

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.04.21

苗尾水电站赵子坪岸坡变形失稳的 地下水动力作用分析

白洁, 巨能攀, 张成强, 卢向涛

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 库水位变动是诱发库岸边坡变形失稳的主要因素。为探究库水位变动下倾倒变形岩体破坏后形成的堆积体斜坡的地下水动力作用, 以云南澜沧江的苗尾水电站赵子坪滑坡为研究对象, 通过现场地质调查和勘探确定了滑坡形态和坡体结构特征; 再结合监测数据深入分析了滑坡在地下水动力作用下的变形失稳机制, 并基于非饱和土力学理论和有限元法对其失稳机制进行进一步验证。结果显示: 赵子坪岸坡为原始倾倒岩体变形破坏后上部强倾倒岩体沿着折断面发生滑动而形成的堆积体斜坡, 内部呈层状堆积的片石表明其还保留了部分倾倒岩体的结构特征。水库蓄水后, 由于松散的倾倒堆积体为库水渗入坡体创造了良好的条件, 地下水位随库水位升高而快速升高, 导致孔隙水压力增大而滑坡阻滑段有效应力减小, 从而造成稳定性降低, 滑坡易沿着由倾倒折断面演化而成的基覆界面发生滑动破坏。

关键词: 库岸边坡; 倾倒堆积体; 地下水; 动力作用; 赵子坪滑坡; 苗尾水电站

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)04-0159-08

Dynamic analyses of groundwater on the deformation and instability of the Zhaoziping bank slope near the Miaowei Hydropower Station

BAI Jie, JU Nengpan, ZHANG Chengqiang, LU Xiangtao

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Variation in reservoir water level is the main factor inducing the deformation and instability of bank slopes. In order to explore the groundwater dynamic effect of the slope formed by the collapse of toppling deformed rock mass under the change in reservoir water level, the Zhaoziping landslide near the Miaowei Hydropower Station on the Lancangjiang River in Yunnan was taken as the research object, and the landslide morphology and structure characteristics were determined by field geological survey and exploration. The deformation and instability mechanism of the landslide under the action of groundwater dynamic was analyzed in detail using the deformation monitoring data. They are validated based on the unsaturated soil mechanics theory and finite element method. The results show that the Zhaoziping bank slope is an accumulation slope formed by the sliding of the upper strongly toppled rock mass along the fracture surface after the deformation and failure of the original toppled rock mass. The stratified accumulation of schistose rock in the slope indicates that it retains some structural characteristics of toppled rock mass. After the reservoir impoundment, because the loose toppling accumulation body creates good conditions for reservoir water to infiltrate into the

收稿日期: 2018-10-29; 修订日期: 2019-01-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41372306)

第一作者: 白洁(1995-), 女, 硕士研究生, 主要从事边坡稳定性研究。E-mail: 981549555@qq.com

通讯作者: 巨能攀(1973-), 男, 博士, 博导, 教授, 主要从事地质工程和岩土工程研究。E-mail: jnp@cdut.edu.cn

slope, the groundwater level rises rapidly with the reservoir water level rising, which leads to the increase in pore water pressure and the decrease in effective stress in the landslide resistance section, thus the stability of the landslide decreases, and the landslide is liable to slide along the bedrock cover interface evolved from the fracture surface.

Keywords: bank slope; toppling accumulation body; groundwater; dynamic action; Zhaoziping landslide; Miaowei Hydropower station

库岸边坡的变形破坏是一个从量变累积到质变的地质力学过程,其变形破坏过程与库水位的变化密切相关^[1-3]。水库蓄水改变坡体赋存的地质环境,从而影响边坡的稳定性^[4]。

针对库岸边坡稳定性的研究中,卢书强等^[5]、向家松等^[6]充分利用变形监测数据,深入分析研究了库水位变化下滑坡变形失稳机制,得出库水位升降激励了滑坡变形;张岩等^[7]、王明华等^[8]分析得出库岸滑坡的变形模式在蓄水后由推移式转变为牵引式;赵代鹏等^[9]研究了库水升降作用下浮托减重型滑坡的稳定性;此外,一些学者^[10-12]采用数值计算方法模拟分析了库水位变化条件下滑坡体的应力应变情况;张旭等^[13]建立了流固耦合模型并结合数值计算,分析了滑坡在库水位变化条件下的渗流机制与稳定性。但现有研究中针对库水位上升引起滑坡变形失稳的地下水动力作用分析相对较少。

苗尾水电站赵子坪滑坡属于原始倾倒岩体变形破坏后形成的强倾倒堆积体滑坡,本文在详细调查研究滑坡体结构特征的基础上,对蓄水诱发库岸滑坡的变形破坏模式进行了研究。

1 滑坡区工程地质概况

苗尾水电站赵子坪滑坡位于澜沧江上游段右岸,下距坝址 11.2 km,属于云龙县旧州镇孟帕村。



图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the Zhaoziping landslide

赵子坪滑坡地处滇西横断山脉纵谷区,属中高山区深切河谷地貌类型,地形总体下缓上陡,高程 1 380 m 以下较缓,坡度为 $19^{\circ} \sim 31^{\circ}$; 1 380 m 以上坡度 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$,局部略缓。滑坡位于澜沧江右岸斜坡上,河流凸岸,澜沧江横穿坡体前缘,河谷纵向下切深度较大,滑体下游侧边界处冲沟发育,临空条件较好。岸坡上分布有小山脊和凹槽,平顺度较差。六兰公路、沿江公路至上而下分布其间。工程地质平面图见图 2。

滑坡分为一主滑坡(H2)和一次级滑坡(H1)。H1 发育在主滑坡内,地形下缓上陡,前缘直接伸入库水以下,并在库岸边缘形成 1~4 m 高的陡坎,后缘高程 1 445~1 462 m,呈弧形贯通,延伸长度 300 m,运动方向 $NE79^{\circ}$ 。H2 为主滑坡,其后缘位于六兰公路上方 40~80 m,高程 1 542~1 571 m,上游侧周界沿基岩山脊与覆盖层界面向下接 H1 后缘裂缝,滑坡延伸长度 490 m,滑动方向 $NE90^{\circ}$ 。

现场地质调查及勘察资料显示,滑坡区内地层岩性主要由上覆第四系崩坡积层(Q_4^{del})、冲洪积层(Q_4^{all})及下伏白垩系下统景星组上段(K_1j^1)灰色薄-极薄层板岩组成。滑坡体物质主要为崩坡积碎石土、含碎石粉质黏土、角砾土,局部夹有块石,结构松散至稍密。基岩区多发育倾倒变形,岩层产状为 $N0^{\circ} \sim 10^{\circ}E/NW \angle 30^{\circ} \sim 90^{\circ}$,强风化厚度较大。滑坡体主滑带为堆积层与基岩的接触带,次级滑带位于堆积层中。其典型工程地质剖面见图 3。

在长期的地质历史时期,原始岸坡反倾层状的板岩受河谷下切的影响在重力作用下发生倾倒、折断,破坏后的产物沿折断面下错滑动,最终形成了现在的堆积体边坡。堆积体与下伏基岩存在较大物理力学差异,从而形成二元岩土体结构。堆积体主要成分为顺坡向堆积的砂岩、板岩碎石,碎石含量在 40%~60% 之间,粒径一般为 5~20 cm。崩坡积碎石土、含碎石粉质黏土、角砾土填充其间。堆积体结构特征见图 4。

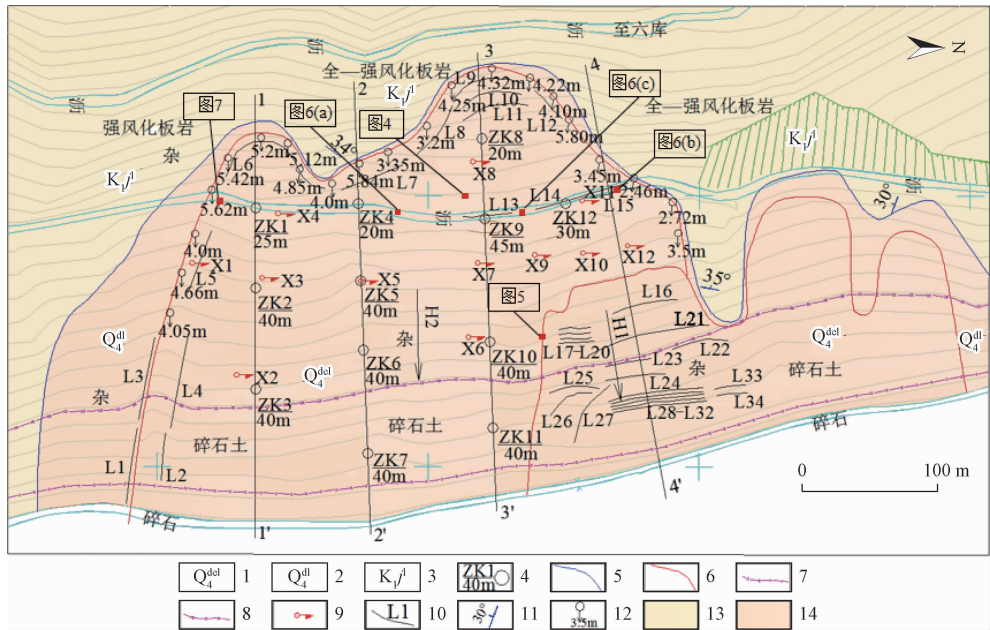


图 2 赵子坪滑坡工程地质平面图

Fig. 2 Engineering geological map of the Zhaoziping landslide

1—第四系崩坡积层;2—第四系冲洪积层;3—白垩系下统景星组板岩;4—勘探钻孔及编号;5—地层分界限;6—滑坡边界;7—一期蓄水位线;8—二期蓄水位线;9—地表监测点;10—裂缝及编号;11—岩层产状;12—地表下错点及下错高度;13—堆积体区域;14—基岩区域

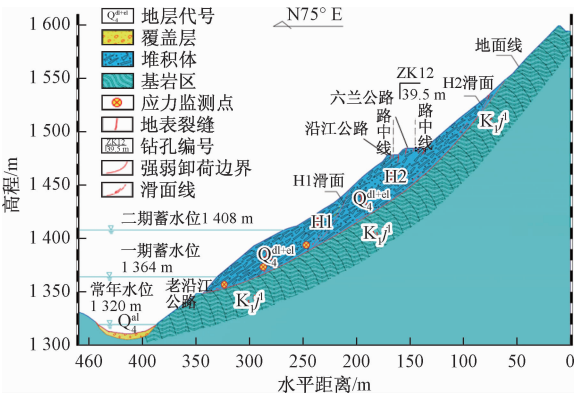


图 3 赵子坪滑坡工程地质剖面图(4-4')

Fig. 3 Engineering geological profile of the Zhaoziping landslide (4-4')

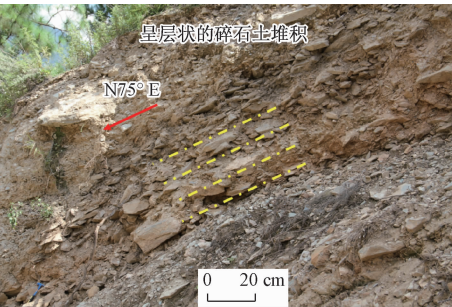


图 4 堆积体结构特征

Fig. 4 Structure features of the accumulation body

2 滑坡变形特征分析

2.1 地表变形特征

在苗尾水电站首次 1 365 m 蓄水之前,主、次级滑坡范围内基本无坡表变形。2016 年 11 月 24 日水库开始蓄水,次级滑坡后缘首先出现裂缝。当水位升高到 1 365 m 后,次级滑坡前缘部分被库水浸没,有少量滚石、岩土体坍塌滑入水中。其后缘形成长大弧形拉裂缝,延伸长度达 300 m,下错高度 2.5~6 m 不等,滑坡体两侧边界处发育有纵向剪切裂缝,在上游侧边界下部出现宽约 5 m 的剪切裂缝带,沿 80°E 向东延伸(图 5)。

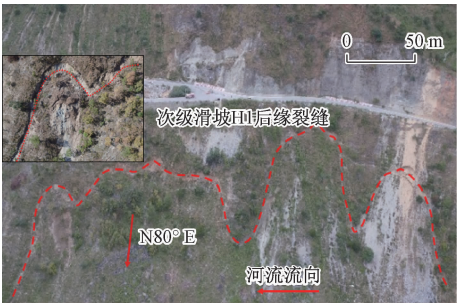


图 5 次级滑坡后缘裂缝

Fig. 5 Photo of the rear edge crack of the secondary landslide

2016 年 12 月份以后,水库保持 1 365 m 水位运行。主滑坡后缘开始出现裂缝,次级滑坡上方公路路面发生开裂,在公路交叉口处出现多条横向弧形拉张

裂缝,贯通性较好,表面可见多条裂隙。公路上部边坡不断发育新的裂缝,裂缝张开度 20 ~ 40 cm,错距 40 ~ 70 cm,且原有裂缝不断扩大(图 6)。随着滑坡变形不断发展,地表变形迹象逐渐增多。

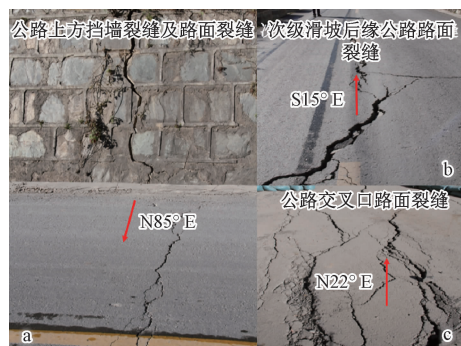


图 6 公路路面破坏

Fig. 6 Destruction of the road surface

2017 年 4 月 24 日水库开始二期蓄水,到 6 月 20 日库水位达到 1 398 m 高程。在此期间,主滑坡后缘出现宽 20 ~ 40 cm、可见深度 40 ~ 150 cm、错距 80 ~ 250 cm 的宽大拉裂缝;下游侧边界将公路错断,错距约 0.5 m,且路边挡墙有开裂和倾向江侧的转动,倾角 15° ~ 20°,开裂宽度 25 cm 左右(图 7)。随着变形的发展,滑坡两侧边界继续向下部延伸,大部分裂缝呈逐渐连通趋势。

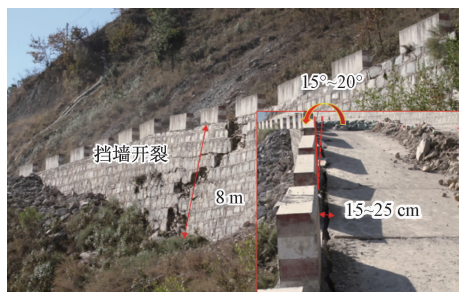


图 7 挡墙破坏

Fig. 7 Failure of the retaining wall

2.2 监测数据

自 2016 年 12 月 5 日起,采用地表位移 GPS 开始对赵子坪滑坡实施现场专业监测。依据综合监测方案,结合现场地形条件,在赵子坪滑坡体上布设 GPS 监测点 12 个(X1 ~ X12),范围覆盖六兰公路、沿江公路及上下边坡,各监测点分布位置见图 1。

滑坡变形曲线见图 8,滑坡各监测点变形具有一致性,变形迹象显著。各监测点水平位移和垂直位移变形趋势一致,最大垂直变形点为 X1,累积位移为 2 323 mm;最大水平位移点在 X9,累积位移值达 3 050 mm。累计垂直位移曲线中 X10 和 X12 监测曲线相较其它监测点的位移曲线高出很多,说明这两个

位置处变形较其他地方大。X8、X11 仪器损坏,故没有监测数据。

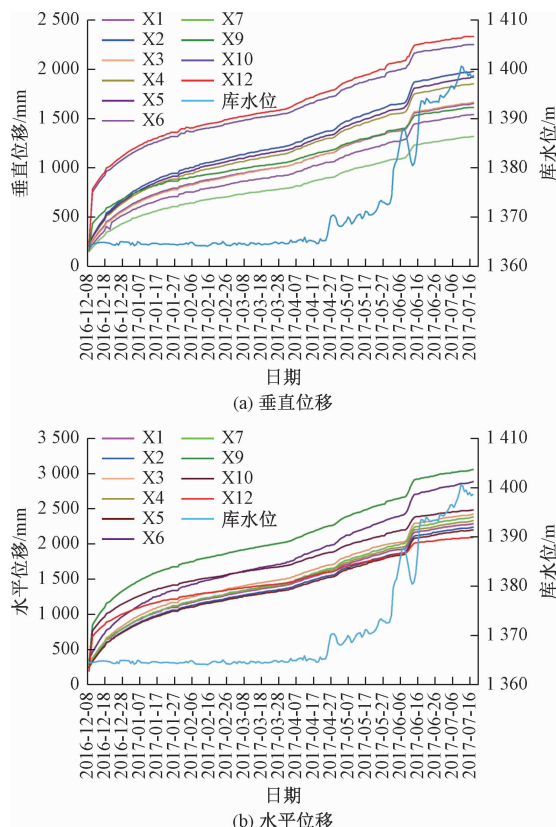


图 8 赵子坪滑坡累积位移监测曲线

Fig. 8 Cumulative displacement monitoring curves of the Zhaoziping landslide

图 9 为赵子坪滑坡各典型监测点的变形速率曲线和库水位升降速率曲线,结合滑坡累计位移曲线分析可知,整体而言,滑坡的变形与库水位的升降相关,其变形速率具有上下波动的变化规律,且随时间的推移变形未出现收敛趋势。

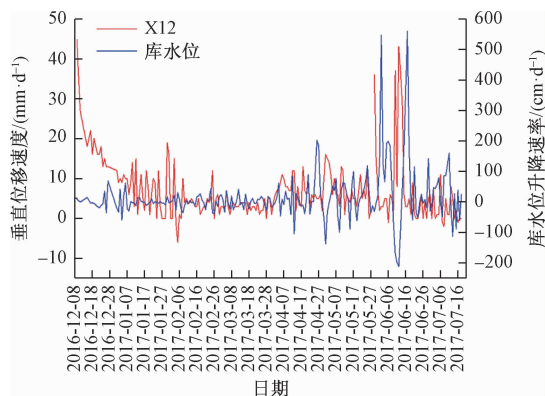


图 9 典型监测点变形速率曲线

Fig. 9 Deformation rate curves of the typical monitoring point

2016 年 12 月 18 日之前,库水位达到一期蓄水高

度 1 365 m, 位移曲线斜率较大, 滑坡变形增长较快, 最大变形达 45 mm/d, 但变形速率呈下降趋势。从 12 月 18 日以后一直到 2017 年 4 月 23 日, 库水位在小范围内波动, 位移呈缓慢增长趋势, 而变形速率在 2 月 10 日之前波动范围较大, 后逐渐趋于平稳, 在小范围内波动。

从 2017 年 4 月 23 日起, 库水位开始升高, 并在 4 月 23 日到 4 月 28 日期间出现一个陡增, 位移曲线也出现了一个小规模阶梯式上扬, 时间略滞后于库水位的上升, 变形速率上下波动范围变大。随后, 库水位呈波浪式升高, 位移曲线斜率略微增大, 变形速率也相应增大。在 6 月 1 日—20 日期间, 库水位呈现出一个正弦曲线式变化, 出现一个波峰和一个波谷, 水位从 1 374 m 上升到 1 387 m, 然后下降到 1 380 m, 再上升到 1 393 m, 位移曲线受到水位升降的影响出现一个明显阶跃, 变形速率在此期间呈大幅度波动。随后, 库水位依旧呈波浪式上升, 位移曲线也继续呈缓慢增长趋势, 变形速率重新回到小范围内波动。

3 滑坡变形机制分析

赵子坪滑坡属于倾倒堆积体滑坡, 其特有的地形地貌、地层岩性以及地质构造条件控制着滑坡的形成和发展, 是滑坡形成的内因。而库水位的变动加速了滑坡的变形, 是滑坡的诱发因素。

3.1 地质因素对滑坡变形的控制

赵子坪滑坡在地形上呈上陡下缓, 坡体前缘河谷纵向下切深度较大, 并在库岸边缘形成 1~4 m 高的陡坎, 滑体下游侧边界处冲沟发育, 临空条件较好。在长期的地质历史时期中形成的倾倒堆积体与下部倾倒基岩形成的特殊坡体结构, 控制着赵子坪滑坡的变形发展。

堆积体滑坡的发生主要受堆积体与基岩基覆接触带的岩土体性质控制, 基覆界面往往是失稳的滑动面。赵子坪滑坡上覆覆盖层和下伏岩层性质差异造成的二元岩土体结构奠定了斜坡变形破坏的物质基础。斜坡易在重力作用下沿着基覆界面发生蠕动变形。

3.2 库水位对滑坡变形的激励作用

苗尾水电站设计最高蓄水位为 1 408 m, 初始水位为 1 320 m, 水库蓄水分两期进行。一期蓄水于 11 月 24 日开始, 11 月 29 日水位升高到 1 365 m 并保持该水位运行; 二期蓄水从 2017 年 4 月 23 日开始, 截至到 2017 年 7 月 16 日, 水位最高达到 1 402 m。根据监测数据显示, 水库在蓄水过程中, 滑坡变形不止。

对于坡体结构松散、渗透性较好的库岸边坡, 在涉

水后水体能快速渗入坡体, 引起地下水位升高, 水体初始渗透力和后期静水压力导致坡体内孔隙水压力增大, 从而有效应力减小, 产生浮托减重效应。若涉水部位为滑坡阻滑段, 则在水位升高后由于水体入渗产生浮托减重效应, 导致其阻滑力相应减小, 滑坡稳定性降低, 更易发生失稳破坏。

苗尾水电站一期蓄水开始后, 滑坡前缘首先受到水的动力冲刷及浸泡软化作用, 由于滑坡体物质结构松散稍密, 水体容易入渗, 产生浮托减重效应, 且坡体前缘存在较高的陡坎, 在水的作用下, 次级滑坡在前缘临空条件下部分发生坍塌破坏滑入水中, 后缘滑坡在前缘坍塌后失去支撑而向下滑动, 从而产生了较多拉裂缝, 发生了较大变形。一期蓄水高度仅淹没滑坡前缘一小部分, 此后, 保持该水位运行, 水体继续入渗, 地下水位升高, 滑坡在此期间发生蠕动变形, 变形速率较小。

二期蓄水开始后, 根据图 2 工程地质平面图可以看出, 次级滑坡上在一期蓄水时形成的大部分裂缝位于二期蓄水位高度以下, 裂缝的存在导致二期蓄水过程中水体渗入坡体内更加容易, 从而引起坡体内地下水位快速升高。且涉水部位为滑坡阻滑段, 阻滑段坡体有效应力减小, 滑坡稳定性降低, 滑坡变形速率增大, 位于次级滑坡上方的主滑坡上游侧边界先发生变形, 其变形又为下游侧滑坡变形创造了临空条件, 从而变形逐渐向下游侧发展, 最终滑坡边界贯通, 发生滑动破坏。

综合分析, 结合图 8 滑坡位移监测曲线, 可以看出滑坡变形受库水位上升影响较大。在库水位快速上升后, 滑坡变形也出现一个明显的阶跃, 但略滞后于库水位的上升。分析其原因, 由于库水位上升较快, 地下水位也上升较快, 坡体内孔隙水压力增大而有效应力随之减小, 坡体阻滑力减小, 滑坡变形增大, 但水体入渗需要一定时间, 因此坡体内孔隙水压力的增大滞后于库水位的升高, 坡体变形滞后于库水位上升。

4 数值模拟分析

基于非饱和土力学理论建立渗流场—应力场的流—固耦合计算模型, 考虑土—水特征曲线与渗透特征, 将孔隙水压力分布和非饱和土强度理论应用到极限平衡法中, 并与有限元法结合, 对库水作用下的赵子坪滑坡稳态—瞬态进行渗流及应力应变的非饱和数值计算。

根据赵子坪滑坡的基本结构特征和变形破坏特征, 选取滑坡的工程地质剖面图 3-3' 为典型剖面, 对滑坡进行水库蓄水作用下的渗流场模拟。

苗尾水电站设计最高水位为 1 408 m, 在一期蓄水

至库水位达到 1 364 m 高度时,滑坡开始出现开裂变形,选取库水位从 1 364 m 上升到 1 408 m 为计算工况,分析库水位上升过程中滑坡体内孔隙水压力的变化情况。计算中所采用的物理力学参数根据现场滑坡变形破坏程度结合其它工程经验反演得到,具体取值如表 1 所示。

表 1 赵子坪滑坡计算参数取值表

Table 1 Calculation parameters for Zhao Ziping landslide

	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	内聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
滑体	22	30	28
基岩	27	45	32

滑坡体土-水特征曲线见图 10。

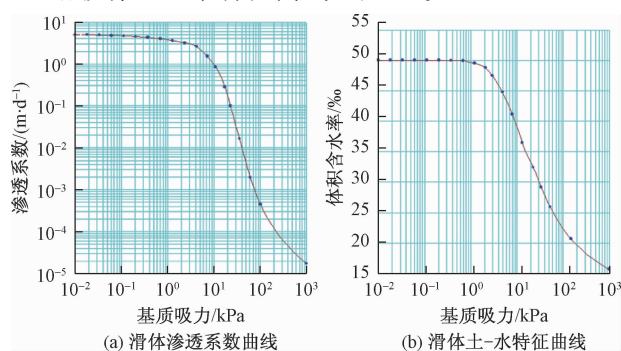


图 10 滑坡体土-水特征曲线

Fig. 10 Hydraulic curves of rock and soil of the landslide

根据上述工况,滑坡在库水位从 1 364 m 上升到 1 408 m 的过程中,浸润线变化和某些时刻孔隙水压力等值线见图 11。分析可知,在二期蓄水开始之前,坡体后缘水头略高于坡体前缘,地下水流速矢量指向坡外。随着库水位的升高,浸润线也缓慢抬升,在蓄水初期,由于库水位上升较快,滑坡后缘水头抬升比前缘水头抬升慢,浸润线从滑坡前缘坡表到后缘向下倾斜,地下水流速矢量方向指向坡内。在库水位上升至 1 394 m 时,滑坡后缘水头与前缘坡表水头基本达到相同高度,浸润线基本呈水平,与库水位高度基本持平。在库水位达到 1 408 m 以后,水体入渗达到平衡,坡体后缘的水头略高于坡表,地下水流速矢量指向坡外。由此可知,在库水位升高过程中,浸润线的抬升滞后于库水位的抬升。

在滑坡体涉水部位沿着基覆界面设置 3 个监测点(图 3),监测库水位上升过程中孔隙水压力以及坡体内有效应力变化情况,结果见图 12。由图 12(a)可知,在库水位上升的过程中,三个监测点变化趋势一致,表现为随着库水位的升高孔隙水压力增大,而有效应力减小;由图 12(b)可知,在库水位升高的初始阶段,由于渗透力的作用,孔隙水压力大幅度上升,而随着渗透力的消散,孔隙水压力又逐渐降低,最后小幅度回升后趋于稳定。

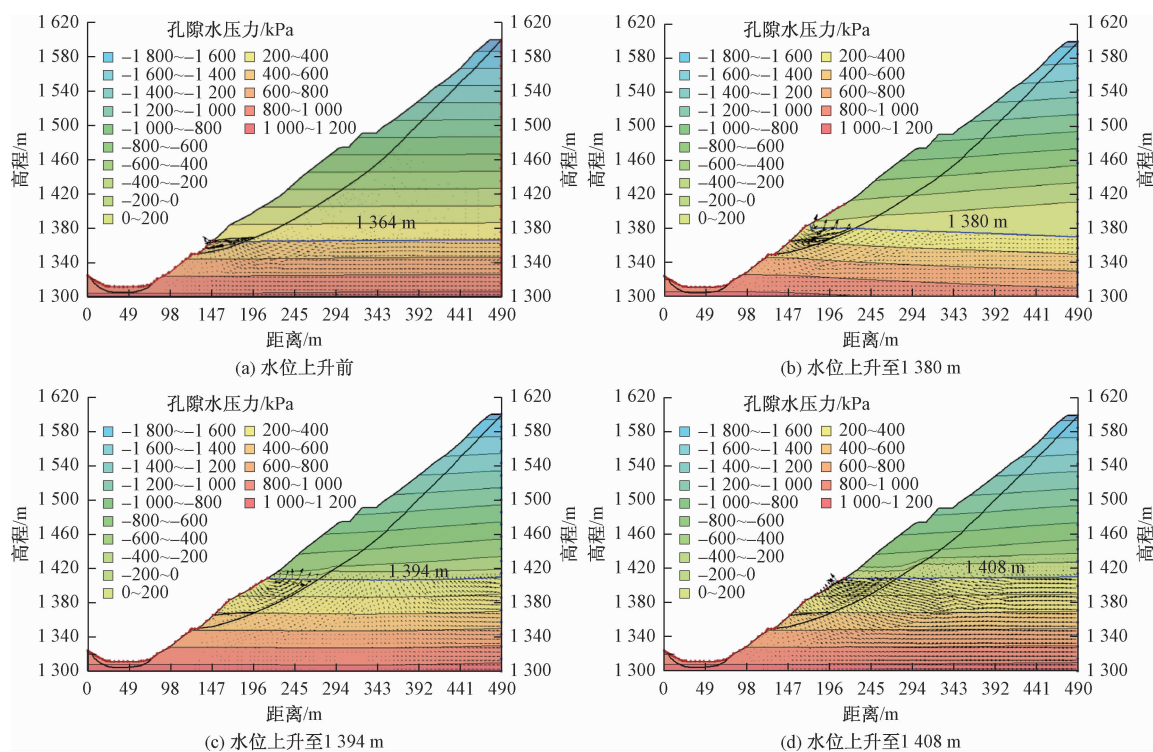


图 11 库水位上升过程中孔隙水压力图

Fig. 11 Pore water pressure before and after the rise of the reservoir water level

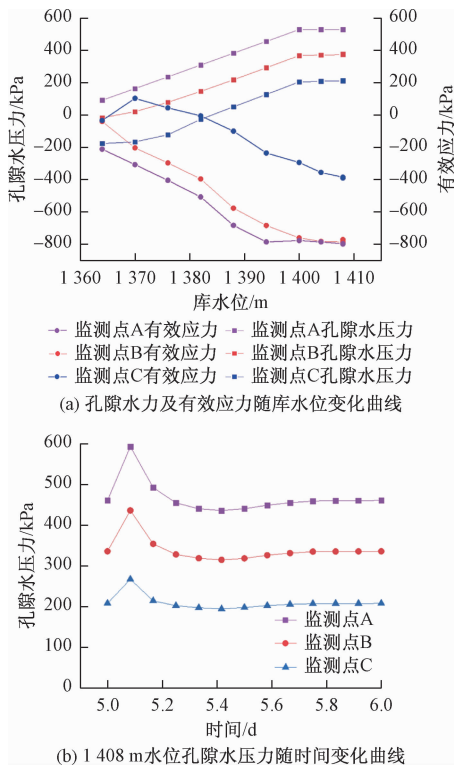


图 12 力的监测曲线
Fig. 12 Curves of stress monitoring

将渗流场的水力作用加到应力场的分析中,得到滑坡在二期蓄水过程中塑性区的变化(图 13)以及蓄水完成后滑坡的最大剪应变特征(图 14)。

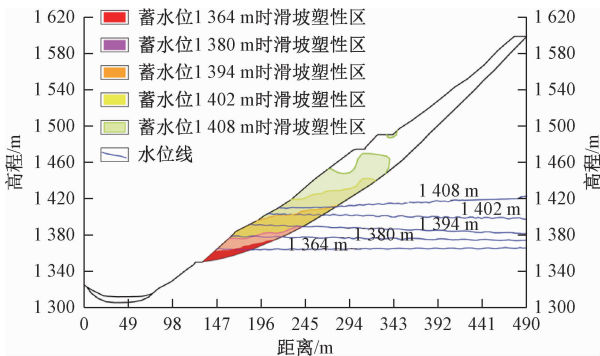


图 13 赵子坪滑坡蓄水过程中塑性区变化图
Fig. 13 Plastic zone change during the Zhaoziping landslide storage process

由赵子坪滑坡在蓄水过程中塑性区的变化可知,在库水位从 1 364 m 上升到 1 408 m 的过程中,随着浸润线不断升高,滑坡塑性区范围也从滑坡体前缘开始从下往上扩张,最终塑性区扩张到 1 408 m 水位线以上约 40 m。根据在蓄水完成后滑坡的最大剪应变特征云图,在坡体前缘浸润线以下滑带附近剪应变较大,滑坡剪出口处剪应变最大且集中。由此可知,滑坡稳定性受库水位升高影响较大,在库水位升高后,滑坡堆

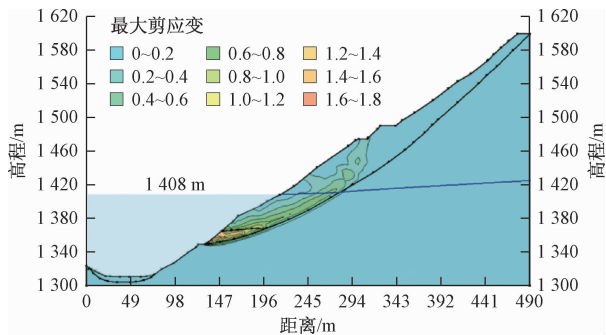


图 14 赵子坪滑坡最大剪应变特征
Fig. 14 Characteristics of the maximum shear strain of the Zhaoziping landslide

积体自下而上发生不同程度的塑性破坏,滑坡体易沿着基覆界面滑动并从前缘剪出口滑出。

数值模拟结果与滑坡变形特征及成因机制分析的结果一致,即随库水位升高滑坡稳定性降低。

5 结论

(1) 赵子坪滑坡为反倾层状板岩发生倾倒变形破坏形成的堆积体发生失稳而形成的滑坡,其地表宏观变形迹象显著,稳定性较差。持续近 7 个月的监测数据显示,滑坡变形持续不止,且变形受库水位的升高影响较大。

(2) 赵子坪滑坡的地质因素对滑坡的变形和发展起控制作用,而水库蓄水过程中库水位的升高激励了滑坡的进一步变形。在蓄水过程中,库水位升高会对滑坡体产生动水压力和孔隙水压力,且涉水部位滑体为滑坡的阻滑段,涉水后由于其孔隙水压力增大而有效应力减小,从而阻滑力减小,滑坡更易发生失稳破坏。

(3) 基于非饱和土力学理论并与有限元法结合的滑坡非饱和数值计算结果显示,水库在蓄水过程中浸润线随水位升高而升高且滞后于库水位的上升,坡体内孔隙水压力增大而有效应力减小。在水位上升过程中,滑坡体塑性区范围向上扩张,在滑坡剪出口处剪应变最大且集中。数值模拟结果与滑坡变形特征及成因机制分析结果一致。

参考文献:

- [1] 朱冬林,任光明,聂德新,等. 库水位变化下对水库滑坡稳定性影响的预测[J]. 水文地质工程地质, 2002, 23(3): 6-9. [ZHU D L, REN G M, NIE D X, et al. Effecting and forecasting of landslide stability with the change of reservoir water level[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2002, 23(3): 6-9. (in Chinese)]
- [2] 尹晓萌,晏鄂川,杜毅,等. 库水位下降条件下堆积层滑坡稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017,

- 28(3):8-15. [YING X M, YAN E C, DU Y, *et al.* Stability Analysis of accumulation layer landslide under the condition of falling Reservoir Water level [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(3): 8-15. (in Chinese)]
- [3] 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 W W, XU P, DING X L. Research progress on the effect of reservoir water level fluctuation on landslide Stability [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006,2(6): 997-1002. (in Chinese)]
- [4] 王俊梅,刘海宁.水库蓄水引发的地下水位抬升和渗控措施研究[J].水文地质工程地质,2011,38(5):115-119. [WANG J M, LIU H N. Study on groundwater level uplift and seepage control measures caused by reservoir impoundment[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011,38(5):115-119. (in Chinese)]
- [5] 卢书强,易庆林,易武,等.三峡库区树坪滑坡变形失稳机制分析[J].岩土力学,2014,35(4):1123-1130. [LU S Q, YI Q L, YI W, *et al.* Analysis of deformation and failure mechanism of Shuping landslide in Three Gorges reservoir area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014,35(4): 1123-1130. (in Chinese)]
- [6] 向家松,文宝萍,陈明,等.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[J].水文地质工程地质,2017,44(4):71-77. [XIANG J S, WEN B P, CHEN M, *et al.* 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 [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017,44(4): 71-77. (in Chinese)]
- [7] 张岩,陈国庆,张国峰,等.库水位变化对观音坪滑坡稳定性影响的数值分析[J].工程地质学报,2016,24(4):501-509. [ZHANG Y, CHEN G Q, ZHANG G F, *et al.* Numerical analysis of influence of water level variation on Guanyinping landslide stability [J]. Chinese Journal of Engineering Geology, 2016, 24(4): 501-509(in Chinese).]
- [8] 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. [WANG M H, YAN E C. Study on influence of reservoir water impounding on reservoir landslide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007,28(12): 2722-2725. (in Chinese)]
- [9] 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. [ZHAO D P, WANG S M, TAN Y Z, *et al.* Stability studies of buoyancy weight loss landslides under reservoir water level fluctuation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013,34(4): 1017-1024. (in Chinese)]
- [10] 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. [TAO H L, FAN S K, XU G L, *et al.* The deformation characteristics and stability analysis of accumulation landslide under the condition of water level change [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(5): 96-100. (in Chinese)]
- [11] 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. [ZHU J L, HUANG R Q. Study on the stability of Shuiwenzhan slope in a large hydrostation after impoundment by using 3d numerical modeling. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1384-1389. (in Chinese)]
- [12] 钟登华,安娜,李明超.库岸滑坡体失稳三维动态模拟与分析研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(2):360-367. [ZHONG D H, AN N, LI M C. 3D dynamic simulation and analysis of slope instability in reservoir bank [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007,26(2): 360-367. (in Chinese)]
- [13] 张旭,谭卓英,周春梅.库水位变化下滑坡渗流机制与稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2016,35(4):713-723. [ZHANG X, TAN Z Y, ZHOU C M. Seepage and stability analysis of landslide under the change of reservoir water levels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016,35(4): 713-723. (in Chinese)]
- [14] 卢树盛,辛全才,肖诗荣,等.水位骤降下边坡渗流场与应力场耦合数值分析[J].水文地质工程地质,2010,37(6):130-133. [LU S S, XIN Q C, XIAO S R, *et al.* Numerical analysis of coupling of seepage field and stress field of slope under sudden drop of water level [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2010,37(6):130-133. (in Chinese)]
- [15] 伍艳,王玮屏,任海平,等.水-土作用对土体渗透系数的影响研究[J].水文地质工程地质,2011,38(6):39-43. [WU Y, WANG W P, REN H P, *et al.* Study on the effect of water-soil interaction on soil permeability coefficient [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011,38(6): 39-43. (in Chinese)]