

文章编号: 1007-2993(2024)06-0732-08

# 西南山区高陡岩质边坡破坏模式及路径分析 ——以博瓦水电站左岸边坡为例

强新刚 李嘉昊 叶堃 李嘉雨 张广泽  
(中铁二院工程集团有限责任公司, 四川成都 610031)

**【摘要】** 西南地区由于其丰富的水能资源储备, 已成为我国水电站建设最为集中的区域。为了解决高山峡谷区修建水电站时开挖引起的高陡岩质边坡问题, 以博瓦水电站左岸边坡 3 号危岩体为研究对象, 结合无人机三维建模手段, 采用赤平投影法和极限平衡法分别从定性和定量角度论述了该危岩体的变形破坏模式及路径, 并借助数值模拟手段完成结果分析和验证。结果表明: 3 号危岩体的破坏主要受两侧优势结构面控制, 属多级、多次的楔形体破坏模式, 其在天然工况下较为稳定, 但在暴雨、地震等极端工况下可能发生破坏; 数值分析结果则表现出“先滑移后倾倒”的破坏形式, 为理论分析提供支撑。研究成果对类似的高陡水电岩质边坡破坏及防治问题提供了一定的科学参考和工程经验。

**【关键词】** 高陡岩质边坡; 赤平投影法; 破坏模式及路径; 稳定性评价; 数值模拟; 博瓦水电站

**【中图分类号】** P642.2

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.06.014

## Failure Mode and Path Analysis of High and Steep Rock Slope in Mountainous Areas, Southwestern China: A Case Study in Bowa Hydropower Station

Qiang Xingang Li Jiahao Ye Kun Li Jiayu Zhang Guangze  
(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, Sichuan, China)

**【Abstract】** Southwestern China has become the most concentrated area for the construction of hydropower stations in China due to its rich hydropower resources. When building a hydropower station in the Alpine Valley area, it often causes the problem of destruction on steep rock slopes because of the excavation. To solve this problem, taking the No. 3 dangerous rock mass on the left bank slope of the Bowa Hydropower Station as the research object, combined with the 3D realistic modeling method of unmanned aerial vehicles, the deformation and failure modes and paths of the dangerous rock mass were qualitatively and quantitatively discussed using the stereographic projection method and limit equilibrium method. The results were analyzed and verified using numerical simulation methods. The main findings were as follows: The failure of No. 3 dangerous rock mass was mainly controlled by the preferred planes of both sides, belonging to a multi-stage and multiple wedge-shaped failure mode. It is relatively stable under natural engineering conditions, but it may occur under extreme conditions such as heavy rain and earthquakes. The numerical simulation results show a failure form of "sliding first and then dumping", which verifies the correctness of the theoretical analysis. Research results provide certain engineering experience and scientific reference value for similar steep rock slope problems of hydropower stations.

**【Key words】** steep rock slope; stereographic projection method; failure mode and path; stability evaluation; numerical simulation; Bowa Hydropower Station

### 0 引言

西南地区拥有丰富的水能资源, 其贮备量居世界首位<sup>[1]</sup>。随着现代化建设进程的推进, 国内能源缺口增大, 水能资源的开发利用也变得越发重要, 西南山区成为水电事业建设的前沿阵地。

水电站选址具有河谷狭窄、边坡陡峻、河流侵蚀严重等特点, 对两岸边坡的爆破开挖, 易形成数百米乃至上千米的高陡岩质边坡<sup>[2]</sup>。另一方面, 基于水电工程的重要性及易损性, 对两岸边坡的稳定性要求高。因此, 库区高陡岩质边坡的变形失稳已成为高山峡谷

**基金项目:** 西藏自治区自然科学基金(XZ202201ZR0069G); 中国中铁股份有限公司科技研究开发计划(2022-重大-01)

**作者简介:** 强新刚, 男, 1980 年生, 汉族, 陕西宝鸡人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事铁路工程地质与水文地质、地质灾害及高陡工程边坡稳定性调查及研究。E-mail: 24520166@qq.com

地区建设水电工程的一个关键问题<sup>[3]</sup>。

岩质边坡的破坏通常根据其破坏形式分为崩落和倾倒两类。在此基础上, Hungr 等<sup>[4-5]</sup> 依据坡体动力学特点将其扩充为坠落、倾倒、滑移、变形、脱离及流动六大类。对于西南地区危岩体发育密度极大的岩质边坡, 陈红凯等<sup>[6]</sup> 先从宏观上将其分为单体和群体危岩, 再从破坏路径及力学机制出发进行细分, 以期建立起高效且适用的危岩防治体系, 具有一定的普适性。

如何对边坡稳定性进行评价则是岩质边坡研究中的另一难点。因其形成机理及破坏路径复杂多样, 尚未有一套标准化的方法能对边坡的破坏过程进行精确的描述和计算。但通过大量的工程实践, 已有一些较为成熟的理论被提出并得到广泛应用, 目前主要有定性分析、定量计算及数值模拟等方法<sup>[7-9]</sup>。其中常用的定性方法有工程类比法和赤平投影法, 如袁奇等<sup>[10]</sup> 利用工程类比法来确定惠罗高速公路某滑坡的防护方案; 李红旭等<sup>[11]</sup> 利用赤平投影结合定量检算的方法解决了某高铁沿线高陡碎裂岩质边坡的难题; 王永学等<sup>[12]</sup> 通过优势结构面赤平投影分析, 阐述了四川茂县某震裂山体的破坏模式及演化机理。定量方法则以极限平衡法应用最为广泛, 张帆等<sup>[13]</sup> 基于刚体极限平衡和离散元进行稳定性系数计算, 提出有效的治理方案来应对水电岩质边坡破坏问题; 王凯<sup>[14]</sup> 在西成高铁某大桥岩质边坡稳定性评价中, 采用极限平衡法对稳定坡脚进行验证, 为桥台基础设计提供了理论支撑; 高玉峰等<sup>[15]</sup> 将极限平衡法扩展至三维, 提出一种三维非对称边坡稳定性分析极限平衡法, 并在工程实例中验证了其可行性。计算机技术高速发展, 数值模拟也逐渐成为主流的边坡稳定性评价手段, 以有限元、离散元等为代表的相关理论已趋于成熟。张莹等<sup>[16]</sup> 借助 FLAC3D 软件对某矿山高边坡进行了数值分析, 结果表明边坡整体稳定, 但局部可能随开采进度增加有垮塌的风险; 王川等<sup>[17]</sup> 对裂隙扩展判别的理论方法进行开发并将其引入到数值分析中, 模拟了在多级开挖卸荷条件下, 边坡的失稳路径与机制, 为边坡工程的支护开辟了新思路。此外, 有学者在现有理论的基础上不断开发新的方法, 以应对各种不同工程条件下的边坡破坏问题<sup>[18-22]</sup>。

以上方法虽已得到大规模应用, 但仍有局限性, 如极限平衡法是在假定条件下实现的, 而实际情况往往与假定大相径庭; 数值模拟虽计算快速准确, 但其计算条件设置受主观因素影响大, 如网格划分不同可能导致计算结果差距较大, 容错率偏低<sup>[23]</sup>。此外, 水

电岩质高边坡往往位于高山峡谷内, 交通闭塞, 环境恶劣, 地质条件复杂, 勘察工作也难以做到精确, 又为边坡稳定性评价增加了难度。

因此, 以四川省凉山州水洛河博瓦水电站左岸边坡为例, 基于无人机航拍、三维建模等手段, 将定性分析、定量计算及数值模拟方法相结合对该边坡的破坏过程及稳定性进行综合分析判断, 3 种方法互相印证来确保评价结果最大化接近实际, 以期为该边坡后续的防治及修复提供数据支持, 也可为同类边坡破坏问题的研究提供新的思路。

## 1 坝区左岸边坡工程地质概况

博瓦水电站位于凉山州木里县水洛河下游, 距木里县城接近 200 km。库区河道顺直, 河谷因强烈的下蚀作用呈“V”字型, 岸坡绝壁陡立。坡体位于库区左岸, 总高度约 500 m, 宽约 270 m, 坡向 335° (见图 1)。

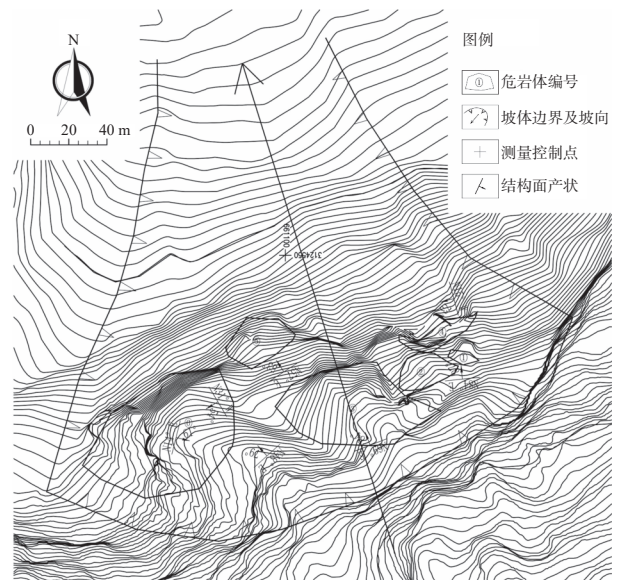


图 1 博瓦水电站左岸边坡平面图

坡底高程约 1980 m, 坡顶约 2480 m, 其中 2075 m 以上段坡体呈陡崖状; 2075 m 以下以崩坡积为主, 基岩零星分布, 坡度逐渐变缓至 40°左右。坡体中上部出露震旦系上统灯影组 ( $Z_2dy$ ) 灰白色厚层白云岩及大理岩, 产状  $100^\circ \sim 120^\circ \angle 40^\circ \sim 60^\circ$ , 倾向坡内, 为反倾岩质边坡。下部为第四系崩坡积物 ( $Q_4^{col+dl}$ ), 微风化, 整体厚度约 3 ~ 8 m。

坝址区属青藏高原东南缘川滇活动地块中北部, 根据该地区构造环境和断裂活动性分析, 木里地区应力背景较低, 从构造条件来看一般不会发生 6 级以上强震, 历史上也未有相关记载<sup>[24-25]</sup>。但由于紧邻丽江—小金河断裂带,  $2.0 \leq ML \leq 5.0$  的地震发生频率并不低。2019 年 11 月 19 日木里县水洛河发生的 3.9

级地震,是导致水电站左岸边坡失稳的直接诱发因素。由于水电站首部枢纽位于震中附近,导致左岸边坡发生高位岩体崩塌,首部枢纽导流洞进口及电站进水口被掩埋,坝上建筑物遭到破坏,后虽开展了一定的治理措施,但左岸边坡于2020年9月19日及2021年9月7日又先后发生两次崩塌。

三次崩塌过后,在坡体上主要形成6个危岩体,本文选取其中危险性最大的3号危岩体来分析其破坏模式及破坏路径,进而推测整体边坡的破坏情况。

## 2 危岩体破坏模式及稳定性分析

### 2.1 基于无人机手段的危岩体识别

由于坝区地处高山峡谷,边坡陡峻,通行困难,传统的勘察方法危险性大,难以开展,且无法精确辨识危岩体,而无人机航测技术具有轻便快捷、成本低、勘察范围广、环境适应性强、影像清晰等特点,可以高精度还原研究对象的实际样貌<sup>[26-27]</sup>。利用无人机从不同的角度对边坡及周围地形进行拍摄,不但能快速获取研究区最新的影像资料(见图2),在此基础上还能通过倾斜摄影测量技术,划定飞行区域及固定航线,将拍摄到的大量照片进行计算机解算,得到相邻照片间的空间关系,进而建立起高分辨率的精细化三维模型(见图3),其本质上是对收集到的点云数据进行聚类计算。利用三维模型可直观地对危岩体进行识别划分和测量。

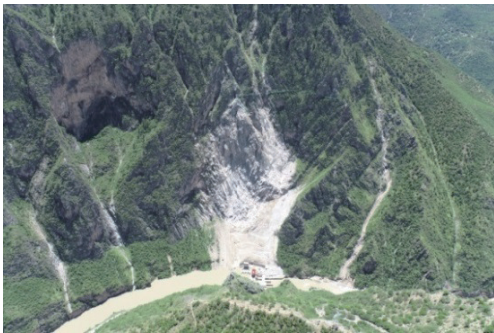


图2 左岸边坡航拍全景图

无人机摄影测量技术对危岩体结构面的识别精度主要取决于三维实景模型精度,即外业航摄所收集到的点云数据是否丰富全面。由于岩体结构面发育位置的不确定性,若摄影测量信息采集不全会导致建立的三维模型产生拉花或空洞现象,因此需要从多个不同角度进行补偿拍摄。通过对所建三维模型和研究区现场的影像资料和勘察成果进行对比发现,模型展示与边坡实际样貌基本一致,建模精度高,所展示的结构面特征明显,纹路清晰可见,可以满足稳定性分析的要求。

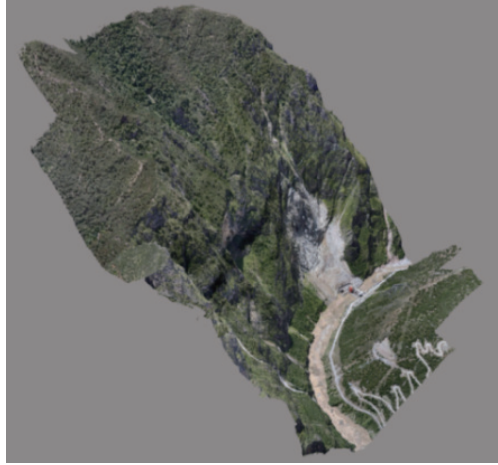


图3 左岸边坡三维模型

这种方法相当于将地质调绘工作计算机化,在提高工作效率的同时还降低了调查危险性,此外在掌握危岩体空间形态特征方面也有帮助。但由于该技术仅能还原边坡的表征样貌特点,对于危岩体内部的节理产状等特征仍需结合三维模型、影像资料以及现场勘察成果进行综合判断。

### 2.2 基于赤平投影法的危岩体破坏模式及路径分析

本文以危险性最大的3号危岩体为例来分析其破坏形式。3号危岩体拔河高度约275~405 m,宽约40 m,水平厚度20~25 m,体积分约5万 $\text{m}^3$ (见图4),以中厚层大理岩为主。岩体表面节理裂隙极为发育,宽度约20~50 cm,长度多大于10 m,裂隙内充填泥质及岩屑。

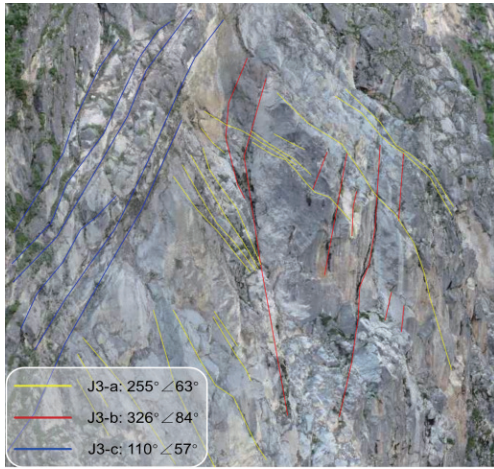


图4 3号危岩体航拍图

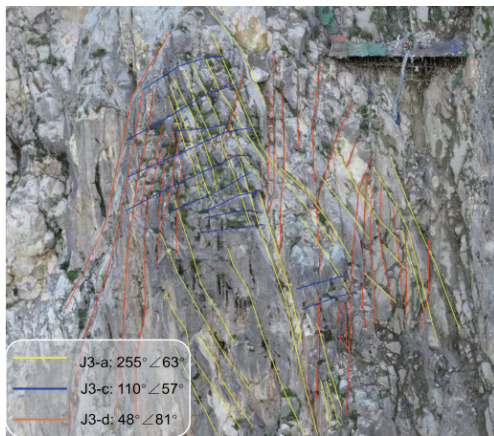
#### 2.2.1 结构面统计分析

对获得的影像资料进行解译,可得到节理分布(见图5)。该危岩体共统计79组节理,通过对这些节理的迹线长度、宽度和产状进行测量,可知其平均

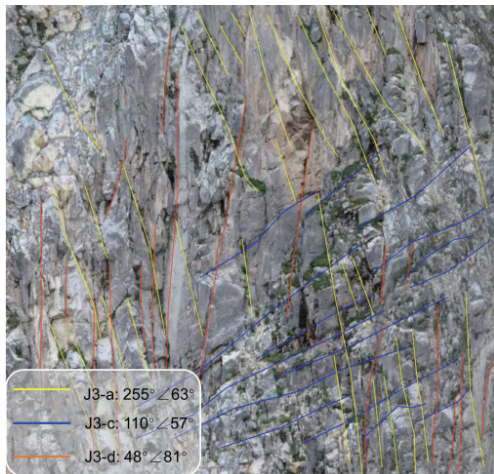
几何特征(见表 1)。由表可知,这些节理长度多在 18 m 以上,间距大小不一,节理连通率偏高,说明危岩体卸荷作用强烈,易产生破坏。



(a) 壁面 1



(b) 壁面 2



(c) 壁面 3

图 5 3 号危岩体节理分布图

根据生成的优势结构面极点密度图(见图 6),共发育有 4 组优势节理,其中 J3-a、J3-d 为倾坡外的卸

荷裂隙, J3-b 为危岩体后缘破裂面, J3-c 为倾坡内的岩层面。根据节理分布特征显然可知,该处危岩受 J3-a、J3-b、J3-d 切割,形成了上陡下缓的潜在破坏模式:岩体顶部及底部受 J3-c 剪断, J3-a、J3-d 控制其左右边界,向内贯通至破裂面 J3-b,整体沿 J3-b 面发生破坏。

表 1 3 号危岩体节理平均几何特征统计表

节理编号	数量/组	长度/m	间距/m	产状	连通率
J3-a	29	18	2	255°∠63°	0.58
J3-b	18	18.9	1.6	326°∠84°	0.7
J3-c	16	36.9	0.35	110°∠57°	0.77
J3-d	16	22.3	3.01	48°∠81°	0.61

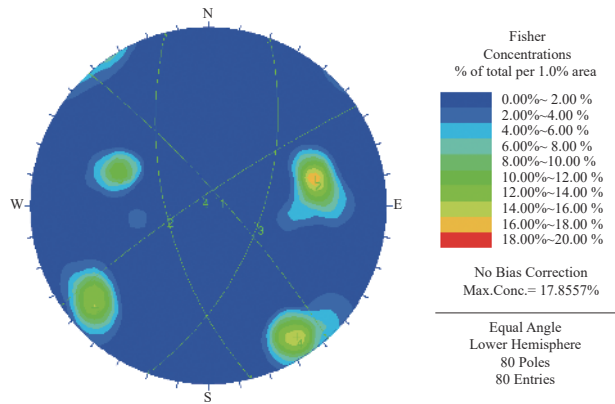


图 6 优势结构面极点密度图

### 2.2.2 破坏模式分析

该危岩体目前虽未发生过大的垮塌,但可根据周围已崩塌的危岩体揭露的新鲜面再结合 3 号危岩体的形态特征、节理裂隙分布及发育情况分析其破坏模式。该危岩体上部具有典型的受节理控制的特征:以陡倾的 J3-b 节理为后缘拉裂面,底部则为缓倾的 J3-a 及陡倾的 J3-d 结构面控制,这两组节理在剪出口处呈“V”字型分布,延伸至层面处被剪断。同时,块体上部“X”型分布的 J3-a、J3-d 向岩体内部延伸,由于这两组结构面分布密集,在内部相交后形成许多平行交线,这些交线逐渐贯通产生拉裂,成为 J3-b 破裂面,这两组节理及层面 J3-c 将岩体切割成密密麻麻大小不一的楔形体(见图 7)。

由于 J3-b 破裂面较该处地形偏陡,故该危岩体中上部主要沿 J3-b 发生拉张破坏(见图 8),而在下部则逐渐变窄,主要沿 J3-a 及 J3-d 的交线发生剪切破坏,破坏后以 J3-c 为原点发生倾倒。

其下部有内倾层面 J3-c 作为“基座”,稳定性本该较好,但由于下部危岩体厚度较小,尤其在 J3-a、

J3-d 及 J3-c 交界处产生剪切及挤压破坏,导致“基座”处岩体极为破碎,局部由于挤压作用已产生外崩现象(见图9),故这个基座并不能很好地托住上部危岩体。总体而言,该危岩体的破坏模式主要受 J3-a、J3-d 两组卸荷裂隙影响,能够形成多级、多次的潜在次级楔形块体。



图7 危岩体表面楔形体



图8 3号危岩体破坏模式

### 2.2.3 破坏路径分析

根据优势结构面赤平投影(见图10), J3-a 和 J3-d 节理的交线倾角约为  $42^\circ$ , 小于边坡的平均产状, 而局部岩体的坡角常处于  $70^\circ \sim 90^\circ$ , 为楔形体的下部剪出提供了地形条件。

根据前述破坏模式, 3号危岩体的最终破坏面位于高程约 2350 m 处(见图11), 通过下部 J3-a 和 J3-d 节理面追索可以确定, 楔形体约在 2242 m 高程处剪出。

此外, 由 3号危岩体中部岩体厚度进行推测, 岩



(a) 底部破碎岩体



(b) 挤压外崩现象

图9 危岩体底部破坏现象

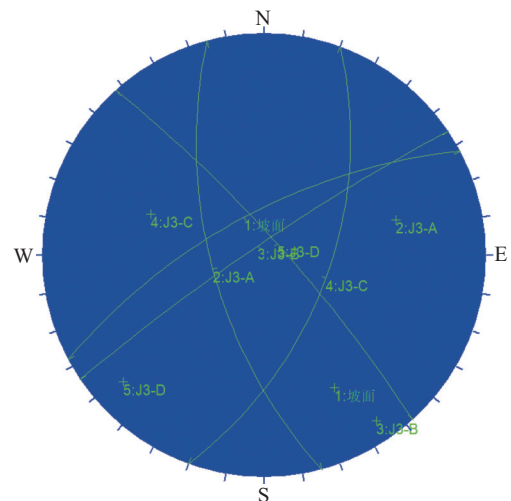


图10 优势结构面赤平投影图

体破坏面最大水平深度约为 22 m, 这表明危岩体失稳与破坏面上结构面连通情况密切相关, 在节理连通率较大时极有可能发生整体崩塌, 而非传统的由外向内的逐层剥落破坏。



图 11 潜在破坏面

### 2.3 基于极限平衡法的危岩体稳定性分析

#### 2.3.1 计算方法

据前文分析, 该危岩体属于下部剪切上部拉裂的破坏模式, 下部剪切是其破坏的控制性模式, 因此可采用极限平衡法进行计算。该方法是假设坡体处于临界状态时, 研究危岩体下滑力与抗滑力在滑动面上平衡形式的方法。计算公式如下:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left( R_i \prod_{j=1}^{n-1} \Psi_j \right) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} \left( T_i \prod_{j=1}^{n-1} \Psi_j \right) + T_n} \quad (1)$$

$$\Psi_j = \cos(\theta_i - \theta_{i+1}) - \sin(\theta_i - \theta_{i+1}) \tan \varphi_{i+1} \quad (2)$$

$$R_i = N_i \tan \varphi_i + c_i L_i \quad (3)$$

$$T_i = W_i \sin \theta_i \quad (4)$$

$$N_i = W_i \cos \theta_i \quad (5)$$

式中:  $K$  为滑坡稳定性系数;  $R_i$  为作用在第  $i$  段滑体的抗滑力,  $\text{kN/m}^2$ ;  $\Psi_j$  为第  $i$  块段的剩余下滑力传递到下一块段时的传递系数 ( $i = j$ );  $n$  为滑块数量, 个;  $R_n$  为作用在第  $n$  段滑体的抗滑力,  $\text{kN/m}^2$ ;  $R_i$  为第  $i$  块滑体产生的下滑力,  $\text{kN/m}^2$ ;  $T_n$  为第  $n$  块滑体产生的下滑力,  $\text{kN/m}^2$ ;  $\theta_i$  为第  $i$  块段的滑面与水平面夹角, 反倾时取负值, ( $^\circ$ );  $\varphi_i$  为第  $i$  段滑体滑带土的内摩擦角, ( $^\circ$ );  $N_i$  为第  $i$  段滑体在滑面法线上的反力,  $\text{kN/m}^2$ ;  $c_i$  为第  $i$  段上滑带土的黏聚力,  $\text{kPa}$ ;  $L_i$  为第  $i$  块段的滑动面长度,  $\text{m}$ ;  $W_i$  为第  $i$  块段滑体的自重,  $\text{kN/m}^2$ 。

#### 2.3.2 计算参数及模型

根据前期岩土体物理力学参数建议值、室内试

验结果以及结构面几何特征, 选取岩体及结构面计算参数(见表 2)。

表 2 稳定性计算参数选取表

计算单元	重度/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )		内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$		黏聚力 $c/\text{kPa}$	
	天然	饱水	天然	饱水	天然	饱水
大理岩	27	27.5	34	32	420	400
结构面			25	24	70	60

通过 2.2 中对于 4 组优势结构面产状、结构面组合关系、裂隙连通率及延展性的描述, 可确定危岩体潜在破坏面的位置及形态, 选取合适的剖面建模进行计算(见图 12)。

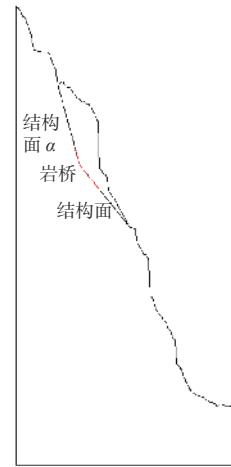


图 12 计算模型

#### 2.3.3 计算结果

运用 slide6.0 程序进行计算, 该程序依托极限平衡法, 可对土质及岩质边坡稳定性进行分析。正常工况计算时仅考虑自重; 暴雨工况按 20 年一遇 5 日暴雨进行计算; 地震工况考虑地震水平力作用在危岩体上的稳定系数, 危岩区抗震设防烈度为 VII 度, 地震动峰值加速度值为  $0.1g$ <sup>[28]</sup>。

计算结果如图 13 所示。

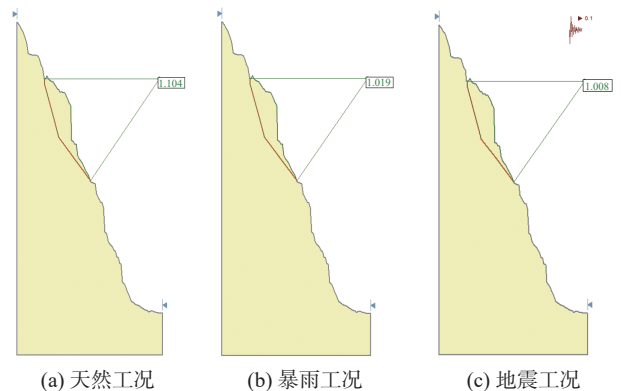


图 13 稳定性计算结果

从计算结果来看,3号危岩体在三种工况下的稳定性系数分别为1.104, 1.019和1.008,这说明该危岩体在天然工况下处于基本稳定状态,而暴雨工况及地震工况稳定性较差,在极端工况下可能发生破坏。

### 3 数值模拟验证

为了验证前文中对于3号危岩体破坏情况的定性分析和定量计算结果,使用phase2软件,基于有限元理论进行数值模拟,对危岩体内部的应力应变及位移变化情况再做进一步分析。phase2软件通过强度折减法,可对边坡的应力分布及变形过程进行详细的计算。选取暴雨工况构建有限元模型,基岩用线弹性模型进行描述,坡体边界视为半无限边界。

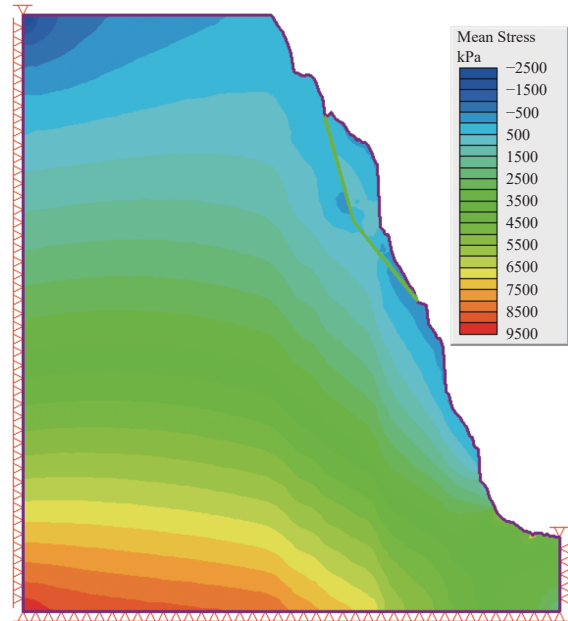
图14(a)为坡体平均应力云图,由图可知,坡体应力分布本该随深度呈正向变化,但在3号危岩体破坏面中部产生应力集中现象,应力分布在危岩体中部厚度较小处达到最大值,约为500 kPa,说明上部结构面已基本贯通,危岩体在重力作用下有向下滑移的趋势,挤压下部坡度较小的位置,这与危岩体中下部块体破碎并有小块岩体向外崩出的实际情况相符,若遇强降雨或地震,危岩体极有可能以底部破碎处为支点发生向外的倾倒式崩落。

图14(b)为坡体位移云图,该图说明危岩体在后缘面及底部剪出口上部位移达到最大值,约为5.5 mm,位移随着破坏面延伸长度逐渐减小,在底部重新增大,这是由于上部结构面贯通,危岩体沿结构面有下滑趋势,位移增大,而中部由于岩桥相连,位移逐渐减小,下部剪出口位置还存在贯通结构面,位移重新增大。位移图反映出3号危岩体的破坏模式为下部先发生剪切破坏,向下滑动时遇到缓坡脚及内倾层面后产生挤压作用,上部结构面拉裂贯通,最终以层面处为原点发生外倾,即“先滑移后倾倒”式崩塌,这与前文中对于破坏模式和破坏路径的分析基本一致,该结果对前文危岩体破坏形式及路径分析的正确性进行了验证。

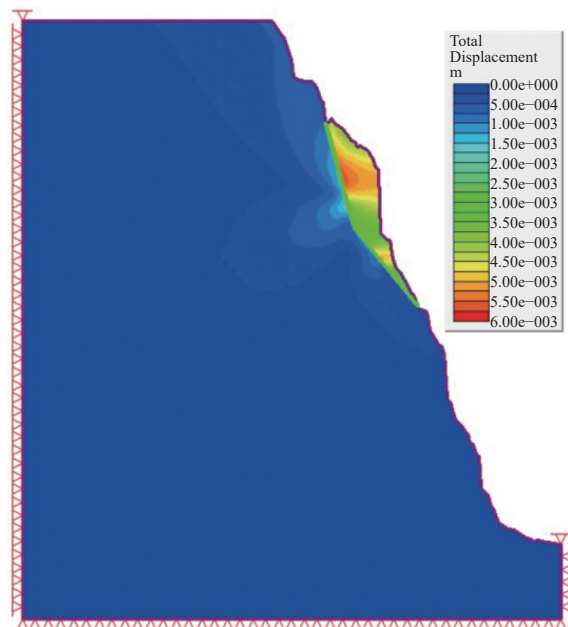
### 4 结论与建议

选取西南地区典型水电岩质高边坡-博瓦水电站左岸边坡为研究对象,针对其破坏模式、破坏路径及稳定性,以现场调查结合无人机三维建模手段为基础,通过赤平投影法与极限平衡法分别从定性和定量两个角度进行了分析,利用数值模拟方法验证了理论分析的正确性,得出以下结论:

(1)基于高山峡谷区岩质边坡特性,采用无人机航拍影像并建立三维模型,对3号危岩体进行解译识别,并获取基本几何特征及结构面特征。



(a) 坡体平均应力云图



(b) 坡体总位移云图

图14 数值模拟结果

(2)根据危岩体几何特征及赤平投影分析,3号危岩体层面内倾,除层面外还发育3组优势结构面,其破坏模式主要受两侧J3-a、J3-d两组节理控制,沿二者交线产生的贯通面发生破坏,属多级、多次的楔形体破坏模式。

(3)根据极限平衡法计算结果,3号危岩体在天然、暴雨及地震工况下的稳定性系数分别为1.104, 1.019和1.008,说明该危岩体整体为基本稳定,在暴雨或地震等极端工况下可能产生破坏。

(4)利用数值模拟手段对分析结果进行验证,从

应力和位移云图所揭示的坡体内部变化情况来看,危岩体表现出“先滑移后倾倒”的破坏形式,与前文中对于破坏模式、路径及稳定性的论述基本一致,表明分析结果是符合实际的。

目前博瓦水电站左岸边坡经过3次崩塌及治理后,整体趋于稳定。在后续调查中发现,整个左岸边坡的主控结构面发育情况与3号危岩体基本一致,虽然厚层大理岩及内倾的白云岩层面有利于边坡的稳定,但由于坡体结构面发育强烈,坡面上遍布结构面切割成的密密麻麻大小不一的楔形块体,依然容易产生小规模崩落。出于水电站的重要性及坡体高度考虑,应进一步加强治理和监测。本文通过对3号危岩体的分析,不仅为同类边坡的破坏问题提供工程指导,也可为该边坡后续的防治提供数据支撑。

#### 参 考 文 献

- [1] 宋胜武,冯学敏,向柏宇,等.西南水电高陡岩石边坡工程关键技术研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(1):1-22.
- [2] 王周萼,蔡耀军.高山峡谷区不良地质体堵江风险分析——以旭龙水电站为例[J].人民长江,2022,53(4):125-129,148.
- [3] 马荣和.HSSPC方法及其在水工高陡岩质边坡稳定性评价中的应用研究[D].昆明:昆明理工大学,2020.
- [4] HUNGR O, LEROUEIL S, PICARELLI L. The Varnes classification of landslide types, an update[J]. *Landslides*, 2014, 11(2): 167-194.
- [5] 张倬元,王士天,王兰生.工程地质分析原理[M].北京:地质出版社,1994.
- [6] 陈洪凯,唐红梅.长江三峡水库区危岩分类及宏观判据研究[J].中国地质灾害与防治学报,2005(4):57-61,82.
- [7] 田 耘.高烈度区水平复杂层状岩质边坡的动力破坏机制[D].重庆:重庆交通大学,2020.
- [8] 王 洋,魏玉峰,贺琮栖,等.反倾岩质边坡多级破坏边界折断深度计算模型[J].岩石力学与工程学报,2023,42(3):630-639.
- [9] 马 克.开挖扰动条件下岩质边坡灾变孕育机制、监测与控制方法研究——以大岗山水电站右岸边坡为例[D].大连:大连理工大学,2014.
- [10] 袁 奇,刘 品,谭玉强.贵州惠罗高速公路缓倾顺层基岩滑坡治理方案分析[J].中国地质灾害与防治学报,2018,29(4):103-107.
- [11] 李红旭,王衍汇,周 海.高速铁路高陡碎裂岩质边坡稳定性评价[J].铁道勘察,2022,48(5):46-51.
- [12] 王永学,朱 凌,裴向军,等.典型震裂山体发育特征及形成机制分析——以四川省茂县叠溪镇松坪沟为例[J].人民长江,2022,53(4):118-124.
- [13] 张 帆,王明疆,刘永智.基于刚体极限平衡法和离散元法的某水电工程岩质边坡综合处理措施[J].西北水电,2020(S1):15-21.
- [14] 王 凯.西成高铁东崂峪大桥岩质边坡稳定性研究[J].铁道勘察,2019,45(2):28-32.
- [15] 高玉峰,万愉快,张 飞.三维非对称边坡稳定性分析极限平衡法[J].中国科学:技术科学,2022,52(12):1819-1830.
- [16] 张 莹,王旭阳,林智勇.某露天矿山破碎岩体高陡岩质边坡稳定性的数值模拟研究[J].有色金属(矿山部分),2023,75(2):100-105.
- [17] 王 川,冷先伦,张占荣,等.基于裂隙扩展的多级岩质边坡开挖卸荷破坏路径分析[J].岩土力学,2023,44(4):1190-1203.
- [18] 刘汉东,牛林峰,王忠福,等.震动强度对反倾层状岩质边坡动力响应规律的影响[J].防灾减灾工程学报,2018,38(4):677-683.
- [19] SONG D Q, LIU X L, HUANG J, et al. Seismic cumulative failure effects on a reservoir bank slope with a complex geological structure considering plastic deformation characteristics using shaking table tests[J]. *Engineering Geology*, 2021, 286(1): 106085.
- [20] LIU H L, LI L C, LI S H, et al. The time-dependent failure mechanism of rocks and associated application in slope engineering: an explanation based on numerical investigation[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020(7): 1-19.
- [21] 杜 威,陈兴周,陈莉丽,等.岩质边坡开挖卸荷岩体参数特征分析[J].防灾减灾工程学报,2023,43(3):596-603.
- [22] LI K, WANG Y F, LIN Q W, et al. Experiments on granular flow behavior and deposit characteristics: implications for rock avalanche kinematics[J]. *Landslides*, 2021, 18: 1779-1799.
- [23] 王有建.高陡岩质边坡变形破坏特征及控制研究[D].淮南:安徽理工大学,2021.
- [24] 吴微微,吴 朋,魏娅玲,等.川滇活动块体中—北部主要活动断裂带现今应力状态的分区特征[J].地球物理学报,2017,60(5):1735-1745.
- [25] 徐锡伟,程 佳,许 冲,等.青藏高原块体运动模型与地震活动主体地区讨论:鲁甸和景谷地震的启示[J].地震地质,2014,36(4):1116-1134.
- [26] 冯 威.高寒高海拔复杂艰险山区无人机勘察技术应用[J].铁道工程学报,2019,36(8):9-13.
- [27] 胡才源,章广成,李小玲.无人机遥感在高位崩塌地质灾害调查中的应用[J].人民长江,2019,50(1):136-140.
- [28] GB 18306—2015 中国地震动参数区划图[S].北京:中国标准出版社,2015.