

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.06.003

## 三峡库区杉树槽滑坡成因及视向滑动机制分析\*

周 剑<sup>1,2,3</sup>, 邓茂林<sup>1,2,3</sup>, 李卓骏<sup>1,2,3</sup>, 张富灵<sup>1,2,3</sup>, 林 琰<sup>1,2,3</sup>

(1. 三峡大学湖北省地质灾害防治工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 3. 湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 三峡库区杉树槽滑坡属于典型的顺层岩质滑坡,但其失稳模式不同于常见顺层岩质滑坡,由于真倾向受阻,属于真倾向滑移变形转为视向滑动的特殊失稳模式。在滑坡发生后对其追踪调查的基础上,从地层岩性、岩体结构、泥化夹层、纵向裂缝等地质特征分析杉树槽滑坡形成的原因;通过对滑坡区的滑坡发生前几年降雨数据进行对比分析,研究降雨类型对滑坡的影响;基于极限平衡法,考虑滑坡的失稳模式,对主滑体进行稳定性计算。分析结果表明,杉树槽滑坡是在后缘静水压力、底滑面扬压力、侧向静水压力和滑带土软化综合作用下发生的失稳破坏;多日持续降雨之后的暴雨是杉树槽滑坡发生的必要条件;将主滑体从纵横两个方向分别进行力的解析,当纵向裂缝内水头高度达到滑坡启动的临界高度时,确实可以依靠纵向裂缝的静水压力将主滑体侧向推出。结论可为此类滑坡早期识别、稳定性评价和防治工程提供参考。

**关键词:** 地质特征; 纵向裂缝; 视向滑动; 极限平衡法; 降雨

**中图分类号:** P642 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)06-0860-07

## Analysis on the Formation and Apparent-dip Lateral Sliding Mechanism of Shanshucao Landslide in the Three Gorges Reservoir Area

ZHOU Jian<sup>1,2,3</sup>, DENG Maolin<sup>1,2,3</sup>, LI Zhuojun<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Fuling<sup>1,2,3</sup>, LIN Yan<sup>1,2,3</sup>

(1. Hubei Geological Disaster Prevention and Control Engineering Technology Research Center, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. National Field Observation and Research Station of Landslides in Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** Shanshucao landslide in the Three Gorges Reservoir area is a typical bedding rock landslide, but its failure mode is different from that of the common bedding rock landslide due to the block in the true dip direction. Shanshucao landslide exhibited a special failure mode of sliding from the true dip direction to the apparent dip direction. On the basis of the follow-up investigation after the occurrence of Shanshucao landslide, the formation was analyzed from the geological characteristics such as

\* 收稿日期:2019-06-25;修回日期:2019-08-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1504803)、国家青年科学基金项目(41701013,41807924)、湖北省自然科学基金面上项目(2018CFB654)资助

作者简介:周 剑(1993-),男,硕士研究生。主要从事地质灾害预测与防治方面的研究。Email:798294061@qq.com

通讯作者:邓茂林(1980-),男,讲师,硕导,博士。主要从事地质灾害预测与防治方面的研究。Email:dmltop@163.com

stratum lithology, rock mass structure, muddy interlayer, lateral structural fracture and so on. Through the comparative analysis of the rainfall data in the landslide area a few years before the occurrence of the landslide, the influence of rainfall type on the development of the landslide was studied. Based on the limit equilibrium method, the failure mode of the landslide is considered, and the stability of the main landslide is calculated. Results show that Shanshucao landslide was caused by the combined action of hydrostatic pressure on the trailing edge, uplift pressure on the bottom sliding surface, lateral hydrostatic pressure and soil softening in the sliding zone. The heavy rainstorm after days of consecutive rainfalls was a necessary condition for the occurrence of the Shanshucao landslide. The force of the main sliding body was analyzed from both vertical and horizontal directions. It is true that the main landslide can be pushed sideways by the hydrostatic pressure of the lateral crack when the water head reaches the critical height for slope failure. The conclusion can provide references for early identification, stability evaluation and prevention of this kind of landslide.

**Keywords:** geological features; longitudinal crack; apparent-dip sliding; limit equilibrium method; rainfall

## 引言

三峡库区沙镇溪镇自三峡水库蓄水以来,已发生过多次滑坡,成为全国滑坡高发区之一。2003年7月,在蓄水后1个月,沙镇溪镇的千将坪滑坡整体失稳滑入江中,造成巨大损失<sup>[1]</sup>,2014年9月2日13时19分,在连续几日暴雨影响下,位于长江支流锣鼓洞河的杉树槽滑坡失稳,快速滑入锣鼓洞河。在致灾的过程中,约80万m<sup>3</sup>的滑坡体倾泻而下,将整个大岭电站和长200m的G348国道推入河内,62户140间房屋倒塌,60亩柑橘被摧毁,直接经济损失达3200多万元。

已有许多专家学者对杉树槽滑坡进行了研究,G. L. Xu等<sup>[2]</sup>对该滑坡的基本特征进行了分析,认为滑坡的产生是长时间的强降雨和库水位的快速上升导致;王鸣等<sup>[3]</sup>研究认为,从滑坡的主要动力来源来看,杉树槽滑坡属于“推移式”滑坡;易武等<sup>[4]</sup>认为降雨是诱发滑坡的关键外在因素,其为典型的剧动推移式降雨型顺层岩质滑坡。本文通过多次的野外调查走访以及相关资料的查阅,发现杉树槽滑坡在滑出时由初始的滑出方向108°转为75°,是沿滑动面滑动在前缘发生方向转动、左侧陡崖视向剪出的一种特殊的视向滑动破坏方式,认为其失稳模式不同于张倬元等提出的斜坡变形破坏五种常见的地质力学模型<sup>[5]</sup>,由于滑坡真倾向受阻,继而转视向滑动,属于真倾向滑移变形转为视向滑动的特殊失

稳模式。这类滑坡发生在单斜岩质坡体中,因前缘或者侧壁等受阻的岩质斜坡一般稳定性较高,难以失稳,但基于主滑体特定的坡体结构等条件(如滑坡纵向裂缝、溶蚀带),在一定的外界触发因素(如强降雨)下,底滑面贯通后,坡体逐渐剪断锁固段,向一侧视向滑出而失稳,因此这类滑坡失稳模式往往具有复合型特征。这类滑坡由于其失稳模式多样及破坏过程的隐蔽性等问题,导致地质灾害评估准确度较差,如重庆武隆的鸡尾山滑坡<sup>[6-8]</sup>、“8·12”山阳滑坡<sup>[9]</sup>等。

复杂山体失稳模式的研究是滑坡等地质灾害成功预报的基础<sup>[6]</sup>,目前,许多学者对岩体的失稳破坏模式和稳定性进行过研究<sup>[10-11]</sup>,滑坡失稳模式以及形成机制的认识不足,易导致滑坡的整个运动机制、成灾模式及成灾范围难以预测等问题,正是这种实际与预测上的差异性,导致滑坡灾害的严重性。因此,有必要对于杉树槽这类的视向滑移型滑坡的形成条件、成因机制、失稳模式等开展深入研究。

## 1 杉树槽滑坡区基本概况

滑坡区为中低山宽谷型地貌,地势总体北西高南东低,河床高程140~145m,受河流侵蚀切割,前缘塌岸多形成陡崖。杉树槽滑坡位于锣鼓洞河左岸一走向北东山脊南东侧的顺向坡,平面形态呈长条形,滑坡滑前为南侧大岭不稳定斜坡和北侧大岭

电站滑坡的一部分,中部为一走向约为 $108^\circ$ 、高 $15\sim 20\text{ m}$ 的陡崖。斜坡纵向上以G348国道为界为上缓下陡,且下部的山体有向北偏转的现象。滑前工程地质平面图如图1所示。

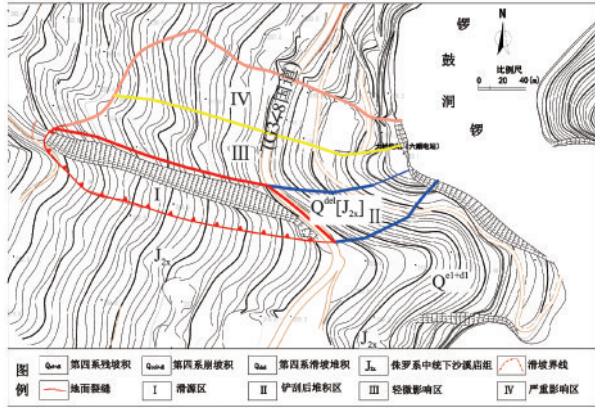


图1 杉树槽滑坡工程地质平面图

Fig.1 Engineering geological plan of Shanshucao landslide

杉树槽滑坡纵长 $360\text{ m}$ ,横宽 $45\sim 50\text{ m}$ ,均宽 $48\text{ m}$ ,面积 $1.73\times 10^4\text{ m}^2$ ,滑体厚 $23\sim 30\text{ m}$ ,均厚 $25\text{ m}$ ,规模约 $43.2\times 10^4\text{ m}^3$ ,滑坡主滑方向 $108^\circ$ 后转 $75^\circ$ 。依据滑前以及滑后的地形地貌、堆积体堆积及运动特征等进行分区,将其分为滑源区、严重影响区、轻微影响区以及铲刮后堆积区(图2)。

滑源区以新形成的陡崖为侧边界,G348国道转角至滑坡后缘的主滑体部位,该部位的滑体滑出堆积了大量松散块状块石,并将整个大岭电站和 $200\text{ m}$ 长的G348国道推入河内,在前缘临河段造成大量岩体错动碎裂形成碎裂岩,此区域划分为铲刮后堆积区。滑坡左侧则为因牵引作用而产生不同程度破坏的两个影响区域。



图2 滑坡滑后分区

Fig.2 Zoning map after landslide

## 2 杉树槽滑坡基本地质特征及其成因

### 2.1 地层岩性组合

长江三峡库区广泛分布着侏罗系地层,且在这套地层发育的滑坡总数占整个库区的 $67\%$ ,体积占 $65.3\%$ <sup>[12]</sup>。杉树槽滑坡发育于这套地层,其岩体具有软硬互层、上缓下陡的二元结构特征。坡面第四系残积物主要为粉质黏土杂碎石或碎块石土,结构稍密-中密,土石比约 $4:1$ ,厚度变化大,厚度一般为 $0.5\sim 2.0\text{ m}$ ,分布于山脊、滑坡后缘、滑坡周界。坡体为侏罗系中统下沙溪庙组( $J_{2k}$ )灰绿色砂岩、紫红色泥岩互层出露。滑带紫红色薄层泥岩构成,厚 $5\sim 30\text{ cm}$ ,由于上部岩石自重挤压岩石碎裂,具有遇水易泥化的特征。软硬互层的岩体在滑坡演化过程中会发生蠕变现象,软弱层中产生剪应力集中,出现应变损伤,随着时间的增长,导致岩体强度降低。在长期自重力和地下水浸泡作用下,这种软硬相间互层结构,砂泥岩界面会逐渐崩解泥化,导致其工程地质性质劣化,层状软弱面的形成。

### 2.2 岩体结构特征

杉树槽滑坡滑前具有两侧临空的特征,其左侧临空,有一走向约 $108^\circ$ 、高约 $15\sim 20\text{ m}$ 的陡崖,为滑坡转向侧滑提供了良好的临空面,中前部G348国道处因道路修建切坡形成高约 $3\text{ m}$ 的高陡边坡,岩层产状为 $107^\circ/19^\circ$ 。由于杉树槽滑坡处于秭归向斜靠近核部的北翼,受构造活动影响,裂隙发育,岩体主要发育两组优势节理,一组横向切割坡体( $135^\circ/87^\circ$ ),另一与其相交( $19^\circ/76^\circ$ ),岩体中裂隙的发育情况以及与层面的组合关系控制着边坡的稳定性。在长期的重力作用以及外界诱发因素影响下,由于滑坡发生缓慢蠕滑一拉裂,在构造裂隙的基础上,沿着节理面形成了分布在主滑体后缘的张拉裂缝,其竖向深度逐渐延展至底滑面。降雨灌入后缘拉开的裂缝软化滑带,形成巨大的静水压力,为滑坡的发生提供最初始的推力。

### 2.3 泥化夹层

砂泥岩互层岩组多形成于三叠纪至第三纪的漫长历史时期,以侏罗中晚期的沙溪庙组最具代表性<sup>[13]</sup>。大量顺层滑坡调查发现,滑动面(带)基本都

是由层间错碎带发展而来<sup>[14]</sup>。杉树槽滑坡的硬岩夹软岩的岩层结构有利于层间破碎带的形成,在自重及构造应力的作用下,硬岩软岩相互剪切错动,层间软岩产生大量节理裂隙,形成结构疏松的剪切破碎带,上覆岩体节理的发育裂隙为降雨渗入破碎带补给地下水提供良好的通道,地下水的侵蚀性将破碎带中的可溶盐逐渐带走,矿物之间的胶结作用遭到破坏,粗颗粒变细,演化成黏土颗粒,泥化后的层间破碎带其物理力学性质大幅度降低。软弱夹层泥化后,渗透率也随之下落,相当于形成了一个隔水层,地下水的汇聚在滑体底部产生的基底压力大幅度降低了抗滑力,加速了滑体沿着泥化夹层发生剪切滑动。

### 2.4 纵向裂缝

杉树槽滑坡前在崖顶高程 290 m 一带居民房屋后基岩陡坎下见一走向约为 280° 的裂缝 L1,以及中部 G348 国道发育着近似平行于陡崖边界的纵向裂缝 L2,坡体上也发育着多条近似平行陡崖的纵向裂缝。此类纵向裂缝在大岭斜坡体上分布广泛且存在于滑坡发生变形之前,不属于因滑坡滑动而形成的滑坡裂缝,推测为先期构造运动伴生的构造裂缝。滑坡发生之后陡崖壁可见多条近似平行于陡崖走向的卸荷裂缝,且纵向构造裂缝 L1 以及 L2 均有拉开扩张的现象。在暴雨工况下,纵向裂缝的发育让雨水入渗坡体后能更快到达滑带层,从而软化滑带,降低滑带的抗剪强度。其次主滑体在变形破坏应力重分布的过程中,此类裂缝会促进卸荷裂隙的发育扩展,且与卸荷裂隙逐渐贯通,形成深大的纵向裂缝。纵向裂缝的形成不仅为降雨渗入层间破碎带的促加速泥化过程提供更为良好的通道,更重要的是形成侧边界的静水压力柱,将坡体向陡崖方向推出。所以,这类纵向构造裂缝的存在,对杉树槽滑坡滑动方式有着极其重要的控制作用。

## 3 杉树槽滑坡启动机制分析

### 3.1 滑坡诱发因素

降雨是杉树槽岩质滑坡失稳的关键性诱发因素,在滑坡发生前,滑坡区持续了近一周的降雨。图 3 为滑坡区历史降雨量,在滑坡发生当日(2014 年 9 月 2 日),降雨量达到 96.5 mm 的暴雨级别,在暴雨作用下坡体最终失稳。图 4 为特殊时间段的降雨

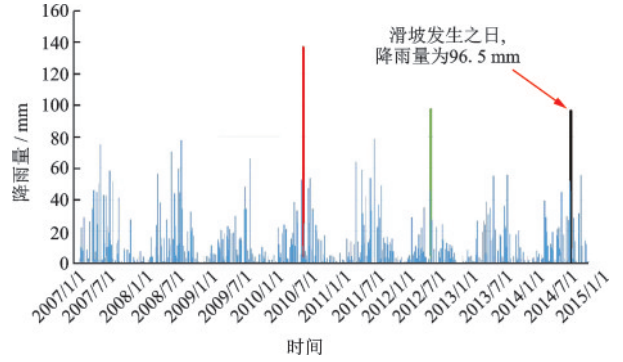
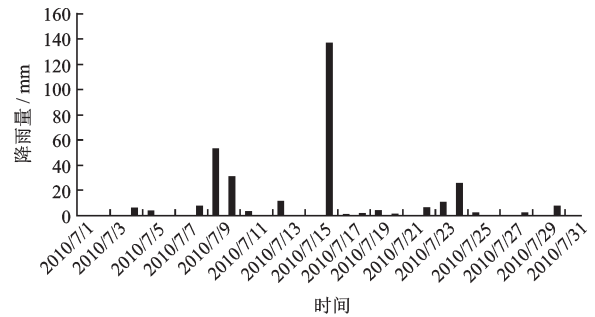
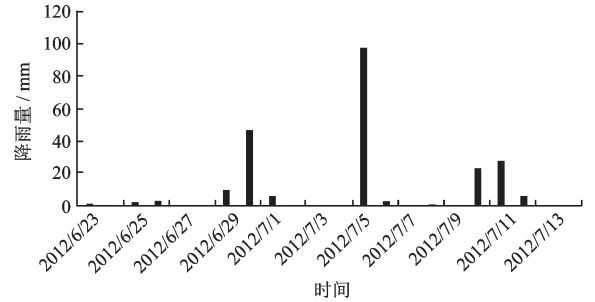


图 3 滑坡区历史降雨量

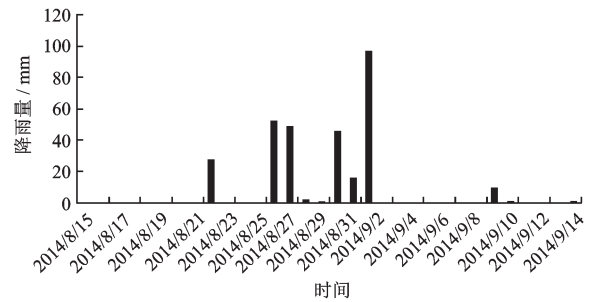
Fig.3 Historical rainfall in landslide area



(a) 2010年7月暴雨时间段



(b) 2012年7月暴雨时间段



(c) 2014年8月暴雨时间段

图 4 特殊时间段的降雨量

Fig.4 Rainfall in special time periods

量。引人注意的是,在 2012 年 7 月 5 日(图 4(b)),该区日降雨量也曾达到 97.4 mm 的暴雨级别,但却没有导致滑坡发生;2010 年 7 月 16 日(图 4(a)),其日降雨量更是达到了大暴雨级别的 136.8 mm,滑坡体也没有失稳破坏。

对于满足诱发滑坡起始值(阈值)的条件,不仅要有足够大的暴雨程度,还需要有足够长的降雨时间。对比分析上述3个特殊时间段前几天的降雨量(图4)可知,在滑坡失稳时,不仅当日降雨量达到96.5 mm,前天还发生了不同程度的大雨。如图4(c)所示,2014年8月27、8月28日和8月30日日降雨量分别达到了51.2、48.6和45.5 mm,而另外两个时间段却没有这种暴雨之前久雨的现象。一日的暴雨虽然能够使滑坡体节理裂隙中积累较高的水位,形成较大的静水压力,但是由于滑带软弱夹层软化的时间不够,其物理力学性质并未达到有效降低,且降雨一日滑带处的泥岩未必能完全饱和,滑体底部没有产生足够的浮托力,坡体未能失稳。因此认为,多日持续降雨之后的暴雨是杉树槽滑坡发生的必要条件。

### 3.2 滑坡失稳模式

一般而言,自在重力作用下,由于坡体受到岩层产状的限制,顺层岩质斜坡初始位移方向一般顺岩层真倾向方向蠕动变形,当斜坡前缘岩体稳定性良好,软弱夹层或滑面未出露,斜坡理论上不会沿软弱夹层发生大尺度的滑动破坏;一般顺层岩质滑坡发生失稳破坏时,若滑体前缘无阻挡,滑体一般沿着滑动面向真倾向方向滑动破坏,如图5(a)所示;当顺层岩质滑坡真倾向方向的滑动受阻时,由于卸荷作用,其中一种主要的破坏形式为侧向崩塌,崩塌岩体继而堆积在次级平台或坡脚,后续可能发展为堆积体滑坡,湖北清江茅坪崩塌<sup>[15]</sup>就是如

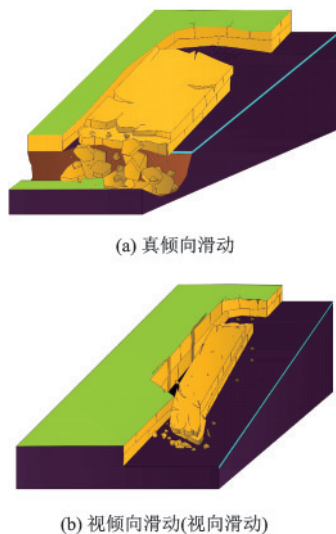


图5 顺层岩质滑坡破坏形式示意

Fig.5 Pattern of failure modes of bedding rock landslide

此;另外一种顺层岩质斜坡真倾向方向位移受阻的失稳模式为平面旋转拉裂,斜坡变形或瞬时启动时由于局部受限而呈现平面旋转滑动破坏<sup>[16]</sup>。杉树槽滑坡这类顺层岩质滑坡岩层真倾向方向受阻,其变形破坏不同于一般的岩体侧向崩塌转化为堆积体滑坡类型和平面旋转式滑动拉裂破坏类型,由于前部稳定岩体的阻挡,杉树槽滑体在滑出时由初始的滑出方向108°转为75°,是沿滑动面滑动在前缘发生方向转动、左侧陡崖视向剪出的一种特殊的视向滑动破坏方式,如图5(b)所示。

根据现场访问调查,滑前沙镇溪镇地质灾害群测群防监测员王克旺在滑坡体后缘南侧高程约283 m的村道处发现一条近5 m长的张裂缝,听见下部陡壁上有碎石滚落声<sup>[17]</sup>,滑坡中部国道G348出现鼓包,纵向构造裂缝L2扩大并冒出一股黄色、浑浊状水流。由此推测,在连续多日暴雨的情况下,临滑阶段雨水灌入滑坡后缘裂隙,裂隙水形成静水压力柱,加强坡体的下滑力,滑坡启动。由于前部山体转向的原因,前部山体形成阻滑段,滑体滑出受阻,而左侧陡崖提供了更好的临空方向。坡体向新临空面卸荷回弹,临空面附近岩体内部应力重分布,且造成局部应力集中,沿着原有的纵向节理面产生了近乎平行陡崖的侧向卸荷裂缝,形成了新的卸荷带。强降雨在迅速拉开的纵向裂缝形成了静水压力柱,将滑体向陡崖方向推出,模式如图6所示。

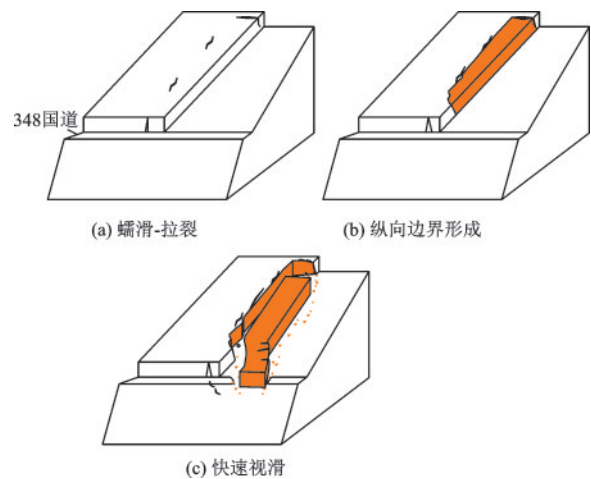


图6 杉树槽滑坡形成演化过程模式

Fig.6 Evolution process of Shanshucao landslide

综上,杉树槽滑坡的主滑体失稳滑动可分为三个阶段:

(1)蠕滑-拉裂阶段:降雨作用下,滑带(滑面)软

化,摩擦系数降低,下滑力大于抗滑力,滑坡体向真倾向方向蠕滑,因前部受阻,后缘形成较小的拉裂。应力在滑坡中前部的右侧集中。

(2)纵向边界形成阶段:由于滑坡前缘山体的阻挡,滑出受阻,在G348国道附近产生隆起膨胀裂缝,由于左侧陡崖临空,滑体应力重分布,近乎平行于陡崖的纵向裂缝张开,主滑体前缘沿着节理面在剪出口剪出。

(3)快速视滑阶段:后缘裂缝静水压力柱急剧升高,增大下滑力,推动滑体,降雨渗入滑带层,降低滑带的抗剪强度,滑坡稳定性降低。纵向裂缝的静水压力柱急剧升高,形成的侧向静水压力推动滑体,使得主滑体产生视向滑动,后缘静水压力以及侧向静水压力复合而成的视滑力将滑体向陡崖方向侧向推出。

### 3.3 滑坡稳定性分析

从失稳模式来看,杉树槽滑坡不属于顺层岩质滑坡简单的平面直线型滑动,可理解为纵向(沿坡体倾向)“推动式”与横向(沿坡体走向)“平推式”的复合类型,两个方向上复合成向外的合力才是主要驱动力,所以不可用简单的单方向上的极限平衡原理进行稳定性分析。因此,将主滑区滑体分为两个方向分别进行力学分析更加合理,整个主滑体主要受到后缘裂缝的静水压力 $F$ 、滑体自重 $W$ 以及来自纵向裂缝的静水压力 $S$ 三种力,静力解析如图7(a)所示。对于纵向的滑动,其稳定性适用于简单的极限平衡原理,但是横向的滑动推动力就需要验证,当侧缘裂缝内水头高度达到一定的滑坡启动临界高度时,是否可依靠侧缘裂缝的静水压力触发滑坡侧滑的发生。

针对主滑体是否可能被侧向静水压力触发滑坡

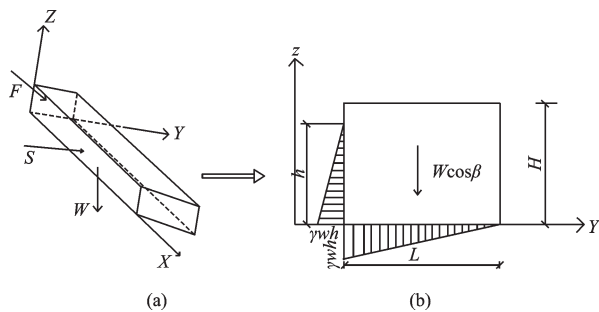


图7 静力分析示意

Fig.7 Static analysis diagram

注: $F$ 为后缘裂缝的静水压力; $W$ 为滑体自重; $S$ 为纵向缘裂缝的静水压力; $h$ 为纵向裂缝水头高度; $\beta$ 为滑坡倾角

侧滑的发生,可从横向上将主滑体视作平推式滑坡,用平推式滑坡计算方法<sup>[16-17]</sup>来验证主滑体能否被侧向的静水压力以及底滑面扬压力的联合作用侧向推出。做以下假设:

(1)主滑体作整体运动;

(2)不考虑运动方向的复合型,假设主滑体只向陡崖方向横向滑出;

(3)滑面横向高度一致(即横向上滑面倾角为0);

(4)纵向裂缝水头,垂直滑面分布。

根据图7(b),由于条件(3)的假设,可得到主滑体横向稳定性的计算公式:

$$K = \frac{(W \cos \beta - \frac{1}{2} \gamma_w h L) \tan \varphi + cL}{\frac{1}{2} \gamma_w h^2} \quad (1)$$

再利用张倬元等<sup>[5]</sup>提出平推式滑坡启动的临界水头高度公式:

$$h_{cr} \approx \frac{1}{2 \cos \alpha} \left[ L^2 \tan^2 \varphi + 8 \frac{W}{\gamma_w} \cos \alpha (\cos \alpha \tan \varphi - \sin \alpha) \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{L}{2 \cos \alpha} \tan \varphi \quad (2)$$

式中, $h$ 为纵向裂缝最大充水高度; $L$ 为主滑体宽度; $W$ 为滑块单宽重量; $\beta$ 为滑坡倾角; $\gamma_w$ 为水的重度; $\varphi$ 为滑动面内摩擦角; $c$ 为滑动面黏聚力; $\alpha$ 为滑移面顺滑动方向的倾角。

查阅参考相关资料<sup>[17-18]</sup>,取砂泥岩接触界面的内摩擦角 $\varphi=11^\circ$ ,黏聚力 $c=20$  kPa,滑体重度 $\gamma=26$  kN/m<sup>3</sup>。根据图6(b),取 $H=25$  m(主滑块高度), $L=40$  m, $\alpha=0^\circ$ ,水的重度 $\gamma_w=10$  kN/m<sup>3</sup>。

计算出考虑黏聚力 $c$ 时,滑坡启动的临界水头高度 $h_{cr} \approx 3.56$  m。再将 $h_{cr} \approx 3.56$  m代入式(1),计算其主滑体横向上稳定性,得到对应的 $K=0.82$ 。

从上述的分析计算结果可知,当陡崖纵向裂缝内水头高度达到滑坡启动的临界高度时,确实可以依靠纵向裂缝的静水将主滑体侧向推出。事实上,当纵向裂缝水位上升时,由于重力作用,必定会在纵向裂缝前缘(即靠近G348国道一端)先达到临界高度水头,因此,锁固段更易被剪断,导致滑体被侧向上的静水压力侧向推出。

## 4 结论

(1)通过分析滑坡的地质结构特征,认为软硬

相间的岩性组合、发育的节理裂隙是控制滑坡的主要内在因素,暴雨是诱发杉树槽滑坡极为关键的因素。另外,对滑坡区滑前几年的降雨量进行分析得出结论,多日持续降雨之后的暴雨是杉树槽滑坡发生的必要条件。

(2)杉树槽滑坡的失稳模式并非简单的推移滑出,属于真倾向滑移变形转为视向滑动的特殊失稳模式,纵向构造裂缝起着极为关键的控制作用,其失稳阶段可概括为:蠕滑—拉裂、纵向边界形成和快速视滑滑出三个阶段。

(3)考虑滑坡特殊的失稳模式,从纵横两个方向来分别进行力学分析,当陡崖纵向裂缝内水头高度达到滑坡启动的临界高度时,确实可以依靠纵向裂缝的静水将主滑体侧向推出。

(4)杉树槽滑坡是在后缘静水压力、底滑面扬压力、侧向静水压力和滑带土软化综合作用下发生的失稳破坏。

## 参考文献:

- [1] 肖诗荣,刘德富,胡志宇.世界三大典型水库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 Sh R, Liu D F, Hu Zh Y. Engineering geologic study of three actual dip bedding rockslides associated with reservoirs in the world [J].Journal of Engineering Geology 2010, 18(1):52-59. (in Chinese)
- [2] Xu G L, Li W N, Yu Zh, et al. The 2 September 2014 Shanshucao landslide, Three Gorges Reservoir, China [J]. Landslides, 2015,12(6):1 169-1 178.
- [3] 王 鸣,易 武.三峡库区杉树槽滑坡地质特征与成因机制分析[J].三峡大学学报(自然科学版),2015,37(5):44-47.  
Wang M, Yi W. Geological characteristics and formation mechanism of Shanshucao Landslide in Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2015, 37(5): 44-47. (in Chinese)
- [4] 易 武,黄鹏程.湖北省杉树槽滑坡成因机制分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2016,35(3):89-93,114.  
Yi W, Huang P Ch. Formation mechanism of Shanshucao Landslide in Hubei Province[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2016, 35(3): 89-93, 114. (in Chinese)
- [5] 张倬元,王士天,王兰生,等.工程地质分析原理[M].3版,北京:地质出版社,2009:367-380.  
Zhang Zh Y, Wang Sh T, Wang L Sh, et al. Principles of engineering geology [M]. 3rd ed. Beijing: Geological Publishing House, 2009:367-380. (in Chinese)
- [6] 冯 振,殷跃平,李 滨,等.重庆武隆鸡尾山滑坡视向滑动机制分析[J].岩土力学,2012,33(9):2 704-2 712.  
Feng Zh, Yin Y P, Li B, et al. Mechanism analysis of apparent dip landslide of Jiweishan in Wulong, Chongqing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2 704-2 712. (in Chinese)
- [7] 邓茂林,许 强,郑 光,等.基于离心模型试验的武隆鸡尾山滑坡形成机制研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(增1):3 024-3 035.  
Deng M L, Xu Q, Zheng G, et al. Study on the formation mechanism of Jiweishan Landslide in Wulong Chongqing China-based on centrifugal model test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Sup 1): 3 024-3 035. (in Chinese)
- [8] 邓茂林.视倾向滑移型滑坡形成条件与失稳机理研究[D].成都:成都理工大学,2014.  
Deng M L. Study on formation conitions and instability mechanism of the apparent dip slide landslide [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [9] 王佳运,石小亚,武 立,等.“8·12”山阳滑坡视向滑动成因机理[J].西北地质,2018,51(3):232-239.  
Wang J Y, Shi X Y, Wu L, et al. Formation mechanism of apparent dip slide in the Shanyang “8·12” Landslide [J]. North Western Geology, 2018, 51(3): 232-239. (in Chinese)
- [10] Evert H, Bray J. Rock slope engineering [M]. New York: Tylor & Francis Group, 1974.
- [11] Hungr O, Evans S G. The occurrence and classification of massive rock slope failure [J]. Felsbau, 2004, 22(2):16-23.
- [12] 地质矿产部编写组.长江三峡工程库岸稳定性研究[M].北京:地质出版社,1988.
- [13] 黄绍槟,程 强,胡厚田.四川红层分布及工程环境特征研究[J].公路,2005,50(5):81-85.  
Huang Sh B, Cheng Q, Hu H T. A study on distribution of sichuan red beds and engineering environment characteristics[J]. Highway, 2005, 50(5): 81-85. (in Chinese)
- [14] 孙广忠.岩体结构力学[M].北京:科学出版社,1988.  
Sun G Zh. Rock mass structure mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1988. (in Chinese)

(本文责编:赵 霞)

(下转第 883 页)