

贵州金海湖新区田湾子滑坡活动特征及成因机理分析

胡 屿, 张 楠, 吴东燃, 陈 亚, 何 辉

Analysis on the characteristics and mechanism of Tianwanzi landslide in Jinhaihu newly liberated area, Guizhou Province

HU Yu, ZHANG Nan, WU Dongran, CHEN Ya, and HE Hui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202203025>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三峡库区大型斜倾顺层滑坡失稳机理分析

Instability mechanism of massive oblique bedding rock landslide in the Three-Gorges Reservoir: A case study of the Longjing landslide in Shizhu County of Chongqing City

王平, 朱赛楠, 张枝华, 吴晓宾, 杨柳, 赵慧 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 24-32

广州夏茅村岩溶地面塌陷成因机理与塌陷过程分析

Analysis on formation mechanism and process of karst collapse in Xiamao Village, Guangzhou City of Guangdong Province

郭宇, 周心经, 郑小战, 李晶晶 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 54-59

肯尼亚裂谷区地裂缝特征及成因分析

Analysis of the characteristics and causes of ground fissures in Kenya rift region

谭鹏, 刘阳, 蒋富强, 温欣岚, 王飞永, 贾智杰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 53-62

北京山区突发性地质灾害易发性评价

Assessment on the susceptibility of sudden geological hazards in mountainous areas of Beijing

罗守敬, 王珊珊, 付德荃 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 126-133

甘肃舟曲垭豁口滑坡复活机理及成因探讨

Mechanism and causal analysis on the Yahuokou landslide reactivation and causes (Zhouqu County, Gansu, China)

窦晓东, 张泽林 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 9-18

三峡库区巫峡剪刀峰顺层岩质岸坡破坏模式分析

An analysis on the destruction mode of Wuxia scissors peak down the shore slope in the Three-Gorges Reservoir area

王平, 胡明军, 黄波林, 张枝华, 郑涛, 吴坤达, 毛博 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 52-61



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202203025

胡屿, 张楠, 吴东燃, 等. 贵州金海湖新区田湾子滑坡活动特征及成因机理分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(5): 11-19.
HU Yu, ZHANG Nan, WU Dongran, *et al.* Analysis on the characteristics and mechanism of Tianwanzi landslide in Jinhaihu newly liberated area, Guizhou Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5): 11-19.

贵州金海湖新区田湾子滑坡活动特征及成因机理分析

胡 屿, 张 楠, 吴东燃, 陈 亚, 何 辉
(贵州省地质环境监测院, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 2022 年 1 月 3 日 18 时 55 分, 贵州毕节市金海湖新区归化街道田湾子发生一起顺层滑坡, 形成约 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的堆积体, 造成 14 人遇难, 3 人受伤。综合应用无人机航拍、现场测试等技术手段, 文章详细描述了现场的地质调查, 初步分析了滑坡体特征、滑坡发生的运动过程和成因机理, 并对滑坡残留体的潜在危险进行了监测和分析, 为现场救援行动提出搜救建议。初步研究结果认为, 滑坡源区特殊的地形地貌条件、风化碎裂的泥质白云岩和不利的岩体结构面是滑坡形成的内因, 边坡开挖扰动致斜坡的地表形态和应力分布发生改变是滑坡发生的外因。田湾子滑坡发生前斜坡无明显变形迹象, 灾害发生具有突发性, 造成了较大的人员伤亡和经济损失, 深入研究田湾子滑坡的形成过程和成灾机理, 对贵州山区存在类似条件的地质灾害隐患防治工作具有现实的指导意义。

关键词: 突发性滑坡; 软弱夹层; 顺层滑坡; 地质灾害; 成因机理

中图分类号: P694;X43;X45

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)05-0011-09

Analysis on the characteristics and mechanism of Tianwanzi landslide in Jinhaihu newly liberated area, Guizhou Province

HU Yu, ZHANG Nan, WU Dongran, CHEN Ya, HE Hui
(The Geo-environment Monitoring Institute of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550081, China)

Abstract: At 18:55 on January 3rd, 2022, a bedding landslide disaster occurred in Guihua street, Jinhaihu newly liberated area, Bijie City, Guizhou Province, with a volume of about $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3$, which resulted in 14 deaths and 3 injuries. Through the detailed geological survey, this paper comprehensively uses UAV aerial photography, field testing and other technical methods to describe the characteristics of Tianwanzi landslide in detail, preliminarily analyze the movement process and genetic mechanism of the landslide, monitor and analyze the potential risk of the landslide residue, and put forward search and rescue suggestions for on-site rescue operations. The preliminary research results show that the special topographic and geomorphic conditions in the landslide source area, weathered and fragmented argillaceous dolomite and unfavorable rock mass structural plane are the internal causes of the landslide, and the change of surface morphology and stress distribution of the slope caused by slope excavation disturbance is the external cause. Before the occurrence of Tianwanzi landslide, there was no obvious sign of slope deformation, and the disaster occurred suddenly, resulting in great human and economic losses. In-depth study of the formation process and disaster mechanism of Tianwanzi landslide has practical guiding significance for the prevention and control of potential geological hazards with similar conditions in Guizhou mountainous area.

Keywords: sudden landslide; weak intercalated layer; bedding landslide; geologic hazard; genetic mechanism

收稿日期: 2022-03-18; 修订日期: 2022-05-28

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

第一作者: 胡 屿(1982-), 男, 贵州盘县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治研究。E-mail: 370564777@qq.com

通讯作者: 张 楠(1987-), 男, 重庆綦江县人, 硕士, 高级工程师, 从事地质灾害气象风险预警研究。E-mail: 675400947@qq.com

0 引言

2022 年 1 月 3 日 18 时 55 分 38 秒, 贵州省毕节市金海湖新区归化街道田湾子毕节市第一人民医院分院培训综合楼在建工地发生滑坡地质灾害, 共造成 14 人遇难, 3 人受伤, 损毁挖机 4 台, 货车 1 台, 直接经济损失超过 1 000 万元。滑坡区位于双山北路北侧。滑坡体失稳后, 岩土体快速破碎解体, 沿岩层面迅速滑动至下方平台堆积, 形成堆积体约 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3$, 整个滑坡过程从启动到停积仅 15 s。

灾害发生后, 按照中央有关部门, 省委、省政府有关领导指示批示精神, 由省自然资源厅组建地质调查组, 立即开展滑坡成因应急调查。

学者一般是通过一些滑坡地质灾害实例调查分析滑坡成因机理。郑光等^[1]针对贵州水城县鸡场镇滑坡碎屑流开展现场调查, 根据岩土体堆积特征将滑坡区分为滑源区、滑移-刮产区、主停积区, 研究分析了其动力学过程和成因机理。王浩杰等^[2]针对甘肃通渭常河滑坡开展现场调查, 通过现场测绘、走访及数值模拟等手段对其变形破坏特征进行分析, 研究探讨了其成因机制。然而, 以上研究方式很难直接观察到滑坡的具体运动过程, 对探究滑坡运动及成因机理分析存在一定的局限性。

文中通过开展灾区无人机测绘、地层岩性和地质结构调查, 收集历史影像、灾害发生过程监控视频和原始地形数据, 为灾害发生前后过程分析提供了详实的技术支撑。在调查研究的基础上, 得出了滑坡特征和成因机制的初步认识。

1 研究区概况

田湾子滑坡区属低中山溶蚀侵蚀地貌。总体的地势为东高西低。滑坡所在山体最高海拔 1 433 m, 最低海拔 1 367 m, 高差 66 m。原始斜坡整体向西倾斜, 为缓斜坡, 起伏变化较小, 地形坡度 $16^\circ \sim 18^\circ$ 。因工程建设需要, 斜坡区已被多次“切割”改造。东侧因医院建设切坡, 形成高 40 m 左右的高陡陡坡; 南侧因双山北路(又称横一路)形成高 5~35 m 的高陡边坡, 坡度 60° 以上; 西侧因医院培训综合楼建设切坡形成了三级边坡, 正进行切坡和坡顶支护作业, 平均坡度 $30^\circ \sim 60^\circ$, 局部较陡, 开挖放坡坡度 60° 以上。本区为独立山体, 地下水为大气降水补给, 在降雨条件下沿坡面径流, 区内及周边未见泉点露露。

区内出露地层为三叠系中统关岭组^[3](T_2g), 岩性为黄灰、浅灰色薄至中层状泥质白云岩夹黏土岩, 岩层平

均产状 $273^\circ \angle 16^\circ$, 斜坡结构为顺向层面坡, 强风化层厚约 2~4 m, 风化强烈, 岩体破碎^[4]。土层厚约 0.2~1.5 m, 成分为黄褐色含碎石黏土, 碎石含量约 10%。

研究区属杨子准地台、黔北台隆、遵义断拱、毕节北东向构造变形区, 处于落脚河向斜的北西翼, 断裂构造不发育, 岩层呈单斜构造, 地震基本烈度值为 VI 度。区内及邻近区域近年来未发现有强震活动, 滑坡发生前未见可能影响坡体稳定的地震显示, 区域稳定性良好^[5]。

2 田湾子滑坡特征

2.1 滑坡规模与形态特征

通过收集金海湖新区地质灾害隐患管理台账等资料进行分析, 该滑坡属于非地质灾害隐患点, 不在地质灾害隐患管理台账内。整个滑坡区域空间上北、东、南、西四面临空, 分为滑源区、滑移区和主停积区, 在平面形态上呈不规则多边形, 平均长 100 m, 平均宽 70 m, 滑坡体面积约 $6\,998 \text{ m}^2$, 平均厚 5 m, 体积约 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3$, 主滑方向 263° , 滑体物质组成主要为第四系碎石土及泥质白云岩(图 1)。



图 1 田湾子滑坡全貌图

Fig. 1 Overall view of Tianwanzi landslide

滑坡边界清晰, 后缘高程 1 429 m, 后缘边界呈折线型, 形成明显的拉张陡壁, 陡壁长约 80 m, 高约 2~3.6 m, 壁面形成锯齿状断面, 可见两组节理裂隙发育, 其中一组产状为 $95^\circ \angle 79^\circ$, 节理紧闭, 无充填, 发育密度 4 条/m; 另外一组产状 $150^\circ \angle 78^\circ$, 节理紧闭, 无充填, 发育密度 2 条/m, 受节理裂隙影响, 岩体破碎, 主要成分为强风化泥岩(图 2)。滑坡左侧缘以南面公路边坡为边界, 右侧缘以北侧山坡为边界, 前缘高程 1 393 m, 前

后缘高差 36 m,前缘为施工便道及开挖边坡形成的平台。滑坡后缘残留体发育一条牵引式拉裂缝 L1,裂缝距滑坡残留体前缘陡壁约 3 m,裂缝延伸方向为 165°,呈直线型延伸,裂缝长 6 m,宽 10~15 cm,可见深度 0.3~0.8 m(图 3)。抢险救援期间为防止发生二次灾害,在残留体上裂缝 L1 布设了 2 部便携式裂缝监测仪进行 24 h 不间断监测,通过对监测数据判断分析,残留体未出现异常变化,直到抢险救援结束时仍处于稳定状态,应急监测为下方灾害现场救援队伍作业位置选择提供了建议,降低了救援队伍作业风险。

2.2 滑坡运动破坏特征

通过现场地质调查及调取施工监控视频综合判定,滑坡在发生前正在边坡开挖,2022 年 1 月 3 日 18 时 55 分 38 秒时,滑坡沿开挖的第三级台阶下部约 2~3 m



图 2 田湾子滑坡后缘节理

Fig. 2 Joints at the back edge of Tianwanzi landslide

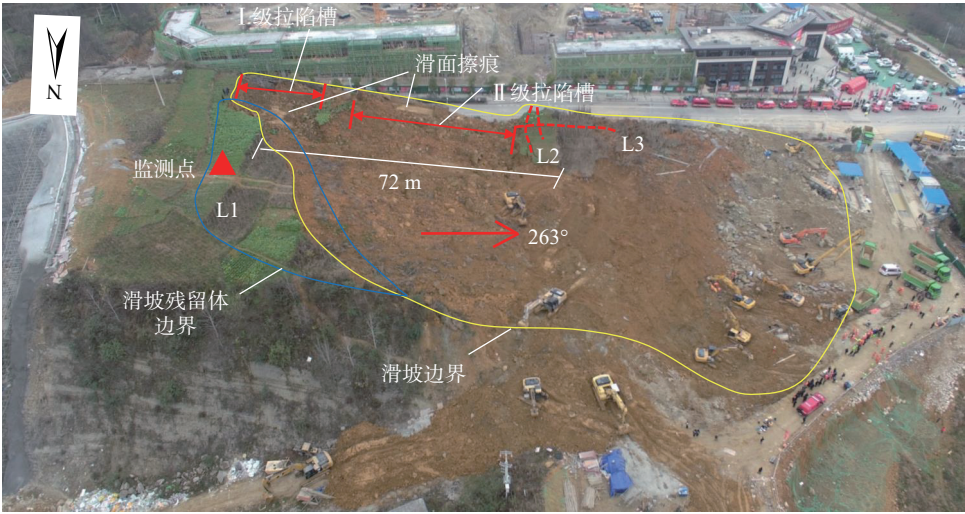


图 3 滑坡运动破坏特征

Fig. 3 Failure characteristics of landslide

处剪出滑动破坏,18 时 55 分 53 秒时滑坡停止,整个滑坡从启动到停积共 15 s,滑动距离约 72 m(图 4)。

滑坡运动结束后,中后部形成两级拉陷槽,Ⅰ级拉陷槽位于后缘滑壁陡坎部位,槽底面为岩层层面,宽度为 13 m,长度为 14 m,层面光滑平整,表层为厚度 1 cm 左右的灰白色黏土,黏土湿润柔软,手捏易变形。其表面见明显的擦痕,擦痕产状为 262°∠18°,与陷槽底面层产出状态一致;Ⅱ级拉陷槽位于滑坡体中部,与Ⅰ级拉陷槽底面为同一岩层面,层面光滑平整,宽度为 7 m,长度为 14 m,表层为厚度 1.5 cm 左右的灰白色黏土,黏土湿润柔软,用手捏易变形。表面见明显的密集擦痕,擦痕产状为 263°∠16°,与陷槽底面层产出状态一致。

拉槽前缘为整体滑动后形成的一块滑坡堆积体,长

度为 32 m,宽为 20 m,面积为 545 m²,平均厚度约 4.7 m,体积约 2 600 m³。其上发育 2 条较大裂缝,其中一条裂缝 L2 走向为 187°,大体与坡向垂直,呈锯齿状延伸展布,长度为 15 m,宽 5~43 cm,可测深度为 1.1 m;另一条裂缝 L3 走向为 276°,大体与坡向一致,呈直线型延伸展布,长度为 6 m,最大宽度为 42 cm,可测深度为 1.75 m;此外滑坡体表面还发育多条较小裂缝,裂缝间距为 0.2~3 m,发育密集,走向杂乱且相互交叉(图 3)。

前缘堆积体物质成分主要为含碎石黏土及强风化泥质白云岩,堆积体长约 60 m,宽约 40 m,厚约 5 m,体积约 1.2×10⁴ m³。左侧缘堆积体主要堆积于双山北路内侧,体积约 0.8×10⁴ m³,物质成分以强风化泥质白云岩碎块石为主,夹部分黏土。其余 1.5×10⁴ m³ 多为残留块体



图 4 滑坡启动—运动—停积过程监控图形

Fig. 4 Monitoring graph of landslide movement process

或零散堆积于整个坡体的堆积物。

综上, 整个滑坡启动时, 前缘滑移后呈垮塌破碎状态剪出, 前缘顺岩层面滑移剪出后, 中后部继续拉裂滑动形成二次堆积, 滑坡运动特征为前缘牵引启动, 中后部拉裂, 滑体沿 1~3 cm 厚灰白色泥质软弱层顺层滑动, 整个滑坡从启动到堆积完成仅用 15 s, 为牵引式顺层突发性滑坡地质灾害^[6-8]。

3 滑坡前后影像资料分析

(1) 2019 年 6 月卫星影像图显示, 滑坡区所处山体东侧已开挖形成边坡, 尚未完成支护, 边坡东侧为正在建设毕节市第一人民医院分院综合大楼。山体南侧为已经修建完成并投入使用的双山北路, 公路边坡已经完成支护。山体北侧为一沟谷, 沟谷以北另一山体出现开挖现象。山体西侧的本次滑坡区位置尚未出现开挖迹象, 结合对周边村民访问调查, 滑坡区位置地面为植被覆盖, 部分区域为村民旱地(图 5)。

(2) 2021 年 12 月 21 日卫星影像图显示, 山体东侧已开挖形成的边坡已基本完成支护工作。山体南侧公路边坡的西段部分边坡已被开挖面长度约 35 m。山体北侧距滑坡区边界直线距离约 67 m 位置已建好活动板房。山体西侧滑坡区已进行大范围开挖, 开挖周长为 402 m, 开挖平面面积为 $1.04 \times 10^4 \text{ m}^2$, 初步形成了三级开

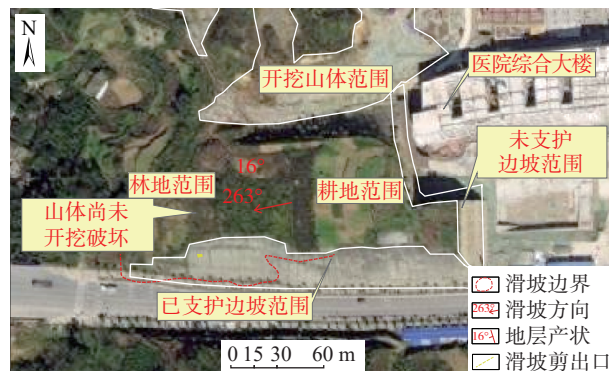


图 5 滑坡前 2019 年 6 月卫星影像图

Fig. 5 Satellite image on June 2019 before landslide

挖台阶, 其中第一级台阶正在支护, 第二级、第三级台阶正在开挖(图 6)。

(3) 2022 年 1 月 4 日无人机正射影像显示, 2022 年 1 月 3 日 18 时 55 分 38 秒时发生的滑坡地质灾害, 堆积体覆盖面积为 $11\,608 \text{ m}^2$, 滑坡向西平均移动约 72 m, 部分滑体出现了整体移动现象, 在山体斜坡上及山体西侧开挖平台处堆积, 堆积体空间上呈前厚后薄状态, 滑坡主滑方向约 263° (图 7)。

4 斜坡及边坡稳定性分析

对田湾子滑坡前所在山体原始斜坡及开挖后形成

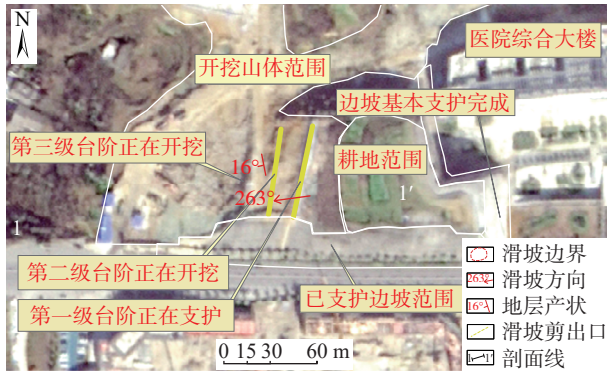


图 6 滑坡前 2021 年 12 月 21 日卫星影像图

Fig. 6 Satellite image on December 21, 2021 before landslide

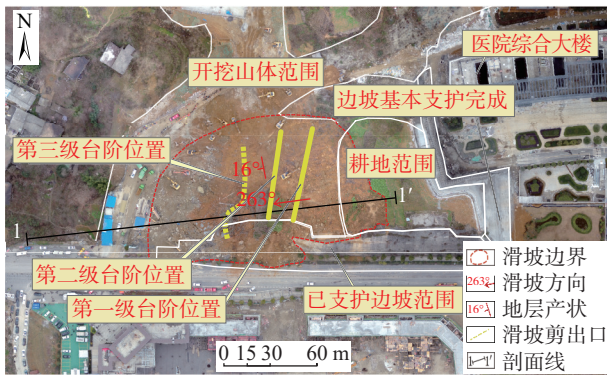


图 7 滑坡后 2022 年 1 月 4 日无人机影像图

Fig. 7 UAV image on January 4, 2022 after landslide

的边坡稳定性进行分析,深入调查分析滑坡前所处主要时间节点下的稳定状态,是判定此次滑坡成因机理的重要技术手段。此次调查采用定性与定量相结合的方式,针对该滑坡区域所处的原始斜坡地形状态与开挖形成的边坡滑坡前地形状态分别进行稳定性分析。

4.1 稳定性计算模型建立

对田湾子滑坡运动破坏特征的调查分析,滑坡为顺层岩质滑坡,采用《滑坡防治工程勘查规范(GB/T 32864—2016)》岩质滑坡单一滑面极限平衡法计算模型对滑坡稳定性进行评价^[9-13],岩质滑坡极限平衡法计算模型示意图(图 8),计算公式如下:

$$K_f = \frac{[W(\cos \alpha - A \sin \alpha) - V \sin \alpha - U] \tan \varphi + CL}{W(\sin \alpha + A \cos \alpha) + V \cos \alpha} \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{2} r_w H^2 \quad (2)$$

$$U = \frac{1}{2} r_w LH \quad (3)$$

式中: K_f ——稳定系数;

W ——滑块重量/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$);

α ——滑面(带)倾角/($^\circ$);

A ——地震加速度/ g ;

V ——后缘裂缝静水压力/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$);

U ——沿滑面扬压力/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$);

φ ——内摩擦角/($^\circ$);

C ——黏聚力/ kPa ;

L ——滑面(带)长度/ m ;

γ_w ——水的容重/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$);

H ——地下水位高度/ m 。

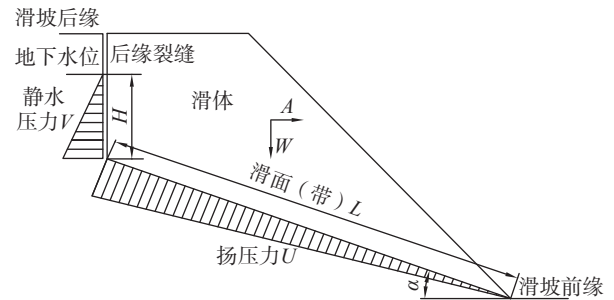


图 8 岩质滑坡极限平衡法计算模型示意图

Fig. 8 Schematic diagram of calculation model of limit equilibrium method for rock landslide

4.2 斜坡及边坡稳定性分析

分析田湾子滑坡稳定性,需获得滑坡前尚未破坏的原始地形,通过毕节市第一人民医院建设项目尚未开工前的早期项目征地图,获取了项目未开展前的原始地形图,可以计算得到原始地形条件下的斜坡稳定性。通过获取滑坡位置 2022 年 1 月 3 日临近滑坡发生前的施工资料及卫星影像图(2021 年 12 月 21 日),结合施工现场监控录像进行分析,可以获取 2022 年 1 月 3 日 18 时 55 分临近滑坡前最新开挖剖面图,进而获得滑坡时剪出口位置及开挖剖面地形,再与原始地形剖面图进行叠加处理,反推得到原始地形剖面滑坡剪出口位置^[14-16]。最后计算得到原始地形剖面及滑坡发生前开挖剖面稳定性系数。

(1) 斜坡稳定性分析

由滑坡运动破坏特征过程分析可以得知,此次滑坡的滑面为岩层厚度为 1~3 cm 的白色泥质软弱带,根据《毕节市第一人民医院建设项目培训综合楼(补勘)场地岩土工程详细勘察报告》可获得滑面软弱夹层的岩土体物理力学参数(表 1)。通过对 2014 年毕节市第一人民医院用地红线地形图制作相应位置的地形剖面可以看出,2022 年 1 月 3 日发生滑坡的剪出口位于原始地形线以下,说明在原始地形条件下,不会沿已发生滑坡的滑面发生地质灾害。此外,调查组进一步选取

最有可能发生滑坡的斜坡剪出口进行斜坡稳定性分析,以顺层的软弱夹层延伸至地表位置为剪出口的潜在滑面进行验算,得到潜在滑面稳定性系数为 1.18,表明斜坡在原始地形条件下为稳定状态,不会沿顺层的软弱夹层发生滑坡地质灾害(图 9)。综上,原始斜坡在未有外界干扰变化的情况下处于稳定状态,不会发生滑坡地质灾害。

表 1 岩土体物理力学参数
Table 1 Physical and strength properties of rock and soil mass

岩土体	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa		内摩擦角/(°)	
				天然	天然	天然	天然
滑体	2 592	17 150	0.29	1 876		28	
滑面	2 160	3 200	0.36	34		7	

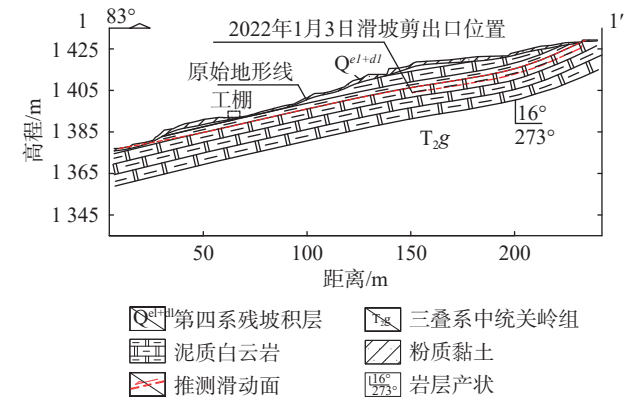


图 9 田湾子滑坡原始地形纵剖面图
Fig. 9 Original topographic profile of Tianwanzi landslide

(2)边坡稳定性分析

经调查,场地从 2021 年 9 月 1 日开工建设,原始斜坡平均坡度 16°~18°,到 2022 年 1 月 3 日临滑前开挖形成了三级台阶状边坡,平均坡度 30°~60°,局部较陡,开挖坡度在 60°以上,滑坡发生前正在进行边坡开挖施工,白云岩层间软弱泥质夹层的临空面已充分暴露地表,根据滑坡临滑前的剖面图对边坡进行稳定计算,得到 2022 年 1 月 3 日 18 时 55 分滑坡发生时的稳定系数为 0.97,说明边坡在此时是处于不稳定状态,与实际情况相吻合(图 10)。

5 滑坡成因机理分析

滑坡的发生往往是内因和外因共同作用的结果。内因一般为地形地貌、地层岩性、地质构造、岩土结构等因素,外因主要为地震、降雨、人类工程活动等因素。

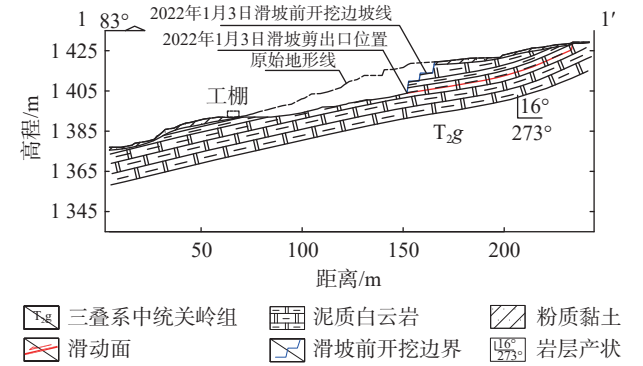


图 10 田湾子滑坡临滑时地形纵剖面图
Fig. 10 Topographic profile of Tianwanzi landslide closing to slide

5.1 岩土体结构

田湾子滑坡边界清晰,节理裂隙发育,后缘边界被节理裂隙切割分离,形成明显的滑坡后缘陡壁,陡壁面为拉裂形成锯齿状,断面粗糙,顺着后缘岩层面一直延伸到山顶还有平均长为 80 m,平均宽为 20 m,平均厚为 4 m,规模为 0.64×10⁴ m³ 的滑坡残留体。滑坡体岩体较破碎,主要成分为上部强风化泥岩,中下部为中风化白云岩。滑面为白云岩岩层间 1~3 cm 厚灰白色泥质软弱夹层,滑面平均坡度为 16°。不利的岩土体组合和不利斜坡结构的顺向坡为滑坡提供了天然的滑面及物质基础^[17-18]。

5.2 降雨条件

滑坡区地下水主要补给源为大气降水,在降雨条件下,存在坡面径流和垂直下渗,由于坡体相对独立,坡面汇水面积较小,垂直下渗的水量不大。根据收集滑坡最近的省气象台毕节市梨树站和双山站气象观测站降雨资料,据观测记录,滑坡发生前 60 d 累计降雨量为 23.0 mm 和 54.0 mm;滑坡发生前 30 d 累计降雨量为 11.8 mm 和 28.4 mm;滑坡发生前 15 d 累计降雨量分别为 9.3 mm 和 19.8 mm;滑坡发生前 7 d 累计降雨量分别为 1.2 mm 和 3.6 mm,两站均未有单日大于 3 mm 的降雨记录^[19](图 11)。另据施工单位施工日志记录,工程自 9 月 1 日开工以来,到 10 月 2 日,除 9 月 16 日和 17 日有降雨(未影响施工)外,其余时间均为晴天,2021 年 11 月 5 日至 12 月 1 日,仅有 2 d 小雨,但未影响施工。滑坡发生后,场区东南两侧挂网喷浆区域均设置有泄水管,未见排水现象,未见地下水出露,说明滑坡区地下水不发育,降雨对滑坡发生的影响极小^[20]。

5.3 地震条件

田湾子滑坡发生前,周边区域最近一次发生较

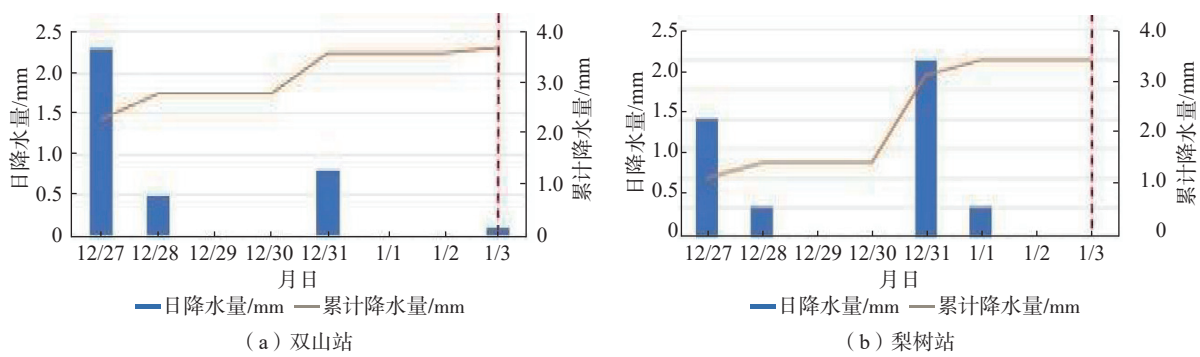


图 11 滑坡前降雨过程曲线图
Fig. 11 Rainfall process curve before landslide

强地震是毕节市七星关区 2021 年 8 月 21 日发生的 4.5 级地震,滑坡距离震中 18 km,从 2021 年 11 月 23 日起到 2022 年 1 月 4 日止,滑坡区域未记录到震级 $M \geq 0$ 以上地震。可以看出,七星关区 2021 年 8 月 21 日发生的 4.5 级的地震与此次田湾子滑坡空间上距离较近但不属于破坏型地震,滑坡前最近的 43 d 内在周边区域未发生过地震,说明滑坡发生不受地震影响^[21-24]。

5.4 人类工程活动影响分析

通过对斜坡稳定性的计算可知,发生滑坡的剪出口位于开挖前地表以下,在原始地形条件下,不会沿已发生滑坡滑面剪出口位置发生地质灾害;通过进一步选取滑坡剪出口以上最有可能发生滑坡的顺层软弱夹层作为潜在滑面进行验算,在原始地形条件下仍不会发生滑坡地质灾害。毕节市第一人民医院分院培训综合楼于 2021 年 9 月 1 日开始施工对斜坡进行开挖,随后开挖的边坡逐步形成了临空面并扩大,到 2022 年 1 月 3 日 18 时 55 分,施工挖掘机持续开挖边坡形成并进一步扩

大了白云岩层间软弱泥质夹层出露临空面积,上方坡体失去支挡物支撑沿着岩层软弱面瞬间向下滑动发生滑坡地质灾害。

通过选用有限元软件 GeoStudio 开展数值模拟,其中分析类型选用原位分析类型,材料模型采用线弹性(总应力),分别对边坡开挖前原始地形和开挖三级台阶形成后的边坡进行计算(图 12)。可以看出原始地形下从地表往地下最大总应力沿斜坡呈现规律性的逐渐增加,第三级台阶处最大总应力为 3 000 ~ 4 000 kPa;开挖边坡后在每个台阶拐角处出现不同程度的应力集中,第三级台阶拐角处应力集中最大,最大总应力大于 4 000 kPa。说明毕节市第一人民医院分院培训综合楼在建工程边坡开挖改变了斜坡的地表形态和应力分布,降低了坡体抗滑力,导致边坡失稳破坏形成地质灾害,通过上述边坡稳定计算得到的 2022 年 1 月 3 日 18 时 55 分时边坡处于不稳定状态也得以验证。

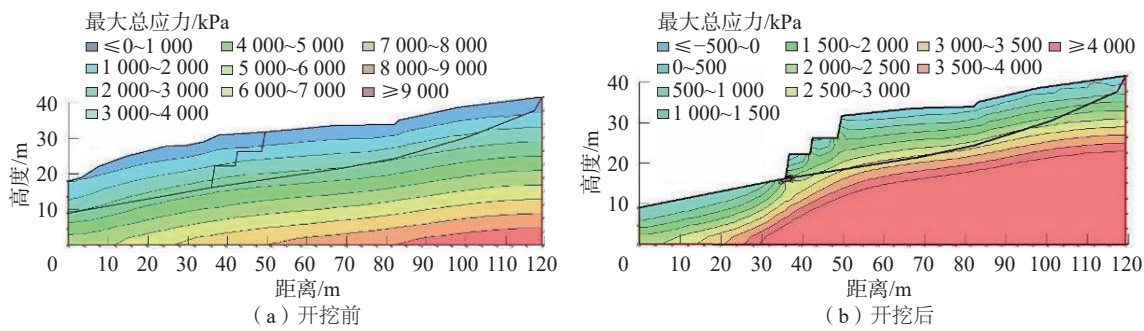


图 12 边坡开挖前后应力演化模式
Fig. 12 Stress evolution model of slope before and after excavation

6 结论与认识

通过开展田湾子滑坡地质灾害应急调查研究,分析了滑坡的具体特征和成因机制,初步得出以下结论和

认识:

(1)滑坡区岩层节理发育,风化强烈,岩石破碎,斜坡结构类型为顺向层面坡,岩层间分布的 1 ~ 3 cm 厚灰白色泥质软弱层,这为滑坡的发生提供了有利的物质基

基础和岩体组合条件。

(2) 滑坡前纵向为平均 45° 的边坡, 滑坡前后缘和两侧缘临空, 为突发性滑坡的发生提供了几何空间和强大势能条件。

(3) 调查分析结果表明, 在项目建设前, 场区无滑坡、崩塌、泥石流地质灾害隐患。在原始地形条件下, 滑坡所在斜坡处于稳定状态。

(4) 毕节市第一人民医院分院培训综合楼在建工程边坡开挖导致大面积软弱夹层揭露, 使上覆岩土体失去支挡, 改变了斜坡的地表形态和应力分布, 降低了坡体抗滑力, 边坡瞬间变形破坏, 最终发生牵引式顺层突发性滑坡地质灾害。

参考文献(References):

- [1] 郑光, 许强, 刘秀伟, 等. 2019 年 7 月 23 日贵州水城县鸡场镇滑坡-碎屑流特征与成因机理研究 [J]. 工程地质学报, 2020, 28(3): 541–556. [ZHENG Guang, XU Qiang, LIU Xiuwei, et al. The Jichang landslide on July 23, 2019 in Shuicheng, Guizhou: Characteristics and failure mechanism [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(3): 541–556. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 王浩杰, 孙萍, 韩帅, 等. 甘肃通渭“9·14”常河滑坡成因机理 [J]. 现代地质, 2021, 35(3): 732–742. [WANG Haojie, SUN Ping, HAN Shuai, et al. Failure mechanism of the Changhe landslide on September 14, 2019 in Tongwei, Gansu [J]. Geoscience, 2021, 35(3): 732–742. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 贵州省地质矿产局. 贵州省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1987: 277–286. [Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development Guizhou Province. Regional geology of Guizhou Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 277–286. (in Chinese)]
- [4] 张咸恭, 王思敬, 张倬元, 等. 中国工程地质学 [M]. 北京: 科学出版社, 2000. [ZHANG Xiangong, WANG Sijing, ZHANG Zhuoyuan, et al. Engineering geology of China [M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)]
- [5] 王尚彦, 刘家仁. 贵州地震的分布特征 [J]. 贵州科学, 2012, 30(2): 82–85. [WANG Shangyan, LIU Jiaren. Distribution features of earthquake in Guizhou Province [J]. Guizhou Science, 2012, 30(2): 82–85. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 刘传正. 突发性地质灾害防治研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2021. [LIU Chuanzheng. Mitigation of the geologic hazards [M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)]
- [7] 刘传正, 刘艳辉, 温铭生. 长江三峡库区地质灾害成因与评价研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2007. [LIU Chuanzheng, LIU Yanhui, WEN Mingsheng. Research on the geo-hazards genesis and assessment in the Three Gorges Reservoir of Changjiang River in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007. (in Chinese)]
- [8] 李效萌, 李甜, 刘金辉, 等. 赣东地区小型牵引式残坡积土质滑坡稳定性及破坏模式分析 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(22): 9236–9242. [LI Xiaomeng, LI Tian, LIU Jinhui, et al. Stability and failure mode analysis of small traction residual slope soil landslide in eastern Jiangxi Province [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(22): 9236–9242. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 滑坡防治工程勘查规范: GB/T 32864—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Code for geological investigation of landslide prevention: GB/T 32864—2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)]
- [10] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 滑坡防治设计规范: GB/T 38509—2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020. [State Administration of Market Supervision, Standardization Administration of the People's Republic of China. Code for the design of landslide stabilization: GB/T 38509—2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)]
- [11] 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. [LYU Wenbin, GENG Haishen, WEI Sailajia. Stability of Zhangjiawan landslide based on limit equilibrium method and Midas/GTS [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(11): 4369–4378. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 邵龙潭, 王浩然, 姜泽涵. 基于有限元极限平衡法的岩土结构稳定分析 [J]. 中国矿业, 2021, 30(12): 170–177. [SHAO Longtan, WANG Haoran, JIANG Zehan. Stability analysis of geotechnical structures based on finite element limit equilibrium method [J]. China Mining Magazine, 2021, 30(12): 170–177. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 张爱花, 牛肖. 基于极限平衡法的边坡稳定敏感性因素分析 [J]. 中外公路, 2021, 41(增刊 2): 55–58. [ZHANG Aihua, NIUXIAO. Analysis of sensitive factors of slope stability based on limit equilibrium method [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2021, 41(Sup 2): 55–58. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 王塞, 邓建辉, 陈菲, 等. “10·10”西藏白格滑坡运动特征反演分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(2): 162–170. [WANG Sai, DENG Jianhui, CHEN Fei, et al. Inverse

- analysis on motion characteristics of “10·10” Baige landslide in Tibet [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(2): 162–170. (in Chinese with English abstract)
- [15] 易庆林,周瑞,梁卫,等.三峡库区三门洞滑坡稳定分析及抗滑桩模拟研究[J]. *人民长江*, 2021, 52(11): 111–116. [YI Qinglin, ZHOU Rui, LIANG Wei, et al. Stability study on Sanmendong landslide in Three Gorges Reservoir area and simulation of anti-slide pile [J]. *Yangtze River*, 2021, 52(11): 111–116. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 王惠卿,丰成君,戚帮申,等.河北省顺平县李思庄滑坡稳定性分析[J]. *地质力学学报*, 2020, 26(4): 595–603. [WANG Huiqing, FENG Chengjun, QI Bangshen, et al. Analysis of the stability of the Lisizhuang landslide in Shunping County, Hebei Province [J]. *Journal of Geomechanics*, 2020, 26(4): 595–603. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 王玉川,郭其峰,周延国.中等倾角岩层顺向坡滑坡发育特征及形成机制分析:以拖担水库左岸坝肩滑坡为例[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(4): 17–23. [WANG Yuchuan, GUO Qifeng, ZHOU Yanguo. Development characteristics and formation mechanism of the medium-dip bedding slopes: A case study of the landslide on the left bank of Tuodan reservoir dam [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(4): 17–23. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 王平,朱赛楠,张枝华,等.三峡库区大型斜倾顺层滑坡失稳机理分析:以石柱县龙井滑坡为例[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(4): 24–32. [WANG Ping, ZHU Sainan, ZHANG Zhihua, et al. Instability mechanism of massive oblique bedding rock landslide in the Three-Gorges Reservoir: A case study of the Longjing landslide in Shizhu County of Chongqing City [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(4): 24–32. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 贵州省气象局.气象信息报告[R]. 2022. [Meteorological Bureau of Guizhou Province. Meteorological information report [R]. 2022. (in Chinese)]
- [20] 常金源,包含,伍法权,等.降雨条件下浅层滑坡稳定性探讨[J]. *岩土力学*, 2015, 36(4): 995–1001. [CHANG Jinyuan, BAO Han, WU Faquan, et al. Discussion on stability of shallow landslide under rainfall [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(4): 995–1001. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 贵州省地震局.地震信息报告[R]. 2022. [Seismological Bureau of Guizhou Province. Seismic information report [R]. 2022. (in Chinese)]
- [22] 王涛,周葵,袁乾博,等.地震对金沙江金坪子滑坡的稳定性影响分析[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(1): 31–37. [WANG Tao, ZHOU Kui, YUAN Qianbo, et al. Analysis of the effect of earthquake on the stability of Jinpingzi landslide on the Jinsha River [J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2021, 43(1): 31–37. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 廖勇,徐闯,陈军,等.四川长宁“6·17”地震诱发的次生地质灾害类型及其发育特征[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(1): 77–83. [LIAO Yong, XU Chuang, CHEN Jun, et al. Types and their characteristics of geological hazards triggered by “6·17” earthquake in Changning, Sichuan Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(1): 77–83. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 王来贵,向丽,赵娜,等.地震作用下顺倾多弱层岩质边坡动力响应[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(6): 18–25. [WANG Laigui, XIANG Li, ZHAO Na, et al. Dynamic response of down-dip multi-weak-layer rock slope under earthquake [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(6): 18–25. (in Chinese with English abstract)]