

类土质岸坡雪崩式破坏机制研究^{*}

——以三峡库区龚家方岸坡为例

王圣娟¹, 陈洪凯^{1,2}

(1. 重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074; 2. 枣庄学院 城市与建筑工程学院, 山东 枣庄 277160)

摘要:【目的】水库岸坡破坏机制是库岸地质减灾的重要科学问题。【方法】以三峡库区龚家方岸坡为例,采用现场勘查和模型实验方法,探讨类土质岸坡破坏机制问题。【结果】现场勘查结果表明,类土质岸坡破坏的地质基础包括两方面:一是岸坡由灰岩、泥灰岩、白云岩、页岩、片麻岩、板岩等并富含蒙脱石和伊利石亲水性矿物的碎裂岩体组成;二是岸坡卸荷作用强烈,卸荷结构面岩桥区段是岸坡破坏的关键环节。模型实验结果表明,类土体渗透性良好,水库蓄水初期库水进入岸坡后地下水在类土体空隙内产生明显的紊流作用,孔隙水压力波动特征明显。【结论】水库蓄水浸泡条件下岸坡卸荷结构面岩桥区段抗剪强度参数劣化作用和水库蓄水初期岸坡内孔隙水压力波动作用是类土质岸坡发生雪崩式破坏的物理机制。

关键词:类土质岸坡;雪崩式破坏;卸荷作用;水库蓄水浸泡;三峡库区龚家方岸坡

中图分类号:P642.22;O359

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2018)06-0034-06

三峡水库 2008 年第 1 次 175 m 水位试验性蓄水期间,岸坡发生了 97 处坍塌,总长度计 3.3 km,坍塌总方量约 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$,以当年 11 月巫峡龚家方岸坡破坏规模最大,危及长江航道通航安全。大型及特大型水库运行期间,库岸坍塌破坏、老滑坡复活,已经得到国内外众多实例证实;相关减灾科学问题得到国内外学术界高度重视并持续性开展研究,例如:Nian 等人^[1]发现三峡库区老滑坡的滑带土存在被库水浸泡的饱和段和非饱和段,其中饱和段表现出应力应变硬化特征,非饱和段呈现应力应变软化现象;廖秋林等人^[2]发现岸坡在库水位上升期间存在破坏问题;张幸农等人^[3]从渗流路径角度提出了渐进坍塌型崩岸力学模型,较科学地解释了岸坡局部小幅度土体崩塌力学机制问题;吴松柏等人^[4]通过室内水槽试验,发现岸坡破坏是水流淘刷岸坡坡脚、岸坡崩塌及崩塌体淤积坡脚并在河床上分解、输移、掺混中交互作用的复杂循环过程;Tamrakar 等人^[5]从能量变化角度解释了尼泊尔 Malekhu 河右岸巨型滑坡倾倒和楔形体破坏问题;Wang 等人^[6]采用环剪试验方法分析了千将坪滑坡土体的力学特性,发现滑坡体内黑色淤泥夹层对滑坡的稳定性有控制性作用,且该夹层水敏性特征明显,经库水位上升浸泡后该夹层强度迅速衰减,由蠕变破坏快速转变为加速变形;陈洪凯等人^[7]梳理了水库岸坡减灾研究现状,瞄准库水位升降对岸坡的物理力学作用,构建了土质岸坡变形破坏浸泡-渗流耦合驱动理论^[8],提出了基于浪蚀龛和土体临界高度的库岸再造宽度预测修正卡丘金法^[9],通过解剖青石村岸坡变形破坏特性提出了库岸滑坡识别方法^[10];周云涛等人^[11]探讨了类土质岸坡渗流驱动压剪破坏问题。然而,现有研究主要聚焦在土质岸坡、岩质岸坡、岩土混合型岸坡等几类岸坡的变形和破坏方面,对有关类土质岸坡破坏机制问题的研究不多。为此,本研究以三峡库区巫峡龚家方岸坡例,采用现场勘查和模型实验的方法,从岸坡卸荷结构面岩桥区段抗剪强度劣化和类土体孔隙水压力波动作用两方面探讨了类土质岸坡雪崩式破坏机制问题,这一研究结果对于库岸地质减灾有积极指导意义。

^{*} 收稿日期:2017-09-24 修回日期:2018-06-02 网络出版时间:2018-10-25 10:42

资助项目:国家自然科学基金面上项目(No. 11272185);重庆市首席专家工作室专项(No. 201605);重庆市“两江学者”计划专项资金(No. 201309);2016 年重庆高校创新团队建设计划资助项目(No. CXTDG201602012);重庆市教育委员会重点实验室建设计划资助项目(No. ZDSYS201712)

第一作者简介:王圣娟,女,研究方向为岩土工程研究,E-mail:wsjk91@163.com;通信作者:陈洪凯,男,教授,博士生导师,E-mail:chk955@126.com

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20181025.1042.032.html>

1 龚家方岸坡地质结构

龚家方岸坡位于巫峡长江左岸^[7](图1,图2),横石溪背斜北西翼近轴部。基岩主要由三叠系下统大冶组三段(T_1d^3)、四段(T_1d^4)和嘉陵江组第一段(T_1j^1)组成,为一套滨海—浅海相碳酸盐岩与碎屑岩混相沉积。岩性为灰岩、白云质灰岩、泥质灰岩、页岩、砂岩和硅质岩,以碳酸盐岩为主,占该区地层总厚度的90%,水理性质差。岩层产状 $350^\circ\sim 353^\circ\angle 44^\circ\sim 47^\circ$ 。岩体内发育两组裂隙:第1组裂隙产状 $100^\circ\sim 110^\circ\angle 50^\circ\sim 70^\circ$,属于巫峡长江河谷卸荷裂隙,与岸坡平行,间距约50 m,沿岸坡走向断续连通,连通段长度39.5~70 m,裂隙开度可及0.7 m;第2组裂隙产状 $210^\circ\sim 240^\circ\angle 70^\circ\sim 85^\circ$,属于构造裂隙,间距100 m左右。岸坡前缘高程145 m,后缘高程468 m,相对高差323 m,属于反向坡,岩体结构破碎^[7](图3),表层岩层弯曲变形明显,最大可及1.3 m。龚家方岸坡在三峡库区巫峡、巫山大宁河、神女溪、奉节瞿塘峡等地区具有代表性,具有类砌体结构特征^[12],它的地质结构如图4所示。三峡水库145~175 m水位之间的库水位变动带位于该岸坡第1组裂隙岩桥区段。



图1 巫峡龚家方岸坡位置

Fig. 1 The site of Gongjiafang bank in Wu Gorges

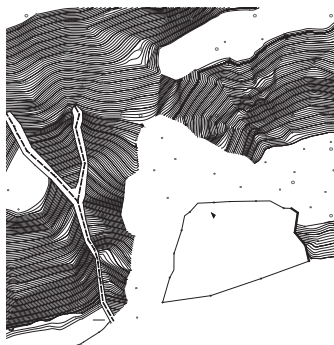


图2 龚家方岸坡平面图

Fig. 2 The plane chart of Gongjiafang bank



图3 龚家方岸坡破碎岩体

Fig. 3 The broken rock of Gongjiafang bank

2 龚家方岸坡雪崩式破坏特征

1991年以来,现场观测发现龚家方岸坡高程404~446 m处出现了6条开张裂缝,属于岸坡第1组裂隙。2008年9月三峡水库第1次175 m水位试验性蓄水,在库水浸泡龚家方岸坡第1组裂隙岩桥区段34天后,于当年11月26日发生了第1次坍塌破坏(图5),坍塌体积为 $2.6\times 10^5\text{ m}^3$,破坏区域呈半椭圆形;冲入水库的岩土体造成涌浪,波及范围 9 km^2 左右,浪高可及4 m。三峡水库2010年投入正式运营后,第2次蓄水淹没龚家方岸坡第1组裂隙岩桥区20余天,于2011年9月29日岸坡在第1次破坏部位中部再次发生坍塌破坏(图6),坍塌体积约为 $1.2\times 10^5\text{ m}^3$ 。从现场采集的视频发现,龚家方岸坡具有雪崩式破坏特征^[7]。

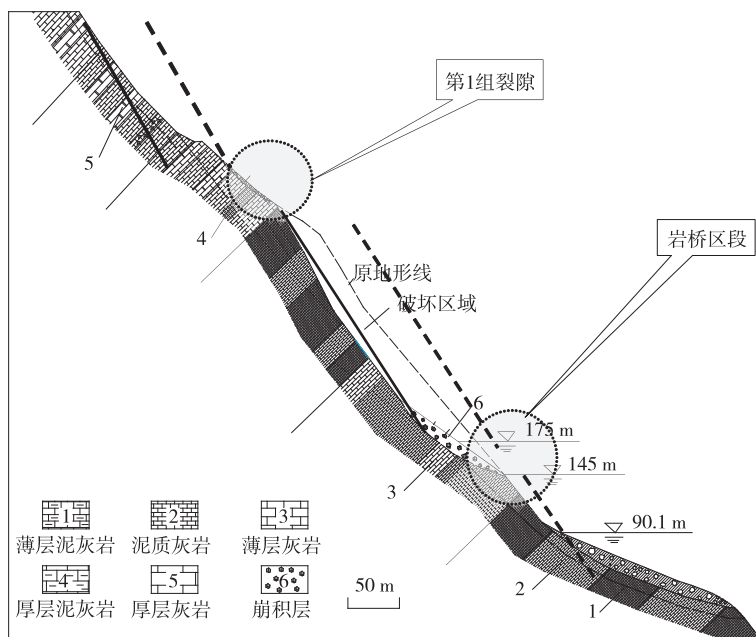


图4 龚家方岸坡地质结构

Fig. 4 Geological structure of Gongjiafang bank

3 类土质岸坡雪崩式破坏机制

3.1 类土质岸坡雪崩式破坏的地质基础

类土质岸坡发生雪崩式破坏的地质基础主要体现在两方面:1)岸坡由灰岩、泥灰岩、白云岩、页岩、片麻岩、

板岩等脆性并富含亲水性矿物的岩石组成;岩体结构介于碎裂状和块体状之间,裂隙表层存在 1~2 cm 的风化层,风化层富含蒙脱石、伊利石等亲水性黏土矿物,类土体遇水后岩块之间致滑效果明显;2) 岸坡卸荷作用强烈:河流下切诱发岸坡岩体强烈卸荷,如龚家方岸坡第 1 组裂隙即为长江河谷下切作用产生的卸荷裂隙,存在 3~8 条与岸坡近于平行的卸荷结构面,水平间距 4~6 m,每条卸荷结构面呈现断续贯通状态,非贯通段属于岩桥区段(图 4),是类土质岸坡发生雪崩式破坏的关键环节。



图 5 龚家方岸坡第一次破坏过程^[7]

Fig. 5 The 1st rupture process of Gongjiafang bank

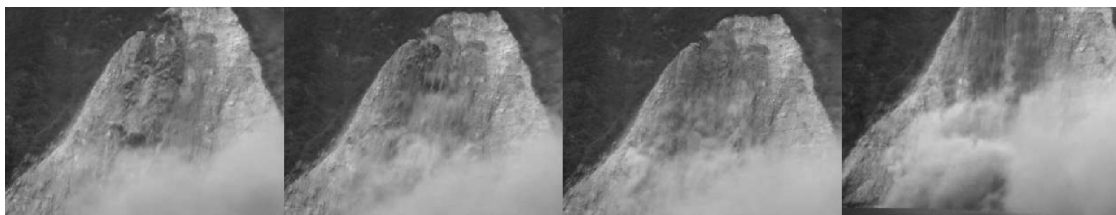


图 6 龚家方岸坡第二次破坏过程^[7]

Fig. 6 The 2nd rupture process of Gongjiafang bank

此外,区域构造应力场是类土质岸坡发生雪崩式破坏的宏观地质基础。陈洪凯等人^[13]的研究表明,巫峡龚家方岸坡所在区域的新构造应力场主压应力 σ_T 方位角为 45° ,两个剪切带 Max1 和 Max2 方位角分别为 5° 和 85° (图 7)。第 1 组裂隙与 Max2 基本一致,第 2 组裂隙与主压应力 σ_T 方向近于垂直。岸坡地质体被第 1 组裂隙、第 2 组裂隙、Max1 剪切带、Max2 剪切带裂隙及地层层面等多组结构面组合,岸坡岩体结构破碎。

3.2 类土质岸坡雪崩式破坏机制

3.2.1 水库蓄水浸泡条件下岸坡卸荷结构面岩

桥区段抗剪强度参数劣化机制 龚家方岸坡典型岩石风化物天然条件及浸泡条件下抗剪强度参数如表 1 所示。如泥质灰岩风化物抗剪强度参数天然工况 c 和 φ 值分别为 40 kPa 和 30° ,浸泡后分别劣化为 19 kPa 和 21° ,劣化幅度分别为 52% 和 30%。采用传递系数法计算结果发现,龚家方岸坡在水库蓄水前的稳定系数为 1.31,蓄水后劣化为 0.88,岸坡处于不稳定状态。换言之,龚家方岸坡于 2008 年 11 月 26 日发生第 1 次坍塌破坏是必然结果。

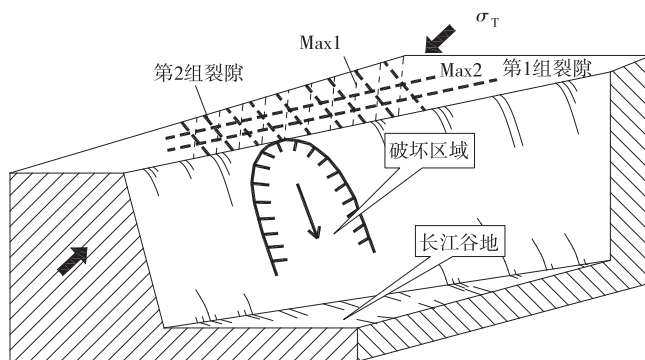


图 7 龚家方岸坡新构造应力场与裂隙发育模式

Fig. 7 Neo-tectonic stress field and crevices in Gongjiafang bank

表 1 龚家方岸坡岩石风化物抗剪强度参数

Tab. 1 Shear strength parameters of rock weathering products in Gongjiafang bank

岩石类型	天然工况			浸泡工况		
	容重/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘结力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)	容重/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘结力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)
泥质灰岩	26.1	40	30	26.6	19	21
泥灰岩夹页岩	25.4	23	24	26.0	13	15
层状灰岩	27.3	60	40	27.8	50	38
白云岩	27.5	90	47	27.9	80	43

3.2.2 类土质岸坡雪崩式破坏激发机制 为探讨龚家方岸坡在三峡水库蓄水期间变形破坏的激发机制,本研究团队于2012年进行了模型试验(图8)。试验用土经室内试验配制,选择 $V_{\text{粘土}}:V_{\text{碎石}}:V_{\text{高岭土}}:V_{\text{水泥}}=4:2:1:0.14$,充分搅拌均匀制成类土体,满足表1所示泥质灰岩风化物的抗剪强度参数,库水位升降速度比尺取1:5.5。典型实验结果如图9和图10所示。由图9可见,位于岸坡基岩表面的孔隙水压力传感器记录的孔隙水压力在蓄水期间总体增大,但在蓄水初期岸具有明显波动性。蓄水期间岸坡破坏具有典型的脆性坍塌特征(图10),这与图5和图6显示的岸坡破坏实情吻合良好。需要指出的是,从2008年三峡水库蓄水至今,三峡水库类土质岸坡尚未发现库水位降落期间发生破坏的事例,其中原因应该是类土质岸坡的岩石风化物内孔隙、裂隙充分发育,可以和库水位降落基本达到同步,换言之,库水位降落在岸坡内未形成明显的渗透力。

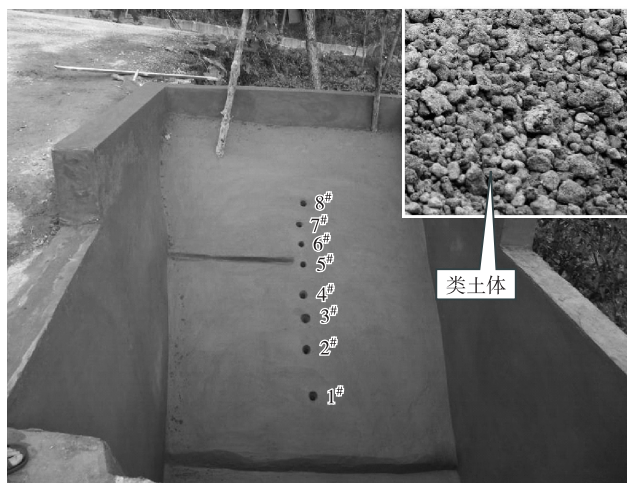


图8 龚家方岸坡蓄水破坏模型实验

Fig. 8 Model experiment to simulate failure of Gongjiafang bank during reservoir filling

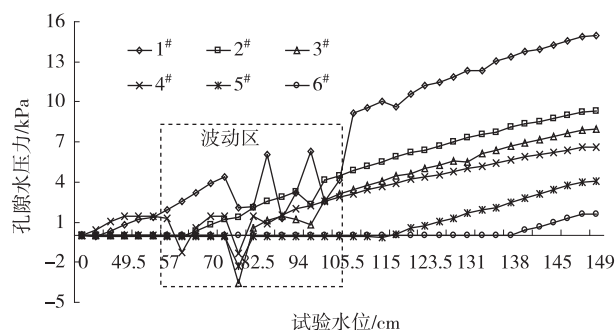


图9 模型试验蓄水期间岸坡孔隙水压力变化曲线

Fig. 9 Variation curves of pore pressure in bank during reservoir filling

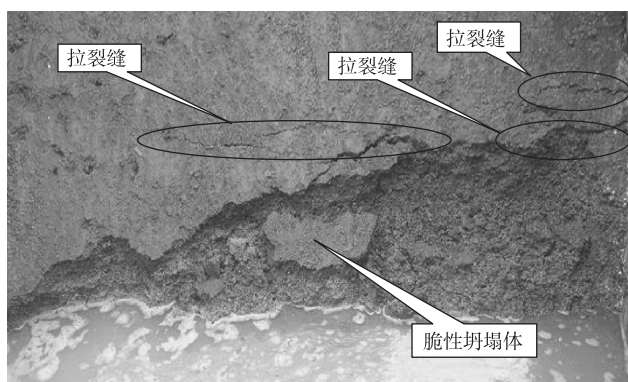


图10 模型试验蓄水期间岸坡破坏图示

Fig. 10 Failure pattern of experiment bank during reservoir filling

雪崩式破坏应该是类土质岸坡破坏的共性特征,表现为岸坡卸荷结构面相邻两个岩桥区段之间类土体的阵性崩滑/坍塌(Intermittent collapse),但目前要给出类土质岸坡雪崩式破坏特征的力学描述有较大难度。本研究仅仅探讨雪崩式破坏激发机制问题。根据图9可推知,水库蓄水初期类土质岸坡内孔隙水压力波动作用(Surging)可能是类土质岸坡雪崩式破坏的激发机制,相关的分析模型如图11所示。图11a为典型类土体微结构,其中A,B,C,D和E为相邻的5个类土体块;B和C之间存在局部面连接,A和D之间存在局部面连接且与C和E均存在角连接,M为类土体空隙,P为渗水通道及观测点。类土体在蓄水浸泡后,类土体内块之间粘结强度降低,如图11b中A和B的稳定性急剧降低,随后在重力作用下向空隙M崩落,并向下拖拽空隙中的水体,M空隙内水体出现紊流作用,在观测点P处产生的孔隙水压力便表现出波动性,如图11c所示。换言之,空隙M的观测点P因A和B的崩落冲击和M空隙内水流紊流共同作用,出现如图9所示的孔隙水压力波动特征。

水库蓄酒类土体内非饱和区产生的孔隙水压力波动作用对于岸坡卸荷结构面非贯通段的贯通破坏具有加速作用,而岸坡内多个岩桥区段从坡脚向坡顶的连锁破坏宏观上表现为类土质岸坡的雪崩式破坏特征。

4 结论

以三峡库区巫峡龚家方岸坡为例,对类土质岸坡的破坏机制问题进行分析,得出如下主要结论:

1) 类土质岸坡由破碎岩体结构组成,这类岸坡的破坏具有雪崩式特征,且主要发生在水库蓄水期间;龚家方岸坡破坏现场观测资料与模型试验结果吻合良好。

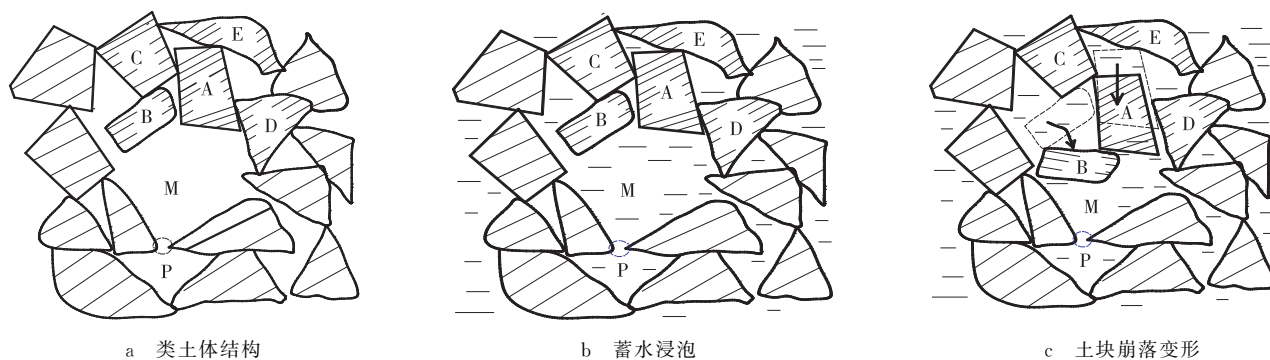


图 11 类土质岸坡雪崩式破坏激发机制分析模型

Fig. 11 Analysis model of trigger mechanism for soil-similar bank failure

2) 由富含亲水性矿物的灰岩、泥灰岩、白云岩、页岩、片麻岩、板岩等组成的碎裂岩体岸坡及岸坡内强烈的卸荷作用是类土质岸坡破坏的重要地质基础。

3) 水库蓄水浸泡条件下岸坡卸荷结构面岩桥区段抗剪强度参数劣化作用和蓄水初期岸坡孔隙水压力波动作用是类土质岸坡发生雪崩式破坏的物理机制。

下一步研究中,应重视类土质岸坡雪崩式破坏的力学描述研究,从而解决类土质岸坡地质减灾的重要基础理论问题。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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 QL, 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 陈洪凯, 周晓涵, 唐红梅, 等. 水库岸坡地质灾害研究现状与趋势[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2016, 33(3): 38-44.
CHEN H K, ZHOU X H, TANG H M, et al. The status quo and trend to study geological disaster in bank slope of reservoir [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2016, 33(3): 38-44.
- [8] 陈洪凯, 唐红梅, 曾云松. 土质岸坡变形破坏浸泡-渗流耦合驱动理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
CHEN H K, TANG H M, ZENG Y S. Soak-seepage coupling drive theory and its application for deformation and failure of earthy bank[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [9] 陈洪凯, 赵先涛, 唐红梅, 等. 基于浪蚀龛和土体临界高度的修正的卡丘金法及其工程应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 1095-1100.
CHEN H K, ZHAO X T, TANG H M, et al. Modified Kachugin method based on wave cut notch and critical height of soil and its engineering application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 1095-1100.
- [10] 陈洪凯, 周晓涵. 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[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2016, 33(5): 37-41.
CHEN H K, ZHOU X H. Study on identification method on failure mode of reservoir landslide: taking Qingshi landslide in Three Gorges reservoir of China as an example [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural

- Science), 2016, 33(5): 37-41.
- [11] 周云涛, 唐红梅, 陈洪凯. 三峡水库泄水期间类土质岸坡渗流驱动压剪破坏机制研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2016, 33(6): 37-44.
- ZHOU Y T, TANG H M, CHEN H K. Study on compression-shear failure mechanism by seepage-driving for the quasi earthy bank slope during the drawdown in Three Gorges reservoir[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2016, 33(6): 37-44.
- [12] 唐红梅, 周云涛, 沈娜, 等. 三峡库区类土质岸坡破坏机制研究: 以巫山县江东寺岸坡为例[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2016, 33(4): 32-39.
- TANG H M, ZHOU Y T, SHEN N, et al. Study on failure mechanism of earthy-soil bank slope in the Three Gorges reservoir: taking Jiangdongsi bank slope in Wushan county as an example[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2016, 33(4): 32-39.
- [13] 陈洪凯, 唐红梅, 艾南山. 三峡库区的新构造应力场及其对库岸滑坡滑动优势方向的影响[J]. 地理研究, 1997, 16(4): 15-22.
- CHEN H K, TANG H M, AI N S. Neotectonic stress field and its effects on the dominant sliding direction of landslides in the Three Gorges reservoir region[J]. Geographical Research, 1997, 16(4): 15-22.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Study on Avalanche Failure Mechanism for Soil-Similar Bank: Taking Gongjiafang Bank of Three Gorges Reservoir Area as an Example

WANG Shengjuan¹, CHEN Hongkai^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074;

(2. School of City and Architectural Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang Shandong, 277160, China)

Abstract: [Purposes] It is one of important scientific problems in geological disaster mitigation for failure mechanism of reservoir bank. [Methods] Taking Gongjiafang bank in Three Gorges reservoir area as an example, the authors discuss failure mechanism of soil-similar bank using observation in field and model experiments. [Findings] Observation in field illustrate that geological conditions include two spheres for soil-similar bank to failure, one is that the bank is composed of brittle rocks such as limestone, mudstone, dolomite, shale, gneiss, slate, in particular, there are a large quantity hydrophilic clay minerals such as montmorillonite and illite in weathering materials from these rocks, another is strong unloading in bank, and the rock bridge zone of unloading structure is the key agent for the bank to rupture. Model experiments demonstrate that the permeability of soil-similar rock is positive, and turbulence is triggered in porosity of soil-similar rock after immersion of water at the initial impoundment of the reservoir. Simultaneously, fluctuation of pore pressure in soil-similar bank are hardly in evitable by the turbulence. [Conclusions] physical avalanche mechanism of soil similar bank manifests two facets, one is deterioration of shear strength parameters of rock bridge zone of unloading structure in bank under impoundment of reservoir, another is the fluctuation of pore pressure at the initial impoundment. Further, the paper approaches the mechanism for the fluctuation of pore pressure in soil similar bank.

Keywords: soil-similar bank; avalanche failure; unloading; immersion and soak in reservoir; Gongjiafang bank in Three Gorges reservoir area

(责任编辑 方 兴)