

# 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

唐红梅, 周云涛, 沈娜, 延兆奇, 刘滨源, 陈洪凯  
(重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074)

**摘要:**2015年6月24日,重庆市巫山县发生江东寺岸坡垮塌事件,造成人员伤亡、财产损失,社会影响较大。针对江东寺类土质岸坡垮塌事件,介绍了岸坡灾情,解译了江东寺滑坡破坏的库水位上升浸泡软化、库水位下降渗流驱动力、降雨入渗劣化等3个诱发机制。结果显示:库水位上升浸泡软化降低了滑体、滑面物理力学参数,在岸坡坡脚形成软化区;库水位下降渗流驱动力增加了顺坡向的下滑力;降雨入渗进一步降低滑体、滑面物理力学参数,增大渗透力和浮托力。3种诱发机制的联合作用是导致江东寺岸坡垮塌的原因。采用PFC2D对江东寺岸坡进行数值模拟发现,库水位上升对类土质土体具有劣化作用;145 m水位处的滑坡破坏运动速度最大,达 $0.59 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,岸坡破坏具有突发性。数值模拟破坏过程与现场监测数据吻合。

**关键词:**破坏机制;防治;类土质岸坡;三峡库区

**中图分类号:**U412.22<sup>+</sup>2;U416.1<sup>+</sup>4

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-6693(2016)04-0032-08

自2003年三峡水库蓄水以来由库水位升降引发的地质灾害不断,如2003年的秭归县千将坪滑坡和马家沟滑坡、2005年开县井泉滑坡、2009年云阳县凉水井滑坡、2010年神女溪青石滑坡等,岸坡地质灾害频发,造成人员伤亡和重大经济损失,研究库水位升降引发的岸坡破坏问题对于三峡库区地质减灾具有迫切意义。

水库水位变化产生的岸坡破坏问题一直是岩土工程界的热点,国内外学者取得了大量研究成果,如Athani等人<sup>[1]</sup>认为在土质坝的设计中必须考虑边坡和渗流的双重稳定性,为土质坝设计提供安全保障;Ahmadi-Adli等人<sup>[2]</sup>进行了引水渠的数值模拟及现场试验,发现基质吸力对水土特征曲线特别敏感;Saada等人<sup>[3]</sup>通过动力有限元程序解决了浸水岩质边坡的稳定性问题,解释了由过饱和和孔隙水压力在边坡中引起的渗流效应;Vandamme等人<sup>[4]</sup>提出一种新的陡坡形迹颗粒元模型,该模型能够较好地考虑渗流引起的基质吸力和水力改变情况;Özer和Akay等人<sup>[5-6]</sup>研发了一种渗流引发的岸坡破坏修复技术,为岸坡修正提供了技术保证;Schwab等人<sup>[7]</sup>认为Hhyex滑坡突发性破坏的诱发因素是岸坡冲刷导致坡体后退;Riemer<sup>[8]</sup>分析得出浸泡作用、孔隙水压力改变引起的有效应力变化、渗流作用、外部侵蚀(波浪作用)以及内部侵蚀(管涌、淋溶)共4个因素是引起土质岸坡发生变形的主要原因;Saurer等人<sup>[9]</sup>认为水库蓄水浸润作用是一个复杂的水力学过程;杨春宝等人<sup>[10]</sup>通过粉土边坡离心模型试验得出,当坡内水位超过1/3坡高后,在坡内渗流作用下,粉土边坡呈现逐级侵蚀剥落、从坡脚向坡顶、由浅层向深层的多级滑坡失稳模型;于玉贞等人<sup>[11]</sup>认为Bishop和Fredlund非饱和土抗剪强度公式在强度折减法应用的本质是相同的;毛昶熙等人<sup>[12]</sup>系统叙述了渗流产生的破坏力“浮力”和“渗透力”,并讨论了渗流力之间相互转换关系及其在管涌滑坡中的应用;俞伯汀等人<sup>[13]</sup>对含碎石粘性土边坡物理模型试验表明,土体渗透系数在管道排泄系统中先减小、后增大,最后趋于稳定,为边坡渗流破坏提供理论依据;张文杰等人<sup>[14]</sup>考虑基质吸力对非饱和土抗剪强度及岸坡安全系数的贡献,认为土体的饱和渗透系数和土水特征曲线共同决定了水位升降过程中岸坡内孔隙水压力的大小和分布;高小育等人<sup>[15]</sup>根据Biot固结理论和孔隙水连续性原理,建立了应力场和渗流场耦合有限元方程,对边坡工程的防控具有一定的参考价值;徐东强等人<sup>[16]</sup>推导了透水边坡在地下水渗流条件下边坡稳定系数的解析表达式,采用非线性规划中的变尺度方法,得出最危险圆弧滑动面的

\* 收稿日期:2015-07-13 修回日期:2016-05-17 网络出版时间:2016-07-07 16:32

资助项目:重庆市重点自然科学基金项目(No. csct2013JJB30001);重庆交通大学研究生教育创新基金项目(No. CYS15185;No. 20150101)

作者简介:唐红梅,女,教授,博士,研究方向为岩土与地质工程,E-mail: hmtang6778@sina.com;通信作者:周云涛,E-mail:zhouyuntao\_13@sina.com

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20160707.1632.016.html>

位置。

本研究以2015年6月24日发生的重庆市巫山县大宁河江东寺岸坡垮塌事件为背景,从库水位升降、降雨角度探讨岸坡破坏机制,并采用PFC2D数值模拟再现岸坡破坏模式,以期三峡库区岸坡地质灾害防治提供参考资料。

## 1 巫山县江东寺岸坡概况

### 1.1 地理位置、地形地貌

重庆市巫山县西距重庆主城区480 km,东距宜昌市240 km,县城地理坐标为东经 $109^{\circ}50'55''\sim 109^{\circ}55'12''$ ,北纬 $31^{\circ}3'23''\sim 31^{\circ}6'17''$ ,是长江中上游重要的水运集散地之一、“黄金水道”上的重要水路交通枢纽。江东寺滑坡区地形地貌属中、浅切割褶皱侵蚀、剥蚀低山深丘地貌,总体地势呈北东高南西低。大宁河由北向南在滑坡区的南西侧汇入长江。岸坡坡度约 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ ,坡高约130~350 m。区内最大高程位于江东寺滑坡北东侧的山脊处,为490.1 m;最小高程位于江东寺滑坡南西侧的长江,目前的水位高程为143.31 m,最大高差为346.79 m。

### 1.2 地层岩性

岸坡区内分布的地层为第四系全新统人工填土( $Q_4^{ml}$ )、残坡积土层( $Q_4^{el+dl}$ ),基岩为三叠系下统嘉陵江组四段( $T_1j^4$ )灰岩,各岩土层特征如表1所示。

表1 江东寺岸坡区各土层特征

Tab.1 Characteristics of soil layers in Jiangdongsi bank slope

土层	特征
第四系全新统( $Q_4$ )	紫红色、浅黄色,杂填土,主要成分为泥岩、泥灰岩碎石及生活垃圾,主要分布于区内的公路外侧,为公路、房屋修建开挖弃土,无分选性,堆填时间一般2~3年,厚度一般3~10 m。
第三系更新统	二级阶地冲积土层( $Q_3^d$ ) (巫山黄土):粘土,浅黄色,呈硬塑状,属半胶结状态,钙质胶结,位于巫山县江东嘴江东村,根据收集的资料及本次调查,厚度约10~90 m。
三叠系下统嘉陵江组四段( $T_1j^4$ )	第四段( $T_1j^4$ ):岩性为浅灰色微晶-细晶灰岩为主,中厚层、块状结构,江东嘴一带呈碎块状。底部见有浅灰色薄层白云质灰岩,上部为灰色白云质灰岩及灰岩、角砾状灰岩。

### 1.3 地质构造

滑坡区地质构造总体上位于巫山向斜南翼的一个次级背斜北翼近核部,该次级背斜轴线走向与巫山向斜轴线近平行。江东寺滑坡位于次级背斜2的北西翼,岩层产状为 $320^{\circ}\sim 347^{\circ}/27^{\circ}\sim 40^{\circ}$ ,优势产状为 $330^{\circ}/35^{\circ}$ ,裂隙① $162^{\circ}\sim 238^{\circ}/53^{\circ}\sim 76^{\circ}$ ,优势产状为 $150^{\circ}/60^{\circ}$ ;间距0.3~1.2 m,延伸长1.5~3.4 m,局部呈张开状,张开宽1~8 mm,裂面较平整,局部粘土充填。裂隙② $76^{\circ}\sim 145^{\circ}/72^{\circ}\sim 89^{\circ}$ ,优势产状为 $88^{\circ}/80^{\circ}$ ;发育间距0.3~0.7 m,延伸长1.5~2.5 m,裂面较平整,多呈闭合状,局部呈张开状,宽2~5 mm。

次级背斜2的南东翼的岩层产状为 $160^{\circ}\sim 206^{\circ}/11^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ,优势产状为 $170^{\circ}/20^{\circ}$ ,裂隙① $282^{\circ}\sim 300^{\circ}/65^{\circ}\sim 75^{\circ}$ ,优势产状为 $290^{\circ}/70^{\circ}$ ;间距0.3~1.0 m,延伸长2~3.3 m,局部呈张开状,张开宽2~7 mm,裂面较平整,局部粘土充填。裂隙② $7^{\circ}\sim 40^{\circ}/80^{\circ}\sim 82^{\circ}$ ,优势产状为 $20^{\circ}/80^{\circ}$ ;发育间距0.3~0.6 m,延伸长1~2.5 m,裂面较平整,多呈闭合状,局部呈张开状,宽2~5 mm。

### 1.4 气象水文地质条件

滑坡区属亚热带季风性温湿气候,具气候温和、四季分明、雨量充沛等特点。区内降雨丰沛,多年平均降雨量1049.30 mm,年降雨量最大值1356 mm,月最大降雨量445.9 mm(1979年9月),多年平均最大日降雨量约139.2 mm。一年中降雨量分布不均,降雨主要分布在5~9月,占全年的68.8%;枯水期分布于1、2、12月,降雨量仅占全年的4.3%。

### 1.5 灾情简介

2015年6月24日18:40,重庆市巫山县龙门街道龙江村2社大宁河江东寺北岸(与长江交汇处约200 m,长江上游航道路程约170 km)突发大面积滑坡(图1)。滑坡引发巨大涌浪,总方量约 $2.3\times 10^5\text{ m}^3$ ,滑坡滑动速度快,一次性入江体量大,形成了5~6 m高的涌浪,造成停靠在江岸的1艘14 m长的海巡艇沉没,造成对岸(南岸)靠泊的21艘小型船舶(渔船、农用船为主)翻沉,另有21艘靠泊船舶断缆漂航。同时,涌浪现已造成在江边

游泳的 1 人失踪、1 人病危、3 人重伤、1 人轻伤, 11 处码头钢缆不同程度受损, 1 处 80 m<sup>2</sup> 的简易棚房垮塌。巫山县启动应急方案, 撤离了滑坡区及影响范围内 56 户共 196 人。

## 2 岸坡破坏机制

通过现场观测及理论分析得出巫山县江东寺岸坡垮塌原因有以下 3 点: 库水位上升浸泡软化作用、库水位下降渗流驱动作用以及降雨入渗劣化作用。

### 2.1 浸泡软化作用

大量研究成果表明<sup>[17-21]</sup>, 土质或岩质岸坡浸泡软化机制受多因素影响, 且软化机制相当复杂。

按岩土介质变化特性可将软化因素概化为物理、化学作用; 按岸坡变形机理可将软化因素分为材料力学效应、水力学效应以及水力机械作用。类土质土体因自身独特的结构和构造异于土体和岩体, 故浸泡软化机制受内外部因素的共同作用; 浸泡软化作用主要由物源条件、库水位上升以及类土质土体宏、微观变化决定<sup>[22]</sup>。

物源即类土质土体。类土质土体是由节理切割破碎岩体, 并经强烈风化作用形成的碎裂状岩体。岸坡形成是一个漫长的过程, 主要作用是河流切割槽谷。岸坡形成过程中会产生强大的卸荷作用, 卸荷岩体内部节理裂隙受卸荷应力作用不断断裂扩宽、变长, 衍生出大量分支裂隙或新生裂纹。而后受流水的物理、化学作用致使风化解体, 受到风化的岩体整体性逐渐遭到破坏, 呈碎裂状, 风化残积物充填其中, 即为类土质土体。类土质土体由风化的岩石块体与风化残积物两部分组成。风化岩石块体残留强度相对风化残积物较高, 两者相互充填粘结在一起, 但粘结强度不高。风化残积物结构疏松, 孔隙度大, 提供两者主要粘结作用。因此, 疏松的风化残积物与岩石块体-残积物粘结强度不高的类土质土体为岸坡的软化提供了必要的物源条件。

图 2 显示, 库水位抬升浸泡条件下, 岸坡坡脚区域会形成浸泡软化带, 此时类土质土体处于饱和或非饱和状态, 强度会有大幅度降低, 一般粘性土饱和粘聚力只有非饱和粘聚力力的 40%~60%。类土质土体强度主要由风化岩石块体强度、风化残积物强度以及两者的界面粘结和摩擦强度分担。浸泡条件下水体进入松散风化残积物孔隙内, 一方面类土质土体有效应力降低, 支撑结构强度减弱; 另一方面水对风化残积物颗粒具有润滑作用, 削弱颗粒之间的联结强度, 并促使风化残积物颗粒发生滑动、滚动以及重新排列。同时, 水体的进入导致岩石块体与残积物界面的粘结颗粒被带走, 粘结面积减少, 润滑作用显著。因此, 浸泡条件下风化残积物强度降低以及岩石块体与残积物界面强度降低是类土质土体软化的主要原因, 也是类土质土体的宏观表象。

为了解释类土质土体浸泡软化的微观变化, 对类土质土体做一定简化。类土质土体是由节理切割破碎岩体, 并经强烈风化作用形成的碎裂状岩体。碎裂状岩体表层经风化形成一层强度较低的包裹体, 因此可将碎裂状岩体(类土质土体)可等效为粒状土体。等效颗粒由两部分组成, 内核与外包裹体。内核强度较高, 受浸泡或外力作用强度变化不明显; 等效颗粒表层裹有包裹体, 包裹厚度与包裹体抗剪强度以及包裹体与类土质颗粒界面强度相关。

受到浸泡后, 类土质土体的物理力学特性发生复杂的变化。类土质等效颗粒间存在大量孔隙, 水化学溶液长期在孔隙中与包裹体表层矿物颗粒或晶体发生化学作用, 矿物分解并生成一些新的矿物。易溶矿物随水流失, 而难溶矿物或结晶矿物则残留原地, 使类土质土体等效颗粒间的孔隙增大, 类土质土体因此变得松散; 某些新生矿物具有高度的分散性, 这种作用逐渐降低了类土质土体的强度, 减弱了类土质土体抵抗破坏的能力<sup>[23]</sup>。



图 1 巫山县江东寺岸坡垮塌前后外貌

Fig. 1 physiognomy before and after Jiangdongsi bank slope collapsed in Wushan county

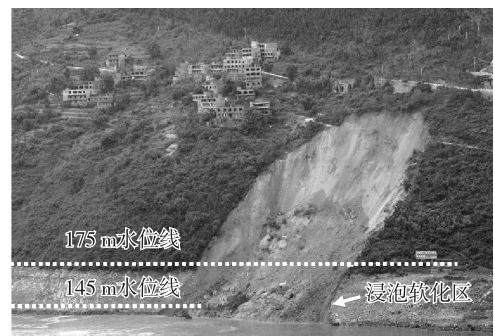


图 2 类土质岸坡浸泡软化区

Fig. 2 Softening zone of earthy-soil bank slope



### 2.2 渗流驱动力作用

2015 年 5 月初至 6 月底是三峡库水位降落时期;2015 年 6 月 24 日,巫山县江东寺发生岸坡垮塌。显然,库水位降落引起的渗流驱动力对岸坡破坏的作用至关重要。传递系数法是计算渗流驱动作用下岸坡稳定性常用方法之一。

将渗流驱动力作用于图 3 中的条块,在岸坡体中取第  $i$  块条块进行受力分析,条块受重力  $W_i$ 、浮力  $U_i$ 、渗流驱动力  $D_i$ 、 $i-1$  条块的不平衡推力  $P_{i-1}$ 、抵抗力  $T_i$  和正压力  $N_i$  作用,将各作用力投影到底滑面上,得到第  $i$  条块的平衡方程为:

$$P_i = (W_i \sin \alpha_i + D_i \cos \beta_i) - c_i l_i / F_s - (W_i \cos \alpha_i - D_i \sin \beta_i) \tan \varphi_i / F_s + F_s + P_{i-1} \psi_{i-1}, \quad (1)$$

不平衡系数为:

$$\psi_{i-1} = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \frac{\tan \varphi_i}{F_s} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i). \quad (2)$$

式中,  $P_i$  是第  $i$  条块的不平衡下滑力;  $\alpha_i$  是第  $i$  条块滑面与水平面的夹角;  $\alpha_{i-1}$  是第  $i-1$  条块滑面与水平面的夹角;  $\beta_i$  是第  $i$  个滑面与渗流驱动力的夹角;  $c_i$  是第  $i$  个条块粘聚力;  $l_i$  是第  $i$  条块的底面长度;  $\varphi_i$  是第  $i$  条块滑动摩擦角;  $\psi_{i-1}$  是第  $i$  条块的不平衡系数;  $F_s$  滑坡稳定系数。

将江东寺岸坡分条块按天然工况和库水位降落工况考虑,将表 2 中的参数代入(1)式和不平衡系数,计算得出天然工况下的稳定系数为 1.03,库水位降落工况下的稳定系数为 0.99,天然工况下江东寺岸坡处于欠稳定状态,而受库水位下降渗流驱动力的作用,致使该岸坡处于不稳定状态,造成岸坡发生突发性破坏。

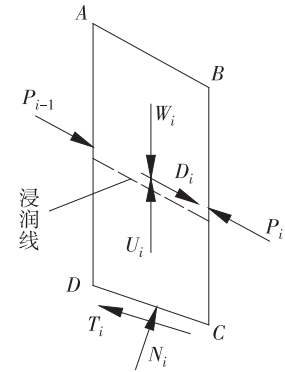


图 3 条块  $i$  力学模型

Fig. 3 Mechanical model of stick  $i$

表 2 江东寺岸坡物理力学参数

Tab. 2 Physical and mechanical parameters of Jiangdongsi bank slope

水力坡降	容重/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	饱和容重/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粘聚力/(kPa)	内摩擦角/( $^\circ$ )
0.64	18.50	19.50	11.20	35.00

### 2.3 降雨入渗作用

江东寺岸坡垮塌前期,巫山县持续多天暴雨,雨水强度大,造成岸坡变形加剧。如 2015 年 6 月 3 日持续暴雨 1 日,6 月 24 日 13:30 监测发现,岸坡处最大水平位移为 13 cm,垂直位移 39 cm,岸坡变形严重,最终导致 6 月 24 日 18:40 岸坡垮塌。降雨对岸坡变形破坏作用体现在以下 3 方面:

1) 改变滑体、滑面物理力学参数。降雨过程中,雨水入渗至滑坡体,改变滑坡体含水量,致使滑体重度增加和抗剪强度参数降低。江东寺滑坡表层为灰岩强风化坡积层,灰岩在演变历史中受水体的侵蚀,多形成溶穴、孔洞,并不断贯通成小的岩溶通道,这些原始的空隙裂隙至今残存在坡积层内。空隙形成的岩溶通道导致坡体孔隙率增加,坡体力学参数劣化严重,同时岩溶通道的存在为坡体的细小颗粒提供运输条件,逐渐向岩-土分界面和坡脚运移。运输到坡脚的细小颗粒随库水位被带走,但大部分会保留在岩-土分界面上,并逐渐累积形成力学弱面,即岸坡滑面。

2) 渗透力增加。雨水入渗滑体致使地下水位抬高,顺坡向的渗透力增大,与库水位下降形成的渗流驱动力不同的是雨水形成的渗透几乎是覆盖整个滑体,而库水位下降仅是改变 145~175 m 滑体浸润部分,但在计算方法上是相同的。考虑雨水入渗采用(1)式和(2)式计算得到暴雨工况下江东寺岸坡的稳定系数为 0.95,使岸坡处于不稳定状态;从稳定系数上看,降雨的作用比库水位下降的作用要强。

3) 地下水位上升浮托力增大。雨水入渗导致地下水位抬升的同时,浮托力在滑体内大幅度增加,提供一定向上的浮力,抵消一部分滑体自重,导致滑面抗力降低,加剧江东寺岸坡的危险性。

## 3 数值模拟分析

滑坡及岸坡的滑塌破坏数值模拟研究采用较多的是有限元法,该方法以连续介质作为前提假设,无法模拟出滑坡介质破坏的大位移、大变形情况。离散元软件 PFC2D/3D 由美国 ITASCA 公司研发,基本单元为颗粒,

颗粒之间可以有粘结作用也可以无粘结力存在,且颗粒的力学行为遵循刚度、接触和粘结 3 种本构模型;软件采用中心差分法在整个时间域内对颗粒运动方程进行积分运算,并保证了解的精度及稳定性。因此,用该软件模拟滑坡土体的非连续特性具有先天的优势,本研究采用二维离散元软件 PFC2D 建立了江东寺滑坡模型并进行了细致的模拟。

### 3.1 PFC2D 模型建立及参数选取

1) 墙体及颗粒集合体建立。江东寺滑坡地质结构由上覆第四系崩坡积层( $Q_4^{col}$ )和下伏第三系灰岩( $T_{1j}^4$ )两部分组成。由于崩坡积层的不均匀性以及各项异性,利用软件内置的 FISH 语言编程建立该滑坡的离散元模型,设定不同粒径组成的颗粒集合体能更好的体现被模拟对象的特性。颗粒集合体的粒径越小,模拟情况越真实;但受到计算机运行能力的影响,颗粒集合体的粒径不能无限小。因此,参照 Wang 等人<sup>[24]</sup>的方法,在滑坡主体部分采用小粒径组颗粒,其余部分采用大粒径组颗粒。这样既克服了计算机容量以及速度的限制,又满足了精度要求。由于此次模拟为江东寺滑坡在库水的作用下上覆崩坡积层( $Q_4^{col}$ )的滑动破坏,所以决定采用大粒径  $0.8\text{ m} < R < 1.2\text{ m}$  的颗粒集合体来模拟下伏灰岩( $T_{1j}^4$ ),小粒径  $0.3\text{ m} < R < 0.5\text{ m}$  的颗粒集合体来模拟上覆崩坡积层。

在  $341.7\text{ m} \times 500\text{ m}$  方形区域内按边界处建立刚性墙体,设置内侧为激活面,然后在该区域上部  $370 \sim 500\text{ m}$  内生成 15 000 个粒径  $0.8\text{ m} < R < 1.2\text{ m}$  的颗粒,设置重度后自由下落,达到平衡后按照岩土分界面删除上部多余颗粒,赋予剩余颗粒灰岩对应的细观参数(表 3)。再次平衡,此即模拟下伏基岩。运用相同方法,在  $370 \sim 500\text{ m}$  内生成 15 000 个粒径  $0.3\text{ m} < R < 0.5\text{ m}$  的颗粒,自由下落达到平衡后按照坡面边界删除多余颗粒,赋予剩余颗粒集合体崩坡积层对应细观参数(表 3),此部分模拟上覆崩坡积层。

表 3 江东寺岸坡岩土层细观参数

Tab. 3 Meso-structure parameters for rock and soil of Jiandongsi bank slope

名称	颗粒密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粒径大小/ m	颗粒摩擦 系数	法向刚度/ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	切向刚度/ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	法向粘结力/ N	切向粘结力/ N
崩坡积层(浸泡前)	1 940	0.3~0.5	2.0	$1 \times 10^8$	$1 \times 10^8$	$2 \times 10^2$	$2 \times 10^2$
崩坡积层(浸泡后)	2 100	0.3~0.5	1.3	$1 \times 10^8$	$1 \times 10^8$	$1.4 \times 10^2$	$1.4 \times 10^2$
灰岩(浸泡前)	2 700	0.8~1.5	2.0	$1 \times 10^9$	$1 \times 10^9$	$1 \times 10^6$	$1 \times 10^6$
灰岩(浸泡后)	2 750	0.8~1.5	1.8	$1 \times 10^9$	$1 \times 10^9$	$1 \times 10^6$	$1 \times 10^6$

2) 细观参数选取。离散元软件 PFC2D 无法直接赋予被模拟对象宏观力学参数,需要事先实施一系列双轴数值试验,通过改变数值试验中细观参数得出对应的不同宏观力学参数,并与被模拟对象的力学参数进行对比,反向标定出最能代表材料宏观力学性质的细观参数,然后应用于滑坡的整个模拟过程。

建立一组双轴数值试验,尺寸  $30\text{ m} \times 15\text{ m}$ (图 4),生成边界后,在内部填充对应粒径的颗粒集合体,赋予不同组细观参数,在一定围压下达到平衡。此时开启软件内置的伺服机制,保持围压恒定,匀速轴向加载,直至试样破坏,通过大量不同组细观参数的试算,得出滑坡各岩土层对应的细观参数,见表 3。

### 3.2 模拟结果分析

在滑坡模型坡脚、水面处、坡中以及坡顶处各布置一个测量圈,编号①~④,并在各测量圈中心位置设立监测小球,相应的编号为 1~4(图 5),监测记录模型破坏过程中各处应力应变情况与破坏运动速度。模型达到平衡后,将 175 m 水位以下滑坡各岩土层浸泡后对应的细观参数对应赋值,施加渗流力,滑坡在不平衡力作用下将发生破坏(图 6)。

1) 孔隙率变化规律。从图 7 中可以看出,1 号测量圈位置即坡脚处孔隙率在滑坡破坏初始阶段  $4.5 \times 10^6 \sim 6.1 \times 10^6$  时步内由 0.16 增大到 0.55,  $6.1 \times 10^6 \sim 8.6 \times 10^6$  时步内减小至 0.17,之后至  $1.27 \times 10^7$  时步内孔隙率始终在 0.17 附近波动。2 号测量圈(145 m 水位处)在滑坡破坏过程中孔隙率几乎不变,为 0.17。3 号测量圈即坡中处在前期阶段  $4.5 \times 10^6 \sim 8.2 \times 10^6$  时步内孔隙率不变,之后逐渐增大;最大值为 0.43,出现在  $1.22 \times 10^7$

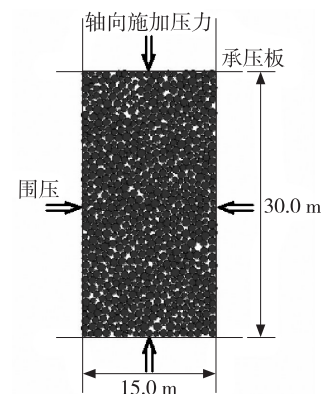


图 4 双轴数值模拟实验

Fig. 4 Numeric simulation of double-shaft test

时步。4号测量圈处于坡顶处,随着滑坡逐渐垮塌破坏,该处堆积层逐渐松动,大部分沿着岩土分界面向下滑动,使得该处孔隙率逐渐增大至 0.89,之后由于测量圈内仍有残留的少量堆积体,故该处孔隙率不会继续增大至 1.0,而是保持为 0.89 不再变化。

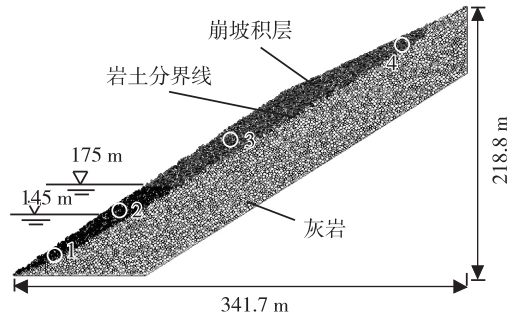


图 5 江东寺岸坡计算模型(15 223 个颗粒)

Fig. 5 Calculation model of Jiangdongsi bank slope (15 223 particles)

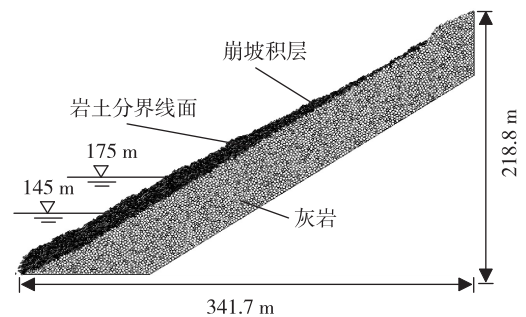


图 6 江东寺岸坡破坏后形态

Fig. 6 Jiangdongsi bank slope form after failure

2) 坡体各监测点破坏运动速度。从图 8 中可以得出,1号测量球在坡脚处,在  $4.7 \times 10^6 \sim 5.9 \times 10^6$  时步内,竖向速度先增大后减小,最大值达到  $0.35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,后减小为  $0.21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,随着坡体的逐渐垮塌,1号测量球进入河道中,被删除,之后无法监测到该小球的速度。2号球处于 145 m 水位处,该小球竖向速度在垮塌过程中呈现波动变化的情况,整体趋势为先增大后减小,最大值出现在  $5.3 \times 10^6$  时步处,为  $0.59 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,后逐渐波动减小,在  $1.27 \times 10^7$  时步处减小为  $0.015 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。3号小球处于坡体中部,在滑坡整  $4.7 \times 10^6 \sim 1.15 \times 10^7$  时步内竖向速度在  $0.17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  上下波动,之后开始逐渐减小,在  $1.27 \times 10^7$  时步时减小至  $0.011 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。4号小球位于坡顶,在整个破坏过程中竖向速度与 2 号小球相似,呈现波动变化的情况,整体趋势先增大后减小,最大值出现在  $5.3 \times 10^6$  时步处,为  $0.39 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在  $1.17 \times 10^7$  时步时,竖向速度逐渐减小,于  $1.27 \times 10^7$  时步处减小为  $0.005 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3) 各监测点竖向位移。当滑坡 175 m 以下区域各岩土层力学参数弱化,施加渗流力后,上覆坡积层会沿着岩土分界面向下滑动。从图 9 可以看出,各监测球竖向位置随着时步数的增加均逐渐减小,以左下角坡脚处顶点位置为 0 m 计,1号监测球竖向位置在  $4.7 \times 10^6 \sim 5.9 \times 10^6$  时步内从 18.3 m 逐渐减小为 0 m,之后 1号小球被删除无监测速度。2~4号监测球竖向位置变化情况基本一致,先逐步减小后趋于稳定。2号球在  $4.7 \times 10^6 \sim 1.04 \times 10^7$  时步内竖向位置从 59.5 m 减小至 10.97 m,在  $1.04 \times 10^7 \sim 1.27 \times 10^7$  时步内,监测球位置基本保持在 9.05 m 左右。3号球在  $4.7 \times 10^6 \sim 1.12 \times 10^7$  时步内竖向位置从 116.4 m 减小至 70.5 m,在  $1.12 \times 10^7 \sim 1.27 \times 10^7$  时步内逐渐保持 66.1 m 附近。4号球在  $4.7 \times 10^6 \sim 1.17 \times 10^7$  时步内竖向位置从 201.7 m 减小至 140.8 m,之后在  $1.17 \times 10^7 \sim 1.27 \times 10^7$  时步内保持在 133.2 m 左右。可以发现,2~4号监测球在滑坡发生滑动至稳定阶段,竖向位置均呈现先减小后稳定的趋势。其中,2号监测球竖向位置最先保持稳定,其次为 3号监测球,4号监测球竖向位置保持稳定最晚。

#### 4 结论与建议

本研究介绍了巫山县大宁河江东寺滑坡灾情,解译了江东寺滑坡破坏的库水位上升浸泡软化、库水位下降

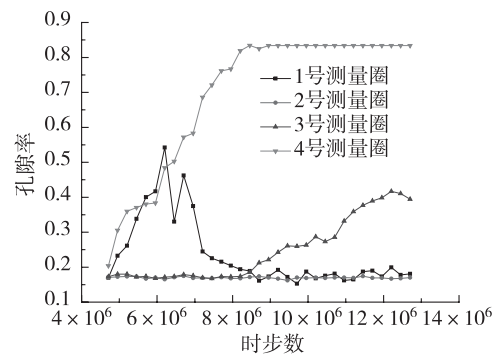


图 7 江东寺滑坡各监测点孔隙率变化

Fig. 7 Porosity variation of the monitoring points in Jiangdongsi bank slope

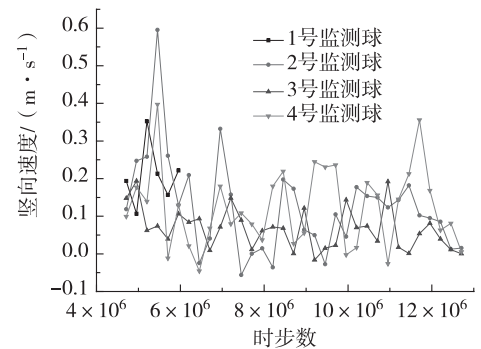


图 8 江东寺滑坡各监测点运动曲线

Fig. 8 Movement curves of the monitoring points in Jiangdongsi bank slope



渗流驱动力以及降雨入渗劣化 3 个诱发机制,其中库水位上升浸泡软化降低了滑体、滑面物理力学参数,在岸坡坡脚形成软化区;库水位下降渗流驱动力增加了顺坡向的下滑力;降雨入渗进一步降低滑体、滑面物理力学参数,增大渗透力,并对滑体产生浮托作用。3 种诱发机制的联合作用是导致江东寺滑坡的原因。

本研究采用 PFC2D 对江东寺岸坡进行数值模拟发现,库水位上升及渗流驱动力条件下坡脚孔隙率先增大再减小,后趋于一定值;145 m 处浸泡部分孔隙率不断上升并趋于一定值,表明库水位上升对类土质土体具有劣化作用;145 m 水位处的滑坡破坏运动速度最大,达  $0.59 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其次为坡脚,运动速度为  $0.35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,运动速度较快,岸坡破坏具有突发性。竖向位移监测发现,江东寺岸坡破坏稳定后坡脚竖向位移为 18.3 m,145 m 水位处运移 48.53 m,坡中运移 46 m,坡顶位移最大,达 60.9 m,与现场破坏位移吻合。

三峡库区岸坡灾害频发,灾害较为严重,影响长江航道运行,如 2009 年的巫山县龚家方岸坡垮塌,2011 年的巫山县神女溪青石岸坡垮塌,多为库水位升降和降雨联合作用诱发引起,建议三峡库区长江沿线在水位降落前期和雨季来临前进行一年一度的岸坡地质灾害排查工程,及时消除隐患。

#### 参考文献:

- [1] Athani S S, Shivamant, Solanki C H, et al. Seepage and stability analyses of earth dam using finite element method [J]. Aquatic Procedia, 2015(4): 876-883.
- [2] Ahmadi-Adli M, Toker N K, Huvaj N. Prediction of seepage and slope stability in a flume test and an experimental field case[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2014, 9:189-194.
- [3] Saada Z, Maghous S, Garnier D. Stability analysis of rock slopes subjected to seepage forces using the modified Hoek-Brown criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 55(55): 45-54.
- [4] Johan V, Zou Q P. Investigation of slope instability induced by seepage and erosion by a particle method[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 48(48): 9-20.
- [5] Özer A T, Akay O, Fox G A, et al. A new method for remediation of sandy slopes susceptible to seepage flow using EPS-block geofoam [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, 42(2): 166-180.
- [6] Akay O, Özer A T, Fox G A, et al. Behavior of sandy slopes remediated by EPS-block geofoam under seepage flow[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2013, 37: 81-98.
- [7] Schwab J W, Geertsema M, Blais-Stevens A. The Khyex river landslide of November 28, 2003, Prince Rupert British Columbia Canada[J]. Landslides, 2004, 1(3): 243-246.
- [8] Riemer W. Keynote lecture: landslides and reservoirs[C]//Landslides. Rotterdam: Balkema, 1995: 1973-2004.
- [9] Saurer E, Prager C, Marcher T. Soil slope stability of hydropower reservoirs-from geological site investigation to design of mitigation measures[C]//Proceedings of the 18th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering. Paris: [s. n.], 2013: 2249-2252.
- [10] 杨春宝, 朱斌, 孔令刚, 等. 水位变化诱发粉土边坡失稳离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7): 1261-1271. Yang C B, Zhu B, Kong L G, et al. Centrifugal model tests on failure of silty slopes induced by change of water level [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(7): 1261-1271.
- [11] 于玉贞, 林鸿州, 李荣建, 等. 非稳定渗流条件下非饱和土边坡稳定分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 2892-2998. Yu Y Z, Lin H C, Li R J, et al. Stability analysis of unsaturated soil slope under transient seepage flow state [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 2892-2998.
- [12] 毛昶熙, 段祥宝. 关于渗流的力及其应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1569-1574. Mao C X, Duan X B. On seepage forces and application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1569-1574.
- [13] 俞伯汀, 孙红月, 尚岳全. 含碎石粘性土边坡渗流系统的物理模拟试验[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 705-708. Yu B T, Sun H Y, Shang Y Q. Physical model simulation tests on seepage system in debris-containing clay slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6): 705-708.
- [14] 张文杰, 陈云敏, 凌道盛. 库岸边坡渗流及稳定性分析[J]. 水利学报, 2005, 36(12): 1510-1516. Zhang W J, Chen Y M, Ling D S. Seepage and stability analysis of bank slopes [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(12): 1510-1516.
- [15] 高小育, 廖红建, 丁春华. 渗流对土质边坡稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(1): 69-72. Gao X Y, Liao H J, Ding C H. Seepage effects on soil

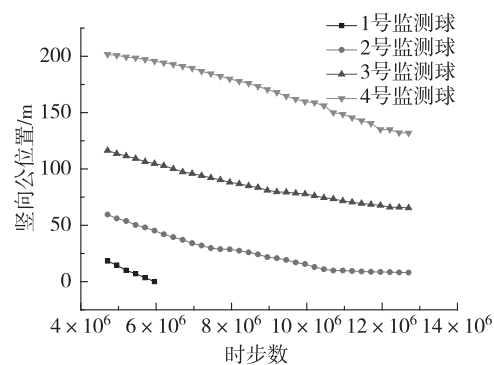


图 9 江东寺岸坡各监测点竖向位置

Fig. 9 Vertical locations of the monitoring points in Jiangdongsi bank slope

- slope stability[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(1): 69-72.
- [16] 徐东强, 姜芳祿, 赵晓艳, 等. 渗流作用下边坡最危险圆弧滑面的优化解[J]. *工程力学*, 2005, 22(5): 214-217.
- Xu D Q, Jiang F L, Zhao X Y, et al. Accurate solution of most dangerous circle slip surface in seepage soil and rock mass[J]. *Engineering Mechanics*, 2005, 22(5): 214-217.
- [17] Nakamura H. Mechanism of reservoir-induced landslides [C]//Proc 4th international conference and field workshop on landslides, Japan, 21-31 Aug 1985. Tokyo: Japan Landslide Society, 1985: 219-226.
- [18] 肖诗荣, 刘德富, 姜福兴, 等. 三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 Qianjiangping landslide in Three Gorges reservoir area[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(5): 1023-1030.
- [19] 罗先启, 肖诗荣. 三峡库区千将坪滑坡形成机制研究[R]. 宜昌: 三峡大学, 2007.
- Luo X Q, Xiao S R. Mechanism research on Qianjiangping landslide, Three Gorges reservoir area[R]. Yichang: China Three Gorges University, 2007.
- [20] 文宝萍. 千将坪滑坡滑带与滑坡牵引区软弱带发育特征及其变化规律综合研究[R]. 北京: 中国地质大学, 2007.
- Wen B P. Comprehensive study of slid zone and soft inter-lays of Qianjiangping landslide, Three Gorges reservoir area[R]. Beijing: China University of Geoscience, 2007.
- [21] 文宝萍, 申健, 谭建民. 水在千将坪滑坡中的作用机理[J]. *水文地质工程地质*, 2008(3): 12-18.
- Wen B P, Shen J, Tan J M. The influence of water on the occurrence of Qianjiangping landslide[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2008(3): 12-18.
- [22] 周云涛, 唐红梅, 陈洪凯. 水库蓄水土质岸坡拉剪断裂破坏机制研究[J]. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 2015, 32(5): 48-54.
- Zhou Y T, Tang H M, Chen H K. Study on tensile and shear failure mechanism of soil bank slope under reservoir filling[J]. *Journal of Chongqing Normal University: Natural Science*, 2015, 32(5): 48-54.
- [23] 李志清, 田奎生, 雷立平. 三峡库区万州区三期滑坡(搬迁避让)主要特征及其影响因素浅析[J]. *工程地质学报*, 2004, 12(s1): 175-180.
- Li Z Q, Tian K S, Lei L P. An initial analysis in Third-stage landslide hazards characteristic and influence factors in Wanzhou region of the Three Georges reservoir area [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2004, 12(s1): 175-180.
- [24] Wang C, Tannant D D, Lilly P A. Numerical analysis of the stability of heavily jointed rock slopes using PFC2D [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40(3): 415-424.

## Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

### Study on Failure Mechanism of Earthy-soil Bank Slope in the Three Gorges Reservoir: Taking Jiangdongsi Bank Slope in Wushan County as an Example

TANG Hongmei, ZHOU Yuntao, SHEN Na, YAN Zhaoqi, LIU Binyuan, CHEN Hongkai  
(Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** On June 24, 2015, Collapses occurred to Jiangdongsi bank slope located in Wushan County, Chongqing Municipality, which caused casualties and property losses and had a greater influence on the society. As regard the collapse of Jiangdongsi bank slope, this paper introduced the situation of this bank slope disaster, and interpreted three trigger mechanisms for Jiangdongsi bank slope failure, i. e. , soaking and softening with the reservoir filling, seepage driving force with the reservoir dropping and rainfall infiltration degradation. Research results show that the physical and mechanical parameters of slip mass and slip surface are reduced by the acting of soaking and softening with the reservoir filling, and the softening zone is formed in the foot of bank slope; the sliding force at the dip of slope is increased by seepage driving force with the reservoir dropping; the physical and mechanical parameters of slip mass and slip surface are further reduced by rainfall infiltration degradation, then the seepage force and the uplift force are increased. The joint action of three trigger mechanisms resulted in Jiangdongsi bank slope collapse. It is found through the numerical modeling of such bank slope by using PFC2D that reservoir filling had a degradation effect on soil-like mass; at the height of 145 m, the velocity of movement of bank slope failure was  $0.59 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  which is maximum; the bank slope failure often happened suddenly. The numerical simulation for the failure process was consistent with the field monitoring data.

**Key words:** failure mechanism; control; earthy-soil bank slope; the Three Gorges Reservoir