

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221536

三峡库区白水河滑坡形成机理及变形特征

刘士元^{1,2}, 王孔伟^{1,2}, 周 准^{1,2}, 赵志豪^{1,2}, 王 岚^{1,2}, 张凯元^{1,2}

(1. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 鉴于三峡库区白水河顺层滑坡的形成演化过程及蓄水后的变形特征研究尚不深入, 在野外地质调查的基础上, 利用最新勘察资料和白水河滑坡 GPS 监测资料, 采用岩芯对比分析方法分析了白水河滑坡的岩土体结构及蓄水后的变形特征, 发现白水河滑坡演化过程经历了滑坡前期演化阶段、岩质滑坡演化阶段和堆积型滑坡演化阶段, 目前白水河滑坡处于堆积型滑坡演化阶段; 白水河堆积型滑坡是二期岩质滑坡破坏形成的滑坡堆积体垂直叠加的产物, 中部存在粘土层; 对应 135、156~175 m 水位, 白水河滑坡的变形可划分为两个阶段, 变形特征分别表现为缓倾台阶状和陡倾台阶状。该研究结果为白水河滑坡的治理提供了相应的决策建议, 同时亦为具有相似结构特征的地质灾害的后期治理提供了方向。

关键词: 白水河滑坡; 粘土层; 监测资料; 变形特征

中图分类号: TV697. 2⁺3; P642. 22

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)06-0146-04

1 工程概况

白水河滑坡地处秭归县沙溪镇长江南岸, 属于鄂西褶皱山地, 为低山峡谷区, 表现为河谷斜坡地貌。山顶高程一般在 450~500 m 之间, 最低处延伸至长江河谷, 高差约 300 m。研究区出露地层包括三叠系巴东组、侏罗系香溪组及第四系。从局部构造看, 白水河滑坡位于谢家包背斜的北翼, 其形成过程与机理与谢家包背斜密切相关^[1]。谢家包背斜位于长江右岸, 延伸方向 80°, 延伸长度 29 km, 宽度为 1~3 km, 枢纽向南东方向倾伏(144°/28°), 尖灭于沙溪镇附近, 背斜主体由三叠系构成, 北翼倾角平缓(10°~30°), 南翼倾角较陡(59°~69°), 为不对称断层传播褶皱, 发育有北东、北西两组共轭断裂构造(F₂、F₃), 形成于燕山、印支构造旋回。谢家包背斜在空间上分别控制着长江流域、清干河流域滑坡群。谢家包背斜北翼因长江的切入形成一个楔状区域, 且长江在杨家沱区域切过谢家包背斜核部, 杨家沱西侧为一顺向坡, 东侧为一反向坡。在楔状区域内顺向坡的坡长由西向东逐渐减小, 随着坡长的逐渐减小, 滑坡规模随之减小; 越过背斜核部形成反向堆积体滑坡, 滑坡规模同样逐渐减小(表1), 白水河

表 1 谢家包背斜两翼滑坡群对比表

Tab. 1 Comparison of landslide groups on both wings of Xiejiaobao anticline

| 长江流域 | | 清干江流域 | |
|-------|-----------------------------------|-------------|-----------------------------------|
| 滑坡名称 | 规模/10 ⁴ m ³ | 滑坡名称 | 规模/10 ⁴ m ³ |
| ①范家坪 | 11 000 | (1)殷家坝滑坡 | 2 190 |
| ②白水河 | 1 820 | (2)姜家滩滑坡 | 50 |
| ③台子湾东 | 134 | (3)唐家山对岸崩滑体 | 41 |
| ④台子湾北 | 30 | (4)白羊坪东侧滑坡 | 33 |
| ⑤淹锅沙坝 | 375 | (5)白羊坪崩滑体 | 18 |
| ⑥雄黄山 | 306 | (6)后坪西崩滑体 | 6 |
| ⑦杨家沱 | 555 | | |
| ⑧卢家沱 | 300 | | |
| ⑨树坪 | 4 027 | | |
| 总计 | 19 627 | 总计 | 2 653 |

注: 长江流域、清干江流域空间演化方向均为由西向东。

滑坡处于顺向坡结构的中部(图 1)。针对白水河滑坡, 已做了很多研究^[2-6]。整体上看研究主要集中于稳定性评价领域, 对其成因机理和整体演化过程的认识尚不深入。鉴此, 本文在野外地质调查研究的基础上, 应用白水河滑坡的最新勘察资料和滑坡监测资料, 针对其形成机理和时空演化过程进行研究, 并分析了三峡水库蓄水后的变形特征, 旨在为该滑坡的治理提供新的思路。

2 白水河滑坡岩土体结构特征

白水河滑坡作为谢家包背斜控制的顺层结构

收稿日期: 2022-07-27, 修回日期: 2022-08-31

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U2034203); 湖北省创新群体项目(2020CFA049)

作者简介: 刘士元(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为地质灾害及成因机理, E-mail: 1454348864@qq.com

通讯作者: 王孔伟(1966-), 男, 博士、副教授, 研究方向为地质灾害成因机理, E-mail: wangkongwei@126.com

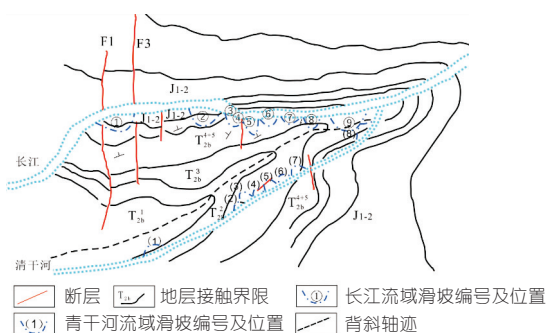


图 1 谢家包背斜局部构造特征与滑坡分布的关系

Fig. 1 Relationship between local structural characteristics of Xiejiabao anticline and landslide distribution

滑坡,其破坏演化过程代表了该类滑坡的形成。此次研究采用岩芯进行对比分析,确定了对比标志层,对比标志层的确定对白水河滑坡的认识起到了关键性作用。白水河滑坡勘查共布置了 9 条勘探线(图 2)。

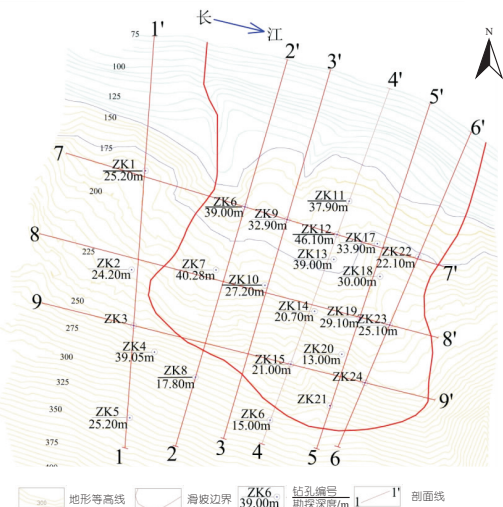


图 2 白水河滑坡勘探布置图

Fig. 2 Layout of Baishuihe landslide exploration

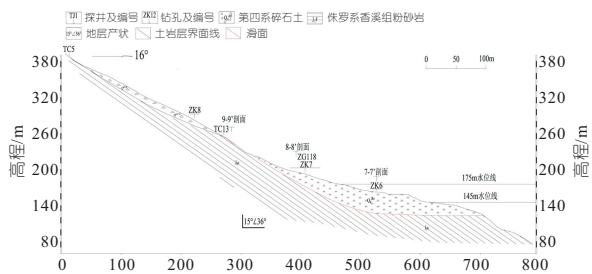
2.1 岩芯对比标志层的确定

在白水河滑坡岩芯对比过程中发现,研究区顶部普遍存在一套粘土层,为成壤作用的产物;同时在工程地质剖面 3-3'、4-4'、6-6' 的钻孔中部发现一层厚度 3~6 m 粘土层,该套粘土层将滑坡堆积体分成上、下部碎石土层两部分,白水河滑坡部分钻孔中部粘土层的发现具有如下意义:①表明在上部碎石土堆积以前,存在成壤过程阶段,该套粘土层中存在碳化植物根茎亦证明了该点;②表明白水河滑坡经历了两次破坏过程,目前白水河滑坡为两次破坏后滑坡堆积物垂向叠加的产物。

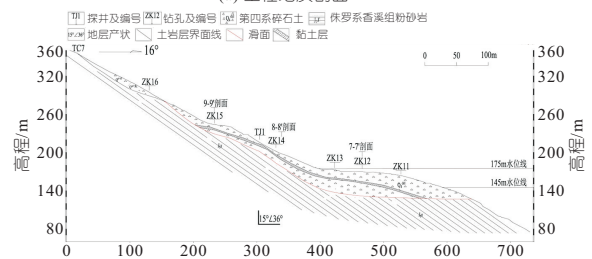
2.2 野外地质调查及钻孔剖面对比

工程地质剖面 2-2' 位于滑坡中部,长 800 m,剖面方向 NE 16°,剖面上分布有 3 个钻孔(ZK6~ZK8)。岩土体结构主要由 4 部分组成,不存在中

部粘土层(图 3),从目前现状看,工程地质剖面 2-2' 整体为凹形坡,存在两处切层部位,具有堆积型滑坡的整体特征。



(a) 工程地质剖面 2-2'



(b) 工程地质剖面 4-4'

图 3 白水河滑坡工程地质剖面 2-2'、4-4' 对比图
Fig. 3 Comparison of 2-2' and 4-4' engineering geological profile of Baishuihe landslide

工程地质剖面 4-4' 位于滑坡中部,长 800 m,剖面方向 NE16°,剖面上分布有 5 个钻孔(ZK12~ZK15)。岩土体结构主要由 6 部分组成,存在中部粘土层(图 3),从目前现状看,工程地质剖面 4-4' 整体为凹形坡,存在两处切层部位,具有堆积型滑坡的整体特征,为两期滑坡堆积物垂向叠加形成。

白水河滑坡后部存在基岩分布区,野外地质调查发现基岩结构松散,表现为全风化基岩,坡面与岩层面一致(图 4),处于岩质滑坡演化阶段,滑带为谢家包背斜形成时的层间剪切带,野外露头表现为含棱铁矿结核的黑色泥岩(图 5),岩质滑坡破坏后形成的滑坡堆积物成为现今白水河滑坡的主要组成物质。

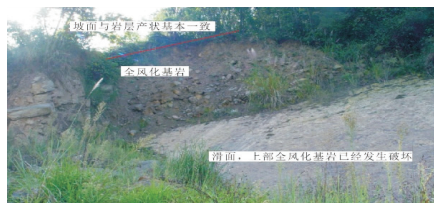


图 4 白水河滑坡岩质滑坡演化阶段的特征

Fig. 4 Characteristics of rock landslide evolution stage of Baishuihe landslide

工程地质纵剖面 1-1'、5-5'、2-2' 相似,不存在中部粘土层,表明这些地区不存在上部碎石土堆积;工程地质纵剖面 3-3'、4-4'、6-6' 相似,存在中部粘土层,表明这些地区存在上部碎石土堆积,进

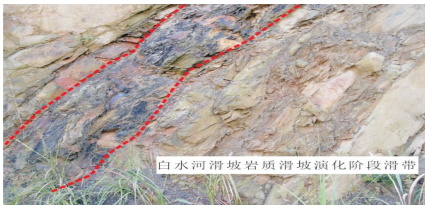


图 5 白水河滑坡岩质滑坡演化阶段滑带特征

Fig. 5 Characteristics of sliding zone in the evolution stage of Baishuihe landslide rock landslide

一步对比分析 3 条横剖面(7-7'、8-8'、9-9')，确定了上部 and 下部碎石土堆积的分布范围(图 6)。

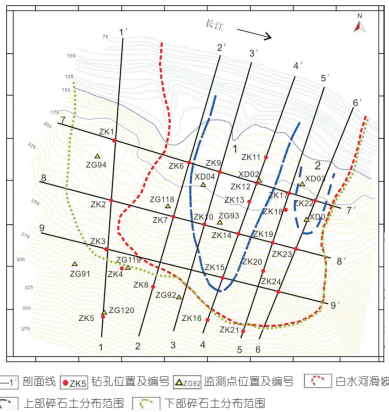


图 6 白水河滑坡上部碎石土堆积分布范围

Fig. 6 Distribution range of gravel soil accumulation in the upper part of Baishuihe landslide

由野外地质调查和岩芯对比发现，白水河滑坡整个演化过程经历了 3 个阶段(图 7)，从时空角度建立白水河滑坡动态演化地质模型，对滑坡治理提供了新的思路^[7]。第一个阶段(滑坡前期演化阶段)，长江切割谢家包背斜，受前期形成的剪切面及层间节理控制，先前层间剪切带在重力作用下，向下运动逐渐演化为岩质滑坡的滑带(图 7 中 a)。第二个阶段(岩质滑坡演化阶段)，岩石逐渐风化，形成全风化岩石分布带，滑带逐渐形成，层间节理部位因重力作用形成一应力集中带，该处逐渐演化成岩质滑坡的剪出口，并在该处形成切层，直至破坏形成岩质滑坡堆积体(图 7 中 b)。

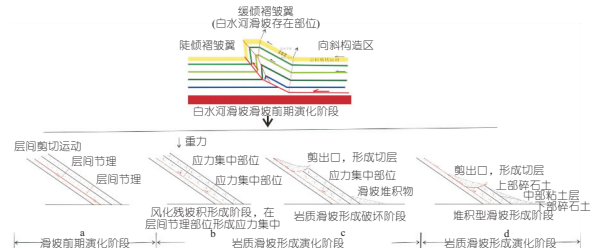


图 7 白水河滑坡形成过程演化示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the formation and evolution of Baishuihe landslide

白水河滑坡是两次岩质滑坡破坏后垂向堆积

形成的产物，第一期岩质滑坡规模最大，其堆积的碎石土规模远超现今白水河滑坡的范围，包括工程地质剖面 1-1' 所在的位置，当时地貌形态为一宽缓的沟谷，沟谷被滑坡堆积物(下部碎石土堆积)几乎填满，随着时间推移，在碎石土表面形成耕植土，碎石含量降低，形成粉质粘土层，直到被上部碎石土堆积掩埋，上部碎石土堆积是白水河滑坡第二次岩质滑坡破坏的产物，分布范围明显小于下部碎石土堆积的范围，主要分布于工程地质剖面 3-3'、4-4'，同时在工程地质剖面 6-6' 局部分布。因此，中部粘土层的识别是此次研究的一个突破点，对白水河滑坡的深入认识起到关键性作用(图 7 中 c)。

第三个阶段(堆积体滑坡演化阶段)，白水河滑坡目前正处于这个演化阶段，实质上表现为堆积型滑坡(图 7 中 d)。

3 白水河滑坡变形特征

白水河滑坡在三峡水库蓄水后发生了较大变形，变形主要集中在白水河滑坡堆积体区域，位于其后部的基岩分布区不存在变形，整体上具有台阶状特点(图 8)。白水河滑坡蓄水后变形可划分为两个阶段，这两个阶段的变形主要控制因素并不一致，两个阶段分别对应不同的水位高程。

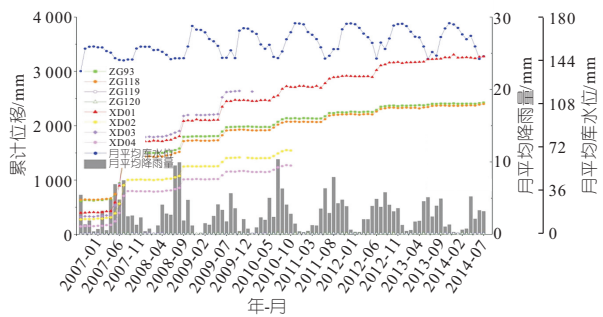


图 8 白水河滑坡累计变形曲线

Fig. 8 Cumulative deformation curve of Baishuihe landslide

库水位 136 m 时白水河滑坡累积变形曲线表现为缓倾台阶状，变形主要受降雨影响，库水位影响次之，台阶的陡缓程度受降雨强度和持续时间的影响，并存在一定的滞后效应。

库水位 156~175 m 之后白水河滑坡累积变形曲线表现为陡倾台阶状，库水位下降是该滑坡变形的主要影响因素，库水位存在 11~30 m 变幅，降雨对变形影响次之，台阶的陡倾幅度与台阶高度受日降水幅度影响，存在一定的滞后效应。

从变形幅度看，各监测点的变形量可划分为 3 组，XD01、XD03 监测点累计变形量最大，其次

为 ZG93、ZG118 监测点, XD02、XD04 监测点累计变形量最小。

从平面上看 XD01 监测点位于工程地质剖面 6-6'、XD03 监测点位于工程地质剖面 5-5'、6-6' 之间,都处于 2 号上部碎石土堆积范围内(图 9),地表存在宏观变形,分布有 Lf1(横向张裂隙)和 Lf2、Lf3(纵向剪切裂隙),Lf1 裂缝沿下部碎石土堆积形成的局部山梁前缘分布,表明此次变形不是沿着下部碎石层与基岩的界面发生,预测是沿着中部粘土层发生的局部滑动(图 10),Lf2、Lf3 剪切裂隙的存在,表明局部滑动已经发生,但还没有连接成一个整体,尚未形成整体破坏,是白水河滑坡目前最危险地段。同时 XD03、XD01 监测点变形方向基本一致,其余监测点变形方向存在一定夹角,变形并不同步(图 9)。

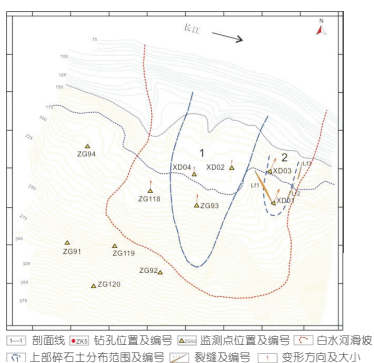


图 9 白水河滑坡变形矢量平面图

Fig. 9 Plane view of deformation vector of Baishuihe landslide

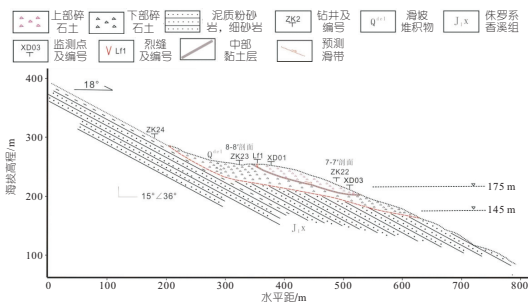


图 10 白水河滑坡工程地质剖面 6-6' 对比图(预测滑带)

Fig. 10 Comparison of 6-6' engineering geological profile of Baishuihe landslide (predicted slip zone)

ZG118 监测点位于白水河滑坡中后部下部碎石土分布区内, ZG93 监测点同样位于白水河滑坡的中后部 1 号上部碎石土堆积范围内(图 9),其变形幅度远大于位于滑坡前部的 XD04、XD02 监测点(位于 1 号上部碎石土堆积范围之内),对比地形特征, XD04、XD02 监测点坡面平缓,呈平台结构特征,中后部 ZG118、ZG93 监测点坡面变陡,坡角 15°~20°左右,表明这两个监测点之间变形并不同步,因 DX04 处地形平缓,形成

阻滑段,上部斜坡变形的剪出口应位于监测点 ZG118 与 DX04 之间地形改变的部位(图 11),滑带浅于碎石土与基岩界面或为中部粘土层部位,也就是说从目前白水河滑坡整体变形特征分析,发生整体破坏的可能性并不存在。

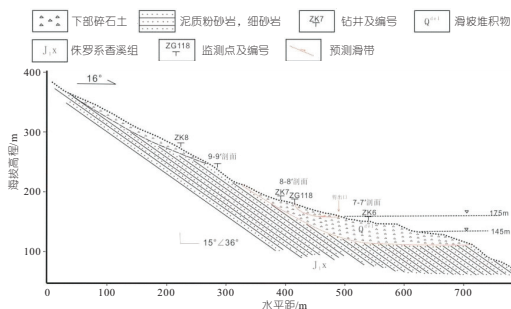


图 11 白水河滑坡工程地质剖面 2-2' 对比图(预测滑带)

Fig. 11 Comparison of 2-2' engineering geological profile of Baishuihe landslide (predicted slip zone)

4 结论

a. 白水河滑坡演化过程经历了滑坡前期演化阶段、岩质滑坡演化阶段和堆积型滑坡演化阶段三个演化阶段,目前白水河滑坡处于堆积型滑坡演化阶段。

b. 白水河滑坡堆积型滑坡是二期岩质滑坡破坏形成的滑坡堆积体垂向叠加的产物,中间的粘土层将滑坡分成上、下部碎石土堆积,上、下部碎石土分布范围分别约为 0.10、0.23 km²。

c. 三峡水库蓄水后,白水河滑坡的变形可以划分为两个阶段,对应 135、156~175 m 库水位,滑坡变形特点分别表现为缓倾台阶状和陡倾台阶状。

d. 平面上白水河滑坡变形分为两个区(东部 2 号上部碎石土分布区和西部分布区),两个区在变形方向和变形幅度上表现不同步;东部 2 号上部碎石土分布区预测滑带为中部粘土层;西部区在变形幅度前缘与后部并不同步,表现为前慢后快,预测剪出口位于坡度由陡变缓的部位,滑带为中部粘土层,目前发生沿基覆界面滑动的可能性很小。

参考文献:

[1] 王孔伟,赵小明,张帆. 三峡库区谢家包背斜与滑坡分布关系[J]. 高校地质学报,2015,21(2):255-267.

[2] 李德营,殷坤龙. 基于影响因子的 GM(1,1)-BP 模型在八字门滑坡变形预测中的应用[J]. 长江科学院院报,2013,30(2):6-11.

[3] 石爱红,牛瑞卿. 库水位响应滞后影响下的滑坡位移预测模型研究[J]. 安全与环境工程,2013,20(1):26-29,35.

kg/s。油雾抽吸装置能有效排出油雾,抑制油雾外逸。

参考文献:

[1] 何宝海,赵宇彤,李荣耀,等.棉花滩水电站机组推力轴承防甩油问题的研究[J].长春工程学院学报(自然科学版),2019,20(3):28-31.

[2] 杨举,王涛,周峰峰,等.葛洲坝水电站发电机推力轴承油雾防治分析[J].人民长江,2018,49(17):103-106,112.

[3] 杨攀,陈怡,潘鹏.瀑布沟机组上导轴承油槽密封盖板改造[J].水电与新能源,2021,35(7):48-49,55.

[4] 武彬,任泽民,敬燕飞.瀑布沟水电站发电机油雾的治理研究及应用[J].大电机技术,2016(5):52-55.

[5] 黄德建.小型水电站机组轴承油雾问题研究与治理[J].四川水利,2021,42(5):47-49.

[6] 邓尧曦,叶玉麟.浅析吸排油雾装置在水电站的应用[J].水电与新能源,2020,34(5):58-61.

[7] 曹硕桐.水电站机组油雾排放控制技术的研究与实现[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2020.

[8] 孙志翔,吴卫康.一种推力轴承油雾吸收装置的研究与应用[J].科学技术创新,2022(4):193-196.

[9] 王荣光,曹硕桐,田翔,等.基于改进的遗传-PID算法的机组轴承油雾排放控制策略[J].应用科技,2019,46(3):70-75.

[10] 刘传东,曹硕桐,田翔,等.基于P-模糊PID控制的发电机轴承油雾排放策略[J].科学技术创新,2018(34):8-10.

Numerical Simulation of Flow Field Characteristics of Thrust Bearing by Oil Mist Discharge Device

YANG Xiong¹,ZHANG Zhi-ping¹,PENG Xu-yi¹,WU Zhong-hua¹,ZHANG Song-xiao¹,NIE Sai¹,SUN Jie²,ZHENG Yuan³,ZHANG Yu-quan³

(1. Jiangxi Hongping Pumped Storage Co.,LTD, Yichun 330600, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The escape of oil mist from bearing oil groove of power station will not only pollute the environment of power station, but also bring safety hazard to electrical equipment. Combined with the actual situation of hydropower station, the installation of oil mist absorption device can help to discharge excess oil mist from oil tank and effectively avoid the pollution problem of oil mist in power station. In order to investigate the variation of oil mist distribution, velocity, pressure at measuring points and discharge amount of oil mist in the oil tank, numerical simulation calculation of thrust bearing oil tank with negative pressure oil mist pipe was carried out. It is found that after complete oil mist discharged, most of the oil mist can be effectively discharged; The overall change of the amount of oil mist at the outlet follows the law of rising first and then falling. Under the suction pressure of -500 Pa, the maximum discharge amount of oil mist could reach 0.008 23 kg/s. After the oil mist is discharged, the pressure drop at the oil tank upper region reaches 96.07%, and the reduction of the pressure difference can effectively prevent the oil mist from escaping to the cover plate, the wind tunnel, the rotor and so on. The research can provide some theoretical help for the oil mist discharge process of oil tank so as to better formulate the oil mist control strategy.

Key words: oil mist discharge; thrust bearing; numerical simulation; pumped storage power station; evaporation-condensation model



(上接第 149 页)

[4] 徐南,马符讯,贾东振.智能优化LSSVM算法的混沌时间序列边坡变形预测模型[J].测绘与空间地理信息,2015,38(2):9-11,17.

[5] 易庆林,张明玉,文凯,等.三峡库区白水河滑坡变形特征及影响因素的阶段分析[J].三峡大学学报(自然科学版),2017,39(1):38-42.

[6] 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.

[7] 王孔伟,常德龙,李春波,等.再论“滑坡群”——以三峡库区为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2017,47(5):1491-1501.

Mechanism of Formation and Deformation Characteristics of Baihe Landslide in the Three Gorges Reservoir Area

LIU Shi-yuan^{1,2},WANG Kong-wei^{1,2},ZHOU Zhun^{1,2},ZHAO Zhi-hao^{1,2},WANG Lan^{1,2},ZHANG Kai-yuan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang 443002, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Baishuihe landslide is a typical representative of bedding landslide in the Three Gorges reservoir area. However, the research on its formation evolution process and deformation characteristics after water storage is not deep. On the basis of field geological investigation and the latest survey data and GPS monitoring data, this paper makes a detailed study on the rock and soil structure of Baishuihe landslide and its deformation characteristics after impounding. The results show that the evolution process of Baishuihe landslide has gone through the early stage of landslide, the rock landslide and the accumulation landslide. At present, Baishuihe landslide is in the accumulation landslide stage; Baishuihe accumulation landslide is the product of vertical superposition of landslide accumulation bodies caused by the destruction of the second-stage rock landslide, and there is a clay layer in the middle. Corresponding to the water level of 135 m and 156-175 m, the deformation of Baishuihe landslide can be divided into two stages. The deformation characteristics of Baishuihe landslide are gently inclined steps and steeply inclined steps. The research results provide the corresponding decision-making suggestions for the treatment of Baishui River landslide, and also provide the direction for the later treatment of geological disasters with similar structural characteristics.

Key words: Baishuihe landslide; clay ground; monitoring data; deformation characteristics