

库岸滑坡破坏模式识别方法研究*

——以三峡水库青石滑坡为例

陈洪凯, 周晓涵

(重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074)

摘要:青石滑坡是三峡水库岸坡消落带典型的崩坡积层滑坡,基于现场调查和工程勘察分析了三峡水库蓄水运行期间青石滑坡的变形与破坏特征;将滑动面位于175 m水位以上的部分假定为弹性介质,位于145~175 m之间的部分假定为应变软化介质,提出了两种介质材料的本构模型;通过对滑坡滑动面弹性应变能、滑坡重力势能和地下水渗透势能的计算,采用突变理论建立了滑坡破坏模式判别指标,据此可将滑坡破坏模式分为缓动型和剧动型两类。计算结果表明,青石滑坡在水库运行期间的破坏模式属于缓动型,与实情相符。研究成果对于探索三峡水库岸坡滑坡灾害的形成机制及其减灾具有积极意义。

关键词:库岸滑坡;破坏模式;识别方法;青石滑坡;三峡水库

中图分类号:P642.22

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2016)05-0037-05

初步统计表明,世界上80%~90%的水库滑坡与库水活动有关,其中主要原因在于库水位降落时在岸坡内出现的渗透力,如意大利Vajont滑坡以及国内三峡水库的千江坪滑坡、凉水井滑坡、康家嘴滑坡、井泉滑坡、和平广场滑坡、清泉路滑坡。水库运行期间库岸滑坡破坏通常表现具有蠕变特征的缓动型和具有突变特征的剧动型两类,相关识别方法是水库岸坡地质减灾的重要科学问题。迄今,国内外学者对水库岸坡的破坏问题进行了广泛而深入的研究,如Bhowmik等人^[1]通过对伊利诺伊河的现场调查和观测,发现岸坡侵蚀的主要动力是洪水冲击形成的波浪、渗流及岸坡脚产生的次生环流;Nian等人^[2]通过对三峡库区老滑坡破坏问题的研究发现,滑带土处于不饱和状态呈现应变软化现象,处于饱和状态时表现为应变硬化现象;廖秋林等人^[3]认为库水位上升对库岸老滑坡的复活起到了加速作用;张幸农等人^[4]建立了坍塌型崩岸的力学模型,发现当坡脚被水流冲失后,岸坡易发生渗透破坏;吴松柏等人^[5]通过弯道水槽试验,发现水流冲刷作用下岸坡破坏表现为岸坡坡脚掏蚀、崩塌及其淤积;Zhang等人^[6]研究了拉瓦锡水电站右岸边坡,发现水库蓄水后岸坡破坏具有突发特征;祁生文等人^[7]认为岸坡破坏主要表现为压致拉裂、差异卸荷、重力蠕变-滑移-倾倒、结构沉陷等4种模式;Tamrakar等人^[8]采用能量平衡方法建立了尼泊尔Malekhu河右岸巨型滑坡倾倒和楔形体破坏力学模型;Wang等人^[9]发现千将坪滑坡体内存在黑色淤泥夹层,水敏感性强烈,在库水浸泡条件下强度快速软化是滑坡由蠕变破坏快速转变为加速变形的根本原因;肖诗荣等人^[10]从滑带土在库水浸泡作用下抗剪强度劣化角度分析了千将坪滑坡的发育机制;Ahmadi等人^[11]分析了裂隙水流动速度对岸坡稳定性的劣化作用;Tsou等人^[12]对台湾中部河流下切引发的沟岸破坏问题进行了研究,得到了岸坡冲蚀造成山坡表面岩土体蠕变位移的统计特征;Kukemilks等人^[13]通过现场调查分析了拉脱维亚境内Gauja河流岸坡破坏问题,揭示河流沿线岸坡破坏的空间分布特性;陈洪凯和唐红梅^[14]认为库水位升降变化是诱发库岸滑坡的根本原因。综上所述,国内外学者在研究水库岸坡的变形与破坏特征时,重点关注机理探索,而在库岸滑坡破坏模式识别方面进展不大。库水位降落导致岸坡破坏和库水位上升导致岸坡破坏的机理不同,即库水位降落在岸坡内产生渗透力可促使岸坡破坏,而库水位上升期间导致的岸坡破坏原因在于土体被库水浸泡后抗剪强度参数劣化。统计资料表明,约70%岸坡破坏事件由库水位降落导致。本文以三峡水库岸坡消落带典型的堆积层滑坡——青石滑坡为例,根据库水位降落期间岸坡破坏特性,从能量

* 收稿日期:2016-01-11 修回日期:2016-06-15 网络出版时间:2016-07-13 14:05

资助项目:国家自然科学基金(No. 51378521);重庆市自然科学基金重点项目(No. cstc2013JJB0001);重庆市“两江学者”计划专项资金(No. 201309)

作者简介:陈洪凯,男,教授,博士,研究方向为地貌过程减灾与环境修复,E-mail:chkexf@163.com

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20160713.1405.058.html>

角度采用突变理论研究库岸滑坡破坏模式识别问题,以便为进一步预测三峡水库岸坡滑坡灾情和有针对性地开展滑坡灾害监测预警工作提供指导性意见。

1 青石滑坡滑坡变形与破坏特征

青石滑坡位于长江三峡巫峡一级支流神女溪右岸的青石村,是一个由山体链式崩塌形成的堆积层老滑坡(封二彩图 1)。滑坡剪出口高程约 140 m,后缘高程约 550 m,滑坡体后壁陡崖高程约 1 000 m,滑坡体体积约 $1.2 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。滑坡体由第四系崩滑堆积物(Q_4^{col})组成,下伏基岩为三叠系下统大冶组灰白色泥质灰岩(T_{1d})和嘉陵江灰岩(T_{1j})。滑坡区域从地质构造上位于官渡向斜北西翼,基岩岩层产状 $26^\circ \sim 110^\circ \angle 14^\circ \sim 32^\circ$ (图 2)。2009 年 10 月,三峡水库 175 m 水位运行期间青石滑坡前缘发生局部变形,出现 3 条环状拉长裂缝(封二彩图 3),变形体的体积约 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3$;2010 年 10 月 11 日,滑坡前端变形体加速变形,于 10 月 12 日发生破坏,体积约 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ (封二彩图 4)。

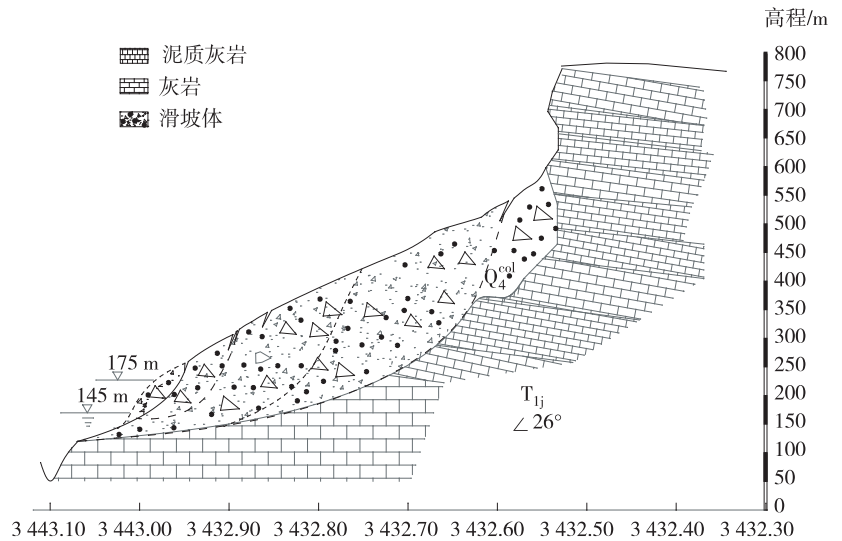


图 2 青石滑坡地质剖面

Fig. 2 Geological section of Qingshi landslide

2 库岸滑坡破坏力学模型

本研究就青石滑坡前端已破坏的局部滑坡构建了相应的力学模型(图 5),即将局部滑坡滑动面简化为两段,上段为位于 175 m 水位以上部分,属于弹性介质,下段为位于 145~175 m 库水位变动带,属于应变软化介质,两种介质的本构曲线如图 6 所示。

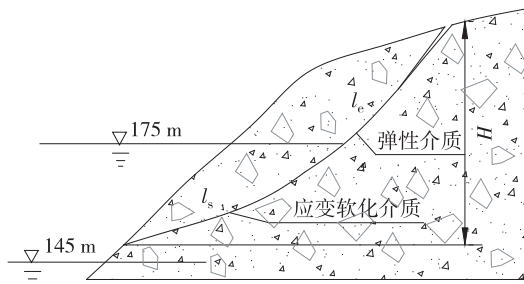


图 5 水库岸坡滑坡力学模型

Fig. 5 Mechanical model for landslide in bank of reservoir

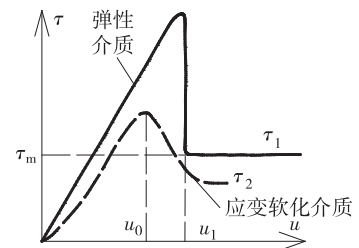


图 6 滑动面介质本构曲线

Fig. 6 Constitutive curve for the medium of slip surface

滑坡滑动面弹性段的本构模型为:

$$\tau = \begin{cases} G_1 \frac{u}{h} & (u < u_1), \\ \tau_m & (u \geq u_1). \end{cases} \quad (1)$$

式中, G_1 为滑动面弹性段剪切模量(单位:kPa); τ_m 为滑动面弹性段残余抗剪强度(单位:kPa); h 为滑动面(带)平均厚度(单位:m); u 为滑动面剪切位移(单位:m); u_1 为弹性段被剪断时的临界位移(单位:m)。

借鉴姜永东等人^[11]的研究,滑坡滑动面应变软化段本构模型为:

$$\tau = \frac{G_2}{h} u e^{-\frac{u}{u_0}}. \quad (2)$$

式中, G_2 为滑动面应变软化段剪切模量(单位:MPa); u_0 为剪应力峰值点所对应的位移(单位:m); 其余变量

同前。

3 库岸滑坡破坏模式识别方法

3.1 能量计算

当滑坡滑动面弹性段发生蠕滑位移 u 且 $u < u_1$ 时,产生的弹性应变能为:

$$W_1^e = G_1 \frac{l_e}{2h} u^2 \quad (3)$$

式中, l_e 为滑动面弹性段长度(单位:m);其余变量同前。

当滑动面应变软化段发生蠕滑位移 u 时,产生的弹性应变能为:

$$W_2^e = l_s \int_0^u \frac{G_2 u}{h} \exp\left(-\frac{u}{u_0}\right) du \quad (4)$$

式中, l_s 为滑动面应变软化段长度(单位:m);其余变量同前。

滑坡重力势能为:

$$W_G = m g u \sin \beta \quad (5)$$

式中, m 为滑坡滑坡体总质量(单位:kg); β 为滑动面倾角(单位:°);其余变量同前。

地下水在滑坡体内发生渗流作用,渗透力及其动力势能分别为:

$$f = m_w g i \quad (6)$$

$$W_w = m_w g i u \quad (7)$$

式中, f 为滑坡体内地下水以下的渗透力(单位:kN); W_w 为渗透力产生的势能(单位:kN·m); m_w 为水体的质量(单位:kg); i 为水力坡降;其余变量同前。

3.2 滑坡破坏模式能量判别

三峡水库蓄水运行期间,青石滑坡下部处于周期性浸泡状态,严重劣化滑动面浸泡段土体的物理力学特性,滑坡由渐变到突变破坏。取单位宽度滑坡体为分析单元,滑坡的势能函数可表示为:

$$W = W_1^e + W_2^e - W_G - W_w = G_1 \frac{l_e}{2h} u^2 + l_s \int_0^u \frac{G_2 u}{h} \exp\left(-\frac{u}{u_0}\right) du - m g u \sin \beta - m_w i u \quad (8)$$

对(8)式取偏导,得:

$$\frac{dW}{du} = \frac{d(W_1^e + W_2^e - W_G - W_w)}{du} = G_1 \frac{l_e}{h} u + l_s \frac{G_2 u}{h} \exp\left(-\frac{u}{u_0}\right) - m g \sin \beta - m_w g i \quad (9)$$

方程 $dW/du=0$ 为平衡曲面(突变流形)。据光滑流形性质,存在 $W'''=0$,求解可得 $u = u_t = 2u_0$,将平衡曲面(9)式在 u_t 处值作 Taylor 级数展开,取至3次项,可得:

$$\frac{l_s G_2}{6 h e^2 u_0^2} (u - u_t)^3 + \left(\frac{G_1 l_e}{h} - \frac{l_s G_2}{h e^2} \right) (u - u_t) + \frac{G_1 l_e}{h} u_t + \frac{l_s G_2 u_t}{h e^2} - m g \sin \beta - m_w g i = 0 \quad (10)$$

式中, u_t 为滑动面应变变化段本构曲线拐点所对应的位移(单位:m);其余变量同前。

将(10)式中自变量量纲归一化,得:

$$\frac{l_s G_2}{6 h e^2 u_0^2} \left(\frac{u - u_t}{u_t} \right)^3 + \left(\frac{G_1 l_e}{h u_t^2} - \frac{l_s G_2}{u_t^2 h e^2} \right) \left(\frac{u - u_t}{u_t} \right) + \frac{G_1 l_e}{h u_t^2} + \frac{l_s G_2}{h e^2 u_t^2} - \frac{m g \sin \beta + m_w g i}{u_t^3} = 0 \quad (11)$$

令 $x = \frac{u - u_t}{u_t}$, $a = \frac{3}{2}(k - 1)$, $b = \frac{3}{2}(1 + k - \xi)$, $k = \frac{G_1 l_e e^2}{G_2 l_s}$, $\xi = \frac{h e^2 (m g \sin \beta + m_w g i)}{u_t l_s G_2}$,将(11)式简化为突变模

型的标准形式为:

$$x^3 + a x + b = 0 \quad (12)$$

对于突变点,采用突变理论^[15]建立滑坡破坏模式判别指标为:

$$\Delta = 4a^3 + 27b^2 = 0 \quad (13)$$

将参数 a 和 b 的表达式代入(13)式,得:

$$2(k - 1)^3 + 9(1 + k - \xi)^2 = 0 \quad (14)$$

随着滑坡滑动面错动产生位移 u ,会出现如下两种情况:1) 当 $\Delta > 0$,势函数光滑,滑坡稳定性不发生突变破坏,滑坡破坏方式属于缓动型;2) 当 $\Delta \leq 0$ 时,势函数非连续,滑坡稳定性易于发生突变,滑坡破坏方式属于刷

动型。

4 青石滑坡破坏模式

根据地质勘察资料可知,青石滑坡前端局部滑坡体后缘弹性段: $c=45.1\text{ kPa}$, $\varphi=19.8^\circ$,弹性模量 $E_1=68.2\text{ GPa}$,泊松比 $\mu=0.21$,长度 $l_e=12.91\text{ m}$;应变软化段: $c=4.1\text{ kPa}$, $\varphi=31^\circ$,弹性模量 $E_2=3.24\text{ GPa}$,泊松比 $\mu=0.36$,长度 $l_s=43.54\text{ m}$ 。滑动面浸水段长度 $\Delta L=23\text{ m}$,高度 $\Delta h=7.5\text{ m}$,水力梯度 $i=0.326$,水体质量 $m=8.2\times 10^5\text{ kg}$, $m_w=1.1\times 10^5\text{ kg}$ 。依据本研究建立的公式,得: $k=\frac{G_1 l_e e^2}{G_2 l_s}=19.0696$, $\xi=\frac{he^2(mg\sin\beta+m_w gi)}{u_1 l_s G_2}=0.0576$, $\Delta=2(k-1)^3+9(1+k-\xi)^2=15404>0$, $u=5\times 10^{-3}\text{ m}$ 。由此可见,三峡水库蓄水运行期间青石滑坡前端滑坡体破坏属于缓动型破坏,与实情相符(封三彩图 7)。

5 结束语

青石滑坡是三峡水库岸坡消落带具有代表性的崩坡积层滑坡,本研究分析了三峡水库蓄水运行期间青石滑坡的变形与破坏特征,并据此构建了库岸滑坡力学模型,提出了滑坡滑动面本构模型。本研究建立了库岸滑坡破坏模式识别方法,即通过对滑坡滑动面弹性段和应变软化段弹性应变能、滑坡重力势能和地下水渗透势能的计算,采用突变理论建立了滑坡破坏模式判别指标,据此可将滑坡破坏模式分为缓动型和剧动型两类,分别表征滑坡稳定性不发生突变和稳定性存在突然衰减。本研究的计算结果表明,青石滑坡在水库蓄水运行期间的破坏模式属于缓动型,与实情相符。因此,本研究构建的库岸滑坡破坏模式识别方法对于科学识别三峡水库岸坡滑坡灾害有着积极意义。

参考文献:

- [1] Bhowmik N G, Schicht R J. Bank erosion of the Illinois river[R]. [S. l.]: World Environmental & Water Resources Congress, 1979: 1112-1119.
- [2] Nian T K, Feng Z K, Yu P C, et al. Strength behavior of slip-zone soils of landslide subject to the change of water content[J]. Natural Hazards, 2013, 68(2): 711-721.
- [3] 廖秋林, 李晓, 李守定, 等. 三峡库区千将坪滑坡的发生、地质地貌特征、成因及滑坡判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3146-3153.
Liao Q L, Li X, Li S D, et al. Occurrence, geology and geomorphology characteristics and origin of Qianjiangping landslide in Three Gorges reservoir area and study on ancient landslide criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3146-3153.
- [4] 张幸农, 陈长英, 假冬冬, 等. 渐进坍塌型崩岸的力学机制及模拟[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 246-252.
Zhang X N, Chen C Y, Jia D D, et al. Mechanisms of gradual riverbank collapses and simulation study[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(2): 246-252.
- [5] 吴松柏, 余明辉. 冲积河流塌岸淤床交互作用过程与机理的试验研究[J]. 水利学报, 2014, 45(6): 649-657.
Wu S B, Yu M H. Experimental study on bank failure process and interaction with riverbed deformation due to fluvial hydraulic force[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(6): 649-657.
- [6] Zhang D X, Wang G H, Yang T J, et al. Satellite remote sensing- based detection of the deformation of a reservoir bank slope in Laxiwa hydropower station, China[J]. Landslides, 2013, 10(2): 231-238.
- [7] 祁生文, 伍法权, 常中华, 等. 三峡地区奉节县城缓倾层状岸坡变形破坏模式及成因机制[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 88-91.
Qi S W, Wu F Q, Chang Z H, et al. Mechanism and model for deformation of bank slope with slightly inclined soil layers in Fengjie county of Three Gorges[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(1): 88-91.
- [8] Tamrakar N K, Singh J L, Bista K K, et al. Toppling and wedge failures in Malekhu river area, Malekhu, central Nepal lesser Himalaya[J]. Bulletin of the Department of Geology, 2013, 16: 21-28.
- [9] Wang F W, Zhang Y M, Huo Z T, et al. Mechanism for the rapid motion of the Qianjiangping landslide during reactivation by the first impoundment of the Three Gorges dam reservoir, China [J]. Landslides, 2008, 5(4): 379-386.
- [10] 肖诗荣, 刘德富, 姜福兴, 等. 峡库区千将坪滑坡地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 1023-1030.
Xiao S R, Liu D F, Jiang F X, et al. Geomechanical model experiment on Qian Jiangping landslide in three gorges reservoir area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 1023-1030.
- [11] Ahmadi M, Eslami M. A new approach to plane failure of

- rock slope stability based on water flow velocity in discontinuities for the Latian dam reservoir landslide[J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, 8(2): 124-130.
- [12] Tsou C Y, Chigira M, Matsushi Y, et al. Deep-seated gravitational deformation of mountain slopes caused by river incision in the central range, Taiwan; spatial distribution and geological characteristics [J]. *Engineering Geology*, 2015, 196(1): 126-138.
- [13] Kukemilks K, Saks T. Landslides and gully slope erosion on the banks of the Gauja river between the towns of Sigulda and Ligatne [J]. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 2013, 62(4): 231-243.
- [14] 陈洪凯, 唐红梅. 三峡库区大型滑坡发育机理[J]. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 2009, 26(4): 43-47.
Chen H K, Tang H M. Developing mechanism of giant landslides in the area of Three Gorges reservoir [J]. *Journal of Chongqing Normal University: Natural Science*, 2009, 26(4): 43-47.
- [15] 陈洪凯, 张瑞刚, 唐红梅, 等. 压剪型危岩破坏弹冲动力参数研究[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(24): 30-33.
Chen H K, Zhang R G, Tang H M, et al. Elastic & dynamic parameters of a ruptured compression-shear perilous rock [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(24): 30-33.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Study on Identification Method on Failure Mode of Reservoir Landslide: Taking Qingshi Landslide in Three Gorges Reservoir as an Example

CHEN Hongkai, ZHOU Xiaohan

(Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China)

Abstract: Qingshi landslide is an representative landslide composed of colluvial deposits in water level fluctuating zone of Three Gorges reservoir. Based on field investigation and engineering survey, this paper analyzes formation and failure characteristics of Qingshi landslide during the running of the three gorges reservoir. Paying attention to slide surface of landslide in reservoir bank, the paper treats the part above 175 m a. s. l. as elastic medium, while the part between 145 m a. s. l. and 175m a. s. l. as strain softening medium, then establishes two constitutive models respectively. Further, identification index for failure mode of landslide is built up in mutation theory following calculations such as elastic strain energy of slide surface, gravitational potential energy of landslide and osmotic potential energy in landslide. The index represents two failure modes of landslide, the slow failure type and the mutant failure type. Calculation identifies that Qingshi landslide belongs to the slow failure type in running of Three Gorges reservoir, which is consistent to the true state of affair. The research result is valuable in discovery formation mechanism and disaster mitigation for landslide in bank of Three Gorges reservoir.

Key words: landslide in reservoir bank; failure mode; identification method; Quingshi landslide; Three Gorges reservoir

(责任编辑 方 兴)