

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.04-04

# 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

王 平<sup>1</sup>, 朱赛楠<sup>2</sup>, 张枝华<sup>1</sup>, 吴晓宾<sup>1</sup>, 杨 柳<sup>1</sup>, 赵 慧<sup>2</sup>

(1. 重庆市地质矿产勘查开发局 208 水文地质工程地质队 (重庆市地质灾害防治工程  
勘查设计院), 重庆 400714; 2. 中国地质环境监测院 (自然资源部地质灾害  
技术指导中心), 北京 100081)

**摘要:**长江三峡库区位于我国地形第二、三级阶梯过渡地带, 地质环境复杂, 斜倾顺层基岩滑坡较为发育。本文以重庆石柱龙井滑坡为例, 详细分析了大型斜倾顺层基岩滑坡的变形特征、成因机理和破坏模式, 并采用极限平衡法计算了滑坡在四种工况条件下的稳定性。结果表明: (1) 龙井滑坡位于扬子准地台石柱向斜北西翼, 体积约  $1.42 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 主滑方向  $162^\circ$ , 前缘发育两个次级滑坡; (2) 受地形地貌、地层构造、地下水和降雨等因素影响, 滑坡目前处于蠕滑变形阶段, 变形方式主要为拉张裂缝、剪切裂缝和局部鼓胀变形; (3) 滑坡同时处于暴雨和前缘次级滑坡滑动条件下, 稳定性为 1.03, 处于欠稳定状态, 滑坡易沿软弱夹层发生整体滑动破坏。

**关键词:**斜倾顺层斜坡; 软弱夹层; 残余强度; 极限平衡分析; 石柱县

中图分类号: P694 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2021)04-0024-09

## 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

WANG Ping<sup>1</sup>, ZHU Sainan<sup>2</sup>, ZHANG Zhihua<sup>1</sup>, WU Xiaobin<sup>1</sup>, YANG Liu<sup>1</sup>, ZHAO Hui<sup>2</sup>

(1. *Hydrogeology & Engineering Team 208, Chongqing Bureau of Geological Exploration (Chongqing Reconnaissance and Design Academy of Geological Disasters Prevention and Treatment Engineering), Chongqing 400714, China;*  
2. *China Institute of Geo-Environment Monitoring, (Guide Center of Prevention Technology for Geo-hazards, MNR), Beijing 100081, China)*

**Abstract:** The Three Gorges Reservoir is located in the transition zone of the second and third terrains in China. Taking the Longjing landslide in Chongqing as an example, this paper analyzes in detail the deformation characteristics, formation mechanism and failure pattern of the oblique bedding slope, and calculates the stability of the slope under four working conditions by using the limit equilibrium method. The results show that: (1) Longjing landslide is located in the northwest wing of the syncline of the stone pillar of the Yangtze platform, with a volume of  $142.83 \times 10^4 \text{ m}^3$  and the main sliding direction of  $162^\circ$ . (2) Under the influence of topographical features, stratigraphic structure, groundwater, rainfall and other factors, the slope is currently in the stage of creep deformation. The deformation pattern are mainly tensile fractures, shear fractures and local bulging deformation. (3) The slope is under the sliding conditions of rainstorm and leading secondary landslide at the same

收稿日期: 2020-07-12; 修订日期: 2020-07-24

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC1505404); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190637); 重庆市地勘局 208 水文地质工程地质队科创基金(208-KC-201905)

第一作者: 王 平(1988-), 男, 汉族, 重庆巴南人, 学士, 工程师, 主要从事地质灾害防治、地质环境调查评价工作。E-mail: 276824228@qq.com

通讯作者: 朱赛楠(1984-), 男, 汉族, 博士(后), 主要从事地质灾害防治方面的研究工作。E-mail: 6057817@qq.com

time, and its stability factor is 1.03, so it is in an under-stable state. The slope is prone to overall sliding failure along the weak intercalated layer.

**Keywords:** monoclinical layered slope; weak intercalated layer; residual strength; three-dimensional stability; Shizhu County

## 0 引言

顺层岩质斜坡一般发育于褶皱构造两翼,岩层倾角小于斜坡坡度,前缘高陡临空,主要以沿软弱层带顺层剪切破坏为主<sup>[1-2]</sup>。长江三峡库区位于我国地形第二、三阶梯过渡地带,地质环境复杂,崩塌滑坡等灾害较为发育,其中基岩顺层滑坡占到总数量 62.0%<sup>[3]</sup>。根据三峡库区 283 处崩塌滑坡发生地层和岩性统计,越有 90% 的崩滑发生在含有软弱面或软弱层带的斜坡中<sup>[4]</sup>。如 2003 年 7 月 13 日发生的千将坪滑坡,体积约  $24.00 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,造成 24 人伤亡<sup>[5]</sup>;2009 年 6 月 5 日重庆武隆鸡尾山滑坡,体积约  $5.00 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,造成 74 人死亡<sup>[6-7]</sup>;2014 年 9 月 2 日发生的杉树槽滑坡,体积约  $46.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,摧毁了一座小型水电站<sup>[8]</sup>。顺层斜坡内一般发育 3-5 层软弱夹层,常为泥岩、煤层或遇水极易软化的砂、页岩,受控于软层长期劣化特性,大型顺层滑坡表现为蠕滑变形特点<sup>[8-9]</sup>。

岩质滑坡的稳定性计算广泛应用了极限平衡方法理论<sup>[10-12]</sup>。根据假定所满足的不同平衡条件,极限平衡法主要包括 Fellenius 瑞典条分法、Bishop 法、Janbu 普遍条分法、Morgenstern-Price 法、陈祖煜法和 Spencer 法等。FREDLUND 等<sup>[13]</sup>对各类方法进行了总结,提出了普遍极限平衡法的概念,对静力学原理加上了补充原则和假设。邹广电等<sup>[14]</sup>从塑性力学理论出发提出了一种满足静力平衡条件和合理性条件的改建条分法,将安全系数的求解归纳为求解强度储备系数,然后采用模拟退火算法求解。用极限平衡分析法所得的稳定系数 Fos 来评价斜坡稳定性时,将岩土体视为刚体,不考虑岩土体本身的变形对边坡影响,同时将静不定问题变为静定问题,在长期工程实践中不断完善,日渐成熟<sup>[15]</sup>。

本文以龙井滑坡为例,采用现场调查测绘、无人机航测、工程地质钻探、现场与室内试验等方法,详细分析了大型顺层斜倾基岩滑坡的基本变形特征、成因机理和破坏模型,并运用极限平衡理论分析了滑坡的稳定性与变形趋势。为此类斜倾顺层基岩滑坡失稳机理研究提供借鉴意义。

## 1 龙井滑坡发育特征

### 1.1 地质环境条件

龙井滑坡地处三峡库区重庆石柱县悦峰镇,在地貌

上属构造剥蚀中山,斜坡自然坡度约  $8^\circ \sim 15^\circ$ ,地势北西高南东低,地形相对高差 160.63 m。滑坡区前缘外侧微地貌呈一脊状地形,将微地貌划分为两个坡向不一致的斜坡。其中西侧所在斜坡坡向约  $168^\circ \sim 175^\circ$ ,地形坡角约  $10^\circ \sim 20^\circ$ ,局部呈小陡坎;滑坡前缘东侧所在斜坡坡向约  $132^\circ \sim 137^\circ$ ,地形坡角约  $10^\circ \sim 15^\circ$ ,滑坡剪出口为新修悦黄公路内侧挡墙处,挡墙近似直立。

在构造上位于扬子准地台石柱向斜北西翼近核部,呈斜倾顺层构造,斜坡体内发育两组优势节理,结构面较平直、光滑,结合度很差。滑坡区出露地层为第四系全新统残坡积层( $Q_4^{el+dl}$ ),侏罗系中统沙溪庙组( $J_2s$ )泥岩和砂岩,岩层产状  $160^\circ \angle 14^\circ$ 。受地质构造、地形地貌、地层岩性等影响,地下水类型包括松散岩类孔隙水、碎屑岩孔隙裂隙水和浅部风化带网状裂隙水共 3 大类,地表汇水补给面积有限。滑坡区人类工程活动主要为悦峰场镇修建过程中对原始斜坡的改造,在道路、房屋修建时斜坡切割开挖使坡面局部形成台阶状及陡坎。

### 1.2 滑坡形态特征

滑坡区内集镇建成区地势相对较平缓,整体倾角多为  $8^\circ \sim 15^\circ$ ,局部呈陡坎状。前缘悦黄公路内侧区域地形相对较陡,坡角为  $23^\circ$ 。右侧前部为一小山包,山顶高程 1 013.24 m,山脚高程 971.50 m,发育垂直高度 41.74 m;滑坡区左侧为一自然形成冲沟。滑坡后缘以不连续发育的多条拉裂缝为界,前缘以新建悦黄公路为界,两侧边界主要以微地貌及地层发育特征为判断依据,右侧以剪切裂缝及山脚边界进行划分,左侧以冲沟为界。滑坡整体形态呈不规则六边形,平均纵长 440 m,平均横宽 300 m,面积约  $12.73 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,平均厚度 11.22 m,体积约  $1.42 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,为斜倾顺层岩质滑坡,主滑方向  $162^\circ$ (图 1)。

根据变形情况及微地貌特征,龙井滑坡前缘地势相对稍陡的区域可分为东西两个次级滑坡 L1 和 L2。滑坡 L1 后缘以地表贯通裂缝为界,两侧以微地貌脊状地形控制,前缘以斜坡陡缓交界处为边界。纵长约 173.2 m,横宽 148.1 m,面积约  $2.14 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,厚度 3.0~13.1 m,平均厚度 8.1 m,体积约  $17.23 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,为纵长型中型中层滑坡。主滑方向  $172^\circ$ ,岩土界面倾角  $9^\circ \sim 20^\circ$ 。滑坡 L2 后缘以地表裂缝为界,左侧以脊状地形控制,右侧以自然冲沟为界,前缘以斜坡陡缓交界处为边界。纵长

约 115.4 m, 横宽约 62.5 m, 面积约  $0.66 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 厚度 3.4 ~ 5.8 m, 平均厚度 4.6 m, 体积约  $3.04 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 为纵长型小型浅层滑坡, 主滑方向约  $134^\circ$ , 岩土界面倾角  $7^\circ \sim 25^\circ$  (图 2)。

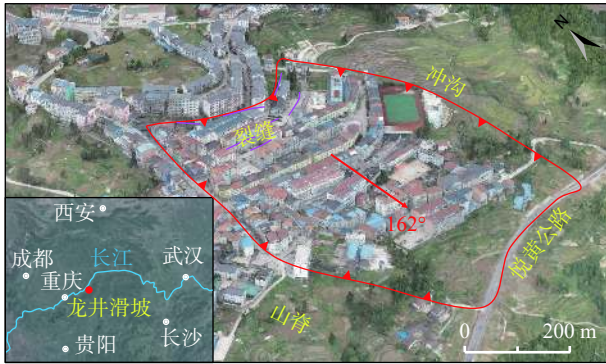


图 1 龙井滑坡无人机影像

Fig. 1 UAV image of Longjing landslide

### 1.3 滑坡物质组成

根据调查测绘、勘探钻孔揭露情况, 滑坡物质主要由第四系粉质黏土、砂岩全风化形成的砂土, 侏罗系泥岩、砂岩等构成 (图 3)。其中, 滑体由粉质黏土、砂土、碎裂状泥岩和砂岩组成, 厚度 4.6 ~ 16.7 m; 滑带由碎裂状泥岩和粉质黏土泥化夹层组成, 厚度 0.2 ~ 2.1 m, 碎裂状泥岩结构破碎, 强度较低, 泥化夹层黏土矿物含量较高, 局部可见轻微擦痕, 镜面现象明显 (图 4); 滑床由泥岩、砂岩组成, 埋深 4.6 ~ 16.9 m。

### 2 滑坡变形特征

滑坡变形区域主要分布在后部与中前缘, 通过现场调查共发现地表裂缝 58 处, 墙体裂缝 77 处, 建构筑物变形 18 处, 变形方式主要为拉张裂缝、剪切裂缝和局部鼓胀变形 (图 2)。

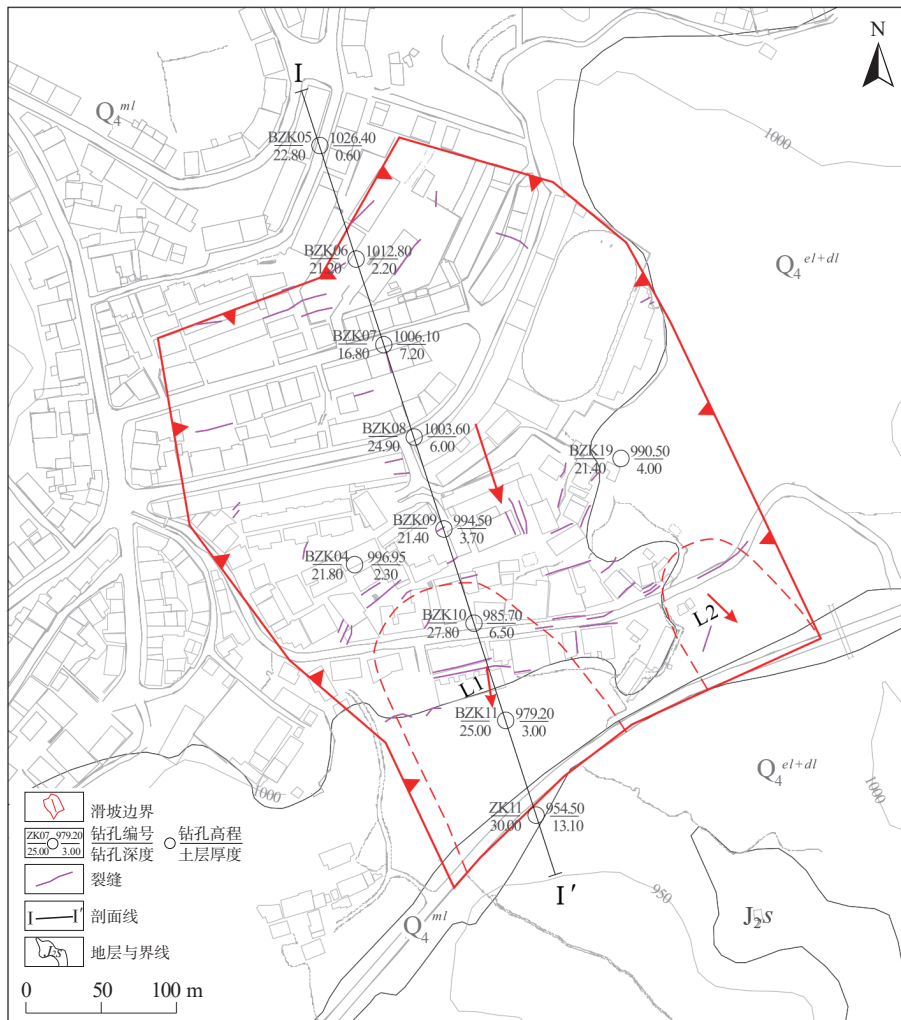


图 2 龙井滑坡工程地质平面图

Fig. 2 Engineering geological plan of Longjing landslide



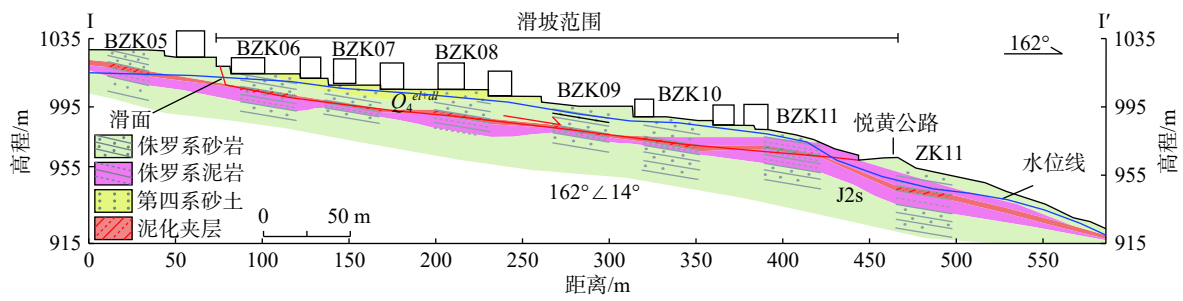


图3 龙井滑坡工程地质剖面图(I-I')

Fig. 3 Engineering geological profile of Longjing landslide (I-I')



(a) 粉质黏土



(b) 碎裂状泥岩

图4 滑带泥化软弱夹层

Fig. 4 Weak intercalated layer at sliding zone



(a) 地表拉张裂缝



(b) 挡墙鼓胀变形

图5 滑坡后部变形迹象

Fig. 5 Deformation at the rear of landslide

### 2.1 滑坡后部变形迹象

滑坡后部变形迹象包含居民房屋地表开裂、建构物变形,共分布有地坝裂缝10条,裂缝张开0.3~5 cm,延伸5.3~30.3 m,可见深度0.3~1.0 cm。建构物变形主要表现为污水管道下挫变形、挡墙外鼓开裂等(图5)。

### 2.2 滑坡中部变形迹象

该段变形迹象主要为建筑物变形、房屋砖墙错断、地面开裂等。地面裂缝张开0.5~2.5 cm,延伸5.0~24.6 m,可见深度0.5~1.0 cm;房屋墙体下错开裂剪断砖体,外墙泥灰掉落,张开约为5~10 cm,房门上方横梁剪断;建筑物变形主要为条石挡墙鼓胀、新建围墙开裂,裂缝张开0.5~3.0 cm,裂缝延伸至地面等(图6)。

### 2.3 滑坡前部变形迹象

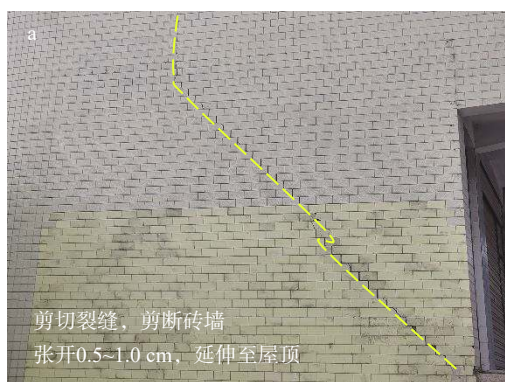
该段变形较强烈,2015年后,每年汛期变形均有明

显加剧现象,主要为建筑物变形、房屋砖墙错断、地面开裂等。地面裂缝张开2.0~5.0 cm,延伸5.0~20.0 m,可见深度1.0~5.0 cm;房屋墙体下错开裂剪断砖体,外墙泥灰掉落,张开约为5.0~10.0 cm,门上方横梁剪断;建筑物变形主要表现为条石挡墙鼓胀、新建围墙开裂,裂缝张开2.0~5.0 cm,裂缝延伸至地面等(图7)。

## 3 滑坡成因机理分析

### 3.1 影响因素

根据遥感解译、钻探以及现场调查分析,滑坡目前处于蠕滑阶段,其稳定性主要受地形地貌、地质构造和地层岩性控制,同时在地下水、降雨以及人类工程活动



(a) 墙壁剪切裂缝



(b) 台阶剪切裂缝

图 6 滑坡中部变形迹象

Fig. 6 Deformation in the middle of landslide



(a) 道路拉伸裂缝



(b) 墙体X型剪断裂缝

图 7 滑坡前部变形迹象

Fig. 7 Deformation in the front of landslide

等因素影响下变形加剧, 分述如下:

(1) 地形地貌与地质构造

滑坡区属构造侵蚀中山斜坡地貌, 坡向约 160°, 地势北西高南东低, 滑坡中后部地势相对较平缓, 整体倾角多为 8°~15°, 局部呈陡坎状。前缘地形相对较陡, 坡角 23°, 整体表现出前缘较陡中后部较缓的地形地貌, 为滑坡的剪出创造了有利条件<sup>[16]</sup>。

滑坡区位于石柱向斜北西翼近核部, 呈斜倾顺层构造, 岩层优势产状 135°~203°∠6°~16°, 与坡向基本一致。此外, 斜坡内发育两组优势构造节理, 将岩体切割成块状, 增加了岩体的离散性, 易于地表水及地下水入渗和汇集储存。

(2) 地层岩性

斜坡浅层主要为粉质黏土夹碎石、砂土, 其结构松散-中密, 渗透性好, 保水性好, 降雨和地表水入渗快。深部的长石砂岩、泥岩呈块状、破碎状, 岩体节理裂隙极其发育, 有利于地下水的运移及赋存。底部完整泥岩、石英砂岩隔水性较好。地下水富集于碎裂与完整泥岩的接触面, 软化岩体形成泥化夹层, 其力学性质差, 抗剪强度低, 具有易滑特性, 滑面及轻微擦痕现象明显<sup>[17]</sup>。

(3) 地下水与降雨

滑坡区内地下水埋深较浅, 水量丰富, 滑面以上岩土体均具有较好的保水性, 形成扬压力。滑坡区受暴雨影响, 自 2015 年后每年汛期地表裂缝均有加剧变形现象。地表水入渗一方面滑体含水而重量增加, 另一方面入渗后在相对隔水层赋存, 不仅长期软化隔水层顶面, 使其抗剪强度降低而形成滑动带, 而且形成一定的孔隙水压力, 增大了下滑力, 降低滑坡稳定性<sup>[18]</sup>。

(4) 人类工程活动

滑坡区人类工程活动主要为道路、房屋修建, 斜坡切割开挖使坡面局部形成台阶状及陡坎, 为岩土体滑移提供了临空面, 降低了斜坡沿软弱面抗滑能力和局部的稳定性。同时滑坡体上的房屋基础均在滑面以上, 对坡体造成了加载, 诱发及促进了滑坡变形破坏进程。

3.2 成因机制与破坏模式

龙井滑坡发生变形是滑坡沿软弱夹层长期蠕变的累进性破坏的结果。滑坡属于顺向斜坡, 地层倾角 6°~14°, 前缘坡度相对较陡, 提供了剪出的临空条件。在重力长期作用下, 一条与岩层走向近平行的构造裂隙



(产状为  $296^\circ \angle 89^\circ$ ) 切割贯通逐步形成滑坡后缘, 另一条与岩层走向近垂直的构造裂隙(产状为  $60^\circ \angle 83^\circ$ ) 侧向切割形成侧边界。滑体的保水性好, 长期饱水, 并沿滑床顶部泥岩隔水层运移, 对交界部位岩土体长期软化, 带走亲水物质, 形成软弱带, 在自重、水压力、加载等不利因素影响下, 沿软弱层长期塑流蠕滑拉裂。随着工程活动越来越频繁, 尤其滑坡前部开挖坡脚, 局部形成临空面, 使斜坡地貌发生较大改变, 破坏了斜坡自然平衡, 导致阻滑段抗滑作用降低, 下滑力增大, 滑坡中前部应力集中, 出现挤压、隆起等破坏, 而且每年汛期到来, 大量降雨入渗形成高裂隙水压力和滑面扬压力, 同时泥化夹层抗剪强度进一步降低, 导致滑坡变形加剧直至整体破坏<sup>[19]</sup>。破坏模式为前缘次级滑坡蠕动下滑解体, 后部岩体顺层渐进滑移的牵引式破坏<sup>[20]</sup>。

#### 4 滑坡稳定性极限平衡法分析

##### 4.1 计算模型

龙井滑坡在高裂隙水压力和滑面扬压力作用下将沿软弱层面顺坡向滑移失稳, 前部浅表层土质滑坡滑动带为岩土界面, 本次选取主滑剖面 I-I', 基于极限平衡理论, 采用折线型滑动的传递系数法对滑坡整体稳定性进行分析<sup>[21-24]</sup>(图 8)。

传递系数法是计算岩土体沿着软弱面滑动最常用的稳定性计算方法, 该方法有 2 个基本假定: (1) 每个分条的滑动面为一直线段, 即整个滑体沿折线滑动; (2) 分条间的反力平行于该分条的滑动面, 且作用点在分隔面的中央。

稳定系数表达式:

$$\frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left( (W_i((1-r_u)\cos\alpha_i - A\sin\alpha_i) - R_{Di})\tan\varphi_i + c_iL_i \right) \prod_{j=1}^{n-1} \psi_j}{\sum_{i=1}^{n-1} (W_i(\sin\alpha_i + A\cos\alpha_i) + T_{Di}) \prod_{j=1}^{n-1} \psi_j} + R_n \quad (1)$$

$$R_n = (W_n((1-r_u)\cos\alpha_n - A\sin\alpha_n) - R_{Dn})\tan\varphi_n + c_nL_n \quad (2)$$

$$T_n = W_n(\sin\alpha_n + A\cos\alpha_n) + T_{Dn} \quad (3)$$

$$\prod_{j=1}^{n-1} \psi_j = \psi_1\psi_{i+1}\cdots\psi_{n-1} \quad (4)$$

式中:  $\gamma_w$ ——水的容重;

$r_u$ ——孔隙压力比;

$\psi_j$ ——第  $i$  块段的剩余下滑力传递至第  $i+1$  块段时的传递系数( $j=i$ ), 即

$$\psi_i = \cos(\alpha_i - \alpha_{i+1}) - \sin(\alpha_i - \alpha_{i+1})\tan\varphi_{i+1} \quad (5)$$

滑坡推力表达式:

$$P_i = P_{i-1}\psi + KT_i - R_i \quad (6)$$

下滑力表达式:

$$T_i = W_i\sin\alpha_i + A\cos\alpha_i + \gamma_w h_{iw}L_i\tan\beta_i\cos(\alpha_i - \beta_i) \quad (7)$$

式中:  $\gamma_w$ ——水的容重。

抗滑力表达式:

$$R_i = [W_i(\cos\alpha_i - A\sin\alpha_i) - N_{wi} - \gamma_w h_{iw}L_i\tan\beta_i\sin(\alpha_i - \beta_i)]\tan\varphi_i + c_iL_i \quad (8)$$

孔隙水压力表达式:

$$N_{wi} = \gamma_w h_{iw}L_i \quad (9)$$

渗透压力垂直滑面分力:

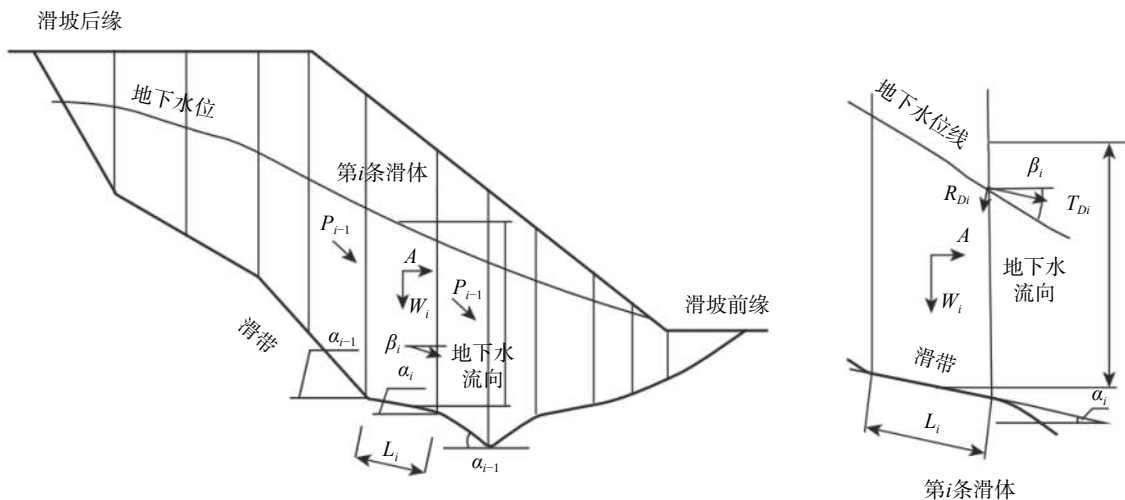


图 8 传递系数法计算简图<sup>[19]</sup>

Fig. 8 Calculation diagram of limit equilibrium method for landslide stability

$$T_{Di} = \gamma_w h_{iw} L_i \tan \beta_i \cos(\alpha_i - \beta_i) \quad (10)$$

渗透压力平行滑面分力:

$$R_{Di} = \gamma_w h_{iw} L_i \tan \beta_i \sin(\alpha_i - \beta_i) \quad (11)$$

## 4.2 计算参数

根据钻探揭露,滑体岩性为粉质黏土及碎石土、砂土、泥岩和砂岩。滑带岩性为泥化软弱夹层,采用现场及室内试验获得以上岩土体的物理力学参数(表 1、表 2)。

表 1 滑体物理力学参数表  
Table 1 Physical and mechanical parameters of the sliding body

滑体岩性	天然重度 ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	饱和重度 ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	天然		饱和	
			$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\circ)$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\circ)$
粉质粘土 夹碎石	20.10	20.40	16.60	22.69	14.30	19.94
砂土	17.50	17.80	11.70	27.76	9.50	22.80
泥岩	25.20	25.30	800	34.35	500	33.17
砂岩	24.60	24.70	790	36.62	550	35.39

表 2 滑带物理力学参数  
Table 2 Physical and mechanical parameters of rockmass at the sliding zone

滑带岩性	天然(峰值)		饱和(峰值)		饱和(残余值)	
	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\circ)$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\circ)$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\circ)$
泥化软弱夹层	15.90	10.60	13.50	8.86	11.10	6.36

## 4.3 计算结果

据前文分析,龙井滑坡为不涉水滑坡,破坏模式为前缘次级滑坡先滑动,然后牵引后部整体滑动,因此计算工况采用如下 4 种:

工况 1: 自重+地表荷载+地下水压力;

工况 2: 自重+地表荷载+地下水压力+20 年一遇暴雨;

工况 3: 自重+地表荷载+地下水压力+前缘次级滑坡滑动后;

工况 4: 自重+地表荷载+地下水压力+20 年一遇暴雨+前缘次级滑坡滑动后。

限于篇幅,省略计算过程,计算结果见表 3。龙井滑坡整体在天然状态下稳定性系数为 1.2,在工况分别

表 3 稳定性系数计算成果表  
Table 3 Calculation results of FOS

工况	滑面型态	剪出口位置	剩余下滑力/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	稳定性系数	稳定状态
工况 1			1 035.30	1.20	基本稳定
工况 2			1 765.97	1.13	基本稳定
工况 3	折线	悦黄公路内侧	1 328.89	1.16	基本稳定
工况 4			2 317.68	1.03	欠稳定

为暴雨和前缘次级滑坡滑动时,稳定性降低,处于基本稳定状态。当同时处于暴雨和前缘滑动后,稳定性急剧降低为 1.03,为欠稳定状态,安全储备不足,整体极易发生滑移破坏。

## 5 结论

本文以龙井滑坡为例,采用了现场调查测绘、卫星遥感解译、无人机航测、工程地质钻探、现场与室内试验等多种手段,详细分析了大型斜倾顺层基岩滑坡的基本变形特征、成因机理和破坏模式,并运用极限平衡分析法计算了滑坡在四种工况条件下的稳定性,得到以下认识:

(1) 龙井滑坡在构造上位于扬子准地台石柱向斜北西翼近核部,斜坡内发育两组优势节理,为斜倾顺层结构。滑坡平均纵长 440 m,横宽 300 m,面积约  $12.73 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,体积约  $1.4283 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,主滑方向  $162^\circ$ 。前缘发育两个次级滑坡,体积分别为  $17.23 \times 10^4 \text{ m}^3$  和  $3.04 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

(2) 滑坡目前处于蠕滑阶段,通过调查共发现地表裂缝 58 处、墙体裂缝 77 处,变形 18 处,变形方式主要为拉张裂缝、剪切裂缝和局部鼓胀变形。受地形地貌、地质构造和地下水等因素影响,滑坡泥化夹层抗剪强度逐渐降低,前缘次级滑坡先滑动然后牵引整体发生破坏。

(3) 通过极限平衡理论分析,计算得到滑坡整体在天然工况下稳定性系数为 1.2,当工况分别为暴雨和前缘次级滑坡滑动时,稳定性降低,处于基本稳定状态。当同时处于暴雨和前缘滑动后,稳定性急剧降低为 1.03,为欠稳定状态,安全储备不足,整体极易发生滑移破坏。

## 参考文献 (References):

- [1] 余飞,陈善雄,余和平.顺层岩质边坡渐进破坏及失稳机理的数值模拟研究[J].岩土力学,2005,26(增刊2):36-40. [YU Fei, CHEN Shanxiang, YU Heping. Numerical simulation study on progressive destruction and failure mechanism of bedding rock slopes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(Sup 2): 36-40. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 白云峰,周德培,王科,等.顺层滑坡的发育环境及分布特征[J].自然灾害学报,2004,13(3):39-43. [BAI Yunfeng, ZHOU Depei, WANG Ke, et al. Development environment and distribution characteristics of bedding plane landslides [J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13(3): 39-43. (in Chinese with English abstract)]

- [ 3 ] 长江水利委员会. 三峡工程地质研究[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997. [ Changjiang Water Resources Commission. Engineering geology study in the Three Gorges Reservoir area[M]. Wuhan: Hubei Science & Technology Press, 1997.(in Chinese) ]
- [ 4 ] 殷跃平. 长江三峡库区移民迁建新址重大地质灾害及防治研究[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 31. [ YIN Yue ping. Major geologic hazards and the prevention on relocation sites of the Three Gorges Reservoir, the Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 31. (in Chinese) ]
- [ 5 ] 廖秋林, 李晓, 李守定, 等. 三峡库区千将坪滑坡的发生、地质地貌特征、成因及滑坡判据研究 [ J ] . 岩石力学与工程学报, 2005, 24( 17 ): 3146 - 3153. [ LIAO Qiulin, LI Xiao, LI Shouding, et al. Occurrence, geology and geomorphy characteristics and origin of qianjiangping landslide in Three Gorges reservoir area and study on ancient landslide criterion [ J ] . Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24( 17 ): 3146 - 3153. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] YIN Y P, SUN P, ZHANG M, et al. Mechanism on apparent dip sliding of oblique inclined bedding rockslide at Jiweishan, Chongqing, China [ J ] . Landslides, 2011, 8( 1 ): 49 - 65.
- [ 7 ] 许强, 黄润秋, 殷跃平, 等. 2009年6·5重庆武隆鸡尾山崩滑灾害基本特征与成因机理初步研究 [ J ] . 工程地质学报, 2009, 17( 4 ): 433 - 444. [ XU Qiang, HUANG Runqiu, YIN Yueping, et al. The Jiweishan landslide of June 5, 2009 in Wulong, Chongqing: characteristics and failure mechanism [ J ] . Journal of Engineering Geology, 2009, 17( 4 ): 433 - 444. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 朱赛楠, 李滨, 冯振. 乌江流域含炭质钙质页岩三轴流变力学特性分析 [ J ] . 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26( 4 ): 144 - 151. [ ZHU Sainan, LI Bin, FENG Zhen. Analysis of triaxial rheological mechanical properties of carbonaceous and calcareous shale in Wujiang river basin [ J ] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26( 4 ): 144 - 151. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] 朱赛楠, 殷跃平, 李滨. 二叠系炭质页岩软弱夹层剪切蠕变特性研究 [ J ] . 岩土力学, 2019, 40( 4 ): 1377 - 1386. [ ZHU Sainan, YIN Yueping, LI Bin. Shear creep behavior of soft interlayer in Permian carbonaceous shale [ J ] . Rock and Soil Mechanics, 2019, 40( 4 ): 1377 - 1386. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 谢定义, 巫志辉, 郭耀堂. 极限平衡理论在饱和砂土动力失稳过程分析中的应用 [ J ] . 土木工程学报, 1981, 14( 4 ): 17 - 28. [ XIE Dingyi, WU Zhihui, GUO Yaotang. Application of limit equilibrium theory to the analysis of dynamic failure process of saturated sand [ J ] . China Civil Engineering Journal, 1981, 14( 4 ): 17 - 28. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] 陈全明, 方琼, 罗冠枝, 等. 缓倾顺层岩质斜坡破坏条件和变形机制分析: 以常吉高速公路朱雀洞滑坡为例 [ J ] . 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31( 2 ): 18 - 23. [ CHEN Quanming, FANG Qiong, LUO Guanzhi, et al. Failure conditions and mechanism of the gentle dip bedding slopes: A case study of the Zhuquedong landslide [ J ] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31( 2 ): 18 - 23. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] 喻永祥, 何伟, 李勇, 等. 雪浪山横山寺西侧顺层岩质高边坡变形破坏机理与治理方案分析 [ J ] . 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31( 2 ): 33 - 43. [ YU Yongxiang, HE Wei, LI Yong, et al. Stability evaluation and treatment measure study of high bedding rock slope on the west side of Hengshan temple in Xuelang mountain [ J ] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31( 2 ): 33 - 43. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 13 ] FREDLUND D G, KRAHN J, PUF AHL D E. The relationship of limit equilibrium slope stability method[C]// In: Proc. the 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Stockholm, Sweden: [s. n.], 1981: 409-416.
- [ 14 ] 邹广电, 蒋婉莹. 边坡稳定性分析的一个改建条分法 [ J ] . 岩石力学与工程学报, 2003, 22( 12 ): 1953 - 1959. [ ZOU Guangdian, JIANG Wanying. Rebuilt slice method for slope stability analysis [ J ] . Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22( 12 ): 1953 - 1959. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] 曾亚武, 田伟明. 边坡稳定性分析的有限元法与极限平衡法的结合 [ J ] . 岩石力学与工程学报, 2005, 24( 增刊 2 ): 5355 - 5359. [ ZENG Yawu, TIAN Weiming. Slope stability analysis by combining fem with limit equilibrium method [ J ] . Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24( Sup2 ): 5355 - 5359. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] 殷跃平. 斜倾厚层山体滑坡视向滑动机制研究: 以重庆武隆鸡尾山滑坡为例 [ J ] . 岩石力学与工程学报, 2010, 29( 2 ): 217 - 226. [ YIN Yueping. Mechanism of apparent dip slide of inclined bedding rockslide: A case study of Jiweishan rockslide in Wulong, Chongqing [ J ] . Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29( 2 ): 217 - 226. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] 朱赛楠. 厚层基岩滑坡软弱夹层演化过程及控滑机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2016. [ ZHU Sainan. Research on evolution process and controlling mechanism of weak layer from



- thick layered bedrock landslide[D]. Xi'an: Changan University, 2016. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] YIN Yueping, LI Bin, WANG Wenpei, et al. Mechanism of the December 2015 catastrophic landslide at the Shenzhen landfill and controlling geotechnical risks of urbanization [ J ] . *Engineering*, 2016, 2(2): 230 – 249.
- [ 19 ] 李守定, 李晓, 吴疆, 等. 大型基岩顺层滑坡滑带形成演化过程与模式 [ J ] . *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(12): 2473 – 2480. [ LI Shouding, LI Xiao, WU Jiang, et al. Evolution process and pattern of sliding zone in large consequent bedding rock landslide [ J ] . *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(12): 2473 – 2480. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 20 ] 邹宗兴, 唐辉明, 熊承仁, 等. 大型顺层岩质滑坡渐进破坏地质力学模型与稳定性分析 [ J ] . *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(11): 2222 – 2231. [ ZOU Zongxing, TANG Huiming, XIONG Chengren, et al. Geomechanical model of progressive failure for large consequent bedding rockslide and its stability analysis [ J ] . *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(11): 2222 – 2231. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 21 ] 殷跃平, 胡时友, 石胜伟. 滑坡防治技术指南[M]. 北京: 地质出版社, 2018. [ YIN Yueping, HU Shiyu, SHI Shengwei. Technical guidelines for landslide control[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018.(in Chinese) ]
- [ 22 ] 黄盛锋, 陈志波, 郑道哲. 基于灰色关联度法和强度折减法的边坡稳定性影响因素敏感性分析 [ J ] . *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(3): 35 – 40. [ HUANG Shengfeng, CHEN Zhibo, ZHENG Daozhe. Sensitivity analysis of factors influencing slope stability based on grey correlation and strength reduction method [ J ] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(3): 35 – 40. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 23 ] 何阳, 徐定芳. 基于强度折减法的边坡安全预警及失稳判据研究 [ J ] . *华南地质与矿产*, 2019, 35(3): 343 – 347. [ HE Yang, XU Dingfang. Research on security warning and instability criterion of slope based on strength reduction method [ J ] . *Geology and Mineral Resources of South China*, 2019, 35(3): 343 – 347. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 24 ] 武亚遵, 田方正, 林云, 等. 基于强度折减法的软弱泥岩隧道围岩稳定性分析 [ J ] . *中国地质灾害与防治学报*, 2018, 29(5): 65 – 71. [ WU Yazun, TIAN Fangzheng, LIN Yun, et al. Analysis on the tunnel surrounding rock stability of weak mudstone based on strength reduction method [ J ] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(5): 65 – 71. (in Chinese with English abstract) ]