

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2017.04.11

结构复杂滑坡活动对库水位变化的响应特征 ——以三峡库区柴湾滑坡为例

向家松¹, 文宝萍¹, 陈明², 王水华²

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 湖北水文地质工程地质大队, 湖北 荆州 434020)

摘要: 柴湾滑坡是三峡库区结构复杂的大型老滑坡之一, 三峡水库蓄水后, 该滑坡出现明显复活迹象。本文基于滑坡结构和2007–2015年监测数据, 分析了该滑坡活动对库水位变化的响应特征; 采用数值模拟手段分析了库水位变化时滑体内渗流场及孔隙水压力变化特征。研究发现, 该滑坡在平、剖面上分别呈现牵引式分块与浅、中层分层的缓慢活动特征; 当库水位降速 $>0.8\text{ m/d}$ 时, 滑坡活动呈现滞后的台阶式加剧趋势; 越接近地表, 滑坡活动对库水位变化愈敏感。柴湾滑坡活动特征受其复杂结构控制, 滑坡中前部地下水与库水密切的水力联系以及中层、深层滑体良好的渗透性决定了滑坡的分块和分层活动特征。库水位上升时透水性较强滑体内的扬压力和库水位下降时透水性较弱滑体内的动水压力是造成滑坡分块分层活动的内在动力。

关键词: 多层含水层结构; 分块活动; 扬压力; 动水压力

中图分类号: P642.21

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2017)04-0071-07

Activity response of a landslide with complex structure to fluctuation of reservoir water level: a case study of the Chaiwan landslide in the Three Gorges Reservoir

XIANG Jiasong¹, WEN Baoping¹, CHEN Ming², WANG Shuihua²

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Hubei Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Jingzhou, Hubei 434020, China)

Abstract: The Chaiwan landslide is a large and complex landslide in the Three Gorges Reservoir area. The landslide is composed of three kinds of materials and develops three slip zones along the contacts among the materials and along the contact between the landslide and the bed rock. The materials of the landslide from top to bottom are very dense coarse soil with some silt and clay with low hydraulic conductivity, dense and coarse soil with higher hydraulic conductivity and very loose cataclastic rocks with the highest hydraulic conductivity, respectively. Reactivation of the landslide was observed since the operations of the Three Gorges Reservoir. Response of the Chaiwan landslide to water level fluctuation of the Three Gorges Reservoir is explored in this study based on the structure of the landslide and field monitoring data from 2007 to 2015. Variation in pore water pressure within the landslide during filling and drawdown of the reservoir was simulated using the Seep/W code. The results show that the landslide is under a slow movement with about constant rate and a retrogressive movement pattern and along the upper and middle slip zones during both the filling and drawdown

收稿日期: 2017-02-08; 修订日期: 2017-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(41372305)

第一作者: 向家松(1986-), 男, 博士研究生, 研究方向为地质灾害分析评价与防治。

通讯作者: 文宝萍(1962-), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为滑坡形成机理、预测预报以及岩土体变形破坏理论。

E-mail: wenbp@cugb.edu.cn

periods of the reservoir, while the movement rate of the landslide suddenly increases when the drawdown rate of the reservoir is greater than 0.8 m/d. The upper and lower parts of the landslide are the most sensitive to the reservoir water fluctuation. The movement pattern of the landslide is due to itself complex structure and great difference in hydraulic conductivity of the materials. The continuously slow movement of the landslide during both the filling and drawdown periods of the reservoir is attributed to the uplift pressure during the filling period occurred within the middle and lower materials of the landslide where the hydraulic conductivity and seepage pressure is high to very high during the drawdown period generated within the upper and middle materials where hydraulic is lower than that of the lower material.

Keywords: Multi-layered hydrogeological structure; retrogressive movement; uplift pressure; seepage pressure

水库蓄水及库水位变化与水库滑坡的关系一直是国内外滑坡研究的热点问题。国内外大量滑坡实例证实,库水位升降都会诱发滑坡^[1~3]。Paronuzzi 等^[4]通过对意大利瓦伊昂水库滑坡地质结构和监测数据分析以及数值模拟,认为库水位升降均对该滑坡稳定性有显著影响,但是库水位上升的影响更大。他们强调,库水位上升后在滑面以上厚达 50 m 高渗透性碎裂岩中形成浮托力是导致滑坡失稳的关键因素。日本大约 60% 的水库滑坡发生在库水位骤降时期,其余 40% 发生在水库蓄水初期和库水位上升时期^[5]。文宝萍等^[6]认为,对三峡水库蓄水初期发生的千将坪滑坡而言,切层段滑带抗剪强度降低作用最为显著,其次为库水浮托力作用。廖红建等^[7]认为,库水位下降阶段滑坡稳定性变化特征与滑体渗透系数密切相关;随着滑体渗透系数的减小,稳定性系数下降率愈大;库水位下降速度也会影响滑坡稳定性,当库水位下降速率 $< 1.0 \text{ m/d}$ 、滑体渗透系数 $> 1.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 时,库水位下降对滑坡稳定性影响不明显。向玲等^[8]、贾官伟等^[9]、孙永帅等^[10]分别通过数值模拟、物理模型试验发现或证实,对于动水压力型滑坡,库水位上升过程中,滑坡稳定性增大;库水位下降过程中,库水位升降速率越大,滑体渗透系数越小,库水位变动对滑坡稳定性影响越明显。

然而,除了 Paronuzzi 等人将意大利瓦伊昂滑坡作为两层结构研究外,其他研究或采用简单滑坡模型,或将复杂滑坡结构概化为简单结构,对结构更加复杂滑坡(即两层以上滑带)活动对库水位变化的响应特征研究,国内外研究较少涉及。水库环境中,滑坡结构复杂实质是滑坡的水文地质结构复杂。伴随库水位变化,滑坡区地下水动态变化是滑坡活动的关键因素之一。周平根^[11]曾将滑坡区水文地质结构概化为统一含水型、管道含水型、层状含水型、复合型等多种类型。当滑坡具有复杂水文地质结构时,滑坡活动特征如何,目前尚无清晰认识。

柴湾滑坡是三峡库区典型的大型老滑坡之一。三峡水库蓄水后,该滑坡显现复活迹象。勘探揭示,该滑坡结构非常复杂,滑体由三层渗透性差异明显的物质组成,滑坡内发育浅、中、深三层滑面。本文基于滑坡结构和监测数据,分析滑坡活动对库水位变化的响应特征,以为水库环境中结构复杂滑坡的活动机理研究提供借鉴。

1 滑坡发育特征

柴湾滑坡位于湖北省巴东县,地处三峡库区巴东段长江左岸,为大坪滑坡群中 3 个滑坡中的最西侧者,其东侧依次为大坪滑坡和横梁子滑坡。3 个滑坡均为岩质老滑坡。柴湾滑坡平面形态呈舌形,前宽后窄;两侧缘以冲沟为界,后缘为基岩台坎,呈圈椅状地形,后缘高程 365 m;前缘位于长江水下,高程约 100 m。滑坡纵长约 580 m,横宽 80 ~ 200 m,滑坡面积约 $6 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。滑坡地形前陡中缓后陡,后部坡度 30° ,中部较缓约 10° ,前部坡度 35° 。

滑体厚度 40 ~ 70 m,滑坡体积约 $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。滑体物质可分为结构差异明显的上、中、下三层(图 1)。上层为紫红色碎石土,结构密实,较潮湿,土石比约 40/60;角砾、碎石成分为紫红色泥岩、泥质粉砂岩,多数碎石粒径 1 ~ 5 cm,土体部分为紫红色粉质黏土;层厚 10 ~ 20 m。中层为紫红色碎块石土,结构较密实,土石比约 30/70;其中 $> 20 \text{ cm}$ 块石含量占 40% ~ 50%,多数块石粒径 20 ~ 30 cm,碎块石间充填粉质黏土;层厚 10 ~ 20 m。下层为碎裂岩,多为 $> 20 \text{ cm}$ 的块石,块石岩性为紫红色泥岩、泥质粉砂岩和浅灰色灰岩、灰黄色泥灰岩;层厚 20 ~ 30 m。滑床为三叠纪中统巴东组 2 段、3 段和 4 段地层,岩性为紫红色泥岩、粉砂岩、砂岩,浅灰色灰岩及灰黄色泥灰岩。滑坡中发育 3 层厚度不等软弱带,分别位于上层碎石土与中层碎块石土接触带、中层碎块石土与碎裂岩接触带以及碎裂岩与基岩接触带,3 层软弱带构

成3层滑带。其中上、中层滑带为含碎石紫红色粉质黏土,厚度分别为0.1~0.3 m、0.2~0.5 m;下层滑带,亦即主滑带为含碎石土黄色粉质黏土,厚0.3~0.6 m,可塑状,手感细腻。3层滑体中,还分布层数不一、厚度不等的含碎石粉质黏土透镜体。

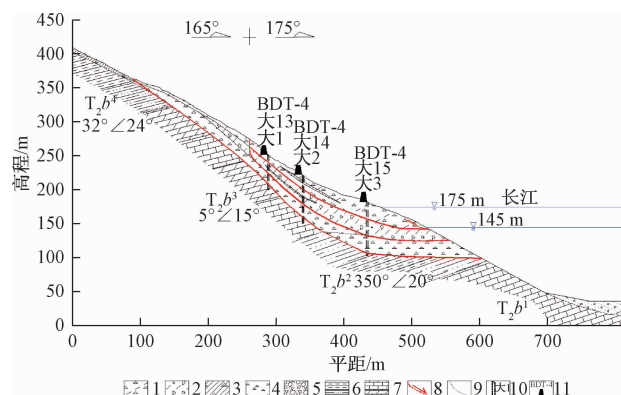


图1 柴湾滑坡工程地质剖面图

Fig.1 Engineering geological profile of the Chaiwan landslide

- 1—碎石土;2—碎块石土;3—含碎石粉质黏土;4—碎裂岩;
5—砂卵砾石;6—泥岩、泥质砂岩;7—灰岩、泥灰岩;8—滑面;
9—库水位线;10—监测孔;11—GPS监测点

滑坡区内未见地下水露头。依据滑体结构判断,滑坡内分布松散岩类孔隙水和基岩裂隙水。各层滑体特征表明其渗透性差异大,上层密实碎石土渗透性相对较弱,中层碎块石土渗透性较好,下层碎裂岩渗透性最强,滑床岩体透水性微弱。因而,滑坡水文地质结构呈现具有多层含水体的结构特征。

2 滑坡活动特征及其与库水位变化关系

2003年6月三峡水库蓄水至135 m,同年7月、10

月,滑坡中部发现2条东西向拉张裂缝,滑坡前缘出现塌岸。西侧裂缝长约50 m,张开2~5 cm;东侧裂缝长约70 m,张开2~10 cm。2条裂缝未见明显下错,裂缝可见深度1.0~1.8 m。随后2条裂缝被封填。2014、2015年现场调查发现,被封填裂缝附近仍有断续裂缝。西侧为细小裂缝群,最长1条长约20 m,张开1~5 cm,下错2~5 cm;东侧为2条断续裂缝,长10~15 m,张开2~10 cm,局部下错15 cm。滑坡前缘塌岸不断发展,纵向上塌岸宽度约30 m。滑坡中后部未见明显变形迹象。上述宏观迹象显示,水库蓄水后,柴湾滑坡中下部复活,并持续缓慢发展。

由于水库蓄水后柴湾滑坡变形明显并持续发展,自2007年3月起,该滑坡被列入三峡库区三期地质灾害专业监测点。监测内容包括地表位移、深部位移和地下水位。在滑坡上布置了东西2条监测剖面,东西两侧剖面上各布置了3个监测点,采用GPS监测地表位移;东侧剖面上还布置了3个深部位移和地下水监测点,采用钻孔倾斜仪和水位监测仪分别测量深部位移和地下水位。

2.1 滑坡地表位移

2007~2015年的累计地表位移矢量显示,滑坡西侧中后部的BDT-1点位移方向杂乱、量值小于45 mm,表明滑坡后部稳定。其余各点累计位移方向与滑坡主滑方向基本一致。位于滑坡前部的BDT-3点累计位移最大1622 mm,量值最大;其余各点累计位移750~1100 mm,呈现出从前部到中后部位移量逐渐减小趋势,显示滑坡具有牵引式分块活动特征。累计地表位移随时间变化特征显示,滑坡位移缓慢匀速增长,2007年6月、2009年6月、2012年6月和2015年6月,各点位移同步出现台阶状增大特征(图2)。

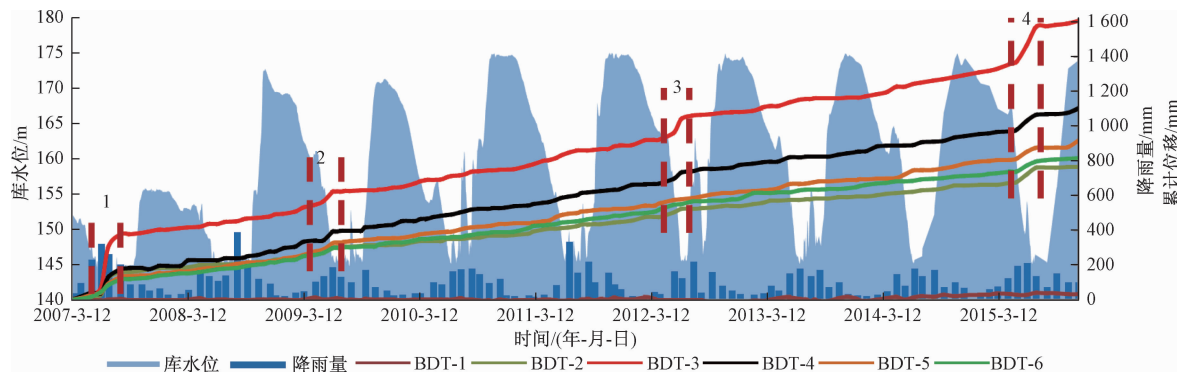


图2 地表累计位移、库水位、降雨随时间变化曲线

Fig.2 Variation of the accumulative surface displacement, reservoir water level and precipitation with time

2007年6月滑坡位移陡增时,该月降雨量331 mm,为当年最大值。然而,2008年6月和2011年6月,降雨量分别为371 mm和314 mm,与2007年6月

雨量基本相当,滑坡位移并未明显增大。这一现象说明,降雨可能并非滑坡位移陡增的主因。

地表位移与库水位关系显示,位移台阶式增大时段

均出现在库水位下降时段,但是滞后于库水位降落时间,这显然与库水入渗滑体需要一定时间相关。2007 年后,每年 1 月上旬至 6 月中旬,库水位逐渐下降至 145 m,其中 5 月中旬至 6 月中旬库水位从 155 m 快速降落至 145 m。对比 2010 至 2015 年每年 5 月 20 日~6 月 20 日库水位快速降至 145 m 前后的每日调度数据发现,滑坡位移突然增大的 2012 年 6 月和 2015 年 6 月,库水位降速超过 0.6 m/d 的累计天数最多;降速超 0.8 m/d 时的累计天数也明显多于其它年份(表 1)。这一特征说明库水位降速增大可能是滑坡活动加剧的直接原因,这也反映出柴湾滑坡对库水位降速响应敏感,进而印证降雨不是滑坡活动加剧的主要因素。

表 1 2010~2015 年库水位快速降落天数

Table 1 The days of rapid drawdown of the reservoir level from 2010 to 2015

年份	累计天数/d	
	$\geq 0.6 \text{ m/d}$	$\geq 0.8 \text{ m/d}$
2015 年	8	4
2014 年	1	0
2013 年	6	1
2012 年	9	4
2011 年	1	0
2010 年	2	0

数据来源:中国长江三峡集团公司官网,水情信息-三峡上游水位。
(<http://www.ctgpc.com.cn>)

2.2 滑坡深部位移

由于滑坡活动显著,大 3、大 1、大 2 等 3 个深部位移监测孔先后于 2007 年 5 月、2008 年 6 月和 2008 年 9 月失效。已有的深部位移监测数据显示,在 3 层滑体分层界面附近位移明显,尽管 3 层滑体内部还出现数个变形带,但在滑体分层接触面的位移量相对较大,证实在 3 层滑体界面处发育浅、中层滑带以及在滑体与滑床接触处发育深层滑带(图 3)。

大 1、大 2 孔中,3 层滑体内部出现的变形带可能与粉质黏土透镜体有关(图 1)。图 3 清楚显示,在 3 个钻孔内,沿着浅层和中层滑带的位移均明显大于深层主滑带,且沿着浅层滑面的累积位移最大,沿中层滑面位移略小于前者,沿深层滑面位移量非常微小。即水库蓄水后,柴湾滑坡沿着浅层和中层滑带复活,且以沿着浅层滑带的活动相对最强,沿碎裂岩与基岩接触面处主滑带的复活迹象不明显。比较同一时间 3 个钻孔的监测数据发现,滑坡沿各层滑面的位移,具有从前向后逐渐减小的趋势,即滑坡前部大 3 孔内沿各层滑面的位移均大于其后大 2 孔,大 2 孔内沿各层滑面的位移大于其后大 1 孔,这一特征与滑坡地表位移完全一致,进一步印证滑坡具有牵引式分块活动特征。

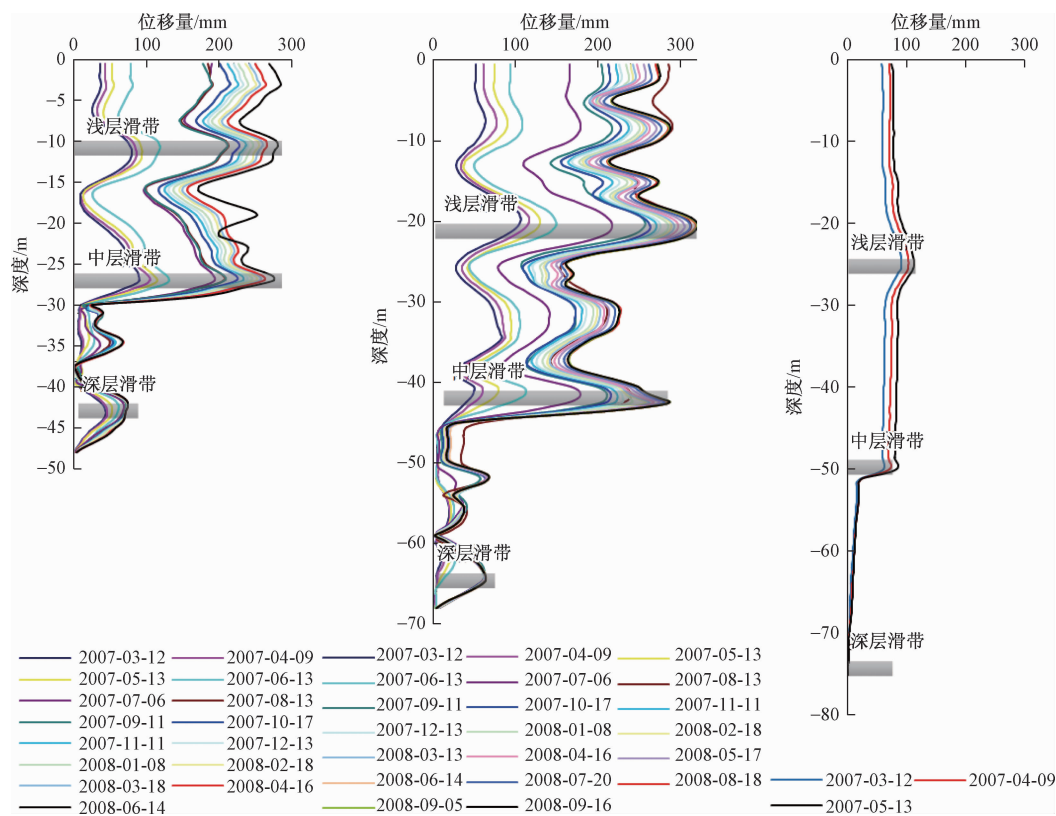


图 3 钻孔深部位移曲线图

Fig. 3 Variation of the accumulative subsurface displacement with depth measured using a borehole inclinometer

因大3孔监测数据过少,故仅将大1、大2孔深部位移监测的3层滑带累计位移与同期库水位对比分析。与地表位移特征类似,滑坡深部也具有持续缓慢增加、间歇性台阶式增大特征,深部位移的台阶式增大同样发生在库水位降落时段(图4)。这也印证了滑坡活动加剧与库水位降落速率增大有密切关系。滑坡地表位移和深部位移共同呈现前部大、后部小的特征,一致反映了滑坡对库水位变化响应具有前部相对强烈、向后逐渐减弱的特征。

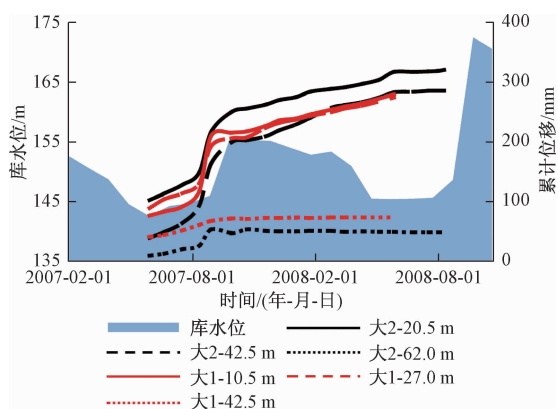


图4 深部累计位移、库水位随时间变化曲线

Fig. 4 Variation in the accumulative subsurface displacement and reservoir water levels with time

3 滑坡活动对库水位变化响应的内在机理

3.1 滑坡区地下水动态与库水位变化关系

滑坡地形和库水位关系清楚显示,175 m 高程以下滑坡中前段滑体内地下水与库水存在密切的水力联系。中前段活动显然是水库蓄水及库水位变化对滑坡影响的直接结果。滑坡区地下水位监测数据印证了滑坡中前段与库水之间密切的水力联系。

如图5所示,位于滑坡中后部的大13孔内,地下水位高程保持在210 m左右,地下水赋存于滑体碎裂岩中,水位略高于深层滑带,其动态不受库水位变化影响。在监测时段内,地下水位变幅1~2 m,应与降雨变化有关。位于滑坡中部大14孔内的地下水位高程在2010年10月(水库蓄水至175 m水位)之前保持在166 m左右,水位变幅1~3 m。这一时期该处地下水位变化也应和降雨有关。当库水位高于166 m时,孔内地下水位与库水位几乎同步变化。位于滑坡前部的大15孔,在2010年3月因滑坡活动钻孔被卡,监测停止,但是前期监测数据显示,该处地下水位变化与库水位变化完全同步,反映滑坡前部与库水的水力联系最为密切。

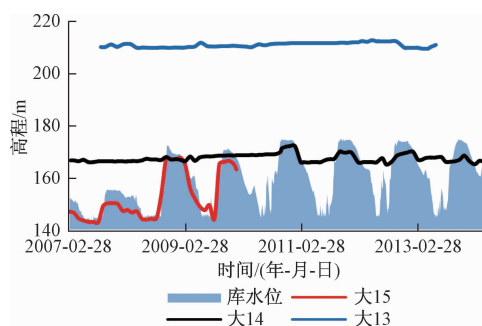


图5 地下水位、库水位随时间变化曲线

Fig. 5 Variation in groundwater level and reservoir water levels with time

由于滑坡地下水动态未进行分层监测,依照滑坡结构,与库水有水力联系的大14、大15孔内水位应为多层含水层的混合水位。大14孔内水位应为中层和深层滑体内地下水的混合水位,大15孔内水位应为浅、中、深3层滑体内地下水的混合水位。由于浅、中、深层滑体分别具有较弱、较强和很强透水性,因此库水位上升时,库水首先渗入中、深层滑体内,不仅造成地下水位上升,而且传递进入的库水压力在起隔水作用的浅层、中层滑面上产生扬压力;在透水性较弱的浅层滑体内,库水入渗形成指向坡内的动水压力,对滑坡活动起抑制作用,但其量值可能远小于下层滑体内水位快速上升产生的扬压力。因此,库水位上升时,在扬压力作用下滑坡沿浅层、中层滑面持续活动。因这一时段浅层滑体内指向坡内的动水压力对滑坡的抑制作用,所以其活动略有减弱。库水位下降时,渗透性极强的深层滑体内地下水迅速排出,渗透性较强和较弱的中、浅层滑体内,地下水位下降速率滞后于库水位下降速率,进而在浅、中层滑体内形成指向坡外的动水压力,这一压力促使浅层、中层滑体在库水位下降时持续活动。因浅层滑体渗透性弱于中层滑体,故而库水位下降时浅层滑体内的水力梯度大于中层滑体、动水压力高于中层滑体,致使浅层滑体的活动性强于中层滑体。尽管岸边滑坡剪出口以下滑床内地下水的压力水头也可能受库水位升降压力影响,但由于滑床岩体渗透性微弱,所以滑床内地下水在深层滑面未形成明显扬压力,沿深层滑面无明显活动迹象。滑坡沿浅层、中层滑带的缓慢活动可能与库水位变化时产生的扬压力和动水压力量值不大有关。

3.2 滑坡区渗流场特征及其在滑坡中的作用

为了验证库水位变化后滑坡区渗流场的变化特征及其在滑坡活动中的作用,采用 GeoStudio 软件中 SEEP/W 模块模拟了滑坡区渗流场(图6)。

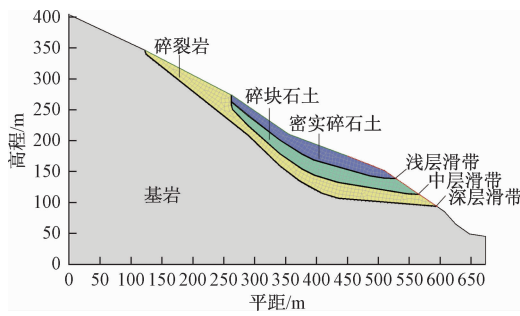


图 6 柴湾滑坡渗流场模拟模型

Fig. 6 Model of the Chaiwan landslide used for numerical simulation of the seepage field

计算参数以大 14、大 15 孔中监测水位的反演拟合为基础,结合经验数据确定(表 2)。

表 2 柴湾滑坡岩土水文地质参数

Table 2 Hydrogeological parameters of the Chaiwan landslide

滑体物质	饱和渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	饱和含水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	残余含水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)
密实碎石土	0.5	0.43	0.03
碎块石土	5	0.42	0.03
滑带土	0.000 84	0.5	0.13
碎裂岩	20	0.39	0.02

模拟时间选取 2006. 9. 5 ~ 2007. 9. 4 和 2011. 8. 1 ~ 2012. 7. 31, 分别对应 2007 年和 2012 年 6 月滑坡位移陡增时段。将库水位变化情况按实际调度情况略作概化, 确定 2 个时段的库水位调度曲线 A 和 B 两类(图 7), 考虑表 3 所列 5 种工况。模拟结果显示, 2006 年 9 月后库水位从 135 m 升至 155 m 过程中, 浅层密

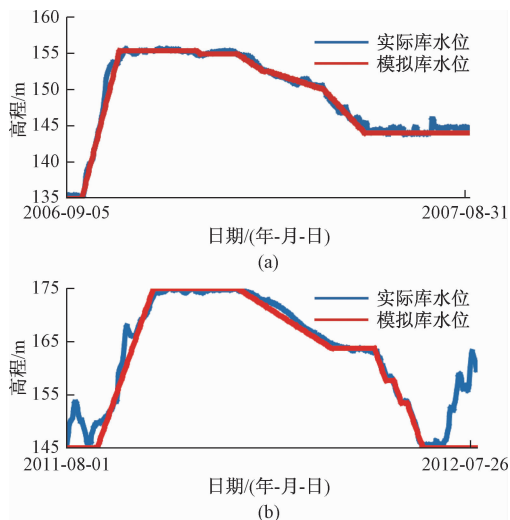


图 7 库水位模拟曲线图

Fig. 7 Variation in the reservoir water levels used for numerical simulation

实碎石土中水位抬升速率最慢, 中层碎块石土内水位抬升速率次之, 深层碎裂岩中水位抬升速度最快, 浅层和中层滑带底部均受到明显的扬压力作用, 量值分别为 50 ~ 60 kPa 和 80 ~ 100 kPa(图 8a)。2007 年 2 月库水位从 155 m 降至 145 m 过程中, 深层滑体内地下水位快速下降, 中层和浅层滑体内水位降速较慢, 在浅层和中层滑体内形成指向坡外的动水压力, 量值分别为 5 ~ 10 kPa 和 4 ~ 7 kPa(图 8b)。

表 3 数值模拟采用的库水位升降工况

Table 3 Scenarios of the reservoir water level fluctuation designed for numerical simulation

工况	库水位/m	历时/d
1	135 升至 155	33
2	155 降至 145	118
3	145 升至 175	51
4	175 降至 159	130
5	159 降至 145	35

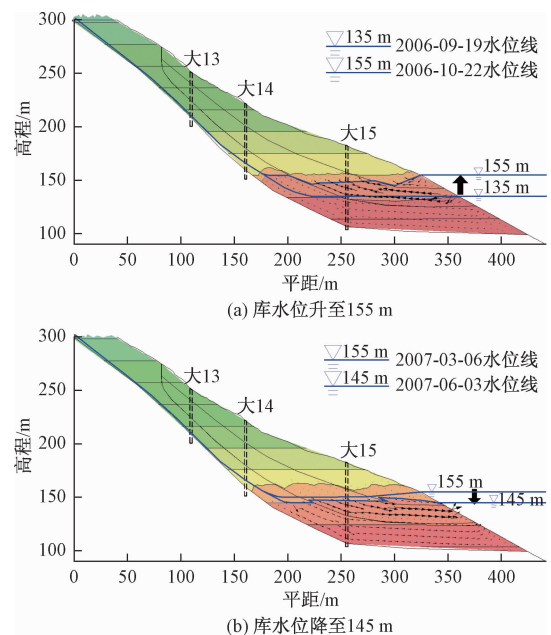


图 8 A 类库水位调度曲线下, 滑坡区渗流场云图

Fig. 8 Seepage field of the landslide following type A fluctuation of the reservoir water levels

2011 年 8 月库水位从 145 m 升至 175 m 过程中, 滑坡同样在浅层和中层滑带底部受到扬压力作用, 量值分别为 10 ~ 60 kPa 和 110 ~ 150 kPa(图 9a)。库水位从 175 m 以 0.13 m/d 速率缓慢初期, 滑体内水压力从扬压力逐渐转为动水压力, 库水位降至 159 m 时, 滑体内地下水位线较平稳, 动水压力量值很小, 不足 1 kPa(图 9b)。当库水位从 159 m 快速降至 145 m 过程中, 深层滑体内地下水位迅速下降, 中层、浅层滑体内

地下水位下降缓慢,形成指向坡外的动水压力,此时,浅层滑体和中层滑体内动水压力值分别为15~45 kPa和8~20 kPa(图9c)。

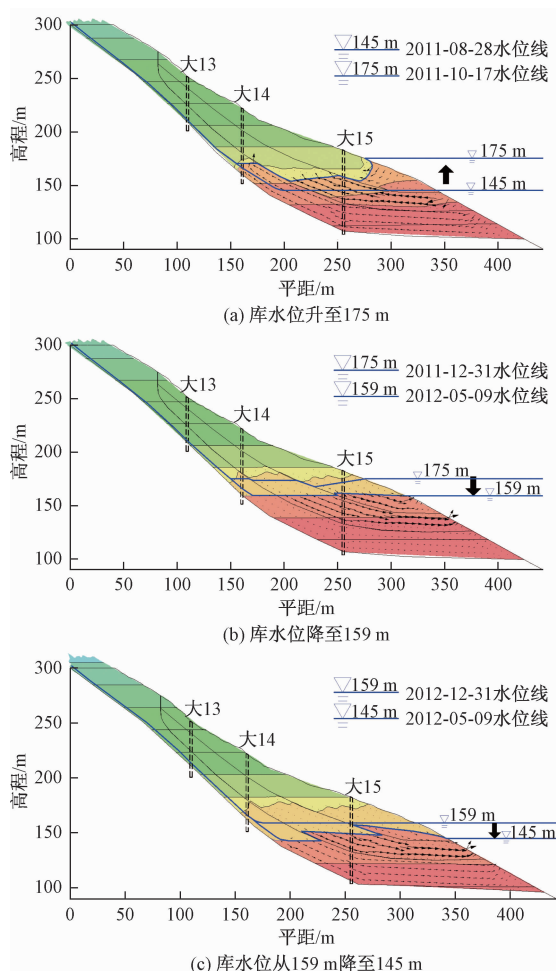


图9 B类库水位调度曲线下,滑坡渗流场云图

Fig. 9 Seepage field of the landslide following type B fluctuation of the reservoir water level

上述模拟结果印证了文中基于地下水位监测数据推测的滑坡活动对库水位变化响应的内在机理。因此,水库环境中,复杂结构滑坡对库水位变化的响应特征受制于滑体分层特征及其渗透性的差异程度。数值模拟结果进一步证实,库水位升降后,柴湾滑坡内产生的扬压力和动水压力值较低,因此滑坡活动呈现缓慢低速特征。

4 结论

(1) 柴湾滑坡具有三层滑体结构,各层滑体渗透性差异明显。三峡水库蓄水后,滑坡复活呈现中前部牵引式分块、中浅层分层的缓慢活动特点。

(2) 柴湾滑坡活动对库水位变化的响应特征为:

水位降速 <0.8 m/d时,无论水位升降,均持续缓慢活动;水位降速 >0.8 m/d时,活动速率呈现滞后的台阶式增大。滑坡前部及滑坡浅层对库水位变化最敏感。

(3) 各层滑体物质渗透性差异是决定滑坡活动对库水位变化响应特征的根本因素。库水位上升期间,浅层、中层滑带底部的扬压力是造成滑坡浅层、中层滑体持续活动的主要动力;库水位下降期间,浅层、中层滑体内的动水压力是促使这两层滑体持续活动的主要动力。滑坡内扬压力和动水压力值较低是滑坡呈现缓慢活动的主要原因。

参考文献:

- [1] Schuster R L. Reservoir-induced landslides [J]. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 1979, 20: 8-15.
- [2] 代贞伟,殷跃平,魏云杰. 三峡库区藕塘滑坡特征、成因及形成机制研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(6): 145-153. [DAI Z W, YIN Y P, WEI Y J. Characteristics, origin and formation mechanism of the Outang landslide in the Three Gorges Reservoir area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(6): 145-153. (in Chinese)]
- [3] 徐永强,祁小博,张楠. 基于降雨与库水位耦合的三舟溪滑坡渗流模拟及稳定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(5): 111-118. [XU Y Q, QI X B, ZHANG N. Numerical simulation and stability analysis for the seepage flow in the Sanzhouxi landslide under the associative action of reservoir water level fluctuations and rainfall infiltration [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(5): 111-118. (in Chinese)]
- [4] Paolo Paronuzzi, Elia Rigo, Alberto Bolla. Influence of filling-drawdown cycles of the Vajont reservoir on Mt. Toc slope stability [J]. Geomorphology, 2013, 191: 75-93.
- [5] 中村浩之. 论水库滑坡[J]. 水土保持通报, 1990, 10(1): 54-64. [Hiroyuki Nakamura. Study on the reservoir landslide [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1990, 10(1): 54-64. (in Chinese)]
- [6] 文宝萍,申建,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, 35(3): 12-18. [WEN B P, SHEN J, TAN J M. The influence of water on the occurrence of Qianjiangping landslide [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(3): 12-18. (in Chinese)]

(下转第84页)

- 角砾土微观结构与抗剪强度[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43 (5): 149 - 154. [HUANG J H, FENG W K, WANG Q, *et al.* The microstructure and shear strength of the breccia soil in glacial deposit body under water action [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43 (5): 149 - 154. (in Chinese)]
- [16] Bishop A W, Blight G E. Some aspects of effective stress in saturated and Partly saturated soils [J]. Geotechnique, 1963, 13 (3): 177 - 196.
- [17] Fredlund D G, Morgenstern N R. Stress state variables for unsaturated soils [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1977, 103 (GTS): 447 - 66.
- [18] 沈珠江. 关于固结理论和有效应力的讨论[J]. 岩土工程学报, 1995, 17 (2): 118 - 119. [SHEN Z J. Discussion on consolidation theory and effective stress [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17 (2): 118 - 119. (in Chinese)]
- [19] 缪林昌, 殷宗泽. 膨胀土边坡稳定中的吸力预测 [J]. 水利学报, 1998, 24 (7): 46 - 49. [MIAO L C, YIN Z Z. Suction prediction on slope stability of expansive soils [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 24 (7): 46 - 49. (in Chinese)]
- [20] 黄润秋, 吴礼舟. 非饱和土抗剪强度的研究 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2007, 34 (3): 221 - 224. [HUANG R Q, WU L Z. Study of shear strength of unsaturated soils [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2007, 34 (3): 221 - 224. (in Chinese)]

责任编辑: 张明霞

(上接第 77 页)

- [7] 廖红建, 盛谦, 高石夯. 库水位下降对滑坡体稳定性的影响 [J]. 岩土力学与工程学报, 2005, 24 (19): 3454 - 3458. [LIAO H J, SHENG Q, GAO S H. Influence of drawdown of reservoir water level on landslide stability [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (19): 3454 - 3458. (in Chinese)]
- [8] 向玲, 王世梅, 王力. 动水压力型滑坡对库水位升降作用的响应——以三峡库区树坪滑坡为例 [J]. 工程地质学报, 2014, 22 (5): 876 - 882. [XIANG L, WANG S M, WANG L. Response of typical hydrodynamic pressure landslide to reservoir water level fluctuation Shuping Landslide in Three Gorges Reservoir as an example [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22 (5): 876 - 882. (in Chinese)]
- [9] 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): 1798 - 1803. [JIA G W, ZHAN L T, CHEN Y M. Model test study of slope instability induced by rapid drawdown of water level [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (9): 1798 - 1803. (in Chinese)]
- [10] 孙永帅, 贾苍琴, 王贵和. 水位骤降对边坡稳定性影响的模型试验及数值模拟研究 [J]. 工程勘察, 2012 (11): 22 - 54. [SUN Y S, JIA C Q, WANG G H. Model test numerical simulation of slope instability induced by rapid drawdown of water level [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012 (11): 22 - 54. (in Chinese)]
- [11] 周平根. 滑坡的水文地质结构类型 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9 (增刊): 207 - 214. [ZHOU P G. The hydrogeological structure type of a landslide [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998, 9 (Sup): 207 - 214. (in Chinese)]

责任编辑: 张明霞