

# 溪洛渡库区典型滑坡堆积体变形与防灾探讨<sup>\*</sup>

刘仕勇, 李攀峰

(中国电建集团 成都勘测设计研究院有限公司, 成都 610072)

**摘 要:** 水库运行过程中, 库岸滑坡堆积体表现出不同的变形、破坏特征及其演化规律。根据溪洛渡库区滑坡堆积体的地质调查、变形监测资料, 选择了干海子、雨林二组2个滑坡堆积体作为典型实例, 分析了水库运行期2个滑坡堆积体的变形破坏现象及其演化特征, 探讨了不同滑坡堆积体的变形破坏特征及其与剖面形态之间的关系; 依据剖面形态, 将滑坡堆积体划分为躺椅型和座椅型两类, 进一步分析了躺椅型、座椅型滑坡堆积体的剖面形态特征、势能特点、变形破坏特征以及可能的灾害效应, 并提出了针对性的防灾减灾对策。

**关键词:** 库区; 滑坡堆积体; 变形; 防灾

中图分类号: TV221.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)05-1393-07

## Deformation Characteristics and Disaster Prevention of Typical Landslide Deposits in Xiluodu Reservoir Area

Liu Shiyong, Li Panfeng

(Chengdu Engineering Co. Ltd., PowerChina, Chengdu 610072, P.R.China)

**Abstract:** During reservoir operation, landslide deposits on reservoir banks show different deformation, failure characteristics and evolution rules. According to the geological survey and deformation monitoring data of the landslide deposits in Xiluodu Reservoir area, two deposits, with name of Ganhaizi and Yulinerzu, are selected as typical examples. The deformation and failure phenomena and their evolution characteristics of two landslide deposits in the operation period of the reservoir are analyzed, and the deformation and failure characteristics of the different sliding slope deposits and their sections are discussed. According to the shape of profile, the deposits are divided into reclining and seat types. The profile characteristics, potential energy characteristics, deformation and damage characteristics and possible disaster effects of the reclining landslides and seating landslide deposits are further analyzed, and the countermeasures for disaster prevention and reduction are proposed.

**Keywords:** reservoir area; landslide deposit; deformation; disaster prevention

## 0 引言

大型水库库区两岸往往分布有大型、甚至巨型滑坡堆积体, 如溪洛渡库区调查发现61处滑坡堆积体, 体积约15.68亿 $\text{m}^3$ ; 向家坝库区分布滑坡47个, 累积体积约2.27亿 $\text{m}^3$ 。水库运行后, 因库水位反复升降变化, 水库两岸分布的滑坡堆积体往往会发生变形甚至破坏, 典型的如三峡库区的千将坪

滑坡<sup>[1]</sup>、白水河滑坡<sup>[2]</sup>与青石滑坡<sup>[3]</sup>、宝珠寺库区的金洞滑坡<sup>[4]</sup>、隔河岩库区的茅坪滑坡<sup>[5]</sup>、水布垭的新塘滑坡<sup>[6]</sup>等。

对库区滑坡而言, 除近坝库段大型滑坡开展专门勘探和研究外, 其他部位的滑坡堆积体一般以地表测绘、调查为主, 研究深度相对有限。在此情况下, 如何利用地表测绘资料, 甄别水库运行期滑坡堆积体的变形破坏形式、评估可能造成的危害, 以

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2018-04-16(修改稿)

作者简介: 刘仕勇(1968-), 男, 四川成都人, 高工, 主要从事水利水电工程地质工作。E-mail: liushiyong@chidi.com.cn

便及时采取防灾避灾措施,就成为大型水库运行管理必须面对和解决的问题。

本文基于溪洛渡水库运行过程中滑坡堆积体变形破坏特征,划分为局部变形和整体变形两种类型,并分别以干海子、雨林二组滑坡为例,详细分析了其变形破坏特征,然后基于变形破坏特征分析评估其可能致灾效应,最后提出了防灾建议。通过对典型滑坡变形破坏特征分析,探讨滑坡堆积体的坡形特点、灾害效应以及防灾避灾对策,为大型水库安全运行提供技术支撑。

## 1 典型滑坡简介

溪洛渡水库蓄水前,经调查库区两岸分布 61 处滑坡堆积体,体积约  $15.68 \text{ 亿 m}^3$ 。2013 年 5 月 4 日导流底孔下闸蓄水,至 2015 年底,库区新增库岸变形点 60 处,其中规模较大的滑坡堆积体复活变形的有干海子滑坡、青杠坪滑坡、雨林二组滑坡、黄田坝滑坡等 21 处,多以滑坡堆积体局部或整体复活为主。水库运行过程中,不同滑坡堆积体的变形演化呈现出不同特点,如部分滑坡堆积体表现为整体稳定、前缘局部变形,如干海子滑坡、青杠坪滑坡等;部分滑坡堆积体则发生整体复活,如雨林二组

滑坡、阿拉吞滑坡、麻地湾滑坡等。

不同的变形失稳模式导致的灾害效应差异明显,堆积体大规模的快速失稳往往会产生灾难性的后果,如柘溪水库塘岩光滑坡、三峡库区千将坪滑坡<sup>[5]</sup>等。根据水库运行期大型滑坡堆积体变形演化特点,可以大致分为两大类,即前缘局部复活型、整体复活型。干海子为典型的前缘局部复活型滑坡堆积体,雨林二组则为典型的整体复活型。

### 1.1 干海子滑坡

干海子滑坡是溪洛渡水电站库区近坝库段的一个大型古滑坡,位于金沙江右岸云南省永善县务基镇白胜村,距坝河道里程  $13.4 \sim 14.3 \text{ km}$ 。

干海子滑坡体后缘为干海子平台,高程  $640 \sim 650 \text{ m}$ ,长约  $600 \text{ m}$ ,宽  $200 \sim 300 \text{ m}$ ,总体以  $3^\circ \sim 5^\circ$  倾角向坡内反倾。平台下游侧有大量唐家湾座滑体的阳新灰岩孤块石分布;平台前缘临江斜坡较陡,坡度总体为  $35^\circ \sim 40^\circ$ ,斜坡中部发育有“垮堵湾”次级滑坡。滑坡前缘堆积至金沙江右岸江边的漫滩上,高程约  $390 \sim 400 \text{ m}$  (如图 1)。滑坡体纵向长  $850 \text{ m}$ ,宽  $750 \text{ m}$ ,一般厚  $55.66 \sim 166.04 \text{ m}$ ,体积  $4760 \text{ 万 m}^3$ ,滑坡形成是的主滑方向为  $N25^\circ W$ 。

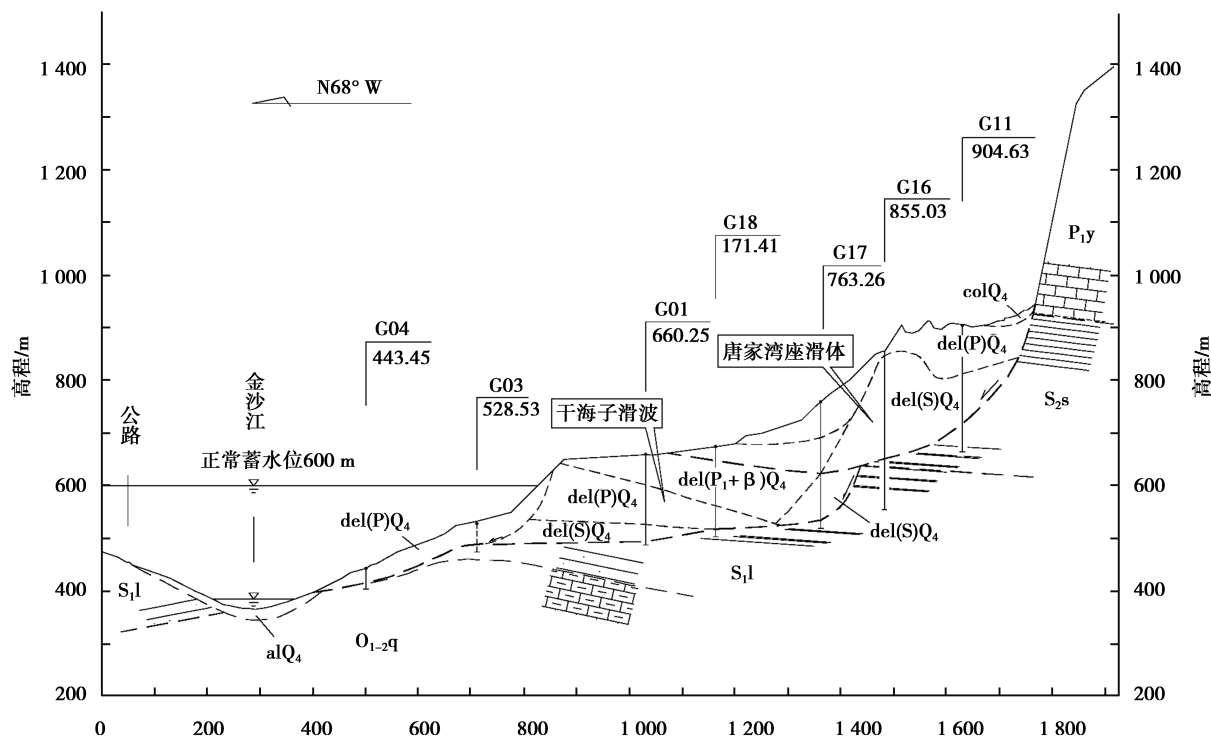


图 1 干海子滑坡工程地质剖面图

Fig. 1 Geological section of Ganhaizi landslide

干海子滑坡为志留系软弱地层控制的切层基岩滑坡,其上的唐家湾座落体堆积于后缘滑坡缓台上,前缘在金沙江水流作用下局部失稳形成垮堵湾。滑坡体典型剖面如图 1。滑坡堆积体为基岩解体后形成的块碎石层。该滑坡滑带较平缓,倾坡外,490 m 高程以上倾角  $5^{\circ} \sim 8^{\circ}$ ,长约 650 m;490 m 高程以下倾角  $17^{\circ} \sim 21^{\circ}$ 。滑带厚约 0.5~2.30 m,由角砾、岩屑夹泥组成,原岩为志留系的泥页岩;下伏滑床基岩为志留系下统龙马溪组的泥页岩及粉砂岩。

## 1.2 雨林二组滑坡

雨林二组滑坡堆积体位于金沙江右岸,距坝河道里程 38.7~39.1 km。

滑坡堆积体组成物质的原岩主要为志留系泥页岩,后缘高程 790 m,前缘高程约 500 m。水库蓄水前金沙江水位约 410 m,在天然状态下,滑坡堆积体基本稳定,未见变形迹象。溪洛渡水库水位抬升后,堆积体前缘部分土体及滑带处于库水位以下,受水的浸泡影响,土体强度指标降低,加之堆积体前缘坡度较陡,在库水作用下,堆积体前缘变形塌滑,进而诱发了滑坡堆积体的整体复活变形。

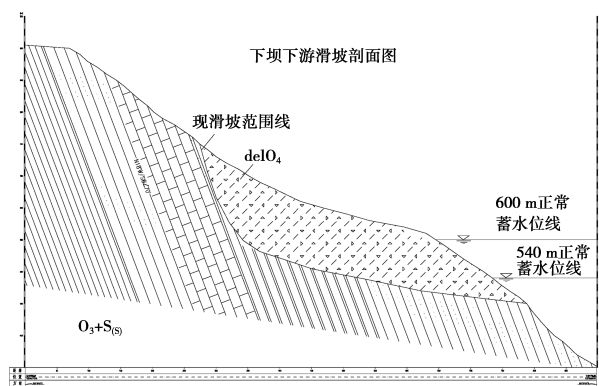


图 2 雨林二组滑坡典型剖面图

Fig. 2 Geological section of Yulinerzu landslide

## 2 典型滑坡变形特征

水库运行过程中,伴随着库水位升降,库岸不同类型滑坡堆积体表现出不同的变形特点。其中

干海子滑坡表现出典型的前缘局部变形破坏特点,雨林二组滑坡堆积体则变现为整体变形、前缘垮塌。

### 2.1 干海子滑坡

水库运行过程中,干海子滑坡堆积体前缘的垮堵湾临江部位发生局部垮塌。随着库水位变化,垮塌范围有所扩展,但总体范围较小。



图 3 前缘垮塌迹象

Fig. 3 Collapse signs in front part of Ganhaizi landslide

伴随着垮堵湾垮塌的同时,干海子 650 m 高程缓台前缘靠近垮堵湾附近(距离 30~50 m)出现拉裂缝,且有所扩展(如图 4),最终裂缝长度达 250~270 m;裂缝展布与前缘垮堵湾临空方向一致,大致平行金沙江。不同阶段裂缝长度有所延伸,宽度则无显著增大,1<sup>#</sup>裂缝宽度一般 25~30 cm,2<sup>#</sup>裂缝宽度约 13~15 cm。

在干海子滑坡体的重点部位布置了 10 个外观变形观测墩,水库 580 m 蓄水期间,为加强对滑坡体前缘变形情况的监测,增加了 3 个外观变形观测墩(如图 3)。监测发现:前缘变形明显大于中后部——滑坡体前缘“垮堵湾”附近的累计位移量明显大于滑坡体主体部位、后缘;前缘变形与水库运行密切相关——前缘位移量在库水位变化(上升或下降)期间的增量较其余时段大,位移量变化与水位变化相关性较明显;中后部位移量变化与水位变化之间的相关性不明显(如图 5);前缘部位,在蓄水初期以及初次水位变化期间往往会发生较大变形;前缘点蓄水初期的变形量较大,占变形量的 1/3 左右。

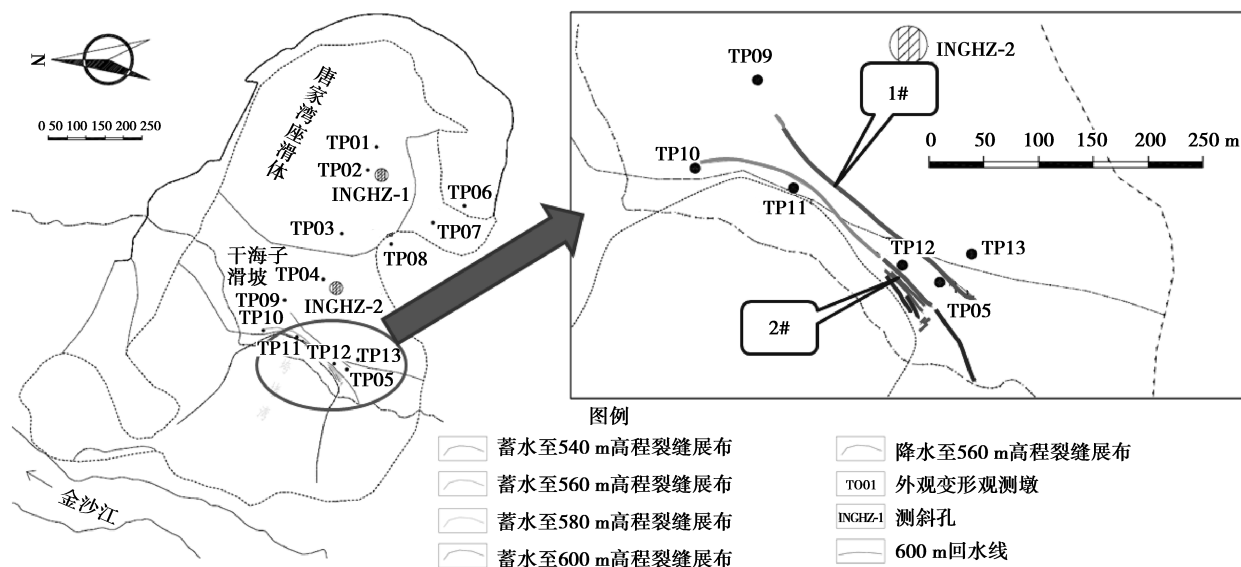


图4 运行过程中滑坡裂缝分布及扩展图

Fig. 4 Distribution and expansion of cracks during operation

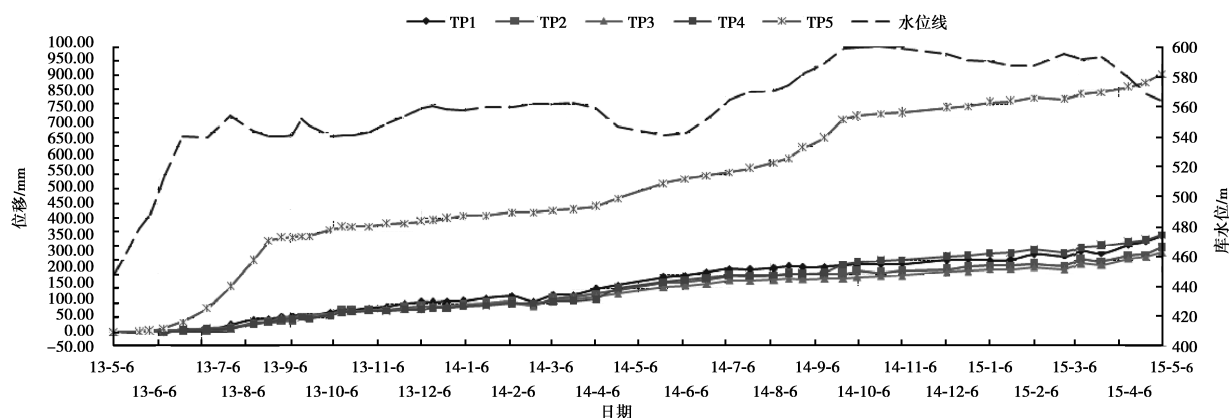


图5 干海子滑坡地表位移监测图

Fig. 5 Displacement monitoring curves of Ganhaizi landslide

## 2.2 雨林二组滑坡

水库蓄水后,雨林二组滑坡堆积体发生了整体复活。滑坡堆积体自2013年6月19日发现明显变形迹象,至6月26日后缘拉裂宽度一般30~60 cm,最大约1.2 m,深度在5 m以上,错台高度一般20~50 cm,最大超过1 m,多处出现二次垮塌;上游边界为一土质冲沟,切割深度3~5 m,下游边界沿着基覆界线附近延伸至江面。坡体上土体和块碎石扰动痕迹明显,后缘和前缘次级裂缝较多,后缘部位次级裂缝长度一般20~50 m,宽度5~20 cm,局部有5~10 cm的错台,前缘次级裂缝相对较小,长10~20 m,宽0.5~3.0 cm,其中临江部位已出现数处垮塌。滑坡面貌及变形特征如图6。



图6 雨林二组滑坡变形与垮塌照片

Fig. 6 Deformation and collapse signs of Yulinerzu landslide

根据变形监测曲线(图7)可知,水库运行期滑坡体向河对岸水平位移达10~13.5 m,且表现出这样的变形规律:①除蓄水初期,不同测点变形速率有所差异,导致滑坡解体外,2014年6月以来,测



点呈同步变形(变形曲线平行);②曲线呈明显的台阶状,主要变形集中在突变的台阶部位,对应着库水位下降时段;③(第 2 次至高程 600 m 降至高程 540 m 的累积变形明显小于第 1 次。

根据岸坡宏观变形迹象、监测资料分析:蓄水初期(第 1 个阶跃期),滑坡体已发生整体失稳(变

形边界完备、拉裂明显);平稳段(2014 年 6 月~2015 年 4 月),岸坡变形几乎停滞,变形速率多在 1 mm/d 左右;后续变形也呈现出类似特点。说明岸坡库水作用下,呈现出变形快速启动、制动相交替的响应特点。

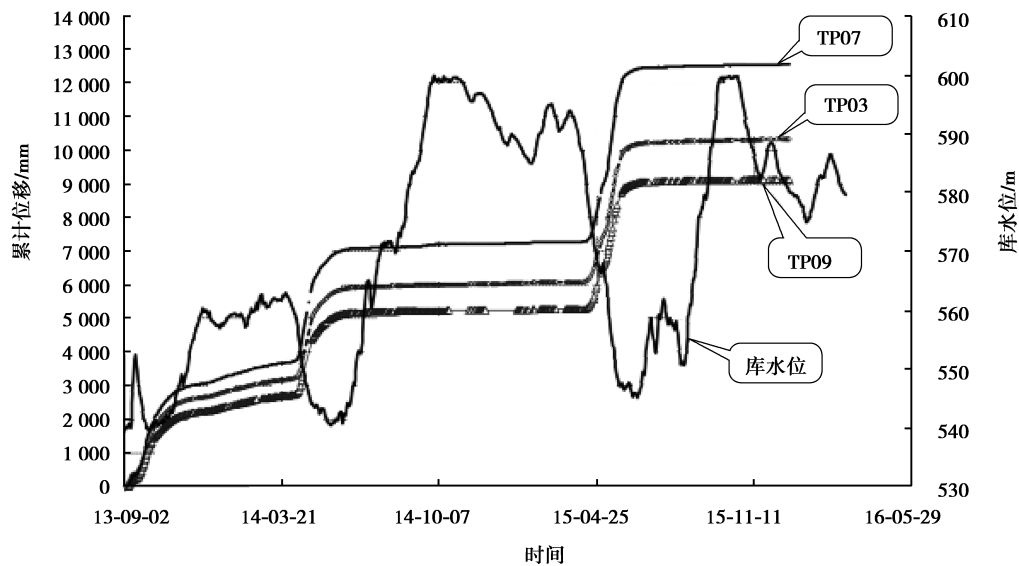


图 7 雨林二组滑坡地表位移监测图

Fig. 7 Displacement monitoring curves of Yulinerzu landslide

3 典型滑坡的剖面形态

在势能驱动下,滑坡发生失稳破坏,形成滑坡堆积体。滑坡堆积体形态不同,所具有的势能也有所差异,因而在水库运行过程中就会表现出不同的变形破坏特征。

根据两个典型滑坡剖面图可获得其主要形态数据,如表 1。

表 1 滑坡堆积体主要形态参数表

Table 1 Basic parameters of two landslides				
名称	长度 /m	平均 厚度/m	前后缘 高差/m	底滑面 倾角/(°)
干海子	576	165	176	5~8
雨林二组	277	94	140	10

干海子滑坡堆积体,前后缘高差与平均厚度之比接近 1.07,前后缘高差与堆积体长度之比约为

0.31;雨林二组滑坡堆积体前后缘高差与平均厚度之比为 1.49,前后缘高差与堆积体长度之比约为 0.51。干海子滑坡堆积体的长度大、底滑面倾角缓,而雨林二组堆积体的滑带长度相对较小、且滑面倾角相对较陡。

综合图 1、图 2 和表 1 资料可将滑坡堆积体剖面形态分为 2 种类型,即“躺椅型”和“座椅型”。

躺椅型——干海子滑坡堆积体,具有滑面缓、长度大、前后缘高差与平均厚度接近、远小于堆积体长度等特点,反映出坡体的整体势能较低,在水库运行中,不易于发生整体复活、大变形,多以前缘较陡部位的牵引式局部垮塌为主。

座椅型——雨林二组滑坡堆积体,滑面较陡、长度相对较短、前后缘高差大于平均厚度且接近或大于堆积体长度的 1/2,反映出坡体(尤其是后缘部位)的势能较高,因而在水库运行中,因后缘势能较大易于发生整体的推移式复活、大变形。

## 4 防灾对策探讨

躺椅型滑坡堆积体,由于后缘势能低,水库运行中多以前缘较陡部位的局部垮塌、塌岸为主,整体变形失稳的可能性较低。座椅型滑坡,则因后缘势能较大,在库水位悬浮减重、动水压力等作用下,易发生整体式复活变形,且在库水位升降期反复启动,累积位移往往较大;在后缘高势能部位推动下,堆积体整体向前位移,后缘随之降低,势能消减,在库水位反复升降下,堆积体反复启动、制动,后缘势能不断减小,逐渐演化为躺椅型并停止整体变形;且随着库水位反复升降,后缘部分势能不断降低,滑坡堆积体整体变形速率将逐渐降低(三峡库区白水河滑坡、宝珠寺库区金洞滑坡等均表现出类似规律)。

躺椅型滑坡堆积体防灾研究的主要范围应集中在前缘潜在垮塌部位(该部位在水库运行过程中可能发生扩展,但通过现场调查可方便地圈定出),灾变的主要形式多为塌岸或垮塌,潜在影响对象主要为垮塌部位的耕地、涌浪范围内的居民、水上交通等。可通过地表裂缝扩展情况对垮塌的范围及危险性进行评估,风险等级高是可及时发出预警,避免造成人员财产损失;对影响特别重大的滑坡堆积体,可开展更为系统的变形监测预警研究<sup>[7-8]</sup>。

座椅型滑坡堆积体的防灾研究的范围则为整个滑坡堆积体;一旦判定为座椅型滑坡,在水库蓄水前应及时将坡体上的居民搬迁,并采取警戒措施;同时应注意因后缘推挤导致的前缘垮塌产生涌浪的可能性。水库蓄水初期,座椅型滑坡堆积体的变形最为显著,以后随着库水位反复升降,变形速率会有所降低,因此,应特别重视第一次水位上升至正常蓄水位以及消落至汛限水位期间,堆积体的变形及前缘垮塌可能造成灾害效应,可通过巡查、监测等手段及时掌握堆积体变形动态,及时作为预警预报,提出防灾避灾建议。

## 5 结语

通过对溪洛渡库区典型滑坡堆积体的宏观变形迹象、监测资料分析,将滑坡堆积体分为“躺椅

型”和“座椅型”,进一步分析了躺椅型、座椅型滑坡堆积体的剖面形态特征、势能特点、变形破坏特征以及可能的灾害效应及防灾减灾对策,通过上述分析,得到以下结论:

(1)躺椅型滑坡堆积体的滑面缓、长度大,前后缘高差与平均厚度接近且远小于堆积体长度;而座椅型滑坡堆积体的滑坡较陡、长度较短,前后缘高差大于平均厚度且接近或大于堆积体长度的1/2。

(2)躺椅型滑坡堆积体的势能相对较低,水库运行期一般不会发生整体大变形或失稳,但前缘较陡的临水部位会发生局部垮塌;座椅型滑坡堆积体对剪出口而言,后缘高差大、势能大,水库运行期已发生整体变形,且变形呈明显的加速、制动相间的特点,变形曲线呈台阶性。

(3)躺椅型滑坡堆积体的可能产生灾变的主要范围集中在前缘较陡的临水部位,包括局部垮塌引起的直接灾害与垮塌涌浪引起的次生灾害,可根据潜在滑塌部位的宏观地表裂缝形态及闭合程度做出预警预报,并及时采取避灾措施;座椅型滑坡堆积体的灾变形式为整体的突发大变形和前缘被快速推出垮塌,坡体大变形会对其上坡体上的建筑物设施、人员、牲畜等造成灾害影响,前缘垮塌涌浪则可能对水上交通等产生影响,考虑到躺椅型滑坡堆积体的影响较大因而建议在蓄水前作好其上人员搬迁等避灾措施。

(4)监测资料反映出,库水位第一个上升、下降时段,滑坡堆积体(特别是座椅型)变形最大,往后随着库水位升降周期增加,滑坡堆积体的变形呈现出明显减速的特点,因此,在水库库岸安全管理工作中,要尤其重视库水位第1次上升至正常蓄水位以及消落至汛限水位这一时段内库岸堆积体的动态演化特征,加强巡视巡查,结合地表宏观变形迹象、监测资料(重点滑坡堆积体)开展致灾风险评估,及时采取合理的防灾避灾对策,以减轻因滑坡堆积体快速大变形或垮塌造成的生命或财产损失。

考虑到水库区地质工作深度、监测点不可能普遍布设等现实情况,本文的研究成果具有重要实际意义的,尤其是在大型水库蓄水前的灾害识别、蓄

水初期的筛选等工作中可发挥重要作用,对工作量不足的中小型水库运行管理工作方面,也具有重要指导意义。

同时还需要指出的是,上述成果是在溪洛渡库区典型滑坡堆积体资料分析基础上得出,在案例代表性方面有所不足;上述成果是基于宏观规律或表象特征总结出来的,缺少力学机制、演化机理方面的分析。此外,库岸滑坡堆积体的变形失稳过程,尚与地质条件、水库运行<sup>[9-10]</sup>特点有关。今后将针对上述不足开展系统研究,得到更为全面、合理的研究成果,为大型水库运行期安全管理提供技术支撑。

#### 参考文献(References)

- [1] 肖诗荣,刘德富,胡志宇. 世界三大典型顺层岩质滑坡工程地质比较研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(1): 52-59. (Xiao Shirong, Liu Defu, Hu Zhiyu. Engineering geology study of three actual dip bedding rockslides associated with reservoir in the world [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(1): 52-59. (in Chinese))
- [2] 卢书强,易庆林,易武,等. 库水下降作用下滑坡动态变形机理分析——以三峡库区白水河滑坡为例[J]. 工程地质学报, 2014, 22(5): 869-875. (Lu Shuqiang, Yi Qinglin, Yi Wu, et al. Study on dynamic deformation mechanism of landslide in drawdown of reservoir water level-take Baishuihe landslide in Three Gorges reservoir area for example [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(5): 869-875. (in Chinese))
- [3] 赖勇,方俊,祝田野,等. 巫山青石滑坡复活机制研究与稳定性评价[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(4): 1039-1046. (Lai Yong, Fang Jun, Zhu Tianye, et al. The Wushan Qingshi landslide resurrection mechanism and stability evaluation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(4): 1039-1046. (in Chinese))
- [4] 邓荣贵,付小敏,邓林. 四川宝珠寺水库滑坡地质灾害及典型滑坡特征分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2005, 32(5): 518-523. (Deng Ronggui, Fu Xiaomin, Deng Lin. On the geological disasters of landslide and feature of typical landslides along the bank of Baozhusi reservoir, Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2005, 32(5): 518-523. (in Chinese))
- [5] 陈祖煜,汪小刚,杨健,等. 岩质边坡稳定分析——原理·方法·程序[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005. (Chen Zuyu, Wang Xiaogang, Yang Jian, et al. Rock slope stability analysis-theory methods and programs [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2005. (in Chinese))
- [6] 李会中,段伟峰,王乐团,等. 水布垭水利枢纽新塘滑坡地址成因与力学机制[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(6): 1057-1062. (Li Huizhong, Duan Weifeng, Wang Letuan, et al. Geological settings and mechanism of Xintang landslide in the Shuibuya project [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(6): 1057-1062. (in Chinese))
- [7] 王倬凯,王界雄,李玉明,等. 水库影响区快速监测分析发预警体系研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(增2): 936-942. (Wang Dikai, Wang Jiexiong, Li Yyming, et al. Study on rapid monitoring, analysis and early warning system in reservoir influence area [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(Supp.2): 936-942. (in Chinese))
- [8] 张顺斌,陈涛,晏萍,等. 实时自动监测系统在库区某滑坡监测中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(增2): 1414-1719. (Zhang Shunbin, Chen Tao, Yan Ping, et al. Real-time automatic monitoring system used in landslide monitoring of Three Gorges reservoir region [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(Supp. 2): 1414-1719. (in Chinese))
- [9] 莫伟伟,徐平,丁秀丽. 库水位涨落对滑坡稳定性影响研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(6): 997-1002. (Mo Weiwei, Xu Ping, Ding Xiuli. Research advances in the influences of reservoir water level fluctuation on slope stability [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(6): 997-1002. (in Chinese))
- [10] 郑颖人,唐晓松. 库水作用下的边(滑)坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1115-1121. (Zheng Yingren, Tang Xiaosong. Stability analysis of slopes under drawdown condition of reservoirs [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1115-1121. (in Chinese))