据饱和度计算出非饱和区的渗透系数,然后在求解过程中适时调整单元渗透系数即可实现非饱和渗流过程的分析。

3 FLAC^{3D} 数值模型分析

3.1 模型的建立

在建立 FLAC^{3D} 模型时,考虑完整地反映龙江红岩子岸坡的工程单元、构成完整的应力边界条件,确定数值计算模型坐标系选取如下: X (320 m) 方向垂直河流指向坡体内部, Y (300 m) 方向指向大宁河上游, Z (290 m) 方向竖直向上。计算模型的范围,前缘至大宁河,后缘至神女庙。整个模型由六面体网格单元组成,共 21764 个节点,32451 个单元。

3.2 模型边界条件确立

计算模型的侧向边界均采用单向约束,即垂直河流方向上的两个边界为 X 方向约束,顺河方向上的两个边界为 Y 方向约束,底边界采用三向约束,自然斜坡为自由边界。材料破坏准则采用莫尔-库仑准则,滑坡计算的 FLAC^{3D} 模型建立如图 2。

FLAC^{3D} 可以直接利用的流体边界有 3 种:①不透水边界条件;②透水边界条件;③其他渗流边界条件(节点渗流边界条件、单元渗流边界条件、平面渗流边界条件)。为了实现边坡降雨和库水位条件的模拟,需要对边坡表面的边界状况进行实时调整,以实现降雨、库水位上升入渗和边坡坡面在降雨停止、库水位下降后的出渗模拟。

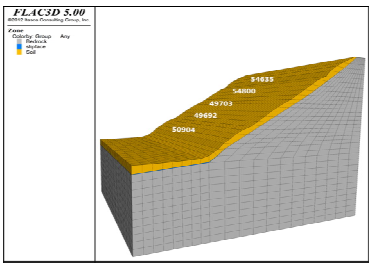


图 2 数值模拟计算模型

Fig. 2 Numerical model for main section of Hongyanzi slope

根据库水位变动曲线如图 3（来源于长江水文网）和降雨量（来源于巫山信息网）确定水位模拟时间段的降雨入渗边界和库水位下降出渗边界条件。

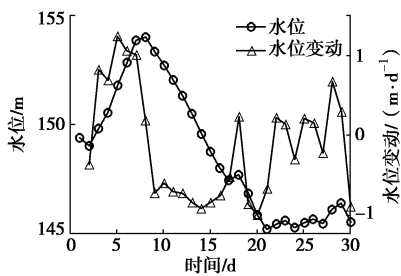


图 3 三峡库区水库水位监测结果及相应波动

Fig. 3 Monitoring results of water level and corresponding fluctuation of Three Gorges Reservoir

研究时段内库水位在 145~175 m 范围内波动时，将坡面 175 m 以下范围设置为水头边界。175 m 以上坡面设置为单位流量边界模拟降雨。滑带与基岩的接触面设置为不透水边界，不考虑基岩内的渗流。6 月是巫山县雨季，据统计 2015 年 6 月有 18 d 在降雨，16，17，20 日降雨量分别为 57.5，44.5，4.5 mm，在渗流分析中，将水头边界设置为当日实际库水位高度 145.3 m，进行稳态计算并将所得渗流场结果作为模型的初始渗流场状态。

3.3 参数的选取

各种岩土体的物理力学参数则是结合勘测资料及三峡库区巫峡地段的类似工程，确定计算参数具体值见表 1。

数值模拟分 6 种工况，工况 1：模拟岸坡初始状态；工况 2：在初始状态下岸坡蓄水至 145 m；工况 3：在初始状态下岸坡蓄水至 145 m 后，继续蓄水至 175 m；工况 4：模拟水库库水位从 175 m 降低至 145 m，库水位 175 m 以下土体取饱和、软化后的力学参数；工况 5：库区水位保持 154.5 m 恒定不变，连续降雨 5 d，降雨强度为 10 mm/d，雨停后，继续计算 3 d（计算方法见文献[8]）；工况 6：取工况 5 的渗流计算结果，库水位从 154.5 降至为 145.3 m，库水位下降速率取 6 月 9 日—6 月 24 日库水位平均下降速率 0.547 m/d。

表 1 岩土体的物理力学参数表

Table 1 Physical and mechanical parameters of gravel soil slope

类型	状态	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	弹性模量 E/GPa	泊松比
岸坡	天然	1.95	46	30	0.30	0.3
土体	饱和	2.10	38	25	0.24	0.32
灰岩	天然	2.40	800	40	3.00	0.26

3.4 计算结果分析

基于强度折减法对 6 种工况作用下稳定性进行数值计算。图 4 显示了 5 种计算工况下强度折减后的滑坡剪切应变率及位移场矢量分布情况，工况 6 的最大不平衡力变化曲线。5 种工况下对应的稳定系数及所对应典型剖面传递系数法的稳定系数变化见图 5。

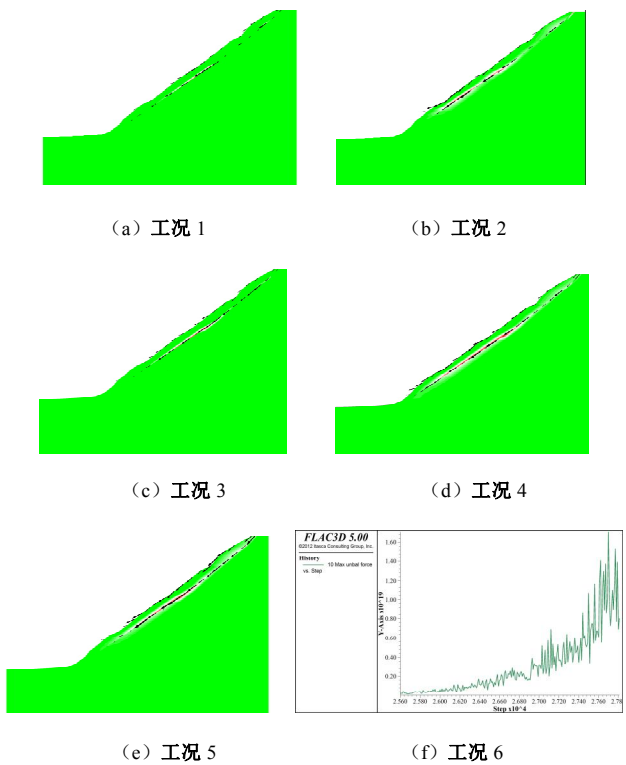


图 4 各种工况下 FLAC3D 软件计算的结果

Fig. 4 Calculated results of FLAC3D under various working conditions

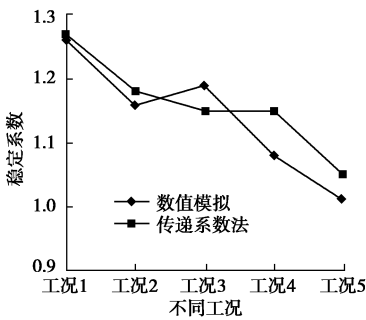


图 5 不同工况计算稳定性系数变化规律

Fig. 5 Variation of safety factor under different working conditions

由图 4 (a) 可知, 工况 1 条件下, 滑带的剪切应变率集中区零星出现, 此工况下的滑坡稳定安全系数为 1.26, 边坡整体处于稳定状态; 由图 4 (b) 可知, 工况 2 条件下, 滑带中下部的剪切应变率集中区较明显, 滑坡前缘有明显的下滑趋势, 滑坡后缘处于张拉状态。这是因为初期蓄水后, 滑坡地下水位上升, 滑坡土体受地下水软化及悬浮减重作用发生变形开裂并处于基本稳定状态。可见, 相对于该岸坡库区初期蓄水会较大地降低坡体的稳定性, 需引起注意。

由图 4 (c) 可知, 工况 3 条件下, 滑带的剪切应变率集中区向滑坡体后缘发展, 滑坡体中部水位以下的滑体出现剪切应变率集中区, 滑体前缘下滑带没有出现剪切应变率集中区。这是因为坡体的地下水位线随着水位上升而上升, 进而使得滑坡中部的滑体和滑带进一步软化, 虽然水位回落。而坡体前缘则由于库水产生的一定的水压力反压坡脚, 使滑坡前缘的下滑趋势受阻, 故滑坡剪切应变率集中区主要集中在坡体中后部。可见, 水位进一步上升对滑坡体后缘稳定性不利, 对滑坡体前缘稳定性有利, 对滑坡体整体稳定性影响较小。在水库蓄水至正常水位后, 滑坡后缘和中部可能出现局部失稳, 滑坡前缘相对稳定。

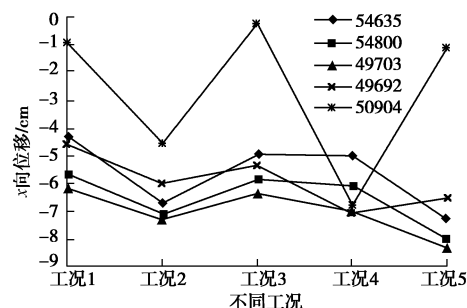
由图 4 (d) 可知, 工况 4 条件下, 整个坡体的剪切应变率集中区几乎贯通, 形成贯通的滑带, 滑坡顶部出现拉裂缝区, 这是因为水位骤降时坡体地下水位线下降滞后, 作用在滑坡中部的静水压力消失, 这使得坡体内部的超孔隙水压力和渗透力指向坡外, 产生向外的拖拽力, 对滑坡体稳定性十分不利。可见, 水位骤降对滑坡体稳定性降低作用明显, 此时滑坡体的安全系数接近临界值, 滑坡前缘可能出现局部失稳。

由图 4 (e) 可知, 工况 5 条件下库水位高程 154.5 m, 在间歇降雨的作用下, 滑坡顶部出现的微裂隙和拉张裂缝, 有利于降雨入渗, 随着降雨不断下渗, 滑体饱水面积比不断增大, 滑体下滑力不断增大, 滑面岩土体抗剪强度降低, 滑坡稳定性系数不断降低, 滑坡稳定性不断下降, 尤其滑坡中部的稳定性下降幅度较大。可见, 长期断断续续降雨对滑坡体稳定性降低作用明显, 此时滑坡体的安全系数接近于临界值, 滑坡体整体稳定性变差, 可能失稳。

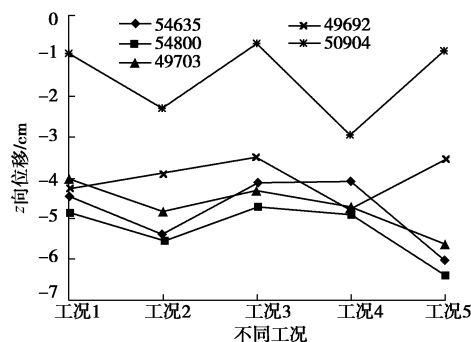
由图 4 (f) 可知, 工况 6 条件下, 先用工况 5 的渗流计算结果, 让库水位降低至 145.3 m (滑坡发生时的库水位), 然后关闭渗流计算, 打开力学计算, 对岸坡稳定性进行计算, 计算发现, 随着计算时步的增加, 最大不平衡力越来越大, 达不到稳定状态, 说明岸坡失稳, 滑坡发生。

为进一步分析库水位升降和降雨对滑坡的影响,

根据监测节点 (图 2) 54635、54800、49703、49692、50904 水平位移和竖直位移监测数据, 得到前 5 种工况下滑坡体不同位置水平位移和竖向位移变化曲线 (图 6)。可以看出, 滑坡体中上部有明显的位移; 水库初期蓄水至 145 m 后, 引起的滑坡体水平位移增量较大, 且滑坡下部较滑坡上部位移增量较大, 即初期水位上升对滑坡下部位移影响大于滑坡上部, 但总体上引起的位移很小。当水位继续上升至 175 m 后, 较初期蓄水至 145 m 时位移有所减少; 库水位下降和长期降雨的综合作用引起的滑坡体水平位移增量较大, 且滑坡中上部水平位移增量远大于滑坡下部, 即水位下降和间歇降雨联合作用对滑坡体位移影响较大, 且滑坡中上部水平位移增量大于滑坡坡脚处, 导致岸坡从中下部滑出, 滑坡体失稳破坏。



(a) 不同工况下 x 方向 (水平) 最终位移



(b) 不同工况下 z 方向 (垂直) 最终位移

图 6 不同记录点沿水平和竖直方向位移变化图

Fig. 6 Change of different recording points along horizontal and vertical directions

4 失稳启动机制分析

水位升降和降雨作用下边坡稳定系数如图 7。由图 7 (a) 可见水位初期上升, 蓄水会造成坡体的悬浮减重效应, 坡体水下部分受浮力作用会抵消部分滑坡体的重量, 导致滑坡体坡脚处的有效重量减少, 对岸坡稳定性有所减弱; 但随着库水位进一步上升, 即上升到 155 m 左右时, 由于水位上升到一定高度, 坡体前缘库水产生的一定的水压力反压坡脚, 使滑坡前缘的下滑趋势受阻, 增加了抗滑力, 所以对岸坡稳定性

有一定的提高;库水位下降,地下水位的降低存在滞后,这是就会在坡体内形成较大的水力梯度,产生渗流,降低滑体力学强度,使岸坡稳定性大幅降低。由图 7(b)可见,由于降雨滑坡体浅表层土体迅速达到饱和,坡面形成地表径流,对坡面造成冲刷;随着降雨时间的不断增加,雨水渗透到坡体内部导致渗流场的变化,从而使滑坡土体的含水率和自重增大及土体抗剪强度的降低,使岸坡稳定性降低。

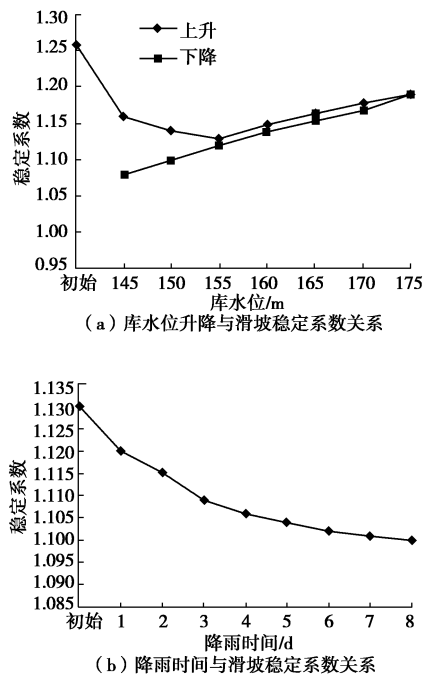


图 7 水位升降和降雨过程中岸坡稳定性变化曲线

Fig. 7 Change of stability with water level and rainfall

本文研究的红岩子滑坡,是间歇性降雨和水位骤降的共同作用导致的,对该滑坡形成的启动过程可以概括为 3 个阶段:

(1) 水位下降阶段:在受库水侵蚀、库水软化及水位变化引起的孔隙水压力、超孔隙水压力的作用下,岸坡变形明显,具现场调查,在 6 月 21 日,龙江红岩子滑坡后缘发生拉裂,前部出现小型滑塌,23 日高程 175 m 以下发生滑塌,滑塌方量约 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,岸坡前缘已经出现局部转移失稳区。

(2) 长期间歇降雨阶段:本来由于库水降低一段时间后岸坡坡体内地下水位线回落,坡体岩土体从饱和转变成非饱和状态,力学强度应该有所增高,加之非饱和区的孔隙水压力的减小甚至消散,岸坡整体的稳定性较水位下降期间有所增加,岸坡变形应该减小,但是由于库水位下降期间,研究区有间歇降雨,且日最大降雨量达 57.5 mm,随着降雨在重力作用下水沿着坡面及后缘的微裂隙和拉张裂缝不断的下渗,补充了本因回落的地下水,同时滑体饱水面积比不断增

大,滑体下滑力不断增大,滑坡体变形作用更明显。

(3) 降水停止,但水位持续下降阶段。边坡的排水作用产生的渗流力作用于滑坡体,滑坡体的抗剪强度降低,同时水位下降,坡脚由河水重力作用产生的压力减小,坡体的抗滑力减小。最终导致 2015 年 6 月 24 日红岩子滑坡的发生。

5 结 论

(1) 选择巫山县红岩子滑坡,利用 FLAC^{3D} 进行数值模拟分析,根据有限差分和强度折减法分析了库水位升降和降雨作用下滑坡体稳定性。

(2) 通过 FLAC^{3D} 模拟了库水位下降和间歇降雨作用下红岩子滑坡失稳启动分为 3 个阶段:①第一阶段,水位升降引起滑坡后缘拉裂和前缘局部滑塌;②第二阶段长期的间歇降雨,雨水随着微裂隙和拉张裂缝不断渗透,使滑坡体变形进一步加剧;③第三阶段降雨停止库水位继续下降导致了滑坡的发生。

(3) 在水库初期蓄水至 145 m 时,岸坡的稳定系数由初始的 1.26 降至 1.16,降低了 10%,继续蓄水至 175 m 时,岸坡的稳定系数由蓄水至 145 m 时 1.16 升至 1.19,上升了 1.7%,由 175 m 降至 145 m 时岸坡稳定系数为 1.08,相比 175 m 时降低了 11%,降雨作用下岸坡稳定系数为 1.10,间歇降雨和库水位下降耦合作用下岸坡失稳。

参考文献:

- [1] DU J, YIN K, LACASSE S. Displacement prediction in colluvial landslides, Three Gorges Reservoir, China[J]. Landslides, 2013, 10(2): 203 - 218.
- [2] HUANG Q X, WANG J L, XUE X. Interpreting the influence of rainfall and reservoir infilling on a landslide[J]. Landslides, 2016, 13(9): 1139 - 1149.
- [3] GUO D, MASANORI H, JIA H. Influential factors on slope stability and landslide mobility[J]. American Society of Civil Engineers, 2013, 31(8): 247 - 254.
- [4] 吴 琼, 唐辉明, 王亮清, 等. 库水位升降联合降雨作用下库岸边坡中的浸润线研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3025 - 3031. (WU Qiong, TANG Hui-ming, WANG Liang-qing, et al. Analytic solutions for phreatic line in reservoir slope with inclined impervious bed under rainfall and reservoir water level fluctuation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 3025 - 3031. (in Chinese))
- [5] 江泊涌, 项 伟, 曾 雯, 等. 三峡库区黄土坡临江滑坡体水岩(土)相互作用机理[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7):

- 1209 - 1216. (JIANG Ji-wei, XIANG Wei, ZENG Wen, et al. Water-rock(soil) interaction mechanism of Huangtupo riverside landslide in Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(7): 1209 - 1216. (in Chinese))
- [6] SONG K, YAN E, ZHANG G, et al. Effect of hydraulic properties of soil and fluctuation velocity of reservoir water on landslide stability[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, **74**(6): 1 - 11.
- [7] 周 丽, 汪 洋, 杜 娟. 库水位下降和降雨影响下李家湾滑坡的稳定性计算[J]. 安全与环境工程, 2010, **17**(3): 5 - 9. (ZHOU Li, WANG Yang, DU Juan. Calculation of Lijiawan landslide stability under the drawdown and rainfall conditions[J]. Safety and Environmental Engineering, 2010, **17**(3): 5 - 9. (in Chinese))
- [8] 蒋中明, 熊小虎, 曾 铃. 基于 FLAC^{3D} 平台的边坡非饱和和降雨入渗分析[J]. 岩土力学, 2014, **35**(3): 855 - 860. (JIANG Zhong-ming, XIONG Xiao-hu, ZENG Ling. Unsaturated seepage analysis of slope under rainfall condition based on FLAC^{3D}[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(3): 855 - 860. (in Chinese))
- [9] YIN Y, WANG H, GAO Y, et al. Real-time monitoring and early warning of landslides at relocated Wushan Town, the Three Gorges Reservoir, China[J]. Landslides, 2010, **7**(3): 389 - 389.
- [10] FREDLUND D, MORGENSTERN N, WIDGER R. The shear strength of unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, **15**(3): 313 - 321.
- [11] Itasca Consulting Group, Inc. Online Manual of FLAC^{3D} Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions[M]. Version 5.0. Minneapolis: Itasca Inc. 2012.

(本文责编 胡海霞)