DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2015.05.38

# 水库蓄水对库岸边坡稳定性的影响

宋丹青

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院,上海 200030)

摘 要:采用一种新型的监测方法(GPS),以甘肃省九甸峡水库燕子坪滑坡为例,通过对滑坡的监测位移进行分 析,定量化研究水库蓄水对库岸边坡稳定性的影响规律。研究结果表明:蓄水位 70~100m 阶段,蓄水对库岸边坡 稳定性是不利的,蓄水至一定高度后,滑坡体趋于稳定;低蓄水位阶段,滑坡的稳定性受蓄水影响较小;水库蓄水引 起的库岸失稳类型主要有3类:已有滑坡的复活滑动、形成新的库岸滑坡和库岸坍塌再造。

关键词:水库蓄水;库岸滑坡;变形特征;九甸峡库区

中图分类号:TV697.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2015)05-0192-05

# Influence of reservoir storage on stability of landslide

### **SONG Danqing**

(School of Ocean and Architecture Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Taking an example of Yanziping Landslide in Jiudian Gorge reservoir in Gansu Province, the paper applied a new kind of monitoring method (GPS) to analyze the law of influence of reservoir storage on landslide stability through the analysis of deformation monitoring. The results show that when the storage level is in the phase of 70 to 100 meters, the storage is unfavorable to the stability of reservoir landslide, but when the storage is in a certain height, the reservoir landslide will tend to stable; in low water level phase, the stability of landslide is less affected by reservoir storage; the main types of bank instability due to reservoir storage has three categories: resurrection sliding of preexisting landslide, new reservoir bank landslide and bank collapse.

Key words: reservoir storage; reservoir landslide; deformation characteristic; Jiudian Gorge reservoir

# 1 研究背景

水库蓄水过程中,由于库水位上升及周期性的 循环涨落,使地下水位和河流局部侵蚀基准面抬升, 造成沿岸的水文地质条件发生显著变化<sup>[1]</sup>,经常会 诱发库岸新老滑坡的产生或复活,这类受库水影响、 由库岸斜坡孕育的滑坡通常称为库岸滑坡<sup>[2]</sup>。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>[3]</sup>。库岸滑坡将会造成有效库容减小等不良 影响,严重时会导致溃坝,严重威胁下游居民的生命 和财产安全。1963 年意大利的 Vajont 滑坡,由于水 库蓄水导致下游死亡人数高达 2000 余人<sup>[4]</sup>;在水库 蓄水初期,李家峡水电站附近产生了两个大型滑坡, 严重威胁水电站及附近居民的生命和财产安全<sup>[5]</sup>。因此,在大型水利工程建设中,研究及防治库岸滑坡 已成为一项迫切解决的重大课题<sup>[6]</sup>。

目前,国内外学者采用多种手段针对库水位升 降对库岸边坡稳定性影响的研究已取得大量优秀成 果。彭浩等<sup>[7]</sup>采用有限元分析了不同水位下降速 率对滑坡渗流场的影响,并结合极限平衡法探讨水 位变动速率对滑坡稳定性的影响机理和规律;陶宏 亮等<sup>[8]</sup>采用 FLAC 数值模拟方法研究了库水位变化 条件下堆积体滑坡的变形特征及稳定性,分析了库 水位变化条件下滑坡内的应力应变情况;周永强 等<sup>[9]</sup>运用非饱和土渗流理论和抗剪强度理论,分析 了库水位不同升速和降速、降雨不同强度以及库水 位变化与降雨联合作用工况下滑坡的稳定性;赵代 鹏等<sup>[10]</sup>运用 Geo - studio 软件研究了库水位升降作 用对临水边坡稳定性的影响机制。临水边坡内的地 下水随着库水位的升降而发生变化<sup>[11]</sup>,导致斜坡岩 土体的地下水向水库排泄,引起动、静水压力迅速增 大,从而诱发边坡变形或发生滑坡<sup>[12]</sup>。因此,研究 不同库水位及蓄水速率条件下滑坡稳定性的变化规 律,对评价蓄水影响滑坡稳定性的规律具有重要作 用<sup>[13-15]</sup>。

目前,国内研究蓄水对库岸边坡稳定性的影响, 采用 GPS 对蓄水过程中滑坡的位移监测的文献相 对较少,尤其是在监测过程中获得了大量的有效数 据显得非常宝贵。以九甸峡库区燕子坪滑坡为例, 采用 GPS 对滑坡进行长期和实时监测<sup>[16]</sup>,通过分析 滑坡的蓄水过程中的位移变化规律,定量研究蓄水 对滑坡稳定性的影响,主要选取库水位和蓄水速率 两个主要影响因素。开展蓄水过程中库岸边坡稳定 性的研究,将会对大型水利工程的顺利建设具有重 要意义,并为其它工程提供重要借鉴作用。

# 2 滑坡位移监测

### 2.1 滑坡概况

九甸峡水库位于洮河中游的临潭、卓尼县的九 甸峡峡口处,库区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。 据九甸峡水温专用站实测资料及岷县气象站资 料<sup>[17]</sup>,区内年均气温约7°C,极端最低气温和极端 最高气温分别为 – 17.2°C和32.5°C,年均降水量 588.2 mm,多集中在7 – 9 月份,日最大降水量 61.25 mm,年蒸发量1192.2 mm。

燕子坪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2095~2360 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(图1)。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°, 地下水含水层厚度10~35m,埋深1~15m<sup>[18]</sup>。

滑坡东北侧为 C3 ~ P1 巨厚层灰岩,岩层产状 NW275°~295°NE∠30°~40°,断裂及卸荷裂隙发 育,岩性坚硬致密;滑坡体西南侧及下部岩层产状为 NE65°~82°NW∠50°~80°,以砂岩为主,岩性相对 软弱,相对高差 600m 左右,两套地层呈断层接触, 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,基座面较为平坦<sup>[18]</sup>。 滑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。



图1 燕子坪滑坡剖面图

### 2.2 燕子坪滑坡监测

GPS 边坡监测网主要由监测点和基准点组成,基 准点常埋设在稳固的基岩上,对于实际监测条件还需 要引起重视<sup>[19]</sup>。选取九甸峡水库蓄水全过程作为研 究时间段(2008 年 1 月至 2009 年 12 月),通过分析滑 坡外部变形,定量研究水库蓄水对库岸边坡变形特性 的影响。

基于滑体各监测点的位移量的不同,将该滑坡 分为四个区(I、III、II2 和Ⅲ区)。九甸峡水利枢纽 公司根据28 号滑坡动态,为保证水利枢纽建设的顺 利进行和工程建成后的安全运行,重新启动监测燕 子坪滑坡外部变形,根据滑坡特点选择包括19 个监 测点的布设方案<sup>[16]</sup>如图2所示,平面控制网设计和 观测按二等 GPS 网实施监测。根据实际位移监测 情况,I、III、II2 和Ⅲ区的位移变化如图3~6所示。



图 2 监测点布置及分区图



# 3 稳定性影响因素分析

### 3.1 库水位变化的影响

采用 GPS 对滑坡外部变形进行监测,根据滑坡 实际监测情况<sup>[16]</sup>,选取代表性监测点进行分析,计 算出不同蓄水位工况下各区的平均位移,结果如图 7 所示。



结合图8分析监测数据可知,蓄水位较低时,滑

坡的位移较小,整体上保持稳定;蓄水位至70m后 滑坡位移急剧增加,滑坡发生局部失稳;蓄水位至 100 m,滑体的位移保持相对稳定状态,这也与滑坡 的实际变形破坏情况相符。由于库水位的抬升增加 了滑体的浸水面积,滑带土浸水饱和后,削弱了滑面 上的抗剪强度,导致抗滑力降低。随着蓄水位的上 升,滑坡的稳定性表现为先缓降 - 急剧减小 - 稳定 的趋势。



#### 图 8 九甸峡水库蓄水位

### 3.2 蓄水速率的影响

九甸峡库区蓄水过程中,蓄水速率也是影响库岸 边坡稳定性的重要因素。根据实际蓄水情况<sup>[16]</sup>,计 算出蓄水阶段的蓄水速率的变化,结果如图9所示。



由图 3~图 6 可知,低蓄水阶段蓄水速率较小, 滑坡的位移也较小;蓄水位至 70 m 后,蓄水速率较 大,最大达到 0.70 m/d,滑坡的位移也随之剧烈增 加;蓄水位至 100 m 后,蓄水速率下降至约为 0.1 m/d,滑坡的位移也随之趋于稳定。因此,在初始蓄 水位至正常蓄水位过程中,蓄水速率越大对库岸滑 坡的稳定性越不利,应将蓄水速率控制在合理范围 内,建议控制在 0.3 m/d 以内。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,降削弱滑 坡的稳定性。

### 195

# 4 监测数据分析

## 4.1 变形特性影响

水库蓄水对库岸滑坡的变形有重大影响,以下 通过分析监测点的位移,研究蓄水对滑坡变形特性 及滑动模式的影响。

4.1.1 变形特征 据临洮气象站统计:洮河下游地 区干旱温和,上、中游地区潮湿寒冷,7-9月份的月 降雨量均在100 mm以上。由图3~6,2008年7-9 月份的监测点位移增量明显大于其余月份,例如 JC09位移突变量为550 mm,JC03约350 mm,JC13 约380 mm,明显大于其它各月的监测位移增量。该 滑坡的位移速率较大多在夏秋季节,主要是受雨季 降雨及地下水位抬升的影响,由于滑坡体裂缝分布 广泛,降雨通过裂隙迅速入渗到滑体内,使土体的容 重显著增加,进而使力学性质发生变化,造成抗滑力 矩增加,又由于抗滑力矩增量小于滑动力矩的增量, 从而降低28#滑坡的稳定性。因此,该滑坡的变形 特征具有明显的季节性变化规律。

4.1.2 蓄水初期变形影响 由图 3~图 8 可知,蓄 水位较低时,I 区、III 区和 III 区水平位移量较小,水 平位移增量均小于 50 mm;II2 区水平位移量很大, 水平位移量在 300 mm 以内变化。例如低水位阶 段,JC18 的水平位移量较小,最大水平位移量约为 60 mm。因此,在低水位的监测期,滑体的受蓄水影 响较小,整个滑坡变形遵循原有属性,滑坡相对稳 定。

4.1.3 蓄水阶段整体变形影响 2008 年8 月至 2009 年1月, 蓄水位70~100 m 阶段, 区内监测点的水平 位移量的变化率变化显著呈增大趋势。I区各监测点 水平位移量整体上表现为呈大幅度增加趋势。其它 3个区均有相似规律,监测点的水平位移量随着库水 位的上升,各区的位移表现急剧上升。Ⅲ区监测点位 移 2008 年 8 月后趋于稳定,其余各区均滞后于Ⅲ区, 这是由于Ⅲ区内监测点位于滑体前缘,该区受地下水 位抬升影响较大, JC14、JC15 和 JC16 位移量产生突 变。蓄水位达到100 m 后,3 个监测点基本上处于库 水位以下,该区地下水位逐渐趋于稳定,该区也逐渐 趋于稳定。低水位蓄水期蓄水初期滑体位移较小,蓄 水至70m后滑体位移剧增,蓄水后期滑体位移趋于 稳定。因此,水库蓄水对滑坡的影响较大,使滑坡的 稳定性先逐渐降低,再大幅度下降,最后趋于稳定,并 且滑坡变形速率具有较小-较大-较小的变形特性。

由勘察评价[17]可知:蓄水前燕子坪滑坡基本处

于稳定状态;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。施工围堰建成后, 回水高度 2 118 m,滑坡将处在极限稳定状态,复活后 破坏方式主要为滑塌,具有解体、分块特征。蓄水位 70 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 70~100 m 阶段;库水位上升至正常蓄水位阶段,由于滑坡体有 三分之二处于库水位以下,在库水位的作用下,该滑 坡不会发生整体性下滑较为稳定,与监测数据分析的 规律相吻合。

# 4.2 蓄水引起的滑坡灾害

根据勘察资料<sup>[17]</sup>:水库蓄水前,库区及近库区 范围内滑坡发育共有38处滑坡,而大部分滑坡位于 洮砚以上洮河两岸及两侧支沟内。蓄水后,大部分 滑坡在水库蓄水后位于库水位之下或远高于库水 位,受库水影响而产生滑动的可能性较小。但是,如 陈旗口南、燕子坪等15处滑坡,蓄水后滑坡前缘库 水位以下,后缘高于正常蓄水位,在库水位作用下产 生复活的可能性较大。

水库建成后,水库蓄水后产生多处滑塌、坍塌甚 至引起小规模的新滑坡等灾害发生,灾害发生的主 要地段主要分布于洮砚以上的河段,如洮砚、石门等 地。还会引发洮河两岸土质岸坡、软弱及软硬相间 的岩质岸坡的坍塌、滑塌,形成库岸坍塌再造现象, 塌岸主要集中于洮砚以上库尾段,主要分布于洮砚 以上的河段,如洮砚、石门等地。上述河段岩质斜坡 含有砂质页岩等软岩及软硬相间岩层,其风化强烈, 裂隙发育,力学强度低,岩体破碎,这既是已有滑坡 发育的基础,也是水库蓄水后容易产生新滑坡的区 域。经实地野外调查资料显示<sup>[17]</sup>:九甸峡库区库岸 边坡失稳类型主要有股滑坡复活滑动、新库岸滑坡 形成和库岸坍塌再造 3 种,调查结果如表 1。

表1 蓄水阶段滑坡监测位移

位置	塌岸宽/m	面积/万 m <sup>2</sup>	塌岸方量/万 m <sup>3</sup>
古马窝	97	1.98	3.96
下达勿	76	4.56	9.12
丁 尕	85	9.60	19.2
石门口	210	2.73	203.8
洮 砚	205	17.29	8.12
唐 旗	80	1.52	7.97
小湾	85	1.76	4.36
秋峪沟	54	1.23	3.9
寺下川	110	2.3	5.7
维新	75	4.5	8.4

# 5 结 语

(1) 蓄水位 70~100 m 阶段, 燕子坪滑坡稳定 性较小, 其稳定性受蓄水影响较大; 蓄水至一定高度 后, 滑坡体趋于稳定。

(2)随着蓄水速率的增加,库岸边坡的稳定性 表现为降低趋势,蓄水速率越大越不利于库岸边坡 的稳定性,建议九甸峡库区蓄水速率控制在0.3 m/d以内。

(3)水库蓄水引起的库岸失稳类型主要有3 类:已有滑坡的复活滑动、形成新的库岸滑坡和库岸 坍塌再造。

但是对于蓄水对滑坡稳定性的影响仍存在以下 问题值得进一步探讨:

蓄水过程中,应分几个阶段进行定量研究分析, 明确各阶段库岸滑坡的稳定性的大小,以便减弱蓄 水对库岸边坡稳定性的不利影响;蓄水对于近坝滑 坡稳定性的影响与距离主坝较远的滑坡影响程度是 否相同,其影响规律值得进一步探讨;蓄水速率对库 岸边坡稳定性的影响已经进行了探讨,但在各个蓄 水阶段速率的大小及其改变量对其稳定性的影响规 律仍值得进一步研究。

致谢:在论文的写作过程中,得到了兰州大学梁 收运教授和王志强教授级高级工程师的指导,同时 也得到了甘肃省九甸峡水利枢纽有限责任公司和甘 肃省水利水电勘测设计研究院的帮助,没有九甸峡 相关工作人员的支持就不可能有此文的完成,在此 表示衷心的感谢!

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 韩凌风,秦荣,吴实渊.库水位升降作用下库岸边坡渗流特征研究[J].工程勘察,2014(7):26-30.
- [3] 彭良泉,王钊.对边坡稳定性分析中危险水力条件的 研究[J].人民长江,2003,34(5):39-41.
- [4] Genevois R, Ghirotti M. The 1963 Vaiont landslide [J].
  Giornale di Geologia Applicata , 2005, 1: 41 52.
- [5] 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.

- [6] 王志旺,杨健,张保军,等.水库库岸滑坡稳定性研究
  [J].岩土力学,2004,25(11):1837-1840.
- [7] 彭浩,许模,郭健,等.水库水位下降速率对滑坡稳定
  性控制作用研究[J].人民黄河,2013,35(4):131 134.
- [8] 陶宏亮,范士凯,徐光黎,等. 库水位变化条件下堆积 体滑坡变形特征及稳定性分析[J].水电能源科学, 2014,32(5):96-100.
- [9] 周永强,盛谦. 库水位变化和降雨作用下付家坪子高 陡滑坡稳定性研究[J]. 长江科学院院报,2014,31
   (2):57-61+67.
- [10] 赵代鹏,王世梅,谈云志,等. 库水升降作用下浮托减 重型滑坡稳定性研究[J]. 岩土力学,2013,34(4): 1017-1024.
- [11] 吴琼,唐辉明,王亮清,等.库水位升降联合降雨作用 下库岸边坡中的浸润线研究[J].岩土力学,2009,30 (10): 3025-3031.
- [12] 夏敏,任光明,马鑫磊,等. 库水位涨落条件下滑坡地 下水渗流场动态特征[J]. 西南交通大学学报,2014, 49(3):399-405.
- YAN Zongling, WANG Junjie, Chai Hejun. Influence of water level fluctuation on phreatic line in silty soil model Slope [J]. Engineering Geology, 2010, 113 (1 4):90 98.
- [14] Jia G W, Zhan TLT, Chen YM, 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.
- [15] XIA Min, REN Guangming, MA Xinlei. Deformation and mechanism of landslide influenced by the effects of reservoir water and rainfall, Three Gorges, China [J]. Natural Hazards, 2013, 68(2):467-482.
- [16] 甘肃省水利水电勘察设计研究院第一分院.28 号滑 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.
- [17] 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.
- [18] 宋丹青.九甸峡燕子坪南滑坡形成机制及防治[J]. 甘肃水利水电技术,2014,50(5):14-20.
- [19] Zhu Wenyao, Wang Xiaoya, Cheng Zongyi, et al. Crustal motion of Chinese mainland monitored by GPS[J]. SCI-ENCE CHINA Earth Sciences, 2000, 43(4):394 - 400.