

# 含软弱夹层缓倾堆积层滑坡变形特征与失稳机制研究

杨云飞<sup>1</sup>, 许万忠<sup>1\*</sup>, 郭英航<sup>1</sup>, 王性昊<sup>2</sup>, 杨子萱<sup>1</sup>, 郑洁茹<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 中国建筑材料工业地质勘察中心新疆总队, 乌鲁木齐 830002)

**摘要:** 以重庆市头渡镇柏枝溪滑坡为例, 利用钻孔、工程测量、无人机摄影测量技术、现场试验及取样试验等手段, 结合现场监测和 Midas-GTS 数值模拟软件, 将变形破坏特征与数值模拟结果相互印证, 详细分析该滑坡的变形特征、成因机制及潜在稳定性。柏枝溪滑坡分为 1<sup>#</sup> 滑坡和 2<sup>#</sup> 滑坡, 结果表明: (1) 绝对位移监测得出柏枝溪滑坡的失稳与降雨密不可分; (2) 钻孔和深部位移监测揭示柏枝溪 1<sup>#</sup> 滑坡为大型中-深层堆积层滑坡, 2<sup>#</sup> 滑坡为中型浅层堆积层滑坡; (3) 数值模拟结果显示柏枝溪滑坡在天然和暴雨工况下分别处于基本稳定和欠稳定状态, 极易沿软弱夹层进行滑移破坏; (4) 柏枝溪滑坡的形成与地形地貌、地层岩性、坡体结构、人工活动、大气降水等因素具有一定的相关性, 但软弱夹层和降雨是该滑坡在平缓地区发生滑移的主要因素。

**关键词:** 堆积层滑坡; 软弱夹层; 变形特征; Midas-GTS; 失稳机制

**中图分类号:** P642.22 **文献标识码:** A

## STUDY ON THE DEFORMATION CHARACTERISTICS AND DESTABILIZATION MECHANISM OF LANDSLIDES WITH WEAKLY INTERBEDDED SLOW-DIPPING ACCUMULATION LAYER

YANG Yun-fei<sup>1</sup>, XU Wan-zhong<sup>1\*</sup>, GUO Ying-hang<sup>1</sup>,

WANG Xing-hao<sup>2</sup>, YANG Zi-xuan<sup>1</sup>, ZHENG Jie-ru<sup>1</sup>

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology,

Kunming 650093, China; 2. Xinjiang Headquarters of China Construction

Materials Industry Geological Survey Center, Urumqi 830002, China)

**Abstract:** Taking the Baizhixi landslide in Toudu Town, Chongqing City as an example, combined with on-site monitoring and Midas-GTS numerical simulation software, this paper analyzes the deformation characteristics, genetic mechanism and potential stability of the landslide in detail by means of engineering measurements, UAV photogrammetry technology, drilling, field tests and sampling tests. The deformation and damage characteristics are corroborated with numerical simulation results. The Baizhixi landslide can be divided into 1<sup>#</sup> landslide and 2<sup>#</sup> landslide. The results show that: (1) the absolute displacement monitoring yields that the destabilization of the Baizhixi landslide is inextricably linked to rainfall; (2) the drilling and deep displacement monitoring reveals that 1<sup>#</sup> landslide is a large-scale middle-deep accumulation landslide, and 2<sup>#</sup> landslide is a medium-sized shallow accumulation landslide; (3) the numerical simulation results show that the Baizhixi

landslide is basically stable and unstable under natural and heavy rainfall conditions, respectively, and is highly susceptible to slip damage along the weak interlayer; (4) the formation of the Baizhixi landslide has a certain correlation with topography, stratum lithology, slope structure, human activities, and atmospheric precipitation and other factors, but the weak interlayer and rainfall are the main factors of the landslide in the low relief area. This paper adopts various means to analyze the deformation characteristics and instability mechanism of the Baizhixi landslide in a comprehensive way, which can provide useful reference for the early identification and instability mechanism study of this kind of gently inclined accumulation landslides.

**Key words:** accretion landslide; weak interbedded; deformation characteristics; Midas-GTS; destabilization mechanism

缓倾堆积层滑坡属于滑坡的一种特殊类型,广泛分布在我国西南地区。其滑面整体坡度较小,按传统极限平衡理论难以对此类滑坡进行准确预测,但在降雨条件下,缓倾滑坡频发。因此,该类滑坡隐蔽性极强,给人们生命财产安全带来巨大威胁。

降雨是导致滑坡灾害发生的一个重要因素<sup>[1-5]</sup>。堆积层滑坡坡体结构复杂,岩土体力学性质多样,在降雨条件下极易沿基覆面的软弱夹层发生失稳破坏。降雨入渗扰动了土体应力平衡状态,使得稳定性系数降低,从而导致边坡发生破坏。相关的研究众多: Cascini<sup>[6]</sup>基于地下水模型和滑坡位移预测模型分析了降雨与地下水位变化及滑坡位移之间的相关性,从而对意大利中部的降雨型滑坡进行危险性分析; Iverson<sup>[7]</sup>认为堆积层滑坡破坏过程与土体初始孔隙水压力及降雨过程中孔压的变化有关,并采用简化 Richards 公式描述了降雨入渗与滑坡触发机制的关系; 付宏渊等<sup>[8]</sup>通过开展炭质泥岩-土分层路堤滑坡对降雨响应的物理模型试验,指出降雨入渗导致的渗流作用使得滑坡下滑力增加,降低了岩土体抗剪强度,从而使滑坡的稳定性减小。

数值模拟是研究滑坡的重要方法之一,具有计算精度高、费用低、应用广泛等优点。郝玉<sup>[9]</sup>使用 Midas-GTS 有限元分析软件,运用强度折减法对模型进行计算,对公路边坡及加固方案进行了稳定性分析。吕文斌等<sup>[10]</sup>利用 Midas-GTS 有限元分析软件,分析了西宁市张家湾滑坡的发展过程、剪出口位置及形成机理,定量评价了该滑坡在各工况下稳定状态。谭银龙等<sup>[11]</sup>利用 Midas-GTS 有限元模拟方法,分析了降雨入渗对裂隙岩质边坡稳定性的影响。

目前,对降雨诱发缓倾堆积层滑坡滑动的研究多以浅层滑动为主,缺少对深层滑动成因与失稳机理的研究。本文以重庆市头渡镇柏枝溪滑坡为背景,在现有勘察资料以及监测数据的基础上,利用

Midas-GTS 有限元分析软件,结合实测数据与数值模拟结果,提出柏枝溪滑坡在具体地质环境及人类工程活动条件下,软弱夹层的存在及暴雨或持续降雨条件是导致其发生整体深层滑动的主要原因。综合分析柏枝溪滑坡的变形特征、失稳机制及潜在稳定性,为此类滑坡灾害的研究分析提供有益的参考。

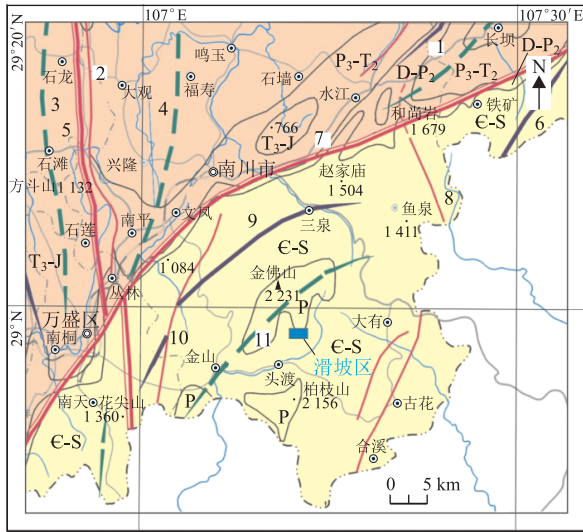
## 1 滑坡区地质环境条件

柏枝溪滑坡整体属构造剥蚀中低山地貌(图 1)。1# 斜坡坡向约  $175^{\circ}\sim 180^{\circ}$ ,地势北高南低,高程分布 915~1 040 m,相对高差 125 m。地形坡度  $20^{\circ}\sim 25^{\circ}$ ,局部陡坎坡角达  $55^{\circ}$ 。2# 滑坡斜坡坡向约  $205^{\circ}$ ,地势北东高南西低,高程分布 935~875 m,相对高差 60 m。地形坡度  $20^{\circ}\sim 35^{\circ}$ ,局部陡坎坡角达  $55^{\circ}$ 。



图 1 滑坡区地貌遥感图

滑坡区在构造上位于龙骨溪背斜的西翼靠近轴部(图 2),呈单斜构造,岩层优势产状为  $280^{\circ}\sim 300^{\circ}\angle 5^{\circ}\sim 7^{\circ}$ ,未见断层及次级褶皱,地质构造简单。滑坡所在区域地层可分为 5 类,从上到下依次为:第四系全新统人工填土( $Q_4^{nl}$ )、崩塌堆积层( $Q_4^{col+dl}$ )、滑坡堆积层( $Q_4^{del}$ )、二叠系下统茅口组( $P_1m$ )灰岩、志留



1. 桐麻湾背斜; 2. 丰盛场断层; 3. 莲石向斜; 4. 堡子场向斜; 5. 遵义基底断裂; 6. 赵家坝背斜; 7. 七曜山基底断裂; 8. 大研坝断层; 9. 龙骨溪背斜; 10. 下水沟断层; 11. 金佛山背斜

图2 柏枝溪滑坡构造地质纲要图

系中统韩家店组( $S_2h$ )页岩和下统小河坝组( $S_{1x}$ )砂岩。滑坡区地下水主要由第四系松散孔隙水和碎屑岩类裂隙孔隙水组成。

1<sup>#</sup>滑坡滑体中部从2017年9月份开始,由于复建公路的修建,在其东侧形成了1~3 m的土质开挖边坡(图3a),西侧形成1~8 m的土质回填边坡(图3b),路面及挡墙错段裂缝明显;2016年对原压力管道进行扩大建设时,在2<sup>#</sup>滑坡滑体中部开挖形成1.0~2.5 m的基槽,开挖的土石方就地堆积于基槽外侧陡坡,开挖沟渠沟底及侧壁未进行有效支护(图3c);2<sup>#</sup>滑坡前缘坡脚位置,由于新头渡集镇安置房(2017年11月基础平场)的修建,对滑坡前缘进行了放坡开挖(图3d),开挖高度约20 m,坡比约1:2,前缘采用了桩板墙支挡。综上,该区域的人类工程地质活动较为频繁。

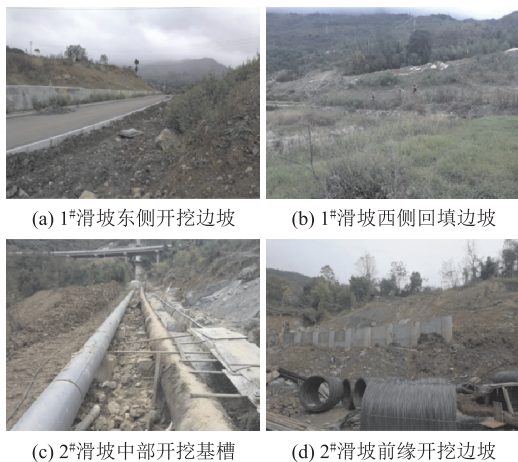


图3 滑坡区人类工程活动

## 2 滑坡发育特征

### 2.1 滑坡边界及形态特征

根据现场调查滑坡变形特征,可将柏枝溪滑坡区分为1<sup>#</sup>滑坡和2<sup>#</sup>滑坡,其中1<sup>#</sup>滑坡位于2<sup>#</sup>滑坡北东侧,1<sup>#</sup>滑坡前缘右侧边界与2<sup>#</sup>滑坡后部边界有局部重合(图4)。

1<sup>#</sup>滑坡整体形态呈“簸箕”型,纵长约480 m,横宽约280 m,滑坡厚度19.5~35 m,体积约 $336 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,主滑方向约 $175^\circ$ ,属大型中-深层堆积层滑坡。

2<sup>#</sup>滑坡整体形态呈“长舌”型,纵长约200 m,横宽约90 m,滑坡厚度9.2~10.3 m,体积约 $18.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,主滑方向约 $213^\circ$ ,属中型浅层堆积层滑坡。



图4 滑坡区航拍全貌图

### 2.2 滑坡物质组成与结构特征

根据实地踏勘、钻孔揭露情况可知,滑坡主要由粉质黏土、块石、碎石组成,局部含淤泥质块石土。地下水水位埋深较浅,本次钻探地下水水位一般在0.48~26.65 m,水量丰富。

#### 2.2.1 滑体特征

滑体物质主要由粉质黏土、块石、碎石组成,局部含淤泥质块石土。1<sup>#</sup>滑坡厚度19.5~35.0 m,2<sup>#</sup>滑坡厚度9.2~10.3 m。滑体前后缘薄,中部厚(图5、图6)。

#### 2.2.2 滑带特征

(1) 物质成分:主要为早期崩滑堆积时原状坡体所含的碎、块石粉质黏土,局部富含有机质,存在泥化现象,碎石含量较少,力学性质较低,部分含5%~25%灰岩、页岩碎石。天然含水量约为22.7%~34%,平均28.17%。土质相对潮湿,软塑-可塑状,手摸有滑感(图7)。

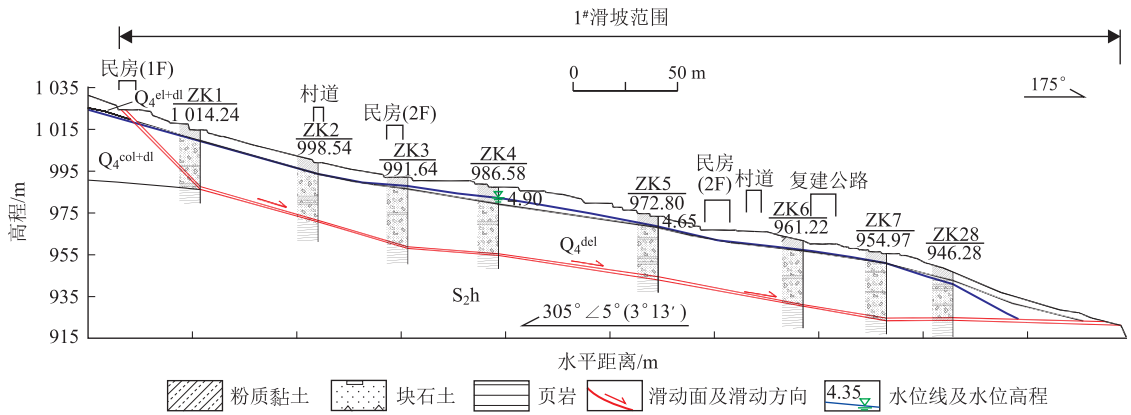


图 5 1# 滑坡工程地质剖面图 1-1'

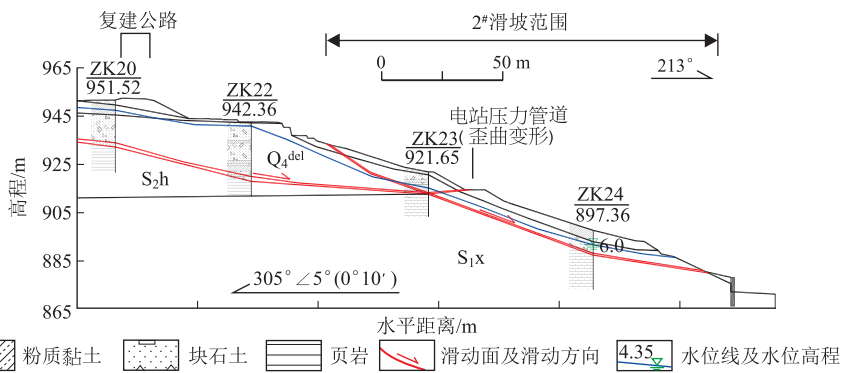


图 6 2# 滑坡工程地质剖面图 4-4'



图 7 典型滑带特征图

(2) 分布特征:1# 滑坡滑带埋深 20~30 m, 滑面与下伏基岩面和地形的起伏密切相关, 倾角 5°~15°;2# 滑坡埋深 9~10 m, 滑面与下伏基岩面和地形的起伏密切相关, 倾角 5°~20°。

(3) 滑面贯通性:两滑坡中后部钻孔均揭露软弱夹层, 在多处软弱夹层中可见明显擦痕, 滑带已基本形成。

### 2.2.3 滑床特征

1# 滑坡滑床为第四系全新统滑坡堆积层(Q<sub>4</sub><sup>del</sup>)和志留系中统韩家店组(S<sub>2</sub>h)页岩;后部滑床为第四系全新统滑坡堆积层(Q<sub>4</sub><sup>del</sup>)。滑床顶面总体形态呈“凹槽型”, 剖面呈“弧状”, 总体上滑坡后部较陡, 坡角一般 15°~48°, 中部相对较缓, 坡角一般 10°~

15°, 前缘较平缓, 坡角 3°~14°。

2# 滑坡滑床为第四系滑坡堆积层和志留系下统小河坝组(S<sub>1</sub>x)砂岩;后部之滑床为第四系滑坡堆积层块石土。滑床顶面整体形态呈“凹槽型”, 剖面呈“弧状”。滑坡中后部较陡, 坡角一般 20°~35°, 前部相对较缓, 坡角一般 5°~9°(参见图 6)。

## 2.3 滑坡变形特征

### 2.3.1 滑坡变形发育历史

1# 滑坡滑坡体后缘、中部及前缘均出现大量墙裂及地面裂缝, 尤其在滑坡中后部房屋墙裂、墙体剪断、地裂、公路错裂、水田开裂漏水、电线杆歪斜等现象明显(图 8)。地面裂缝初现时间为 2018 年 9 月和 10 月连续降雨, 2018 年 11 月 7~8 日连续强降雨, 裂缝进一步扩大, 裂缝宽一般 10~500 mm, 延伸一般 5~125 m。

2# 滑坡滑坡体后缘、中部及前缘均出现大量地面裂缝, 尤其在滑坡前部地裂、压力管道弯曲变形、裂缝发育等现象明显(图 9)。滑坡区发生地面裂缝多达 7 条, 地面裂缝初现时间为 2018 年 9 月和 10 月连续降雨, 2018 年 11 月 7~8 日连续强降雨, 裂缝进一步扩大, 裂缝宽 4~25 mm, 延伸 4~18 m。

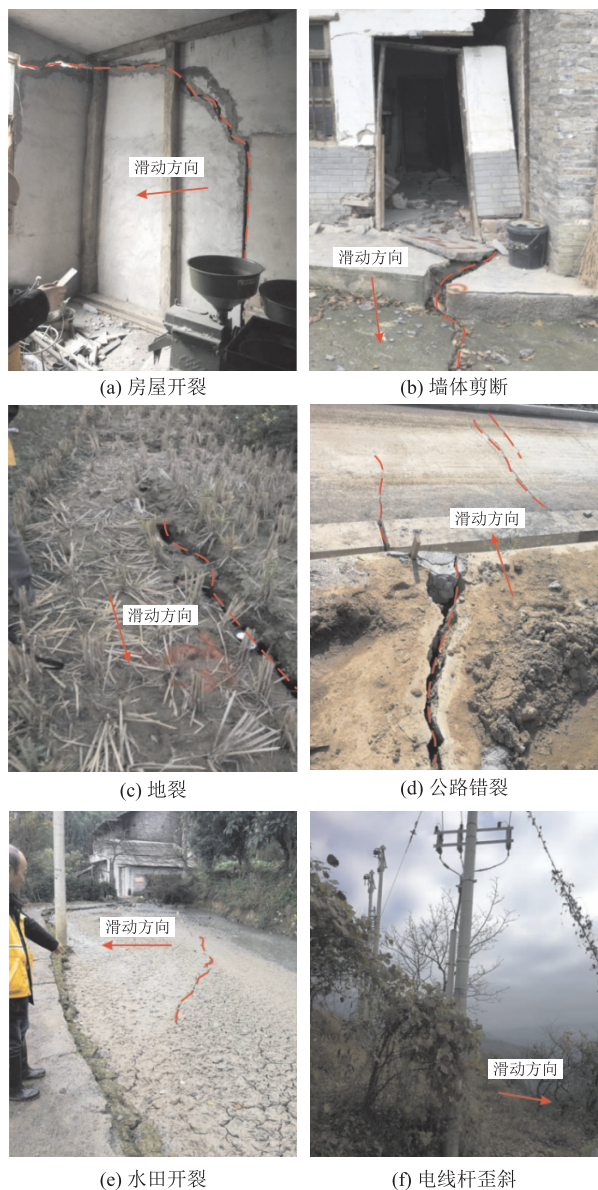


图 8 1# 滑坡宏观变形特征

### 2.3.2 水平位移监测

本次在 1# 滑坡上布置了 21 个监测点, JC9~JC15、JC28~JC29 位于滑坡前部, JC16~JC21 位于滑坡中部, JC22~JC27 位于滑坡后部。2# 滑坡体上布置了 8 个监测点, JC1~JC5 位于滑坡前部, JC6~JC7 位于滑坡中部, JC8 位于滑坡后部。监测周期自 2018 年 11 月 15 日~12 月 27 日, 共 43 日。

结合滑坡监测点布置图(图 10)和 1# 滑坡绝对位移监测图(图 11)可知, 在 11 月 26 日之前, 1# 滑坡后部水平位移变化量 15~52 mm; 中部水平位移变化量 13~41 mm; 前部水平位移变化量 1~49 mm。在 11 月 27 日之后, 1# 滑坡后部水平位移变化量 58~92 mm, 位移方向 163°~183°; 中部位移变化量 43~106 mm, 位移方向 149°~181°; 前部水平

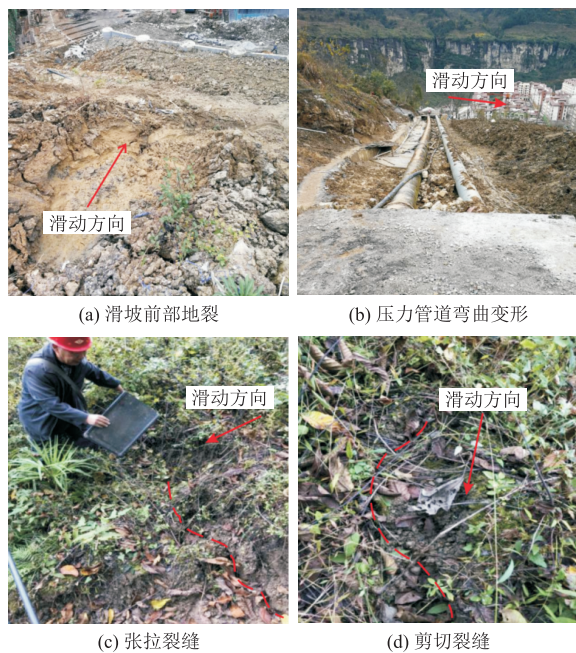


图 9 2# 滑坡宏观变形特征

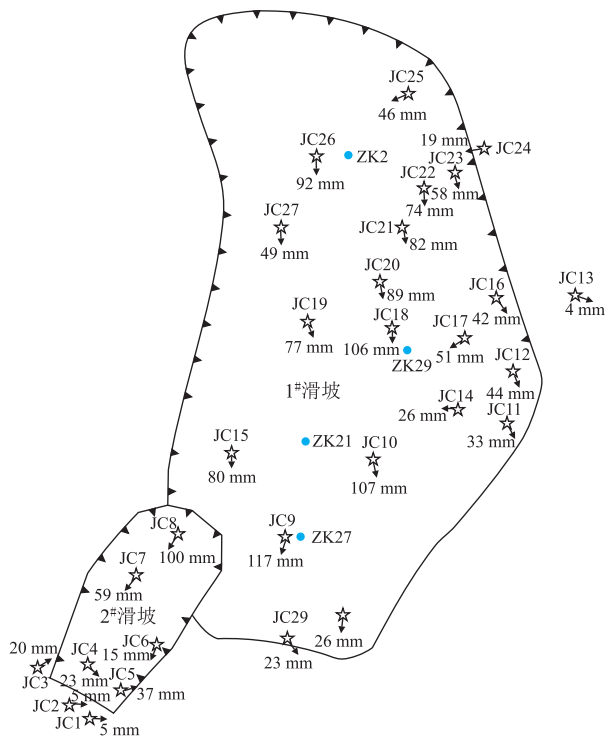


图 10 滑坡监测点布置图

位移变化量 23~117 mm, 位移方向 149°~196°。

结合滑坡监测点布置图(图 10)和 2# 滑坡绝对位移监测图(图 12)可知, 在 11 月 26 日之前, 2# 滑坡整体水平位移变化量 1~52 mm。在 11 月 27 日之后, 2# 滑坡整体水平位移变化量 15~100 mm。滑坡后部、中部监测点数据位移方向 208°~219°, 与主滑方向基本一致。滑坡前部监测点数据位移方向

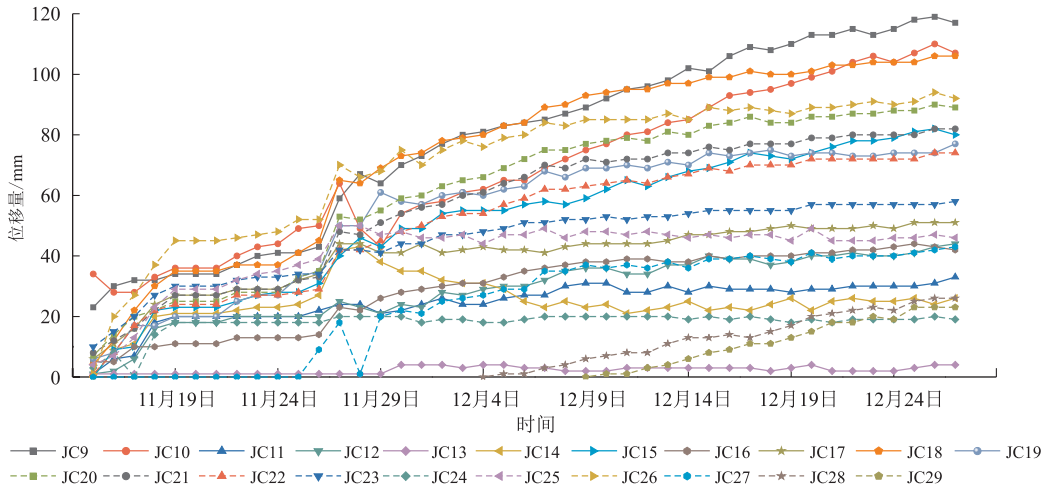


图 11 1# 滑坡水平位移监测图

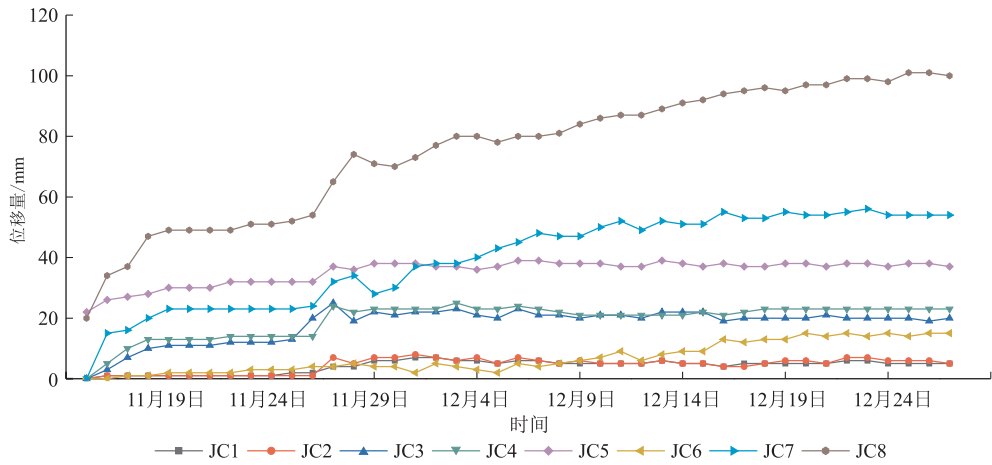


图 12 2# 滑坡绝对位移监测图

63°~139°,位移方向杂乱无序,推测前缘存在鼓胀滑塌变形或监测失真。

综合上述分析可知,11月26日~27日之前,水平位移量浮动不大,累计位移量较小;11月26日~27日,水平位移量出现拐点,有骤增的趋势;11月26日~27日之后,水平位移量整体变大,两滑坡处于持续变形中。导致该现象的主要原因是26~27日两天的持续降雨,故推断滑坡的稳定性与降雨密不可分,是滑坡失稳的主要诱发因素。

### 2.3.3 深部位移监测

光纤光栅深部位移监测是地质灾害领域常用的位移监测系统<sup>[12]</sup>。本次在1#滑坡体上布置4处光纤监测点,分别在ZK2、ZK21、ZK27和ZK29(参见图10)。从地层分布和深部位移监测曲线可知,深部位移变化量为0~1.16 μm,监测周期内拐点明显,滑坡目前处于强变形初始阶段(图13)。

由图13(a)可知,ZK2光纤监测点在深度25~30.0 m出现了明显的应变异常。据该钻孔资料显

示,在深度26.1~29.6 m为软弱夹层,故推测滑动面约在地面下27.7 m附近;由图13(b)可知,ZK21光纤监测点在深度27.8~29.5 m出现了明显的应变异常。据该钻孔资料显示,在深度28.1~29.8 m为软弱夹层,推测深度28.6 m处为滑动面;由图13(c)可知,ZK27光纤监测点在深度23~24.5 m出现了明显的应变异常。据该钻孔资料显示,在深度23.0~28.0 m为软弱夹层,故滑面约在深度24.0 m附近;ZK29位置深部位移计由于钻孔垮孔,只埋设了22.0 m,而此处土层深度为28.2 m,未穿透上覆土层。从图13(d)可知,从12月20日~27日为止,未发现滑动面,由此可推断22.0 m范围内无滑动面。综上,滑坡在沿着软弱夹层发生整体深层滑动。

## 3 数值建模分析

### 3.1 数值模型建立

基于Midas-GTS有限元软件,分别选取1-1'剖

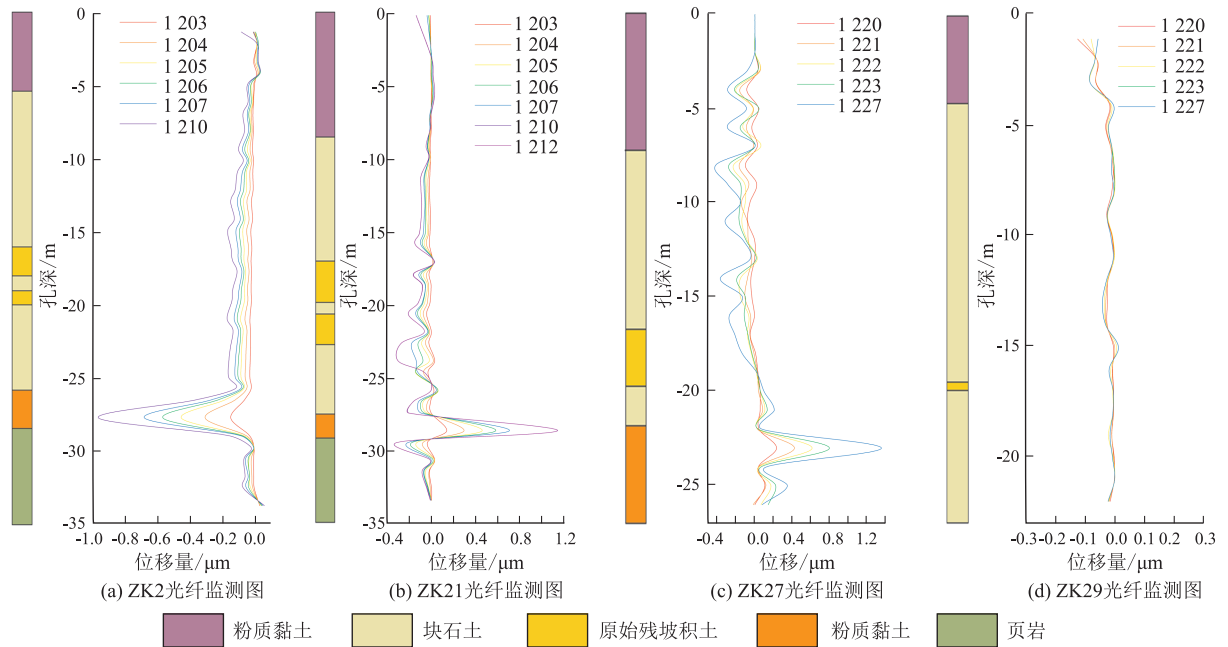


图 13 地层分布与深部位移监测曲线

面和 4-4' 剖面作为 1<sup>#</sup> 滑坡和 2<sup>#</sup> 滑坡典型剖面, 进行有限元数值模拟。在现状地貌条件下, 考虑地下水渗流场、位移场, 进行天然工况及暴雨工况下的滑坡稳定性分析。采用莫尔-库伦作为岩土体的本构模型, VG 模型<sup>[13]</sup> 作为土水特征曲线, 通过定义初始水头模拟地下水的分布, 采用强度折减法 (SRM)<sup>[14]</sup> 计算稳定性系数。在模拟暴雨工况时, 采用曲面流量 (150 mm/day) 模拟降雨入渗; 其次, 由于研究区初始地下水埋深较浅使得边坡的饱水能力有限, 故定义渗流面模拟雨水在地表的径流。相关计算参数均参照滑坡岩土力学性质实验, 见表 1。

表 1 岩土体的物理力学参数

岩土体 / 参数	$Q_{s1}^{hd}$ 表层粉质黏土	$Q_{s2}^{hd}$ 滑体块石土	$Q_{s3}^{hd}$ 滑带土	$S_{2h}$ 页岩	$S_{1x}$ 砂岩
天然重度 / $kN \cdot m^{-3}$	18.8	20	19.6	26.7	26.2
饱和重度 / $kN \cdot m^{-3}$	19.1	20.38	19.9	26.9	26.4
黏聚力 / kPa	26.68	30.6	18.6	$1.18 \times 10^3$	$2.336 \times 10^3$
内摩擦角 / °	16.5	26.5	13.06	35.36	37.83
弹性模量 / MPa	30.56	35.16	22.12	$3.183 \times 10^3$	$6.76 \times 10^3$
泊松比	0.28	0.25	0.3	0.18	0.13
渗透系数 / $cm \cdot s^{-1}$	$3.06 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-4}$	$0.6 \times 10^{-5}$	—	—
饱和含水率 / %	0.38	0.41	0.41	—	—
残余含水率 / %	0.1	0.065	0.095	—	—

### 3.2 滑坡云图分析

由图 14(a)、(c)、(e)、(g) 可知, 在天然工况下, 1<sup>#</sup> 滑坡的稳定性系数为 1.05, 滑动面从后到前趋于贯通, 处于基本稳定状态。总水头最大值为

208.598 m, 最大孔隙水压力为  $1887.62 kN/m^2$ 。由于滑坡位于斜坡地形中下部, 后方的山体汇水将直接进入滑坡体内, 并且因为复建公路的修建, 进行了一部分的回填压实, 从而使得滑坡后部地下水位较高, 增加了滑坡后部土体的重量, 导致滑坡整体有发生推移式滑动的趋势。下伏基岩为相对隔水层, 地下水渗透至基覆界面时, 将沿着岩土接触面径流, 对基岩顶面岩土体进行软化、泥化, 从而形成滑面。最大位移量出现在滑坡后缘, 为 33.506 mm。

由图 14(b)、(d)、(f)、(h) 可知, 在暴雨工况下, 1<sup>#</sup> 滑坡的稳定性系数为 1.0206, 滑动面已全部贯通, 处于欠稳定状态。总水头最大值为 219.501 m, 最大孔隙水压力为  $1893.74 kN/m^2$ 。与天然工况相比, 最大总水头与孔隙水压力增幅不大, 各增加了 10.903 m 和  $6.12 kN/m^2$ , 由于研究区地下水位整体埋深较浅, 故增幅不大。但是由于滑坡体块石土含量较高, 具有较高的孔隙性和吸水性, 在降雨条件下, 地表水沿第四系松散土体及滑坡后部基岩裂隙渗入滑坡体内, 沿着原始残坡积土层以及部分基岩顶面流动, 加速对土体的软化和淋滤作用, 逐渐形成软弱夹层, 降低岩土接触面处的岩土体强度和滑坡的抗滑力。滑坡位移量从前到后逐渐降低, 滑坡最大位移量为 187.93 mm, 出现在滑坡前部, 与监测数据基本一致, 表明了参数选取和模型建立的合理性。

由图 15(a)、(c)、(e)、(g) 可知, 在天然工况下, 2<sup>#</sup> 滑坡的稳定性系数为 1.1, 滑动面渐趋贯通, 处于基本稳定状态。总水头最大值为 83.4733 m, 最大

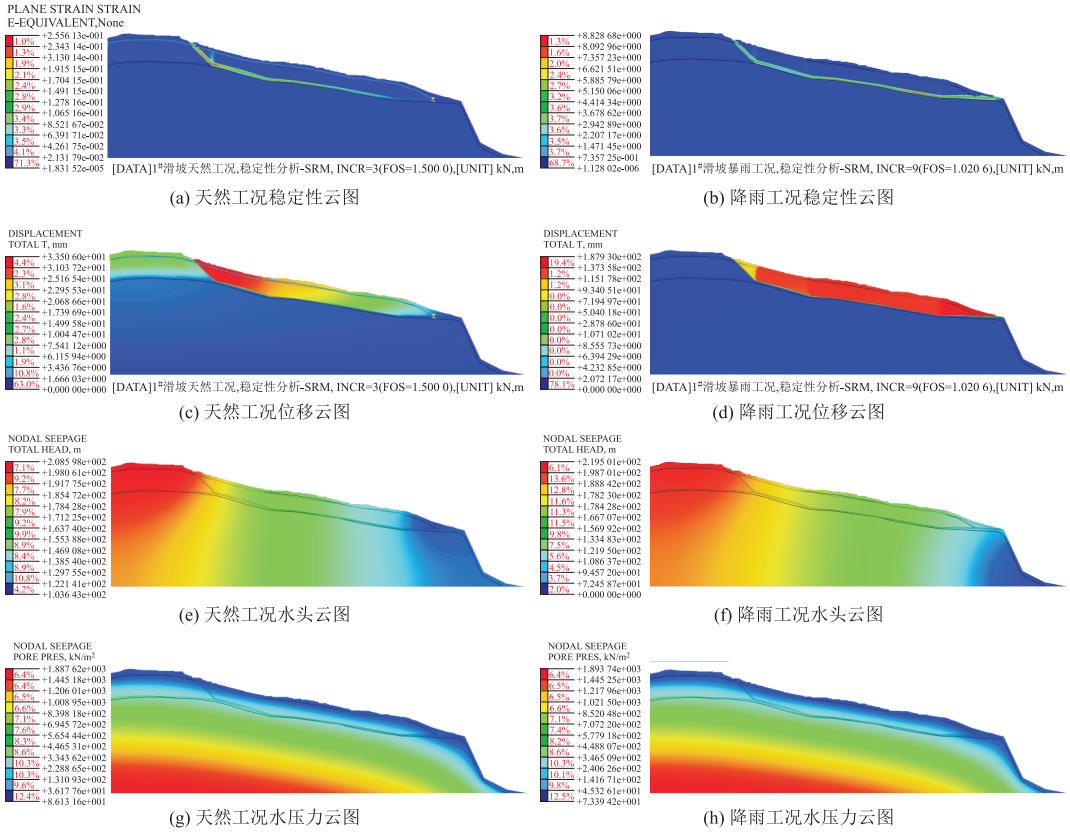


图 14 1-1'剖面各工况云图

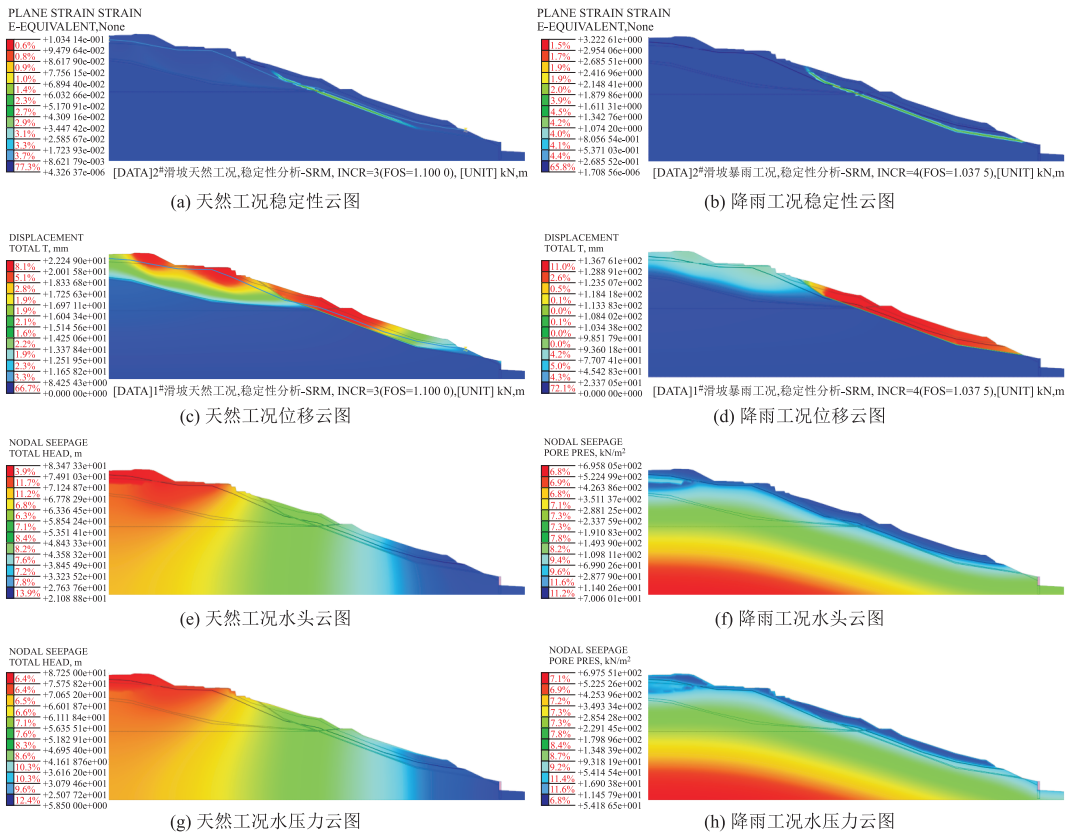


图 15 4-4'剖面各工况云图

孔隙水压力为  $695.805 \text{ kN/m}^2$ 。由于在其中部压力管道扩建,一方面开挖的土石方随意堆在基坑外侧,增加了滑坡后缘荷载;另一方面破坏了原始的林草生态系统,减弱了林草调节水分和固土的功能,扰动了土壤生态,容易造成推移式滑动破坏。最大位移量出现在压力管道附近,为  $22.249 \text{ mm}$ 。

由图 15(b)、(d)、(f)、(h)可知,在暴雨工况下,2# 滑坡的稳定性系数为  $1.0375$ ,滑动面全部贯通,处于欠稳定状态。总水头最大值为  $87.25 \text{ m}$ ,最大孔隙水压力为  $697.514 \text{ kN/m}^2$ 。与 1# 滑坡相似,最大总水头与孔隙水压力增幅不明显,各增加了  $3.7767 \text{ m}$  和  $1.709 \text{ kN/m}^2$ 。在降雨条件下,地表水入渗增加了滑坡体的重量,加速了对土体的软化、泥化,使得滑动面逐渐贯通。滑坡前端由于安置房的建设进行了开挖,使得坡体前缘临空,造成牵引式滑动,形成越顶破坏。滑坡整体位移量从前部到后部缓慢增加,最大位移量为  $136.761 \text{ mm}$ ,出现在压力管道附近。

通过已有的现场踏勘、钻探、相关监测数据、数值模拟等综合分析得出:在天然状态下,1# 滑坡和 2# 滑坡由于人类工程活动,扰乱了坡体地下水分布和应力分布状态,加上地下水长期对基岩顶面岩土体的软化、泥化作用,使得滑面已经逐渐趋于贯通。当在降雨条件下,地下水将加速对土体的软化、淋滤作用,使滑动面彻底贯通产生整体滑移失稳。

## 4 滑坡成因机制分析

通常以粉质黏土组成的堆积体其饱和渗透系数较小,降雨只有小部分入渗进入坡体,入渗深度有限,故缓倾堆积层滑坡在降雨的影响下以浅层滑动居多,且缓倾堆积层滑坡整体坡度较小,按传统极限平衡理论来分析滑坡的稳定性很难达到发生破坏的状况。但柏枝溪滑坡与上述缓倾堆积层滑坡不同,以整体深层滑动为主,究其原因其内部软弱夹层发育,在降雨作用下,使得滑坡失稳,故研究软弱夹层的成因显得尤为重要。

### 4.1 软弱夹层成因分析

#### 4.1.1 岩相构成

滑坡体为第四系滑坡堆积层,岩性以粉质黏土夹块碎石为主,结构松散,容易受降雨入渗和地表水运移的影响。下伏基岩为志留系韩家店组页岩、小河坝组粉砂岩。岩相复杂,在垂直方向上,该斜坡堆积层历史上曾发生多次崩滑堆积,从而在内部形成多个以粉质黏土为主的原始残坡积土层。

#### 4.1.2 裂隙

土体中的裂隙可分为土体干化裂隙和张应力裂隙。该滑坡体以粉质黏土为主,结构较为松散,在干燥条件下容易出现干化裂缝。这些裂缝的存在,增加了土体中的空隙量,提高了土体的渗透系数,从而对坡体的含水量造成影响。此外,土体松散降低了坡体的抗剪强度,容易在坡体后缘拉伸段和坡体前缘隆起段产生张应力集中,从而出现张裂隙。

#### 4.1.3 水文地质

暴雨及持续降雨条件下,地表水沿第四系松散土体及滑坡后部基岩裂隙渗入滑坡体内,将沿着原始残坡积土层以及部分基岩顶面流动。原始残坡积土层以粉质黏土为主,在干燥少水情况下,强度较高,当水入侵坡体后,土体会变得很软,软化现象明显。下伏基岩隔水性较好,从而在基覆界面附近形成饱水带。首先,水的软化作用降低了岩土接触面处岩土体的强度;其次,饱水带中的地下水将产生较大浮托力,降低坡体抗滑力;最后,由于地下水的淋滤作用,在入渗的过程中,不断带走上部坡体内细颗粒物质,在基覆界面附近聚集,同时还将有有机质带到滑面附近,大大降低了基覆界面处强度,逐渐形成软弱夹层。

## 4.2 滑坡成因机制

软弱夹层是导致滑坡失稳的主要因素,但是结合已有的现场踏勘、钻探、相关监测数据及数值模拟可知,滑坡的形成与地形地貌、地层岩性、坡体结构、人工活动、大气降水等同样密不可分,是以上因素共同作用的结果。其中,降雨是该滑坡在平缓地区发生滑移的主要诱发因素。

### 4.2.1 内在控制因素

内在控制因素为地层岩性、地形地貌和坡体结构。首先,滑体块石含量较高,结构较松散,透水性较好,下伏稳定基岩主要为志留系中统韩家店组页岩,其隔水性能较好,地下水渗透至基岩面时,将沿着岩土接触面径流,从而形成滑面;其次,滑坡位于斜坡地形中下部,而斜坡地形具有一定的汇水面积,后方的山体汇水将直接进入滑坡体内,从而增加滑体自重,降低土体抗剪强度;再者,滑坡前缘为陡崖带,为滑坡滑动提供了良好的空间条件。

### 4.2.2 外在诱发因素

人类工程活动和降雨是外在诱发因素。人类工程活动主要体现在扰动了坡体应力分布状态,促进了坡体的变形破坏。1# 滑坡由于复建公路的修建,进行了一部分的回填压实,填土层透水性较弱,导致原有地表及地下水通道受到一定程度的堵塞,使得

滑坡体后部局部水位涌高,增加了滑坡后部重量。2#滑坡前端由于安置房的建设进行了开挖,使得坡体前缘临空,形成牵引式滑动破坏,在其中部由于压力管道扩建基坑开挖,减弱了林草调节水分和固土的功能,开挖的土石方随意堆在基坑外侧,增加了滑坡后缘荷载,形成推移式滑动破坏。

降雨是诱发滑坡产生的主要原因。雨水入渗到土体中可以造成两个结果:一是进入土体的孔隙和岩石的裂缝,使土石的抗剪强度降低;二是补给地下水,抬高地下水位,使滑面的有效法向应力减小,增大了坡体的下滑力。并且降雨又加快了滑坡的变形:一方面由于块石土含量较高,使得滑体孔隙性和吸水性高,雨水在径流的过程中会产生不用程度的入渗,增加了坡体土的含水量和滑体的重量;另一方面因为滑体的入渗条件较好,滑床主要为页岩,透水性差,当降雨时,造成地下水位上升,使基覆面土体软化、泥化,形成软弱夹层,使滑体极易滑动。

## 5 结论

根据钻孔、工程测量、无人机摄影测量技术、现场试验及取样试验等手段,结合现场监测和Midas-GTS数值模拟软件,详细分析该滑坡的变形特征、成因机制及潜在稳定性,得出结论如下:

(1) 柏枝溪滑坡位于龙骨溪背斜的西翼靠近轴部,呈单斜构造,可分为1#滑坡和2#滑坡。1#滑坡平均厚度25 m,体积约 $336 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,为大型中-深层堆积层滑坡;2#滑坡平均厚度约10 m,体积约 $18.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,为中型浅层堆积层滑坡。

(2) 监测数据及数值模拟结果表明:天然工况下,由于人类工程活动的影响,扰动了坡体应力状态分布,柏枝溪滑坡处于基本稳定状态,滑带从后往前趋于贯通;暴雨或持续降雨条件下,雨水入渗加速了软弱夹层的形成,使得滑带贯穿,滑坡属于欠稳定状态,极易沿着软弱夹层发生滑动。

(3) 不同于以浅层滑动居多的缓倾堆积层滑坡,柏枝溪滑坡虽属于缓倾堆积层滑坡,但由于其内部软弱夹层的存在,使得滑坡以整体深层滑动为主,故软弱夹层的存在是该滑坡失稳的主要因素。同时,柏枝溪滑坡的形成是地形地貌、地层岩性、坡体

结构、人工活动、大气降水等因素综合作用的结果。其中,降雨是该滑坡在平缓地区发生滑移的主要诱发因素。

## 参考文献

- [1] Gariano S L, Brunetti M T, Iovine G, et al. Calibration and validation of rainfall thresholds for shallow landslide forecasting in Sicily, southern Italy[J]. *Geomorphology*, 2015, 228(1): 653-665.
- [2] Peruccacci S, Brunetti M T, Gariano S L, et al. Rainfall thresholds for possible landslide occurrence in Italy [J]. *Geomorphology*, 2017, 290(1): 39-57.
- [3] Peng J, Fan Z, Wu D, et al. Heavy rainfall triggered loess-mudstone landslide and subsequent debris flow in Tianshui, China[J]. *Engineering Geology*, 2015, 186(1): 79-90.
- [4] Caracciolo D, Arnone E, Conti F L, et al. Exploiting historical rainfall and landslide data in a spatial database for the derivation of critical rainfall thresholds [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(5): 222-233.
- [5] Zezere J L, Vaz T, Pereira S, et al. Rainfall thresholds for landslide activity in Portugal: a state of the art [J]. *Environmental earth sciences*, 2015, 73(6): 2917-2936.
- [6] Cascini, L. Calvello M, Grimaldi, GM. Groundwater Modeling for the Analysis of Active Slow-Moving Landslides. [J]. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(9): 1220-1230.
- [7] Iverson R M. Landslide Triggering by Rain Infiltration [J]. *Water Resources Research*, 2000, 36(7): 1897-1910.
- [8] 付宏渊, 陈镜丞, 曾铃, 等. 降雨对炭质泥岩——土分层路堤渗流与变形影响的模型试验 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(11): 2852-2860.
- [9] 郝玉. 基于Midas GTS的某高速公路边坡稳定性分析 [J]. *土工基础*, 2023, 37(1): 31-35.
- [10] 吕文斌, 耿海深, 魏赛拉加. 基于极限平衡法和Midas/GTS的张家湾滑坡稳定性 [J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(11): 4369-4378.
- [11] 谭银龙, 许万忠. 降雨入渗对裂隙岩质边坡稳定性影响分析 [J]. *地质灾害与环境保护*, 2022, 33(2): 78-85.
- [12] 张帅, 贺拿, 钟卫, 等. 基于综合监测的滑坡变形特征的分析 [J]. *工业建筑*, 2022, 52(2): 90-95. [J].
- [13] Egel i, Pulat H F. Mechanism and modelling of shallow soil slope stability during high intensity and short duration rainfall [J]. *Scientia Iranica*, 2011, 18(6): 1179-1187.
- [14] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数 [J]. *岩土工程学报*, 2002, (3): 43-346.

作者简介: 杨云飞(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事边坡工程研究。E-mail: 2549972976@qq.com

通讯作者: 许万忠(1965—), 男, 教授, 博士, 主要从事边坡、基坑、隧道及地质灾害防治的力学分析及加固支护设计。

E-mail: 582647881@qq.com