

# 水库蓄水对库岸边坡稳定性的影响

宋丹青<sup>1</sup>, 王 丰<sup>2</sup>, 梅明星<sup>3</sup>, 刘鹏飞<sup>4</sup>

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030; 2. 河南大学 生命科学学院, 河南 开封 475004; 3. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096; 4. 河南大学 黄河文明与可持续发展研究中心, 河南 开封 475004)

**摘 要:** 水库蓄水使库岸边坡稳定性变化较大, 以甘肃省九甸峡库区燕子坪(28#)滑坡为例, 采用 GPS 对滑坡的位移进行定期监测, 分析蓄水对库岸边坡稳定性的影响规律, 并采用边坡熵的方法进行验证. 分析结果表明: ①蓄水过程可分为 3 个阶段, 包括蓄水位 0~70 m, 70~100 m 和 100~130 m 3 个阶段, 且每个蓄水阶段对滑坡的影响程度不同. ②蓄水位 100~115 m 与 115~130 m 两个蓄水范围内滑坡的稳定性受影响程度不同. ③采用边坡熵的方法验证蓄水与库岸滑坡稳定性的关系是适用的, 对于其他类似研究可以提供借鉴作用.

**关键词:** 水库蓄水; 库岸滑坡; 稳定性; 九甸峡水库

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.201503040

## 0 引言

水库蓄水使地下水位和河流局部侵蚀基准面抬升, 造成库区沿岸的水文地质条件发生显著变化, 从而导致库岸边坡的稳定性也发生显著变化<sup>[1-2]</sup>. 水库蓄水初期李家峡水电站附近发生两起大型滑坡<sup>[3]</sup>; 湖北省秭归县千将坪因库水位上升导致滑坡灾害的发生<sup>[4]</sup>; Malpasset 薄拱坝在蓄水后的第 5 年, 左坝头岩体发生失稳; Vajont 水库由于蓄水造成了大型滑坡灾害的发生<sup>[5]</sup>. 因此, 水库蓄水与库岸边坡的稳定性关系密切. 在国内外, 大量学者对库水位升降影响库岸边坡稳定性的研究已取得大量优秀成果. 王明华等<sup>[6]</sup>分析了蓄水改变了临水边坡的安全系数和变形模式; 李晓等<sup>[7]</sup>分析了库区临水坡稳定性与库水位下降之间存在的规律; 张文杰等<sup>[8]</sup>模拟了库水位变化时滑体内的孔压场; 李绍军等<sup>[9]</sup>模拟了库水位升降条件下的滑坡变形破坏过程; 贾官伟等<sup>[10]</sup>对于库水位突降条件下库岸滑坡失稳模式和原因进行了研究. 笔者采用 GPS 对滑坡位移进行监测, 通过分析监测点的位移研究蓄水对库岸边坡的稳定性影响, 对于类似水利工程的建设具有重要借

鉴意义.

## 1 工程概况

### 1.1 燕子坪滑坡基本概况

九甸峡库区位于洮河中游的临潭、卓尼县的九甸峡峡口处, 库区面积约 916 km<sup>2</sup>, 为典型的河谷型水库, 总体地势西高东低, 沟壑纵横, 山势挺拔, 属西秦岭北缘山区. 区内年均气温约 7℃, 年均降水量 588.2 mm, 多集中在 7~9 月份. 28#滑坡位于燕子坪以南, 滑坡平面平均宽约 400 m, 形态呈长舌形, 分布高程 2 095~2 360 m, 上部以大块石为主, 中部块石和土体混杂, 下部以黄土类土为主. 滑体基座面上覆盖有松散堆积层, 厚约 30~73 m, 坡度局部较陡, 约为 30°~40°(图 1), 滑体平坦蓄水水层厚度为 10~35 m, 埋深 1~15 m. 滑体前缘发育有宽约为 100 m 的 I 级侵蚀堆积阶地, 滑体表面发育两条冲沟, 基座面较窄. 前初始水位 2 070 m, 正常水位坡在蓄水过程中发生多次局部失稳, 由于离主坝较近, 对库区主坝及下游危害严重.

### 1.2 滑坡现场监测

基于滑体各监测点的位移量的不同, 将该滑

收稿日期: 2015-03-11; 修订日期: 2015-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41401107)

作者简介: 宋丹青(1989—), 男, 河南郑州人, 博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究, E-mail: danqingsonglzu@163.com.

引用本文: 宋丹青, 王丰, 梅明星, 等. 水库蓄水对库岸边坡稳定性的影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 60-64.

坡分为 I、II<sub>1</sub>、II<sub>2</sub>、III 区 4 个区(图 1),采用北极星 9 600 GPS 对滑坡外部变形进行监测. 根据滑坡特点选择布设方案(包括 19 个监测点),且依据九甸峡公司滑坡外部变形监测报告<sup>[11]</sup>,各区的位移变化如图 2~图 5 所示.

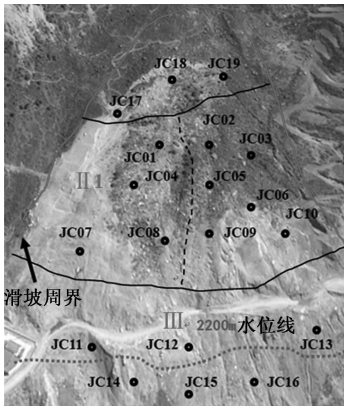


图 1 滑坡监测点布置及分区图

Fig.1 The monitoring plan and partition

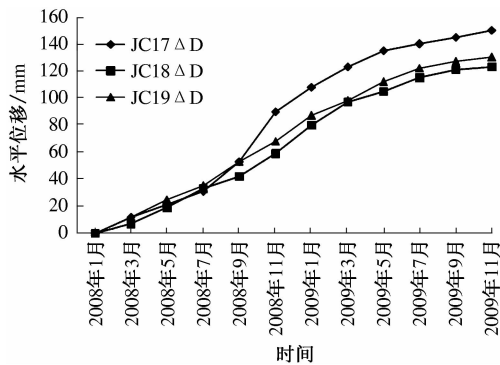


图 2 I 区监测位移

Fig.2 The monitoring displacement in I area

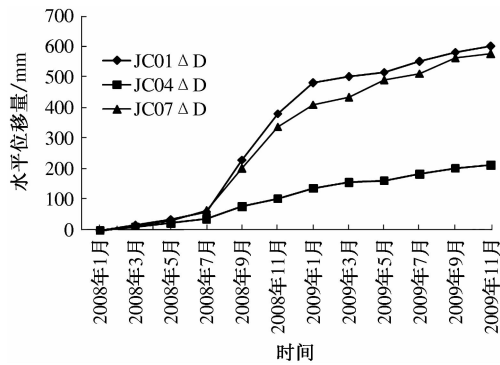


图 3 II<sub>1</sub> 区监测位移

Fig.3 The monitoring displacement in II<sub>1</sub> area

2 影响因素分析

库岸滑坡与水有密切关系的约占 90%,在影响库岸滑坡发生的众多因素中,水是最难定量研究、最活跃的因素<sup>[12]</sup>. 研究水库蓄水对库岸滑坡

的稳定性的影响,主要选取库水位和蓄水速率两个主要影响因素进行分析. 在蓄水后期(蓄水位 100 m 至正常蓄水位)库区沿岸的水文地质条件已趋于稳定,库岸边坡内的渗流场变化较小,正常运营阶段的库水位变化与蓄水后期相似,因此研究蓄水后期的库岸滑坡的稳定性具有重要意义.

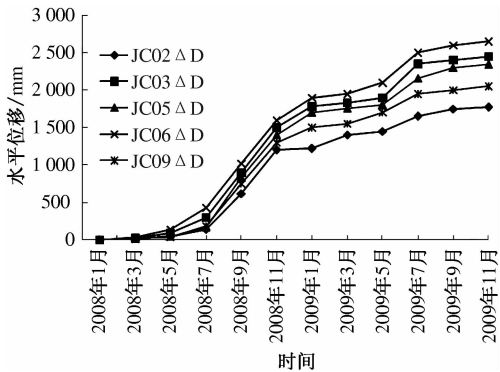


图 4 II<sub>2</sub> 区监测位移

Fig.4 The monitoring displacement in II<sub>2</sub> area

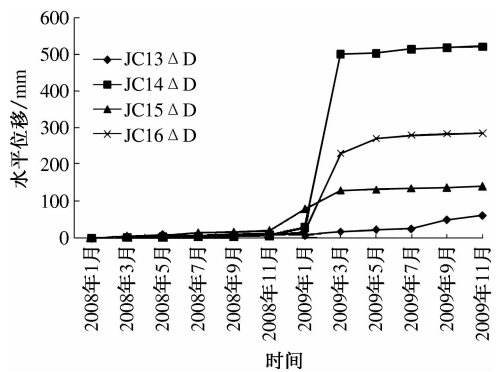


图 5 III 区监测位移

Fig.5 The monitoring displacement in III area

2.1 库水位变化的影响

以 I 区为例进行数据分析,由图 2 和图 6 可知:在蓄水位 0~70 m 阶段,JC17~JC19 最大水平位移量约为 40 mm,且随着蓄水位(图 2)的增加呈线性上升关系. 蓄水位 70~100 m 阶段,各监测点的位移增量约为 80 mm;蓄水位 100 m 至正常蓄水位阶段,位移增量约为 20 mm,其余各区均有相似规律. 由数据分析可知:蓄水至 70 m 前蓄水对该滑坡的稳定性影响很小;蓄水位 70~100 m 阶段,蓄水对该滑坡稳定性有较大的不利影响;蓄水位 100 m 后蓄水有利于该滑坡的稳定.

2.2 蓄水速率的影响

蓄水速率也是影响库岸边坡稳定性的重要因素之一,以 JC17~JC19 监测点的位移变化为例,研究蓄水速率对滑坡稳定性的影响. 根据实际监测资料<sup>[11]</sup>:JC17 的水平位移增量为 18 mm,水平

位移变化率为 0.6 mm/d;蓄水速率为 0.11 m/d 时,JC17 水平位移增量为 15 mm,水平位移变化率为 0.5 mm/d;蓄水速率为 0.04 m/d 时,JC17 水平位移增量为 8 mm,水平位移变化率为 0.27 mm/d;蓄水速率为 0.46 m/d 时,JC18 及 JC19 变化趋势与之相似.因此,蓄水速率对水平位移量有较大影响.

蓄水速率较小时,库水位上升较慢,滑体内的地下水位抬升也相对较慢,产生的孔隙水压力较小;蓄水速率较大时,由于库水位的抬升相对滞后,产生的超孔隙水压力,削弱滑坡的稳定性.蓄水速率保持在 0.35 m/d 范围内,对该滑坡的变形破坏影响较小;随着蓄水速率的升降,位移量及其变化率的大小也随之升降.蓄水速率的变化对该临水边坡的稳定性有着重要影响.蓄水速率越大,越不利于该滑坡的稳定;蓄水速率变化愈大,越不利于该滑坡的稳定,容易导致库岸边坡失稳.

2.3 蓄水后期库岸边坡稳定性的影响

由于 II<sub>2</sub> 区水平位移量变化最大,以该区为例具有实际意义.图 6 为九旬峡水库蓄水位随时间变化图,图 7 为 II<sub>2</sub> 区水平位移量随时间变化图.由图 6 和图 7 可知:2009 年 3 月~7 月,蓄水位在 100~115 m 内波动,其位移增量约为 500 mm;7 月至 12 月,蓄水位在 115~130 m 变化,其位移增量约为 200 mm.在蓄水位 100~115 m 阶段,库水位速率改变量越小,II<sub>2</sub> 区的位移增量较大,不利于库岸滑坡的稳定,库水位升降速率建议保持在 0.03 m/d 内;在蓄水位 115~130 m,九旬峡库水速率的变化较大,II<sub>2</sub> 区的位移增量较大,滑坡处于较为稳定状态;在蓄水位 115~130 m 范围内,库水位下降有利于 28#滑坡的稳定.根据实际监测资料显示<sup>[11]</sup>:I 区和 III 区位移很小,较为稳定;II 区的位移较大,其中 II<sub>2</sub> 区最大,很可能发生局部失稳.

3 边坡熵计算结果分析

3.1 滑坡稳定性计算模型及原理

安全熵是在关系矩阵和信息熵的基础上提出的,具有关系矩阵对敏感性及信息熵对紊乱度的量化的优点<sup>[13-14]</sup>.当边坡变形无序时,其熵值较高,安全系数较大,稳定性较好;反之边坡信息熵低,处于熵减状态. $X_i$  为主要影响边坡稳定性的因素,其中  $X_i$  的对应影响指数为  $P_i$ ,边坡信息熵为 SE,量化协调值为 SSE,其中  $P_i$ 、SE 和 SSE 的计算公式可从文献[13]中查出.

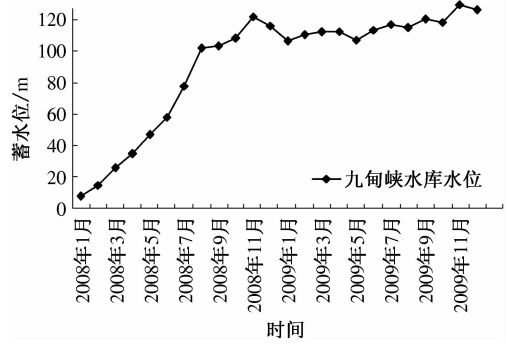


图 6 九旬峡水库蓄水位

Fig. 6 The water level of Jiudianxia Reservoir

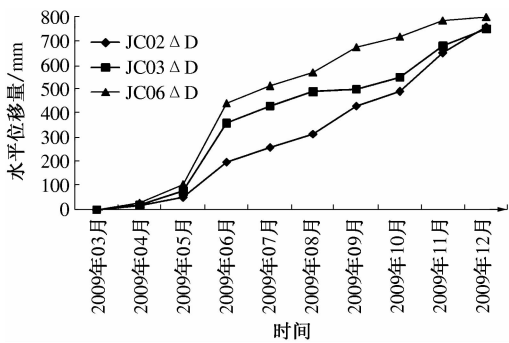


图 7 II<sub>2</sub> 区水平位移量

Fig. 7 The Horizontal displacement of II<sub>2</sub> area

采用边坡安全熵(SSE)方法,以 II<sub>1</sub> 区为例,计算蓄水位至 2 130 m 时的安全熵,通过其计算结果与数据分析结果进行对比,验证蓄水对库岸边坡稳定性的影响规律.选取燕子坪(28#)滑坡的边坡坡度、边坡高度、地下水、岩土体性质、施工、降雨和蓄水高程 7 个主要影响该滑坡稳定性的因素,并对 7 个主要影响因素进行赋值.采用方法定量评价边坡稳定性<sup>[15]</sup>.

3.2 不同蓄水位条件下稳定性分析

3.2.1 边坡熵计算

按照安全熵模型计算出蓄水位至 50 m 时的边坡熵(表 1),滑坡的变形表现为杂乱无序,因而蓄水初期整体稳定性较好,并采用同样方法计算在蓄水全过程中不同蓄水位时的边坡熵值.图 8 为不同水位下各区边坡熵值.由图 8 可知:I 区的边坡熵值整体上表现为杂乱无序,稳定性较好,边坡熵高.II<sub>1</sub> 区在蓄水位 70 m 之前变形杂乱无序,较为稳定.在蓄水位 70~100 m 阶段,滑坡变形朝着一个方向发展,已经开始变形有序,熵值在不断减小,这时边坡安全系数较小,稳定性差;在蓄水位 100~130 m 阶段,边坡熵值整体上杂乱无序,稳定性较好.II<sub>2</sub> 区蓄水位 70 m 之前阶段,变形无序,稳定性较好.在蓄水位 70~100 m 阶段处于

熵减状态,也即内部变形有序,稳定性较差,发生了局部滑动,符合实际勘测情况.在蓄水位 100 ~ 130 m 阶段,边坡熵值整体上杂乱无序,稳定性较好.在蓄水位 80 ~ 100 m 阶段,Ⅲ区处于熵减状态,朝着一个方向发生变形,但是位移量不大.

表 1 边坡熵值及稳定性分区

结果及 分级	边坡分区			
	I 区	Ⅱ <sub>1</sub> 区	Ⅱ <sub>2</sub> 区	Ⅲ区
边坡信息熵(SE)	0.987	0.967	0.964	0.979
安全熵(SSE)	0.870	0.670	0.640	0.790
边坡分级	很稳定	稳定	稳定	稳定

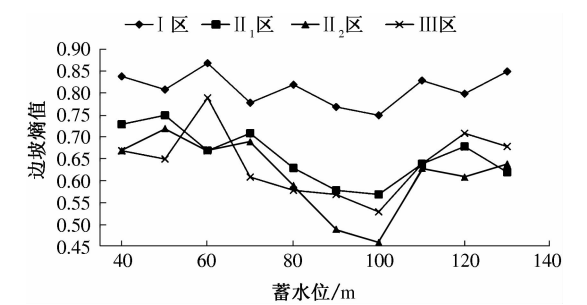


图 8 不同水位下各区边坡熵值

Fig.8 The slope entropy of each area under different water levels

3.2.2 滑坡的安全系数

采用极限平衡法计算出不同蓄水位工况下的滑坡安全系数,如表 2 所示<sup>[16]</sup>.蓄水前 28#滑坡的稳定性较好;蓄水位上升至 80 m 过程中,其安全系数下降约 17%,发生局部失稳现象;在蓄水位 80 m 至正常蓄水位阶段,滑体的安全系数逐渐增加.该现象说明安全系数最小发生在蓄水位 80 ~ 100 m 阶段.因此,采用边坡安全熵(SSE)方法的计算结果符合前文对各区水平位移监测数据的分析结果,这也与甘肃省水电勘测设计研究院的计算结果相吻合.

表 2 不同工况滑坡稳定性计算表

condition of landslide	
蓄水位	安全系数
蓄水前	1.05
50 m	0.99
80 m	0.87
100 m	0.96
130 m	1.42

4 结论

库岸边坡的稳定性由于水库蓄水发生了较大变化,通过分析可得到如下结论:

1)该滑坡的稳定性随着蓄水位抬升,呈现先下降后上升的趋势;在蓄水位 0 ~ 70 m 阶段稳定性减小,但是整体上较稳定;70 ~ 100 m 阶段稳定性最差,容易发生失稳;100 ~ 130 m 阶段,该滑坡稳定性增大,且逐渐趋于稳定.

2)蓄水位 100 ~ 115 m 库岸边坡的稳定性较差;蓄水位 115 ~ 130 m 范围内稳定性较好、建议蓄水完成后蓄水位保持在 115 ~ 130 m 范围内,有利于库岸边坡的稳定.

3)采用边坡安全熵的方法分析蓄水对库岸滑坡稳定性的影响的规律,验证了利用 GPS 平面位移变形监测得出的规律.除此之外,利用边坡熵的方法研究蓄水与库岸滑坡稳定性的关系是适用的,对于其他类似研究可以提供借鉴作用.

参考文献:

[1] PARONUZZI P, RIGO E, BOLLA A. Influence of filling-drawdown cycles of the vajont reservoir on Mt. Toc slope stability [J]. Geomorphology, 2013, 191: 75 - 93.

[2] 朱继良,黄润秋.某大型水电站水文站滑坡蓄水后的稳定性三维数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(8):1384 - 1389.

[3] 白俊光,吕生弟,韩建设.李家峡水电站坝前水库滑坡蓄水前后稳定性预测[J].岩土力学,2008,29(7):1723 - 1731.

[4] 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.

[5] 王兰生.意大利瓦依昂水库滑坡考察[J].中国地质灾害与防治学报,2007,18(3):145 - 148

[6] 王明华,晏鄂川.水库蓄水对库岸滑坡的影响研究[J].岩土力学,2007,28(12):2722 - 2725.

[7] 李晓,张年学,廖秋林,等.库水位涨落与降雨联合作用下滑坡地下水动力场分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(21):3714 - 3720.

[8] 张文杰,詹良通,凌道盛,等.水位升降对库区非饱和土质岸坡稳定性的影响[J].浙江大学学报(工学版),2006,40(8):1365 - 1370

[9] 李邵军,KNAPPELT J A,冯夏庭.库水位升降条件下边坡失稳离心模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(8):1586 - 1593.

[10] 贾官伟,詹良通,陈云敏.水位骤降对边坡稳定性影

- 响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1799-1803.
- [11] 甘肃省水利水电勘察设计研究院第一分院. 28#滑坡外部变形监测报告[R]. 兰州: 甘肃省水利水电勘察设计研究院第一分院, 2010.
- [12] 彭良泉, 王钊. 对边坡稳定性分析中危险水力学条件的研究[J]. 人民长江, 2003, 34(5): 39-41.
- [13] 程东幸, 刘大安. 基于安全熵的边坡稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 851-856.
- [14] 丁继新, 周圣华, 陈梦熊, 等. 基于多因素相互作用关系矩阵的边坡稳定性定量评价[J]. 工程勘察, 2006(7): 5-8.
- [15] HUDSON J A. Rock Engineering Systems: Theory and Practice [M]. Chichester: Ellis Horwood, 1992.
- [16] 甘肃省地质灾害防治工程勘察设计院. 洮河九甸峡水利枢纽灾害危险性评估报告[R]. 兰州: 甘肃省地质灾害防治工程勘察设计院, 2003.

## Study on Influence of Water Impounding on Reservoir Landslide

SONG Danqing<sup>1</sup>, WANG Feng<sup>2</sup>, MEI Mingxing<sup>3</sup>, LIU Pengfei<sup>4</sup>

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 2. School of Life Science, Henan University, Kaifeng 475004, China; 3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 4. The Yellow River Civilization and the Sustainable Development of Henan University Research Center, Henan University, Kaifeng 475004, China)

**Abstract:** The landslide stability is affected by the reservoir impoundment in a large degree, taking an example of Yanziping (28#) Landslide of Jiudianxia reservoir in Gansu province. The landslide displacement was monitored by using GPS regularly for analyzing the law of the landslide stability affected by the the impoundment, and the law is validated by using the method of slope entropy. The results show that: (1) the process of impoundment can be divided into three stages including the 0 ~ 1/2, 1/2 to 3/4 and 3/4 above the stage of the storage level, which is affected to different influence degrees; (2) the landslide stability is affected at different levels between the range of water level I (100 m ~ 115 m) and II (115 m ~ 130 m) in different degree; (3) it is suitable that the relationship between impoundment and the stability of reservoir bank landslide is validated by using the method of slope entropy with being provided by other similar studies.

**Key words:** water impounding; reservoir bank landslide; stability; Jiudianxia reservoir