

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.05.02

三峡库区八字门滑坡变形破坏机理分析

熊 坤^{1,2,3}, 易 武^{1,2,3}, 王 力^{1,2,3}, 余 庆⁴, 邓永煌⁵

(1. 三峡大学湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站, 湖北 宜昌 443002; 2. 防灾减灾湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 3. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002; 4. 云南省煤田地质局, 云南 昆明 650034; 5. 宜昌市地质环境监测站, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 三峡库区库水位周期性的变化引起库岸边坡地下水位发生变化, 库水与地下水共同作用影响其渗流场与应力场, 促使滑坡失稳。本文以三峡库区动水压力型滑坡——八字门滑坡为例, 结合滑坡监测资料, 运用 Geo-Studio 软件中 SEEP 模块、SLOPE 模块以及 SIGMA 模块进行模拟, 深入分析在不同库水下降速率条件下对滑坡渗流场、应力场、位移场以及稳定性的影响, 研究其致灾机理。研究表明: 八字门滑坡滑体物质遇水易软化、渗水性差, 为动水压力型滑坡创造了良好条件。动水压力型滑坡的失稳主要是由于库水位下降, 地下水位相对滞后, 形成指向外侧的动水压力, 不利于滑坡的稳定, 库水位下降速率越大, 滑坡体的稳定系数减小越快。在库水下降速率不断增大时, 渗流作用增强, 但是渗流速率的增长率有减缓趋势。八字门滑坡在库水下降的条件下, 滑坡 159 m 处的滑体及滑带附近出现明显的应力集中现象并逐渐扩大连成一片, 表明滑带附近为剪切塑性区, 主要承受剪切应力。滑坡塑性区竖向位移呈现先减小后增大的趋势。在周期性库水作用下会产生应力带促进滑坡变形, 长期在这种应力作用下可能产生新的滑带, 形成次级滑坡。

关键词: 动水压力型滑坡; 渗流场; 应力应变分析; 稳定性分析; 应力带

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)05-0009-10

Analysis of deformation and failure mechanism of Bazimen Landslide in Three Gorges Reservoir Area

XIONG Shen^{1,2,3}, YI Wu^{1,2,3}, WANG Li^{1,2,3}, YU Qing⁴, DENG Yonghuang⁵

(1. National Field Observation and Research Station of Landslide in Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River, Yichang, Hubei 443002, China; 2. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3. Collaborative Innovation Center for Geo-Hazard and Eco-Environment in Three Gorges Area, Yichang, Hubei 443002, China; 4. Yunnan Coalfield Geological Bureau, Kunming, Yunnan 650034, China; 5. Yichang Geological Environment Monitoring Station, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: The cyclical change of reservoir water level in the Three Gorges Reservoir Area causes the groundwater level of the bank slope to change. The combination of reservoir water and groundwater affects the seepage field and stress field, which causes the landslide to be unstable. This paper takes the hydrodynamic pressure landslide in Three Gorges Reservoir Area-Bazimen Landslide as an example, simulating with the SEEP module, the SLOPE module and the SIGMA module of Geo-studio software based on the landslide

收稿日期: 2019-03-03; 修订日期: 2019-06-10

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2017CFB436); 湖北省水电工程智能视觉监测重点实验室开放基金项目(2016KLA02); 湖北省防灾减灾重点开放基金项目(2016KJZ16)

第一作者: 熊 坤(1996-), 男, 湖北赤壁人, 硕士研究生, 主要从事防灾减灾与岩土工程相关的工作。E-mail: 879491117@qq.com

通讯作者: 易 武(1966-), 男, 湖北黄冈人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事边坡稳定性及其预测预报方面的研究。E-mail: 397745802@qq.com

monitoring data in order to intensively analysis the impact of different drawdown speed on seepage field, stress field, displacement field and the influence of stability, so as to study the disaster mechanism. The results demonstrate that the instability of hydrodynamic landslide is mainly due to the drawdown of reservoir and the relative lag of underground water level. The faster the drawdown speed is, the faster the stability coefficient of the landslide decreases. As the rate of decline of the reservoir water increases, the seepage effect increases, but the growth rate of the percolation rate tends to decrease. Under the condition that the reservoir water is falling, the landslide of Bazimen has obvious stress concentration near the sliding body and the sliding zone at 159 m, and gradually expands into a piece. It indicates that the place of near the sliding zone is a shear plastic zone, which is mainly subjected to shear stress. The vertical displacement in plastic zone of landslide decreases first and then increases. Under the action of periodic reservoir water, stress bands will be generated to promote landslide deformation. Long-term under this stress, new slip zones may be formed to form secondary landslides.

Keywords: hydrodynamic pressure type landslide; seepage field; stress and strain analysis; stability analysis; stress zone

0 引言

三峡库区的建成与运营,在带来利益的同时也对库区地质环境造成重大影响。库水位周期性的涨落引起渗流场和应力场变化,改变了边坡岩土体的物理力学特性,使得三峡库区消落带岩土体进一步劣化,在外界其他因素的作用下产生新滑坡,促使老滑坡的复活^[1]。

三峡库区滑坡较多,肖诗荣等^[2]针对三峡库区蓄水以后所发生的 150 余个特大型滑坡,在分析滑坡致灾成因和作用机理的基础上,提出了库水浮托型、动水压力型、库水软化型三类滑坡。而动水压力型滑坡主要是指对该滑坡稳定性起主导作用的因素是动水压力,而动水压力是由于滑坡体渗透性差,库水下降产生水头差形成指向坡外的水压力。对于动水压力型滑坡的研究,主要从库水、地下水等方面进行研究,甘恩来等^[3]通过对上安坪滑坡进行分析,认为三峡库区动水压力型滑坡在库水位升降期间,滑坡的稳定系数都存在着先减小后增大的趋势。王锦国等^[4]认为库水位在下降时产生的动水压力为正常时的 13 倍。向玲等^[5]、李永康等^[6]分别以三峡库区白家包滑坡和三峡库区树坪滑坡为例进行研究,分析渗流场与滑坡稳定性,他们均认为由于库水位与地下水位变化不同步而产生动水压力,库水位下降过程中,滑坡稳定系数明显减小。库水的涨落引发渗流场的变化主要采用饱和-非饱和渗流理论进行研究,但对其耦合方程的求解不仅复杂而且假设条件较多,数值分析应运而生,廖红建等^[7]、张旭^[8]结合库水水位下降期间不同渗透系数滑坡体的渗流场进行数值计算,得到库区降水速度、渗透

系数与滑坡稳定性之间的变化关系。

滑坡的致灾机理指的是研究其在外作用下的应力应变特性及其变形的内外在联系和规律,诱发滑坡的根本因素及作用的受力特性^[9]。认识滑坡的机理,开展滑坡机理研究,这是认识滑坡最基础性的、最根本的。只有充分认识这些,才能对滑坡的稳定性评价以及预测防治等提供最科学的依据^[10]。随着滑坡的深入研究,在滑坡破坏机理研究方面的探讨主要包括滑坡变形特征及阶段判断、滑坡破坏类型划分和滑坡诱发因素分析等。晏同珍^[11]则根据滑坡发生的初始条件、原因及滑动方式概括了 8 种机理。

对于三峡库区滑坡的研究,大多数学者对库水、降雨、地下水等条件在单一或组合作用下进行流固耦合、固-液-气三相耦合分析,而对于动水压力型滑坡在库水作用下的多场特征分析较少,因此本文以八字门滑坡为例,结合现场监测资料利用 GEO-Studio 软件建立模型,用 SEEP 模块进行渗流分析,基于 SEEP 的渗流计算在 SLOPE 模块中节点水头和孔隙水压力计算其边坡稳定系数,最后基于 SEEP 模块用线弹性模型进行 Sigma 应力模拟。综合分析滑坡在库水位变动下的渗流场、应力场和位移场,研究其致灾机理,为此类滑坡的变形规律提供一定的参考。

1 八字门滑坡的概况

1.1 基本概况

八字门滑坡位于三峡库区湖北省秭归县归州镇长江左岸支流香溪河右岸河口处。滑坡体整体呈现向东倾斜西高东低的趋势,呈现上陡下缓兼具有三级堆积平台的地貌,平面貌似不规则扇形,剖面形态为阶梯

形。滑床剖面整体为下凹型。

滑坡前缘直抵香溪河,剪出口高程 65 m,滑坡后缘以基岩为界,高程 248 m,两侧边界大致以冲沟分界。表现出上部较窄,宽约 100 ~ 110 m,下部较宽约 350 m,纵长 517 m,总面积约 $1.178 \times 10^5 \text{ m}^2$,滑体厚度约为 10 ~ 50 m,总体积 $2.35 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。详见滑坡地质平面图(图 1)。

1.2 物质组成及结构特征

滑坡发育于侏罗系下统香溪组(J_1x)地层,处于黄陵背斜西翼与秭归向斜东翼交汇处,同时也是区域活动性断裂仙女山断裂北端尖灭处。主要由中厚层泥质粉砂岩、细砂岩组成,岩层产状倾向 295° ,倾角 26° ,属逆向坡。香溪组泥页岩夹煤层,长石石英砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩互层,强度低,遇水易软化,且沿砂泥岩界面常见泥化现象,抗剪强度明显降低。滑带为角砾土,以砂岩、泥岩为主,充填粉质黏土,呈软塑-可塑状,土石比 6:4 ~ 5:5。根据现场勘查绘制了滑坡典型工

程地质剖面图(图 2)。

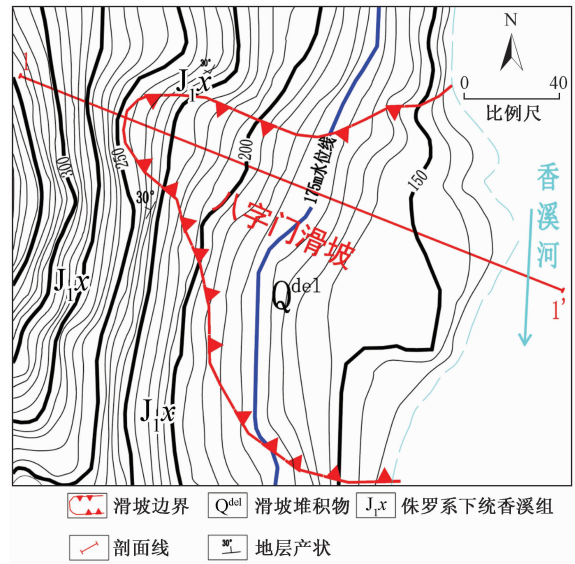


图 1 滑坡工程地质平面图

Fig.1 Engineering geological plan of landslide

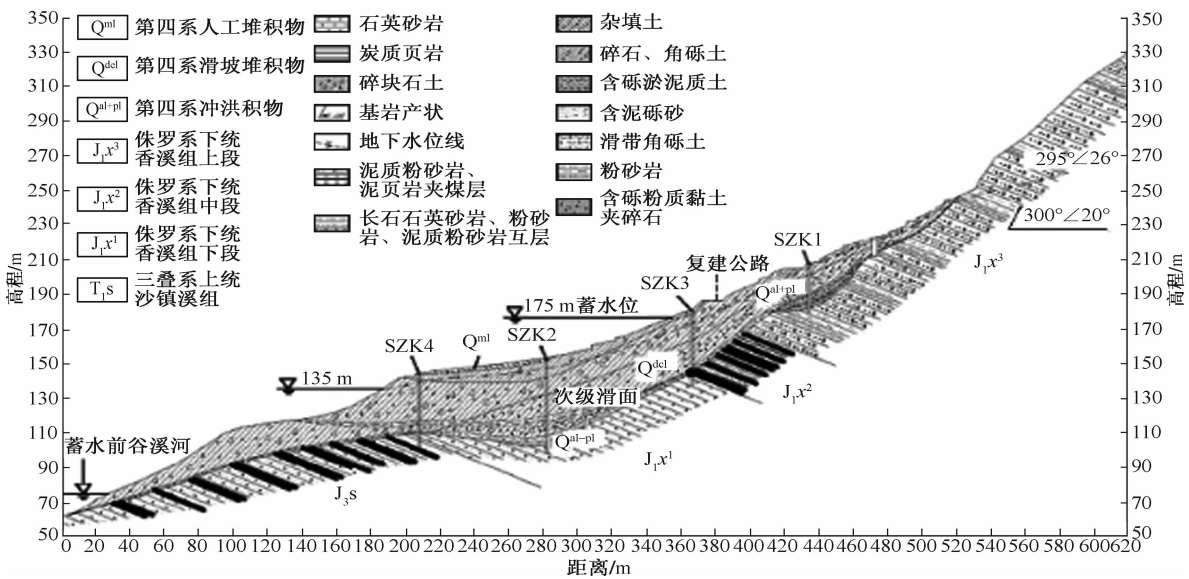


图 2 滑坡剖面图

Fig.2 Section of landslide

2 八字门滑坡的变形演化

2.1 宏观变形特征

八字门滑坡于 1982 年有复活迹象,具体表现为首次出现了 4 条长约 70 m 的裂缝。2003 年三峡库区蓄水以后到 2009 年 6 月份,这个阶段首先是滑坡体公路处出现多条张拉裂缝,接着是由于裂缝的不断产生,部分房屋成为危房。2009 年 6 月到 2012 年 6 月库水位下降以后八字门滑坡宏观变形就比较明显,最显著的

要数 2010 年 7 月产生的变形,八字门滑坡在库水下降以后又加上强降雨的影响,雨水作用在滑坡体的表面,对其进行了冲刷侵蚀,产生了一条较大的裂缝,局部出现了高达一米的下挫,到 2011 年的时候,变形进一步加大,公路严重变形。到 2014 年公路已经破败不堪,变形继续,并有局部下滑坍塌现象。

2.2 GPS 监测布置

八字门滑坡属于三峡库区二期专业监测灾害点,自 2003 年以来开始实施专业监测,共 12 个 GPS 监测

点,目前正常工作有 10 个 GPS 变形监测点,滑体外围布设 2 个基准点。在其中 4 个 GPS 监测点处分别布设测斜、滑坡推力、TDR、地下水位监测孔各 3 个。下

图 3、图 4 是 1-12 监测点 GPS 监测累积位移随库水位的变化而变化的关系图。

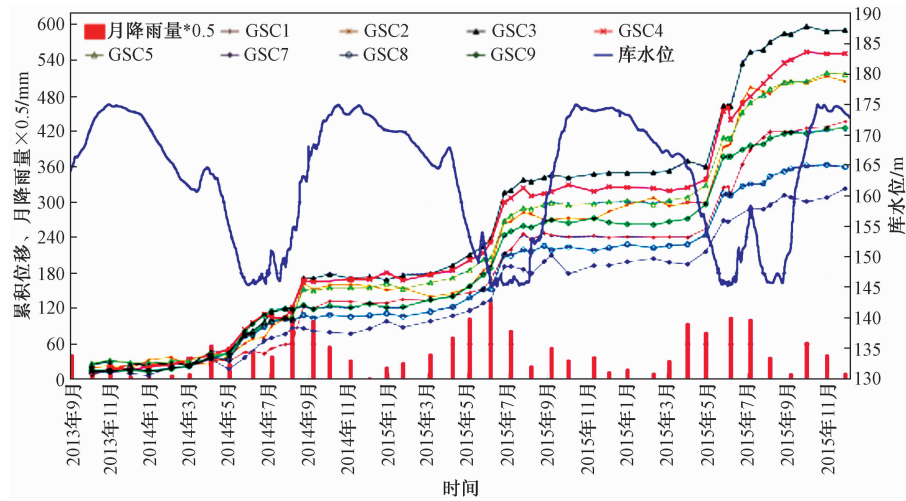


图 3 八字门滑坡累积位移与库水位关系曲线

Fig. 3 Relation curve of cumulative displacement and reservoir water level of Bazimen Landslide

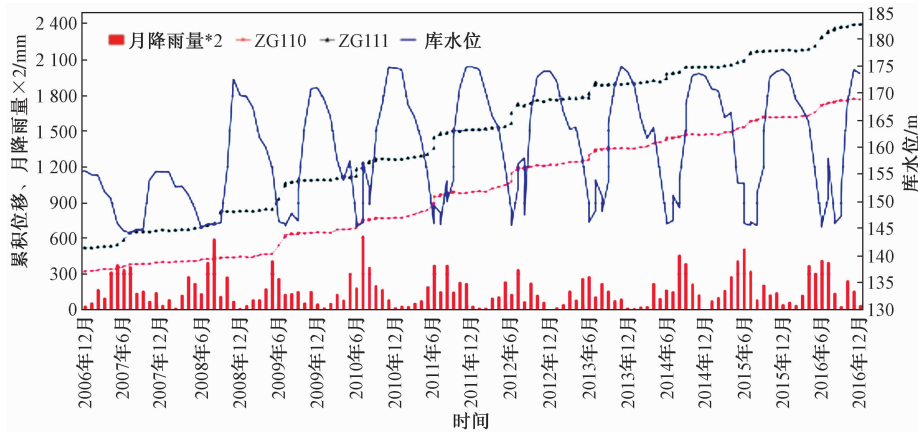


图 4 滑坡 GPS 监测数据与库水位关系曲线图

Fig. 4 Diagram of landslide GPS monitoring data and reservoir water level

2.3 GPS 监测数据分析

图 3 所示的是监测点 GSC1、GSC2、GSC3、GSC4、GSC5、GSC7、GSC8、GSC9 累积位移与日降雨量、库水位的关系曲线。由于此 8 个监测点的初测时间为 2013 年 9 月,因此仅能得出 2013 年 9 月~2016 年 12 月的累积位移曲线。2016 年滑坡累积位移曲线的“阶跃式”增长开始于 4 月下旬,一直持续至 8 月下旬,之后变形趋于稳定。

库水位升降对滑坡变形的影响:由图 4 可知,三峡库区水位的涨落与监测点 ZG110、ZG111 的位移变化过程有着较好的对应关系:在库水位上升及平稳水位运行期间,滑坡的变形不明显;而在库水位下降期间,

滑坡的变形较大,且每次库水位的下降均会引起滑坡累积位移曲线的抬升,2007 年~2016 年期间共经历了 10 次抬升,而滑坡累积位移曲线也相应地出现“阶跃式”增长,这表明库水位下降对滑坡的稳定性产生重要影响,滑坡变形与库水位下降存在较大的相关性。具体表现为:每年 5~6 月,由于库水位的下降,滑坡变形呈突增特征,之后随着库水位趋于稳定,滑坡变形也随之趋于稳定;滑坡变形响应库水位下降呈现出滞后性,库水位下降每年开始于 2 月下旬,下降过程一直持续至 6 月中旬,而滑坡变形的剧增表现在每年的 5~6 月份,滞后于库水位下降一段时间。

由图 4 可看出,在六月份库水由 160 m 降至

145 m 左右,滑坡变形曲线出现突跃,滑坡的月位移量达到最大值,充分表现出“阶跃”的动态响应特征,而在每年的八月至第二年的四月滑坡变形区域平缓。

综合以上分析,八字门滑坡变形受到库水位变化影响,其规律可总结为:当库水位处于快速持续下降时段,将会诱发滑坡产生加速位移,位移产生时间具滞后效应。

3 不同库水降速下八字门滑坡数值模拟

3.1 基本原理

对于滑体渗流场的变化规律,本文采用基于 Geo-Studio 的饱和-非饱和渗流场与应力场耦合方法进行计算。滑坡稳定性的变化规律,采用考虑基质吸力影响的 Morgenstern-Price 极限平衡法^[12]进行计算。最后是在 SIGMA/W 模块中进行应力应变分析,此模块以 SEEP/W 模块为基础,运用非饱和土理论和摩尔库伦弹塑性模型进行计算^[13]。

在 SEEP/W 模块中,赋予滑坡边界条件、非饱和和渗透函数和水土特征曲线等不同的条件进行计算,分析其渗流场的变化情况和超孔隙水压力的消散状况,其计算基础知识是饱和-非饱和渗流运动规律。下式为饱和-非饱和和地下水渗流公式^[14]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \rho_w \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

其中 K_x 、 K_y —— X、Y 方向上的渗透系数;

θ —— 体积含水量;

Q —— 边界流量;

m_w —— 比水容重;

ρ_w —— 水的容重;

t —— 时间。

初始条件: $H(x, y, 0) = H_0(x, y, 0)$

$H|_r = H(x, y, t)$ 水头边界条件:

流量边界条件:

$$k \frac{\partial H}{\partial n} \bigg|_{r_2} = -q(x, y, t)$$

在 SLOPE/W 模块中赋予节点水头和孔隙水压力,计算其在不同工况下边坡的稳定系数的情况,此模块中采用 Morgenstern-Price 极限平衡法进行滑坡稳定性计算^[15],得出八字门滑坡在不同库水下降速率情况下的稳定状态以及发展趋势。

SIGMA/W 模块进行应力应变模拟,本文采用线弹性本构模型,用 K 值法确定应力,在此模块中应力应变采用增量的形式求解。

3.2 计算模型

选取滑坡主剖面 I-I' 剖面为计算剖面,该剖面能反应滑坡的真实情况。计算网格模型节点为 8 792,单元数为 8 217,网格类型为四边形单元和三角形单元(图 5)。

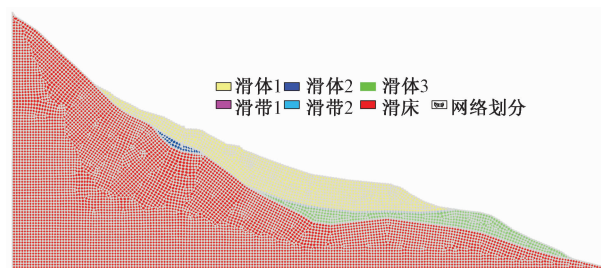


图 5 滑坡计算模型图

Fig. 5 Calculation model of landslide

3.3 计算参数

通过现场原位试验分析得出八字门滑坡渗透系数 $K=0.009-0.658$ 。非饱和渗流分析需要的参数包括材料初始含水率、饱和含水率、土水特征曲线及非饱和渗透性函数。其具体见图 6、图 7。

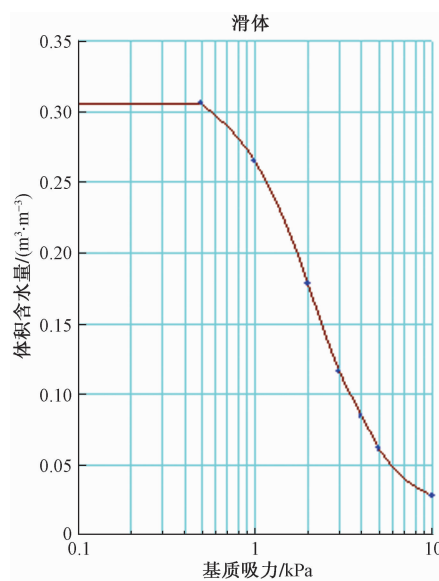


图 6 滑体土水特征曲线函数曲线

Fig. 6 Soil-water characteristic curve of landslide

综合滑坡现场以及室内试验数据,对其进行参数反演最终确定滑坡体的物理力学参数见表 1。

3.4 计算工况

自三峡库区正常运营以后,库水以不同的升降速率在 175 m 水位与 145 m 水位之间变动。通过对八字门滑坡的野外调查得知,八字门滑坡上目前基本上没

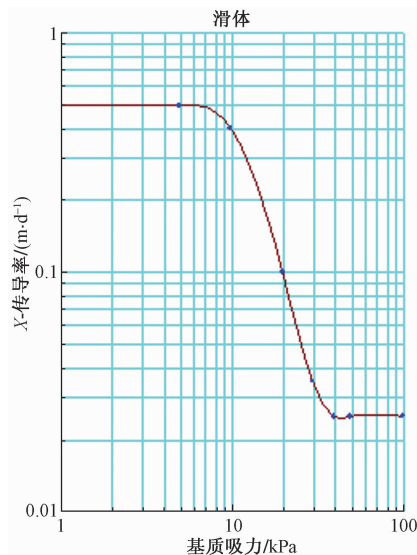


图 7 滑体非饱和渗透系数曲线

Fig. 7 The unsaturated permeability coefficient curve

有其他较重的外加荷载,因此假定八字门滑坡模型中的外部荷载为零,其计算工况见表 2。

表 1 八字门滑坡计算参数

Table 1 Parameters of Bazimen landslide

参数名称	重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比 V	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 ψ / ($^{\circ}$)	弹性模量 $E/10^4$ MPa
滑床	28.00	0.21	245	36	4.257 1.56e10
滑体	20.90	0.18	18.9	22	0.283 2.45e7
滑带	20.90	0.28	16.7	19	0.231

表 2 滑坡计算工况

Table 2 Calculation conditions of landslide

编号	工况组合
1	175 ~ 159 m 降速 0.13 m/d, 159 ~ 145 m 降速 0.6 m/d
2	175 ~ 159 m 降速 0.13 m/d, 159 ~ 145 m 降速 0.8 m/d
3	175 ~ 159 m 降速 0.13 m/d, 159 ~ 145 m 降速 1.0 m/d
4	175 ~ 159 m 降速 0.13 m/d, 159 ~ 145 m 降速 1.2 m/d

4 计算结果分析

4.1 滑坡稳定性模拟分析

通过上述软件在不同工况下先通过 SEEP/W 计算出每步的孔隙水压力,得到相应的渗流场,导入 SLOPE/W 计算出每步的安全系数。本模型在 0.6 m/d、0.8 m/d、1.0 m/d 以及 1.2 m/d 的库水位降速下从 175 m 至 145 m 水位,在不同的工况下最后计算的稳定系数都不一样,工况 1 至工况 4 在 145 m 时的稳定系数见图 8。

由计算结果可以得出:随着库水位的下降,滑坡的稳定系数逐渐减小,不同的库水下降速度滑坡的稳定

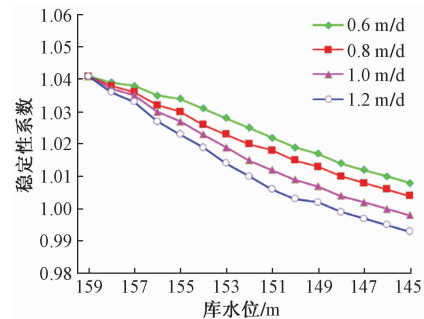


图 8 不同工况下的滑坡稳定系数变化

Fig. 8 Landslide stability coefficient under different conditions

系数也不一样,库水下降速度越大滑坡的稳定系数减小越快。

八字门滑坡发生失稳的主要原因是因为库水位下降导致,这是直接原因也是外在因素。内在原因是因为八字门滑坡地质地形因素,由于八字门滑坡的滑坡体是第四系松散的堆积岩土体,其结构松散,自稳程度较差,强度低,遇水易软化,且沿砂泥岩界面常见泥化现象,软岩透水性差,为动水压力型滑坡提供先决条件。而库水位下降导致地下水也相应发生变化,产生动水压力,减少浮托作用力。地下水渗流速度滞后于库水下降速度,引发水头差形成动水压力,其方向由内指向外,不利于滑坡的稳定,库水下降速度越大,动水压力越大,滑坡的稳定系数越小。

4.2 滑坡渗流场分析

利用 SEEP 模块进行模拟,四种工况下地下水位线的变化如图 9 所示。由于库水从 175 m 降至 159 m 过程降速一致,这里不再分析。库水位从 159 m 降至 145 m 过程中,由于下降速度不同因此出现浸润线分离现状,库水位下降速度越大浸润线越高。水头变化可看出库水下降速度越大水力坡降越大,与浸润线变化高度吻合。

由图 9 可看出,在不同的库水降速下,滑坡体的地下水浸润线呈现倾斜,说明地下水滞后于库水下降,而且降速越大越倾斜,其滞后效应越明显,产生的动水压力也就越大。在库水下降速度不断增大时,渗流作用在增强,但是渗流速度的增长率有减缓趋势,其主要原因在于,当地下水下降速率增大时,形成非饱和区的时间会缩短,在基质吸力的作用下,地下水的渗流作用就会受到抑制,渗流速度的增长率便会逐渐减缓。

库水位从 159 m 下降至 145 m 过程中,下降速度大于地下水渗流速度,地下水来不及及时排除,在滑坡体内形成较大的动水压力,形成瞬态渗流场,且库水位

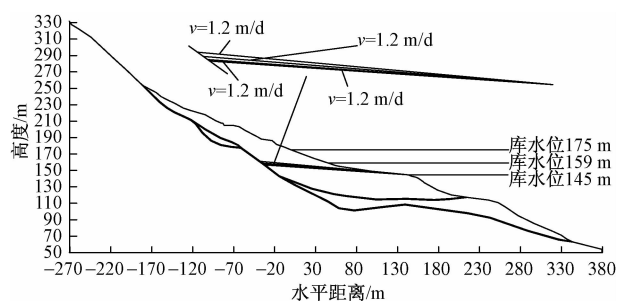


图9 库水位以不同速率从159 m下降至145 m

各工况地下水位线变化

Fig. 9 Underground water level changes under different water level dropping rate from 159 m to 145 m

下降速度越大,形成的水力坡降越大,产生的动水压力越大。越不利于滑坡的稳定。

4.3 八字门滑坡应力场模拟分析

本模型中应力应变的计算是在渗流模拟的基础上进行分析计算,然后赋予X、X/Y的边界条件。由上文分析得出当库水位下降至145 m时,滑坡稳定性系数最小,因此,将无耦合作用的应力场作为初始应力场与145 m水位应力场进行对比分析。在不同库水位降速下降至145 m时八字门滑坡XY方向的剪应力变化见图10~13。

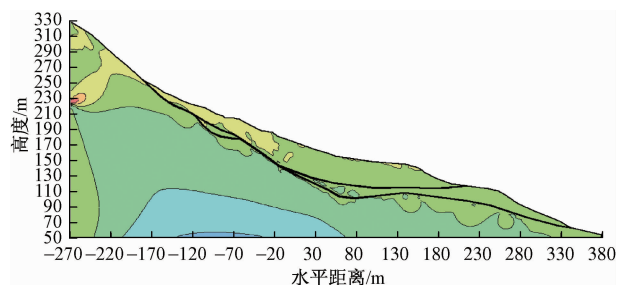


图10 0.6 m/d降速下至145 m处XY方向剪应力图

Fig. 10 Shear stress in the direction of XY at a drawdown rate of 0.6 m/d to 145 m of water level

从图10可以看出:开始在滑坡160 m处滑带附近出现小范围剪应力圈,主要是因为160 m处下降速率增大,在库水下降速度不断增加的条件下至145 m处,滑带附近剪应力的分布范围不断扩大,剪应力增大。其中滑带部位主要为剪切塑性区,表明主要承受剪应力破坏,后部为拉张应力分布区,主要表现为拉裂破坏。

4.4 滑坡的位移场模拟分析

对此滑坡进行位移场分析,选取库水在1.0 m/d降速下降至145 m时滑坡体内的位移场进行对比分析

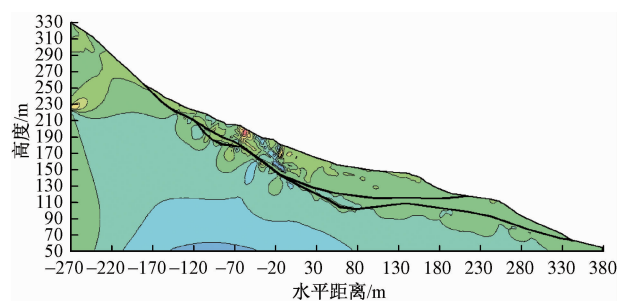


图11 0.8 m/d降速下至145 m XY方向剪应力图

Fig. 11 Shear stress in the direction of XY at a drawdown rate of 0.8 m/d to 145 m of water level

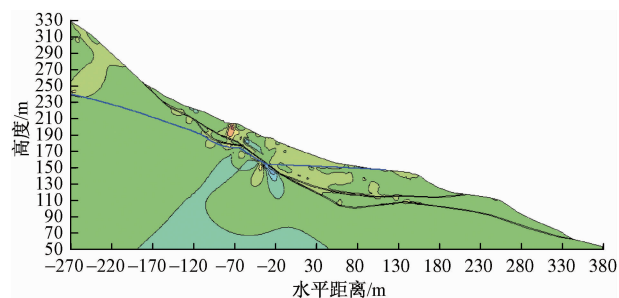


图12 1.0 m/d降速下至145 m XY方向剪应力图

Fig. 12 Shear stress in the direction of XY at a drawdown rate of 1.0 m/d to 145 m of water level

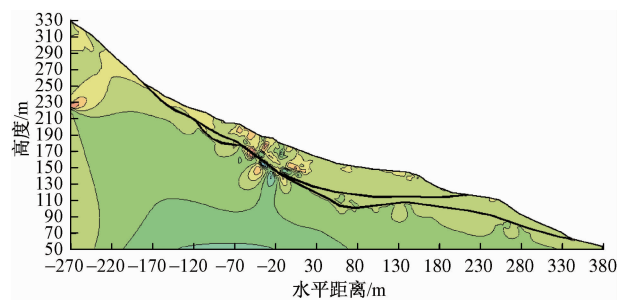


图13 1.2 m/d降速下至145 m XY方向剪应力图

Fig. 13 Shear stress in the direction of XY at a drawdown rate of 1.2 m/d to 145 m of water level

(图14)。

以1.0 m/d库水下降速率为例,由模拟结果可以得出,在开始时随着库水的下降,在滑坡后缘滑带附近出现小范围的位移,至159 m处时,库水下降速度出现陡增,从图14中可以看出在滑带附近出现明显的位移,库水的不断下降,滑坡前缘出现较大位移,并与后缘逐渐连成一片,滑坡失稳。

为研究在不同库水降速下滑坡同一位置处滑坡竖向位移变化情况,以滑坡前缘某点为例,其模拟结果如图15所示。

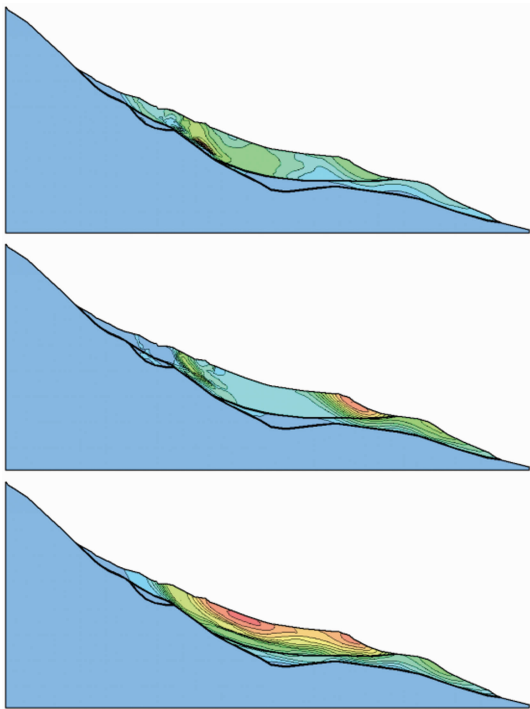


图 14 1.0 m/d 库水降速下滑坡位移场变化图

Fig. 14 The slope displacement field variation under the falling velocity of the water level of 1.0 m/d

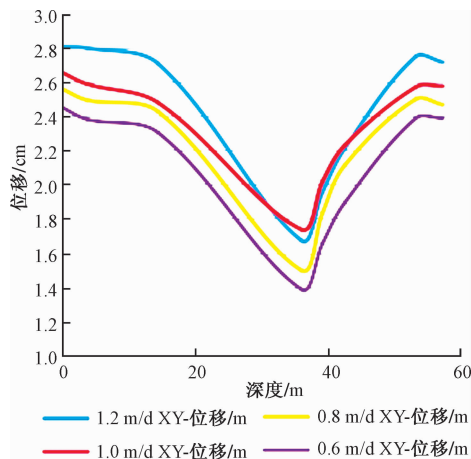


图 15 不同库水降速下至 145 m 滑坡前缘不同深度处 XY 方向位移

Fig. 15 Displacement in the direction of XY at different depths of the leading edge of the landslide from different reservoir water level dropping rate to 145 m

根据图 15 的模拟结果,在不同库水下降速率条件下,滑坡前缘不同深度处位移呈现先减小后增大的趋势,主要是由于滑体表面在库水的作用下效果较为明显,距滑坡表面越深作用逐渐较小,但是在滑带处因为滑带土的强度较弱,因此受渗流场的影响位移较大,因

此出现先减小后增大的现象。

5 基于多场特征分析的动水压力型滑坡致灾机理分析

在不同库水下降速度下,滑坡的渗流场、应力场与位移场也在不断变化,综合其多场可以看出:滑坡体内的渗流场、应力场与位移场高度吻合,即库水下降速度越快滑坡体内地下水流速矢量和位移矢量绝对值均变大。根据前面滑坡稳定性计算结果可知,滑带在库水作用下,摩擦阻力减小,滑带处剪应力出现应力集中且剪应力不断增大。在库水的作用下滑坡表面出现较大位移,在渗流场的作用下滑带处位移增大,滑坡的安全系数不断减小。库水与地下水的作用下形成层状应力带,从滑坡的位移场和剪应力场可以看出滑坡的变形是逐渐变化的,是库水与渗流作用下产生蠕变的结果,在应力带的作用下将可能会产生新的滑带。

根据其受力特征该滑坡属于牵引式滑坡。在库水位下降过程中其力学作用机理主要表现为:首先在库水骤降前,由于水的浮托力作用,使得岸边坡的岩土体形成稳定的状态,特别是那些悬挑或者临空的岩土体,由于库水的浮托力而趋于稳定,一旦这个浮托力突然撤走或减小,则滑体的重度增加其下滑力增大,滑坡就很容易失稳。其次,在骤降之前,库水与滑体地下水处于稳定状态,由于库水位骤降作用以及滑体具有滞后性,所以滑体内的地下水来不及下降与库水保持一致,因此会产生水头差,形成较大的动水压力,而来不及及时排除的水又在岩土体内形成静水压力。不利于滑坡的稳定性。

非饱和土基质吸力改变。对于涉水滑坡,一般都会有饱和段和非饱和段,主要是由于库水和地下水的影响,一般位于库水以下的属于饱和段,而位于库水位以上的处于非饱和状态。而非基质吸力主要存在于非饱和土中,饱和土中没有基质吸力。但是通过许多试验研究分析,非基质吸力主要的影响因素是岩土体的含水量以及渗透性,当岩土体中含水量增大时,基质吸力就会减小,而基质吸力能增强滑体的抗剪强度,当库水入渗时,滑坡岩土体的含水量增大,非基质吸力就会减小从而其抗剪强度就会减小,而达到饱和时非基质吸力就消失了。渗流场的变化主要是由于库水变化产生动水压力以及引起孔隙水压力发生变化,滑坡体有效应力和渗流力进一步产生变化,同时会使岩土体的应力状态发生变化,即产生耦合作用。

6 结论

本文选取三峡库区典型动水压力型滑坡八字门滑坡为案例,根据该滑坡监测资料分析其宏观变化,利用Geo-Studio软件进行数值模拟,揭示了动水压力型滑坡的变形机理,主要研究成果如下:

(1)八字门滑坡表层岩土体松散多孔渗透性良好遇水易软化,库水入渗出现泥化现象,导致滑坡体的渗透性骤减。而在浅层土以下的土中含黏性土较多,土质结果比较密实,软岩透水性差,为动水压力的形成创造了良好的条件。

(2)动水压力型滑坡主要是由于地下水下降速率滞后于库水下降速率产生指向滑坡外的动水压力,其稳定系数随着库水的下降而减小,库水下降速率越大滑坡稳定系数减小越快,滑坡越不稳定。在库水下降速率不断增大时,渗流作用在增强,但是渗流速率的增长率有减缓趋势。

(3)在不同的库水下降速率下,动水压力型滑坡的渗流场、应力场和位移场具有较高的吻合度,滑带处受渗流场的影响,剪应力增大,位移增大。对于土质滑坡,在库水周期性作用下,滑坡体产生蠕变,形成塑性变形区,这种引起滑体土产生蠕变的破坏力因滑体深度不同而不同,逐渐出现应力带,更有可能产生新的滑带,形成次级滑坡。

参考文献:

- [1] 易武,孟召平,易庆林.三峡库区滑坡预测理论与方法[M].北京:科学出版社,2011.
YI Wu, MENG Zhaoping, YI Qinglin. Theoretical method and research of landslide prediction in the Three Gorges Reservoir Area [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [2] 肖诗荣,胡志宇,卢树盛,等.三峡库区水库复活型滑坡分类[J].长江科学院院报.2013; 30(11): 39-44.
XIAO Shirong, HU Zhiyu, LU Shusheng, et al. Classification of reservoir triggered landslides in Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013; 30(11): 39-44.
- [3] 甘恩来,李芝军,彭斌,等.三峡库水位升降对动水压力型滑坡稳定性的影响分析——以上安坪滑坡为例[J].中国水运.2016.16(3):157-158.
GAN Enlai, LI Zhijun, PENG Bin, et al. Analysis of the influence of water level fluctuation of the Three Gorges Reservoir on the stability of dynamic water pressure type landslide [J]. China Water Transport, 2016, 16(3): 157-158.
- [4] 王锦国,周云,黄勇.三峡库区猴子石滑坡地下水动力场分析[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增刊1):2757-2762.
WANG Jinguo, ZHOU Yun, HUANG Yong. Groundwater analysis of Houzishi Landslide in the Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (S1): 2757-2762.
- [5] 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 Ling, WANG Shimei, WANG Li. 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.
- [6] 李永康,许强,董远峰,等.库水位升降作用对动水压力型滑坡的影响——以三峡库区白家包滑坡为例[J].科学技术与工程,2017,17(18):18-24.
LI Yongkang, XU Qiang, DONG Yuanfeng, et al. Influence of reservoir water level fluctuation on typical hydrodynamic pressure landslide: taking Baijiabao Landslide in Three Gorges Reservoir for an example [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(18): 18-24.
- [7] 廖红建,盛谦,高石夯,等.库水水位下降对滑坡体稳定性的影响[J].岩石力学与工程学报,2005,24(19):3454-3458.
LIAO Hongjian, SHENG Qian, GAO Shihang, et al. Influence of drawdown of reservoir water level on landslide stability [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (19): 3454-3458.
- [8] 张旭.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 Xu. 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.
- [9] 马菡林.杜家山滑坡致灾机理研究[D].西安:长安大学,2011.
MA Changlin. Study on disaster-causing mechanism of Dujiashan Landslide [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [10] 刘朋辉.滑坡滑动机理及风险评价研究[D].北京:

- 北京工业大学,2007.
- LIU Penghui. Study on landslide sliding mechanism and risk assessment [D]. Beijing: Beijing University of Technology,2007.
- [11] 晏同珍. 滑坡构造力学某些特征分析[J]. 地球科学,1981(2):223-239.
- YAN Tongzhen. Analysis of some characteristics of structural mechanics of landslide[J]. Earth Science, 1981(2):223-239.
- [12] 屈建军,李建林,王乐华. GEO-SLOPE 软件在边坡稳定性分析中的应用[J]. 人民长江,2009,40(15):1001-4179.
- QU Jianjun,LI Jianlin,WANG Lehua. Application of geo-slope software in SLOPE stability analysis [J]. Yangtze River,2009,40(15):1001-4179.
- [13] DELWYN G. FREDLUND,HARIANTO RAHARDJO. 非饱和土力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- Delwyn G. Fredlund, Harianto Rahardjo. Unsaturated soil mechanics [M]. Beijing: China Construction Industry Publishing House,1997.
- [14] 陈铁林,邓刚,陈生水,等. 裂隙对非饱和土边坡稳定性的影响[J]. 岩土工程学报,2006,28(2):210-215.
- CHEN Tielin, DENG Gang, CHEN Shengshui, et al. Effects of fissures on stability of unsaturated soil slope [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006,28(2):210-215.
- [15] 梁鑫,殷坤龙. 库水位波动及降雨作用下巫峡干井子滑坡流-固耦合特征及稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2019,30(1):642-652.
- LIANG Xin, YIN Kunlong. Flow-solid coupling characteristics and stability analysis of Ganjingzi Landslide in the Wu Gorge under reservoir water level fluctuation and rainfall [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019,30(1):642-652.

封面照片说明

成昆铁路甘洛段苏雄乡埃岱村山体滑塌

2019年8月14日12时40分许,成昆铁路甘洛段苏雄乡埃岱村岩岱2号至3号隧道段间发生山体滑塌。垮塌体后缘高程1 215 m,前缘1 020 m,高差约195 m,其中垮塌体源区剪出口高程为1 130 m。垮塌体启动后沿坡面冲沟高速铲刮扩容,最终形成的滑塌体长约315 m,平均宽约70 m。据垮塌后无人机影像估算,垮塌体总量约 $1.32 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。

(中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害技术指导中心) 王立朝 供稿)