

DOI : 10.16285/j.rsm.2017.S1.044

库水位波动条件下黄土坡临江 1# 崩滑堆积体稳定性研究

刘路路^{1,2}, 宋 亮³, 焦玉勇¹, 王 浩¹, 张秀丽¹, 谢壁婷^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100040;
3. 贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘 要: 水库蓄水是诱发三峡地区库岸滑坡的主要因素之一, 开展库水位波动条件下滑坡稳定性研究意义重大。通过现场地质调查、原位监测、理论分析和数值模拟等手段, 对三峡库区黄土坡临江 1# 崩滑堆积体在库水位波动条件下的稳定性进行了研究。利用现场监测数据, 分析了滑坡体地下水位与库区水位的关系、滑坡体深部不同高程处位移随时间的变化值以及库水位波动对滑坡体变形的影响。采用三维离散元程序“3DDEC”, 对临江 1# 崩滑堆积体进行了数值模拟, 分析了库水位波动条件下滑坡体内应力、应变的变化规律, 并提出了考虑干湿循环作用的强度折减法, 定义了安全系数的求解方法。研究结果表明, 三维离散元法结合强度折减法研究水库滑坡是可行的; 黄土坡临江 1# 崩滑堆积体在目前的调水曲线作用下处于稳定状态; 由 2013 年 12 月 16 日巴东地震前后滑坡堆积体的变形可见低烈度地震对滑坡体的稳定性影响不大。

关键词: 黄土坡临江 1# 崩滑堆积体; 地下水位、深部位移; 三维离散元; 强度折减法; 数值模拟

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2017) 增 1 - 0359 - 08

Study of stability of Huangtupo riverside slumping mass #1 under reservoir water level fluctuations

LIU Lu-lu^{1,2}, SONG Liang³, JIAO Yu-yong¹, WANG Hao¹, ZHANG Xiu-li¹, XIE Bi-ting^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China; 3. Guizhou Provincial Communications Planning & Survey and Design Institute Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550081, China)

Abstract: Because reservoir water is one of the master factor inducing slope landslide in the Three Gorges area, it is significant to study the stability of landslide under the condition of water level fluctuation of reservoirs. We make a study of the stability of Huangtupo riverside slumping mass #1 in Three Gorges area under the condition of water level fluctuation of reservoirs by the measure of geologic survey and in situ monitoring and theoretical analysis as well as numerical simulation. We make a study of the relationship between reservoir water level and the landslide groundwater level in the place mentioned above based on the analysis of field monitoring data. And we also analyze the deep displacement changed over time at different altitudes of the landslide as well as the influence of the variation of water level of reservoirs on the deformation of landslide via the same data. We make a simulation of landslide mentioned above through “3DDEC” and analyze the changeable rule of stress-strain of landslide under the variation of water level of reservoirs; and we put forward the strength reduction method considering the action of drying-wetting cycle and define the method to solve the safety factor. The results show that: it is reasonable adopting “3DDEC” to analyze sliding slope; Huangtupo riverside slumping mass #1 is in a stable state under the action of current water transfer curve; in particular, we find that the low seismic intensity has little effect on the stability of the landslide based on the analysis of the deformation of the slumping mass before and after the Badong earthquake in December 16, 2013.

Keywords: Huangtupo riverside slumping mass #1; groundwater level; deep displacement; 3D discrete elements; strength reduction method; numerical simulation

收稿日期: 2016-07-14

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划)(No.2011CB710602); 国家自然科学基金(No.51509243, No.51479191)。

This work was supported by the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2011CB710602) and the Natural Science Foundation of China (51509243, 51479191).

第一作者简介: 刘路路, 男, 1991 年生, 硕士研究生, 主要从事滑带涉水劣化机理的研究工作。E-mail: ll_liu369@163.com

1 引言

三峡工程是世界上最大的水利枢纽工程,运行期间库水位在 145 ~ 175 m 之间周期性升降^[1-2]。库水位波动引起沿岸地下水位的变化,改变了库区原有的地质平衡条件,增加了库区滑坡以及其它地质灾害的发生率。根据野外调查统计,1991-1999 年期间三峡库区大约存在 1 302 处滑坡,至 2009 年地质灾害监测和预警系统显示三峡库区的滑坡数量已经增加到 3053 处,因此,开展库水位波动条件下库岸边坡稳定性研究,预测、预报及防治水库型滑坡是一项非常重要的研究课题。

三峡水库运行以来已有大量学者针对库区水位波动对库岸边坡稳定性的影响进行了研究。倪卫达等^[3]、Liu 等^[4]、许利凯等^[5]、吴正春等^[6]使用不同监测技术,研究了库区滑坡的变形和稳定性演化规律,指出滑坡体的变形主要发生在库水位下降期间,库水位的变化与地表变形量之间有着明显的相关性。Jia 等^[7]、龙建辉等^[8]、江泊洵等^[9]、张鹏等^[10]进行了受水位波动作用的大型滑坡模型试验和滑带岩土体的物理力学试验,从宏观和微观角度阐释了水位波动作用下滑坡体的破坏模式以及滑带岩土体的微观劣化机制。Li 等^[11]、Zheng 等^[12]、Yang 等^[13]采用数值模拟方法分析了库水位波动作用对滑坡的稳定性影响,Yang 还指出要获得准确的数值模拟结果,需要建立精确的计算模型,获取准确的地层参数,还需要监测数据进行校核,但研究中将监测、试验、数值模拟等方法相结合对滑坡进行综合分析相对较少,且缺乏对水库长期运行条件下滑坡稳定性的预测分析。在分析边坡的稳定性时常采用极限平衡条分法和强度折减法两种方法^[14-17],强度折减法是数值模拟处理边坡稳定问题的常用方法。Matsui 等^[18]、唐芬等^[19-20]、Yaohong 等^[21]研究了强度折减法在边坡稳定性分析中的应用,对传统强度折减法和双强度折减法进行讨论,认为“双折减法”更符合工程实际,但针对水库型滑坡缺乏将干湿循环作用下滑带土的劣化规律与强度折减法相结合的研究。

本文围绕上述问题进行了探索研究,选取湖北省巴东县境内的黄土坡临江 1#崩滑堆积体为研究对象,在现场建立了地下水位和滑体深部位移监测系统,采用三维离散元程序 3DEC 分析了库水位波动对滑坡稳定性的影响,将计算结果与监测数据进行了对比分析,还将考虑干湿循环作用的强度折减法与 3DEC 程序相结合,求解了长期库水位波动作用

下滑坡体的安全系数,分析了滑带土的性质劣化对滑坡稳定性的影响。

2 黄土坡滑坡地质条件

黄土坡滑坡区主要由临江 1#崩滑堆积体、临江 2#崩滑堆积体、变电站滑坡体、园艺场滑坡体组成,临江 1#、2#崩滑堆积体最先失稳滑动,形成了黄土坡滑坡的主体。临江 1#崩滑体为南高北低的顺向斜坡(见图 1),坡面形态为陡缓相间的折线型,大体为上陡(25°~35°),中缓(15°~20°),临江陡(30°~35°),坡面走向与岩层走向基本一致,局部有所变化,但总体上为顺向斜坡。滑体主要由崩滑堆积形成,其物质组成以块石土为主,次为碎石夹黏性土。块石土多分布于 136 m 高程以上地带,累计厚度达 40~60 m。碎石夹土中碎石形状呈棱角状至次棱角状,土一般为砂质粉土、粉质黏土,部分土体有挤压痕迹并伴有擦痕,系崩滑堆积体形成后内部滑动所致,主要分布 136 m 高程以下。

黄土坡临江 1#崩滑体地下水赋存于极不均匀的各种碎石土、碎块石土、碎裂岩夹粉质黏土透镜体或条带中,其中松散结构的碎块石土具孔隙含水性;碎裂结构的碎裂岩原岩结构破坏严重,岩石破碎,似层非层,具孔隙、裂隙含水性;粉质黏土夹碎石(或角砾、砾砂)由于粉粒和黏粒含量高,透水性弱,形成相对隔水层,相互混杂,形成分布紊乱、规模各异的局部上层滞水,底部为相对隔水的滑带土层。

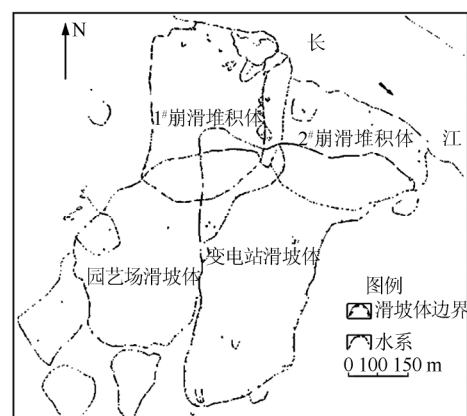


图 1 黄土坡滑坡平面分布示意图

Fig.1 Sketch of plane distribution of Huangtupo landslide

3 监测点的布置及监测成果

3.1 监测系统的设计与布置

本研究的重点是库水位波动对黄土坡临江 1#崩滑堆积体的稳定性影响,监测内容主要包括三峡库

区水位、临江 1#崩滑堆积体地下水位和深部位移三方面。地下水位观测采用 BGK-9060-01X 一体化渗压监测站（见图 2），对水位进行实时监控。采用 CX-01 滑动式测斜仪对滑坡体深部位移进行监测（见图 3），监测点布置见图 4，分别在崩滑体前缘和中部设置监测孔 HZK1 和 HZK3。



图 2 BGK-9060-01X 一体化水位监测站
Fig.2 Integrated water level monitoring station of BGK-9060-01X



图 3 测斜孔
Fig.3 Inclinometer borehole

3.2 监测成果及分析

3.2.1 地下水位监测成果分析

图 5 为实测黄土坡临江 1#崩滑堆积体地下水位与三峡库区实际运行库水位对比。从图中可以看出，崩滑体前缘（钻孔 HZK1）的地下水位与库区水位具有相同的变化趋势，地下水位变化稍滞后于库区水位变化，说明该部位地下水位主要受长江水位控

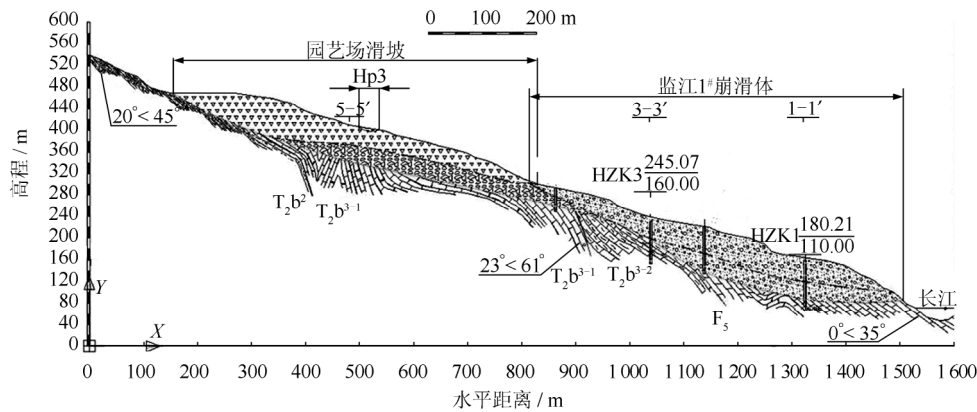


图 4 黄土坡临江 1#崩滑堆积体监测点布置图
Fig.4 Layout drawing of monitoring points of Huangtupo riverside slumping mass #1

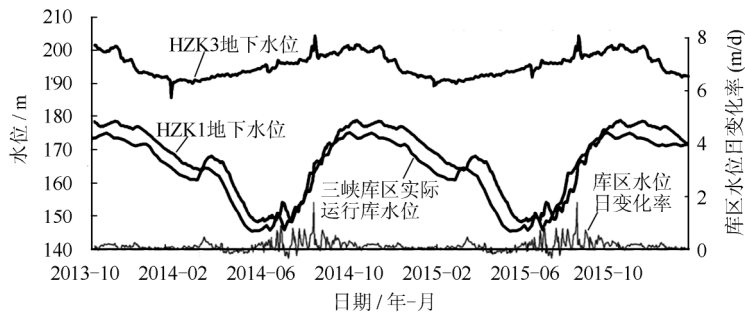


图 5 黄土坡临江 1#崩滑堆积体地下水位与三峡库区实际运行库水位对比
Fig.5 Comparison between water level on Huangtupo riverside slumping mass #1 and actual operation of Three Gorges Reservoir area

制；崩滑体中部（钻孔 HZK3）的地下水位基本稳定在 195 m 高程左右，不随库区水位波动，说明此

部位存在隔水带，最低地下水位在隔水带以上。在 6~9 月份该地区降雨较多，地下水位受降雨影响有

上升趋势。

3.2.2 滑体深部变形监测成果及分析

图 6 为 HZK1 测斜孔深部位移曲线。从图中可以看出,黄土坡临江 1#崩滑堆积体前缘整体发生向江内的滑移,主要发生在崩滑体浅层,滑带大致位于高程 165~175 m 处,至 2015 年 10 月最大累计位移约 21.35 mm,平均位移速率为 0.89 mm/30 d。

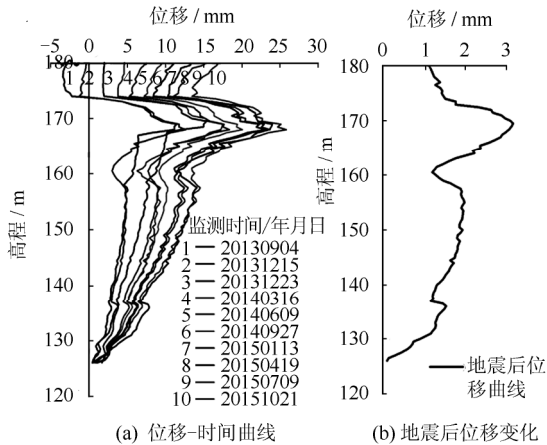


图 6 HZK1 测斜孔深部位移曲线

Fig.6 Deep displacement curves of inclinometer borehole HZK1

由于崩滑体中含有多层非连续、非贯通的软弱夹层,属于“软硬互层”地质类型,结构复杂,滑坡前缘各地层间位移并非线性增大,而是曲折波动。在高程 165~175 m 范围内波动最为明显,形成一个峰值,此高程范围也是长江调水水位区间,可见库水位变动加剧了库岸滑坡的滑移。

2013 年 12 月 16 日巴东县内发生了 5.1 级地震,震源深度为 5 000 m,对临江 1#崩滑堆积体产生了一定的影响,崩滑体前缘产生了最大 3.2 mm 的主滑向位移。

HZK3 测斜孔深部位移曲线如图 7 所示。从图中可以看出,崩滑体中部整体向江内滑移,位移曲线均匀增大,未见明显滑动带,至 2015 年 10 月最大累积位移约 16.21 mm,平均位移速率为 0.675 mm/30 d,小于崩滑体前缘的变形速率,此部位受 2013 年 12 月 16 日地震的影响较小,震后发生了 1.1 mm 左右的位移。

4 库水位波动条件下崩滑体变形分析

4.1 计算模型的建立

根据水文队勘察的黄土坡临江 1#崩滑堆积体工程地质图建立的边坡计算模型如图 8 所示。图中,深色部分为崩滑体,浅色部分为滑床。计算模型沿 X 方向宽度为 300 m,沿 Y 方向高度为前缘 70 m,

后缘 390 m,Z 向边坡长度为 520 m。

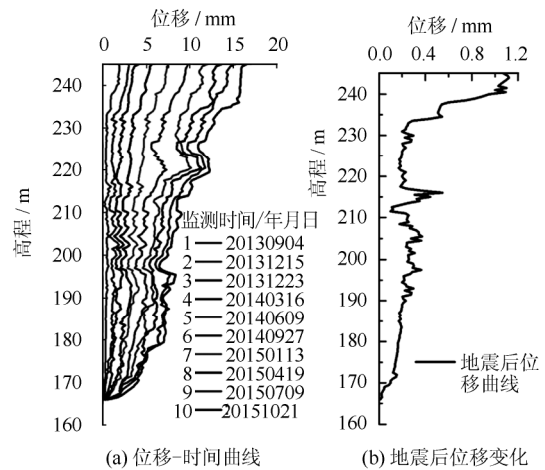


图 7 HZK3 测斜孔深部位移曲线

Fig.7 Deep displacement curves of inclinometer borehole HZK3

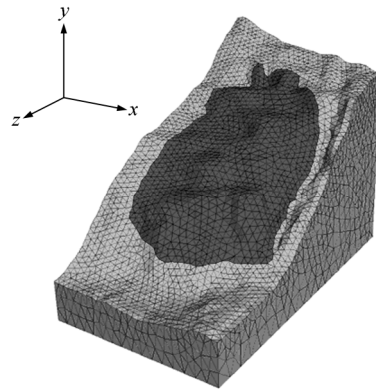


图 8 黄土坡临江 1#崩滑堆积体数值计算模型

Fig.8 Numerical calculation model of Huangtupo riverside slumping mass #1

4.2 边界条件、计算参数和方案的确定

计算模型底部设为固定约束边界,模型四周设为单向边界,模型表面为自由边界,在初始条件中仅考虑自重应力产生的初始应力场和水压力,地下水位为稳定地下水位,不发生变化。

计算选取的本构模型是 3DEC 内置的摩尔-库仑模型,所需要的模型参数包括体积模量、剪切模量、密度、黏聚力、内摩擦角以及节理的法向刚度和切向刚度,参数取值见表 1、2。各参数是根据岩土体物理力学试验结果及勘察报告确定,其中节理的法向和切向刚度是根据工程经验取值。

根据三峡水库调水曲线(见图 9)确定计算方案。从图 9 中可以看出,库水位在 145 m 和 175 m 水位时运行时间较长,且水位从 145 m 变化到 175 m 时变化幅度较大,本次模拟选取 145 m 静水位、175 m 静水位、水位从 145 m 上升到 175 m 和水位从 175 m 下降到 145 m 四种运行方案。

表 1 滑体及基岩的物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of sliding body and rock

滑体材料	体积模量 K / GPa	剪切模量 G / GPa	黏聚力 c /MPa	内摩擦角 φ / (°)	密度/(kg/m ³)	饱和密度/(kg/m ³)
泥质灰岩	20	8	0.90	40	2 700	
滑体	2	0.8	0.03	25	2 000	2 200

表 2 软弱结构面的物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of weak structural plane

结构面	切向刚度 /MPa	法向刚度 /MPa	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / (°)
滑面	100	100	25	25
节理	100	100 <td>20</td> <td>19</td>	20	19

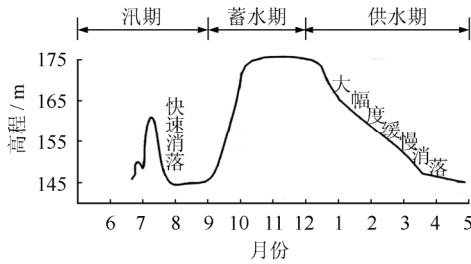


图 9 三峡水库调水曲线

Fig.9 Curve of water transfer in Three Gorges Reservoir

4.3 库水位作用下崩滑体受力变形分析

图 10 为 145 m 和 175 m 库水位时崩滑体监测剖面位移云图。

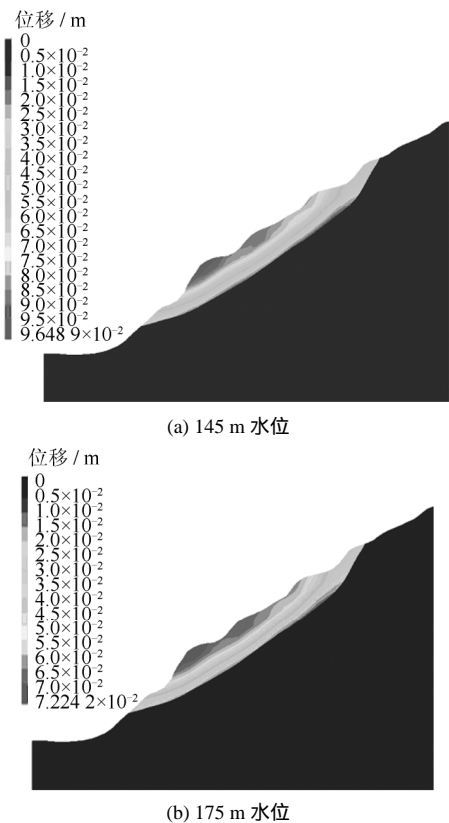


图 10 静水位条件下崩滑体剖面位移云图

Fig.10 Section plane displacement nephogram of slumping condition of static water level

从图 10 中可以看出 崩滑体的变形主要发生在中前部，与监测数据基本吻合；崩滑体在 145 m 水位时最大位移为 8.6 cm，175 m 水位时的最大位移为 10.4 cm，说明滑坡变形随着水位的升高而增大。崩滑体的深部位移从下至上依次增大，至滑体表层位移最大，这与监测所得滑体变形规律相似。

图 11 为库水位波动条件下崩滑体监测剖面位移云图。从图中可以看出，水位波动条件下崩滑体的变形与现场监测数据相符，亦主要发生在中前部，且表层位移最大；水位上升过程中的最大位移为 21.2 cm，水位下降过程中最大位移为 25.4 cm，均比静水位条件下的变形大很多，说明库水位波动条件下崩滑体更容易失稳破坏，且水位下降过程中崩滑体变形更大，也更容易破坏，与 Sun 等^[12]、Yang 等^[13]的研究结论一致。

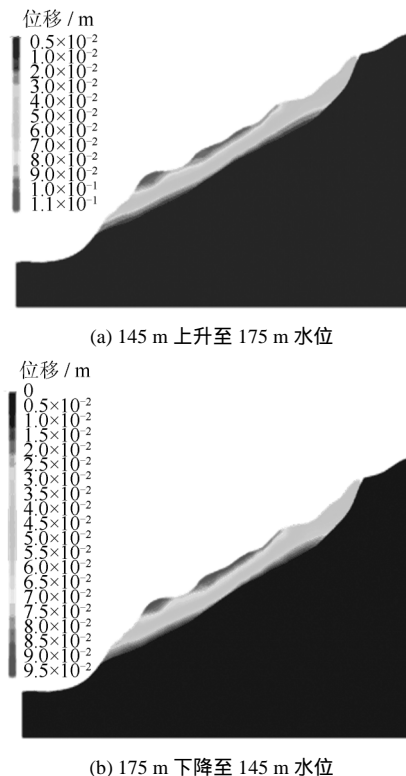


图 11 水位波动下崩滑体剖面位移云图

Fig.11 Section plane displacement nephogram of slope in condition of water level fluctuation

5 库岸滑坡安全系数定义

目前边坡安全系数计算中较为常用的方法是基

于强度储备定义的安全系数,经过诸多学者的完善研究和成功的工程运用后已被正式列入规范^[22]。强度储备定义的原理是:对土体的抗剪强度参数 c 、 φ 进行折减,折减至临界抗剪强度参数 c_c 、 φ_c 时,结构处于临界破坏状态,取这时的折减系数 $R = c/c_c = \tan \varphi / \tan \varphi_c$ 为安全系数 F_s 。大多研究者以个人假定来作为折减系数 R 的取值规律,而未考虑边(滑)坡实际所处环境对其力学性能劣化的影响。针对水库型滑坡,依据水位波动对土体抗剪强度参数的影响来确定折减系数 R 的取值规律,更加符合工程实际。本文在水库滑坡稳定分析中,采用焦玉勇等^[23]在滑带土研究中得到的干湿循环作用下滑带土强度的衰减规律对 c 、 φ 进行不同程度的折减,得到了更为符合实际的库岸滑坡安全系数。

5.1 考虑干湿循环作用的强度折减法

从强度折减法的定义可以看出,在强度折减法中 c 、 φ 都采用同一安全系数或同一折减系数。事实上边(滑)坡发生滑动时 c 、 φ 所起的作用不同,它们发挥秩序及发挥的程度也不同,另外,边(滑)坡在自然作用或人力作用下 c 、 φ 也会发生衰减,但衰减的程度与速度也不相同。因此,各自的安全储备也不相同。为了更准确地反映 c 、 φ 各自的安全储备,本文对 c 、 φ 分别采用不同的折减系数进行研究。

在强度折减法中,对于 φ 的折减通过摩擦系数 $\tan \varphi$ 完成,对于 φ 的衰减本文也用 $\tan \varphi$ 表示。在文献^[23]中得到了干湿循环作用下随着循环次数 n 增加, c 、 $\tan \varphi$ 各自的衰减速率函数 f_n 、 t_n :

$$\left. \begin{aligned} f_n &= 0.29 - 0.32 \exp(-0.98n) \\ t_n &= 0.21 - 0.19 \exp(-0.16n) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

很明显,两者的衰减速率不同,用 k 表示 c 和 $\tan \varphi$ 之间的变化速度的比值,则有 $k = f_n / t_n$, k 为 n 的函数, $n \geq 1$ 。

假设在应用强度折减法的过程中黏聚力和内摩擦角的折减速度比值按照 k 变化,即黏聚力的折减速度是内摩擦角折减速度的 k 倍:

$$\left. \begin{aligned} K_c &= kK_\varphi \\ c' &= \frac{c}{K_c} = \frac{c}{kK_\varphi} \\ \varphi' &= \arctan \left(\frac{\tan \varphi}{K_\varphi} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: K_c 、 K_φ 分别为 c 、 $\tan \varphi$ 的临界折减系数; c' 、 φ' 分别为 c 、 $\tan \varphi$ 折减后的值。

唐芬等^[24]在边坡稳定安全储备的双折减系数

推导过程中认为采用不同的强度折减系数进行分析时安全系数取两个折减系数的平均值更符合实际。本文中强度折减法的库岸滑坡安全系数定义为

$$K_{SF} = \frac{K_c + K_\varphi}{2} = \frac{1+k}{2} K_\varphi \quad (3)$$

5.2 黄土坡临江 1#崩滑堆积体安全系数

采用 3DEC 计算程序对经受若干次干湿循环后黄土坡临江 1#崩滑堆积体在 145 m 和 175 m 库水位时的安全系数进行求解。对滑体和滑面的抗剪强度参数 c 、 $\tan \varphi$ 分别按照 f_n 、 t_n 的折减速率逐步进行折减。为了预估黄土坡临江 1#崩滑堆积体长期在库水位波动条件下的稳定性,本次模拟时取 n 为无穷大,即 c 、 $\tan \varphi$ 按照 $f_{n \rightarrow \infty} = 0.29$ 和 $t_{n \rightarrow \infty} = 0.21$ 的折减速率进行折减,此时 $k = 1.38$ 。

在计算剖面上选取 4 个位移速度监测点如图 12 所示。库水位 145 m 时在相应折减系数下崩滑体变形计算结果如图 13 所示。图 13(a)为折减系数 $K_{SF} = 1.56$ ($K_{SF} = (K_c + K_\varphi) / 2$, 其中 $K_c = 1.81$, $K_\varphi = 1.31$, 且有 $K_c = 1.38K_\varphi$) 时各监测点的 y 向位移速度-时间曲线,图 13(b)为折减系数 $K_{SF} = 1.57$ ($K_c = 1.82$, $K_\varphi = 1.32$) 时各监测点的 y 向位移速度-时间曲线。

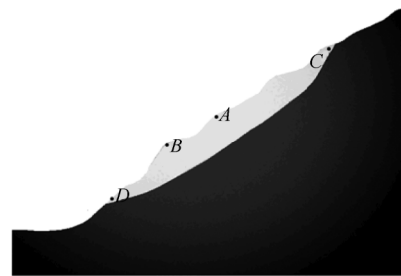


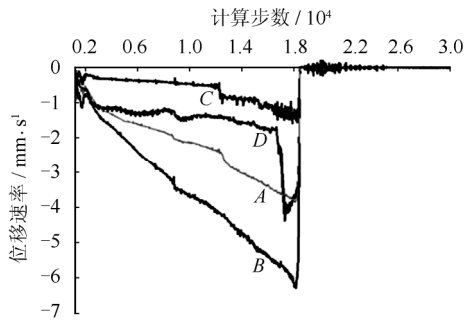
图 12 监测点布置图

Fig.12 layout of monitoring points

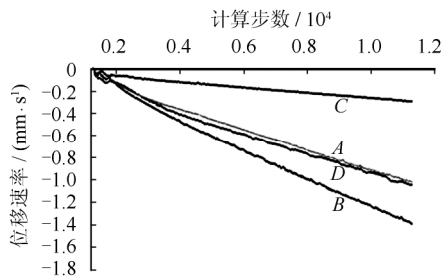
由计算结果可知,当折减系数为 1.56 时,监测点位移速度-时间曲线是收敛的,随着计算时间的增加,各个监测点的位移速率值趋近于 0,说明此时崩滑体处于稳定状态;当折减系数为 1.57 时,各个监测点的位移速率不断增大,说明此时崩滑体正高速下滑或已经破坏,故可认为折减系数等于 1.56 时滑坡处于临界状态,折减系数为 1.57 时滑坡处于破坏状态,即库水位为 145 m 时黄土坡临江 1#崩滑堆积体的安全系数为 1.56。同样计算可得库水位为 175 m 时黄土坡临江 1#崩滑堆积体的安全系数为 1.37,小于库水位为 145 m 时的安全系数,再次证明库水位的抬升不利于库岸边坡的稳定。干湿循环作用下崩滑体安全系数的计算结果表明黄土坡临江 1#崩滑

堆积体在现调水曲线作用下处于稳定状态。

参考文献



(a) 折减系数为 1.56 时各监测点的 y 向



(b) 折减系数为 1.57 时各监测点的 y 向

图 13 库水位为 145 m 时不同折减系数监测点速度-位移曲线
Fig.13 Displacement velocity-time curves of monitoring points under different reduction factors when water level being 145 m

6 结论

(1) 临江 1#崩滑堆积体前缘地下水位受库水位控制，呈周期性波动，水位波动带部位发生明显的滑移变形，主要发生在浅表层，变形速率较小。崩滑体中部地下水位稳定在隔水带以上，不受库水位波动影响，变形值及变形速率均比前缘小。水位抬升不利于滑坡的稳定，水位周期性波动对滑坡的变形有较大的影响，特别是水位快速下降对滑坡的变形影响更大。3DEC 模拟结果与监测结果吻合，表明将 3DEC 用于库岸滑坡的稳定性分析是可行的。

(2) 在双强度折减法中未发现实际有效的方法确定 c 、 φ 值的折减速率关系。依据干湿循环试验中滑带土的力学性质劣化规律确定了 c 、 φ 值的衰减速率函数，本文提出了考虑干湿循环作用的双强度折减法，并提出了库岸滑坡安全系数的定义。

(3) 将双强度折减法与 3DEC 相结合分析了临江 1#崩滑堆积体的稳定性，得到了在库区现调水曲线长期作用下崩滑体的安全系数值，发现在现状最不利条件下崩滑体的安全系数为 1.37，黄土坡临江 1#崩滑堆积体在现库水位波动条件下处于稳定状态。

[1] CHENG Q, ZHU J R. Influence of seasonal runoff regulation by the Three Gorges Reservoir on saltwater intrusion in the Changjiang River Estuary[J]. *Continental Shelf Research*, 2013, 71: 16 - 26.

[2] BAO Y H, GAO P, HE X B. The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir—A unique geomorphological unit[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 150: 14 - 24.

[3] 倪卫达, 唐辉明, 胡新丽, 等. 黄土坡临江 I 号崩滑体变形及稳定性演化规律研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(10): 2961 - 2970.

NI Wei-da, TANG Hui-ming, HU Xin-li, et al. Research on deformation and stability evolution law of Huangtupo riverside slump-mass No. I[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(10): 2961 - 2970.

[4] LIU P, LI Z H, HOEY T, et al. Using advanced InSAR time series techniques to monitor landslide movements in Badong of the Three Gorges region, China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 21: 253 - 264.

[5] 许利凯, 李世海, 朱而千, 等. 清江水库茅坪滑坡监测与发展趋势预测[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2006, 17(1): 9 - 13.

XU Li-kai, LI Shi-hai, ZHU Er-qian, et al. Forecast of the development trend and monitoring of the Maoping landslide in Qingjiang reservoir[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2006, 17(1): 9 - 13.

[6] 吴正春, 韩玲, 李仁光. 应用 GPS 技术对龙羊峡水库库岸滑坡监测的可行性分析[J]. *地球科学与环境学报*, 1994, (4): 78 - 84.

WU Zheng-chun, HAN Ling, LI Ren-guang. Feasibility analysis of using GPS technology to monitor the landslide in Longyangxia reservoir[J]. *Journal of Earth Science and the Environment*, 1994, (4): 78 - 84.

[7] JIA G W, ZHAN T, CHEN Y M, et al. Performance of a large-scale slope model subjected to rising and lowering water levels[J]. *Engineering Geology*, 2009, 106(1 - 2): 92 - 103.

[8] 龙建辉, 李同录, 雷晓锋, 等. 黄土滑坡滑带土的物理特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(2): 289 - 293.

LONG Jian-hui, LI Tong-lu, LEI Xiao-feng, et al. Study

- on physical properties of soil in sliding zone of loess landslip[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(2): 289 - 293.
- [9] 江泊洵, 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.
- [10] 张鹏, 柴肇云. 干湿循环条件下砂岩强度劣化试验研究[J]. **金属矿山**, 2013, 448: 1 - 4.
ZHANG Peng, CHAI Zhao-yun. Sandstone strength degradation experiments under the condition of dry-wet circulation[J]. **Metal Mine**, 2013, 448: 1 - 4.
- [11] LI T, ZHANG C, XU P, et al. Stability assessment and stabilizing approaches for the Majiagou landslide, undergoing the effects of water level fluctuation in the Three Gorges reservoir area[C]//Landslide disaster Mitigation in Three Gorges Reservoir, China, [s. l.]: [s. n.], 2009. 331 - 352.
- [12] SUN G H, ZHENG H, TANG H M, et al. Huangtupo landslide stability under water level fluctuations of the Three Gorges Reservoir[J]. **Landslides**, 2015, 13(5): 1 - 13.
- [13] YANG Q, YE Z, DING W, et al. Impact of water level fluctuation on the reservoir landslide stability[M]: Germany: Springer International Publishing, 2014: 659 - 664.
- [14] CHENG Y M, LANSIVAARA T, WEI W B. Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods[J]. **Computers and Geotechnics**, 2007, 34: 137 - 150.
- [15] WEI W B, CHENG Y M, LI L. Three-dimensional slope failure analysis by the strength reduction and limit equilibrium methods[J]. **Computers and Geotechnics**, 2009, 36: 70 - 80.
- [16] WEI W B, CHENG Y M. Soil nailed slope by strength reduction and limit equilibrium methods[J]. **Computers and Geotechnics**, 2010, 37: 602 - 618.
- [17] TSCHUCHNIGG F, SCHWEIGER H F, SLOAN S W. Slope stability analysis by means of finite element limit analysis and finite element strength reduction techniques. part II. Back analyses of a case history[J]. **Computers and Geotechnics**, 2015, 70: 178 - 189.
- [18] MATSUL T, SAN K C. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique[J]. **Soils and Foundations**, 1992, 32(1): 59 - 70.
- [19] 唐芬, 郑颖人. 边坡稳定安全储备的双折减系数推导[J]. **重庆交通大学学报(自然科学版)**, 2007, 26(4): 95 - 100.
TANG Fen, ZHENG Yin-ren. Analysis of safety reserve of slope with two strength reduction factor[J]. **Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science)**, 2007, 26(4): 95 - 100.
- [20] 唐芬, 郑颖人, 赵尚毅. 土坡渐进破坏的双安全系数讨论[J]. **岩石力学与工程学报**, 2007, 26(7): 1402 - 1407.
TANG Fen, ZHENG Yin-ren, ZHAO Shang-yi. Discussion on two safety factors for progressive failure of soil slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(7): 1402 - 1407.
- [21] YAOHONG S. Double reduction factors approach to the stability of side slopes[J]. **Communications in Computer and Information Science**, 2010, 106(1): 31 - 39.
- [22] 水利部水利水电规划总院. SL386 - 2007 水利水电工程边坡设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
China Renewable Energy Engineering Institute. SL 386 - 2007 Water resources and hydropower engineering slope design specifications[S]. Beijing : China Water Power Press, 2007.
- [23] JIAO Y Y, SONG L, TANG H M, et al. Material weakening of slip zone soils induced by water level fluctuation in the ancient landslides of Three Gorges Reservoir[J]. **Advances in Materials Science & Engineering**, 2014, 2014(1): 1 - 9.
- [24] 唐芬, 郑颖人. 边坡渐进破坏双折减系数法的机理分析[J]. **地下空间与工程学报**, 2008, 4(3): 436 - 441, 464.
TANG Fen, ZHENG Yin-ren. Mechanism analysis on dual reduction factors about the progressive Failure of slope[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2008, 4(3): 436 - 441, 464.