

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.007



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



## 降雨作用下三维矿山边坡的力学状态响应

黄乐源<sup>1,2</sup>, 田城航<sup>3</sup>, 仇文岗<sup>3</sup>, 孟轩宇<sup>3</sup>, 闫国强<sup>4</sup>, 王鲁琦<sup>3</sup>

(1. 武汉科技大学汽车与交通工程学院, 武汉 430081; 2. 长江重庆航道工程局, 重庆 400011;  
3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 4. 中国长江三峡集团有限公司, 武汉 430010)

**摘要:** 矿山边坡稳定性是影响矿山开采的重大安全生产难题, 安全的环境是进行矿山开采的重要前提, 因此, 开展矿山边坡稳定性分析, 对矿山的安全生产具有重要的指导意义。以重庆皇华石灰岩矿山边坡为例进行数值建模分析, 首先利用无人机倾斜摄影得到矿山边坡几何形状并识别出岩体结构面, 基于摄影识别结果建立三维地质模型, 然后采用有限元强度折减法对边坡进行数值计算, 对比分析天然工况及暴雨工况下矿山边坡稳定性, 揭示降雨作用对于边坡稳定性的影响规律。结果表明, 暴雨工况下边坡变形和应变比天然工况下的更大, 安全系数更小; 暴雨工况下的变形和应变分别比天然工况高 30%、40%~60%, 安全系数减小了 5%~7%, 数值模拟结果基本合理; 该矿山边坡稳定性较高, 整体滑移破坏的可能性较低, 但需防范局部块体掉落的风险, 还需要进一步研究是否需要进行局部边坡加固。研究结果验证了现场调查、室内试验、三维模型判定、二维剖面重点分析的综合研究方法对岩质边坡稳定性进行评价的适用性与可靠性。

**关键词:** 边坡稳定; 现场调查; 有限元分析; 数值模拟; 强度折减法

中图分类号: P642.22 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)06-0070-10

## Mechanical response of 3D mining slopes under effect of rainfall

HUANG Leyuan<sup>1,2</sup>, TIAN Chenghang<sup>3</sup>, ZHANG Wengang<sup>3</sup>, MENG Xuanyu<sup>3</sup>,  
YAN Guoqiang<sup>4</sup>, WANG Luqi<sup>3</sup>

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, P. R. China; 2. Changjiang Chongqing Channel Engineering Bureau, Chongqing 400011, P. R. China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 4. China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, P. R. China)

**Abstract:** The stability of mine slope is a major safety and production problem that affects mining practice. A safe environment is an important prerequisite for mining. Therefore, mine slope stability analysis has important guiding significance for safety production. This paper takes the Huanghua limestone mine slope in Chongqing as an example to perform a numerical modeling analysis. Firstly, the unmanned aerial vehicle (UAV) was used to obtain the geometric shape of the mine slope and identify the rock structure surface, and a 3D geologic model

收稿日期: 2023-11-07

基金项目: 重庆市博士后研究项目(2021XM3008)

作者简介: 黄乐源(1985-), 男, 博士, 副教授, 主要从事钢筋混凝土结构研究, E-mail: 823966958@qq.com。

仇文岗(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: cheungwg@126.com。

Received: 2023-11-07

Foundation item: Postdoctoral Support Program of Chongqing (No. 2021XM3008)

Author brief: HUANG Leyuan (1985-), PhD, associate professor, main research interest: reinforced concrete structure, E-mail: 823966958@qq.com.

ZHANG Wengang (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: cheungwg@126.com.

was created based on photographic identification results. Then, the finite element strength reduction method was used to compare the stability of the slope of the mine under natural condition and heavy rain condition, and the influences of rainfall on slope stability were revealed. The results show that under the condition of heavy rain, the slope deformation and strain are larger than those under natural conditions, and the safety factor is smaller. Specifically, the deformation and strain under heavy rain are 30% and 40%-60% higher than that under natural condition. The safety coefficient decreased by 5%-7%, and the numerical simulation results were basically reasonable. The stability of the mine slope is high, and the possibility of overall slip failure is low. However, the risk of local block falls should be prevented, and further research is needed to determine whether local slope reinforcement is required. In addition, the research results of this article verified the applicability and reliability of the comprehensive research methods of on-site investigation, lab testing, preliminary determination of 3D models, and key analysis of 2D profiles for evaluating the stability of rock slopes.

**Keywords:** stability of slope; field investigation; finite element analysis; numerical simulation; strength reduction method

随着社会发展和人们物质生活水平的提高,人们对能源的需求日益上升<sup>[1]</sup>。矿产作为能源的重要组成部分之一,更多矿山从浅层开挖转为深部开挖,以利用更多的深部矿产资源<sup>[2]</sup>。随着开挖规模逐渐增大,矿山事故也愈发频繁,矿山边坡在开挖过程中也受到了潜在影响,其中矿山边坡安全性有待研究<sup>[3-5]</sup>。

对于边坡稳定性问题,众多学者开展了大量研究,也取得了众多成果<sup>[6-8]</sup>。蒋青江等<sup>[9]</sup>将拟动力法与极限平衡法中的条分法相结合,推导出边坡地震力及安全系数的计算公式,基于程序开发实现了一种考虑波动效应的、适用于任意滑面形状的边坡稳定性分析方法。王红雨等<sup>[10]</sup>针对复合土坝和水库运行的特点,基于极限分析上限定理,构建了两种破坏机制,给出边坡稳定性分析的上限解,并采用强度折减法对边坡安全系数进行寻优计算。王思源等<sup>[11]</sup>采用动态强度折减法搜寻滑动面,并提出考虑边坡张拉破坏与剪切破坏的改进矢量和法,该方法适用于各类土岩组合边坡的稳定性分析。Liu等<sup>[12]</sup>基于三维随机场和有限元分析方法,通过将不排水剪切强度模拟为三维随机场,预测了不排水边坡的稳定性,结果表明二维平面应变分析比三维应变分析更精确,且保守程度在15%左右。Zhang等<sup>[13]</sup>采用有限元数值计算方法,对滑坡在自然和降雨条件下的多断面塑性变形进行了比较分析,结果表明滑坡横断面和纵向断面在自然和降雨条件下均处于临界失稳状态。Zhou等<sup>[14]</sup>提出了一种基于SHAP和XGBoost的新型模型,该评估模型为测试集提供了0.75的准确率和0.83的AUC值,结果表明,峰值降雨强度和高程是影响研究区滑坡的主要因素。Gu等<sup>[15]</sup>考虑了干湿循环引起的强度变化等岩体性质的时间变化,基于一系列考虑pH值影响的干湿

循环试验,采用极限平衡法计算安全系数,揭示了干湿循环和pH值的影响。马彦彬等<sup>[16]</sup>对三峡库区的案例进行研究,对不同的机器学习方法进行分析比较,根据滑坡易发性预测模型的准确性和效率评价了几种常用算法的优劣与局限性,结果表明,基于树结构的集成算法模型性能更好。总的来说,岩质边坡稳定性的研究从基本理论的完备到数值计算方法的飞速发展乃至现在的机器学习、神经网络等非确定性方法的应用,正在逐步形成完整的研究体系。

众多学者对岩质边坡稳定性的研究已取得很多成果,在应用数值计算方法研究岩质边坡稳定性时,大多数研究为基于自建简单模型或理想化条件进行,并应用于实际工程中。笔者以重庆皇华石灰石矿山边坡为研究对象,在详细现场调查、室内试验的基础上,结合有限元数值计算,对多工况下矿山边坡的变形、应力、应变以及稳定性进行分析。首先利用无人机倾斜摄影得到矿山边坡整体的几何形状,基于摄影结果和地质报告建立三维地质模型,然后运用有限元强度折减法对边坡稳定性进行数值计算,得到整体应力、应变状态和典型剖面的应力、应变状态。

## 1 工程概况

重庆皇华矿业有限公司石灰岩矿位于重庆市忠县县城166°方位,距忠县县城约22.5 km,属忠县石子乡金矿管辖(东经108°04'42"~108°05'00",北纬30°08'01"~30°08'14")。矿山位于忠县—石柱S202公路旁,距石子乡约4.0 km,距乌杨镇长江码头约18 km,至忠县县城约80.5 km,交通运输较为方便(图1)。

场地位于方斗山山脉中段西侧。方斗山山脊

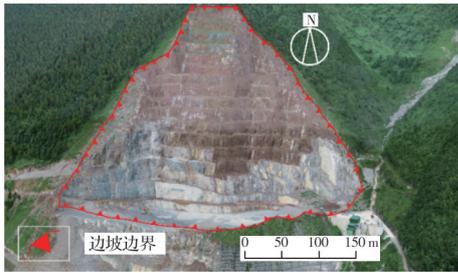


图1 矿山地理位置图

Fig. 1 Geographical location map of mining slope

一带保留有川东平行岭谷地形地貌特征,方斗山山脊东侧及西部坡脚平行山脉走向发育有长数千米至数十千米长条形溶蚀槽谷,槽谷底部平缓开阔,串状分布有溶蚀洼地、落水洞、竖井等岩溶形态和景观。

场地近周边最高海拔1325 m,最低海拔约765 m,相对高差560 m,属中山地貌。地势总体呈南东高北西低的趋势。原始地貌为斜坡地形,总体坡向 $308^\circ$ ,坡角 $40^\circ$ 。因采矿形成一系列台阶状顺向边坡,各台阶边坡高度10~35 m,安全平台2.5~5 m,坡角 $60^\circ\sim 75^\circ$ 。地形地貌复杂。

### 1.1 工程地质及边坡分区

矿区范围及周边主要出露三叠系下统嘉陵江组( $T_{1j}$ )、大冶组( $T_{1d}$ )和二叠系上统长兴组( $P_{3c}$ )等地层,第四系(Q)零星分布,边坡地质较为复杂。研究区域内大致有3类岩组(图2)。

大冶组第3段为灰、浅灰色微晶灰岩,局部夹鲕粒灰岩及少量泥岩,以中厚层状为主,厚228~248 m,该段为矿山开采层位。锤击声较清脆、稍震手,属较硬岩。



(a) 大冶组第3段

(b) 嘉陵江组第1段



(c) 大冶组第4段

图2 3组主要地质岩层

Fig. 2 Three groups of major geological rock formations

嘉陵江组第1段为深灰色中~厚层状微晶灰岩,以薄~中层状为主,组厚大于50 m,与下伏岩层呈整合接触。锤击声略哑、稍震手,属较软岩。

大冶组第4段为紫色泥岩,底部为黄灰色泥灰岩,厚26~28 m。锤击声哑、有较深凹痕,坚硬程度属极软岩。

研究区域的工程地质分区情况如表1所示。

表1 工程地质分区一览表

Table 1 List of Engineering Geological Division

工程地质分区	地层代号	工程地质特征及其评价
较硬中厚层微晶灰岩-鲕粒灰岩岩性组	$T_{1d}^3$	突兀山坡,岩石较硬,裂隙较为发育,斜边坡的稳定性受外倾裂隙控制,边坡肩部易于发生滑塌
较软薄层微晶灰岩岩性组	$T_{1j}^1$	地形坡度较缓,岩石较软,裂隙较为发育,位于边坡底部,对边坡影响较小
极软岩薄层泥岩-泥灰岩岩性组	$T_{1d}^4$	相对负地形,岩石极软,裂隙不发育,斜边坡的稳定性受岩性控制,位于边坡底部,对边坡影响较小

结合无人机摄影结果、重庆皇华矿区地质勘查报告等绘制出矿山边坡平面图,如图3所示。

### 1.2 边坡滑动机理

边坡的滑动与最大剪应力面、软弱面等因素有关。采用赤平投影法,选取部分典型边坡进行分析,如图4所示。

自然边坡BP1为顺向坡,斜坡坡角小于岩层倾角,层理面顺向不临空、对斜坡稳定性的不利影响小,斜坡整体稳定;裂隙L5与斜坡同向,倾角陡于坡角,裂隙L5对斜坡稳定性的不利影响小,斜坡整体

稳定。发生地质灾害的可能性小,危险性小。

人工边坡BP3为顺层坡,岩层倾角与边坡坡角近于一致,层理面顺向不临空、对边坡稳定性的不利影响小,边坡整体稳定;裂隙L5位于边坡肩部,倾向坡外、倾角 $51^\circ$ 缓于坡角,属外倾裂隙,对边坡稳定性的不利影响大,边坡肩部失稳的可能性大,即边坡整体稳定,局部失稳的可能性大,危险性中等。

### 1.3 边坡破坏历史

区内采场边坡主要由大冶组第3段石灰岩组成,层理面顺向不临空,边坡总体属顺向不临空类

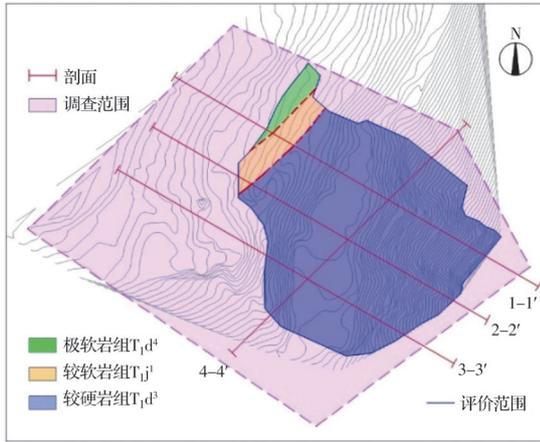


图 3 边坡平面图

Fig. 3 The plane of the slope

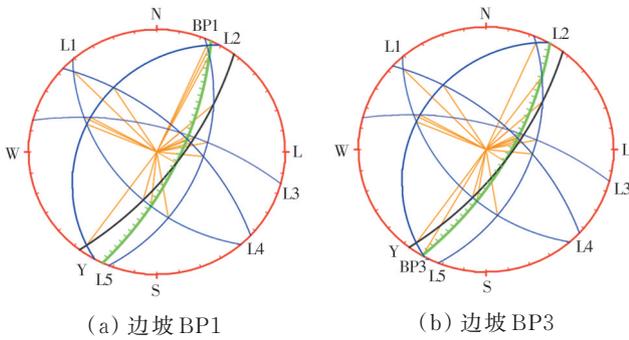


图 4 典型边坡赤平投影图

Fig. 4 Stereographic projection maps of typical slopes

型;仅台阶肩部因局部凹陷可见零星滑塌或掉块迹象,整个采场边坡未见明显位移,专业监测也显示边坡整体稳定,即人工边坡整体稳定性好,仅局部失稳,且主要集中于台阶肩部。

在矿区南西侧外 400 m 处的陡坡曾于 2020 年 1 月 27 日发生崩塌,如图 5 所示。崩塌区出露地层为二叠系上统长兴组灰岩,相对高差(纵长)10~15 m;横宽约 60 m,厚 10~15 m,崩塌体积约  $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。主崩方向为  $278^\circ$ ,崩塌规模为中型。崩塌堆积体停留在冲沟及两侧斜坡上,一般厚度 3~5 m;块石粒径 0.5~2 m,最大可达 3 m;呈棱角状,结构松散~稍密。下伏原始斜坡坡角  $20^\circ \sim 30^\circ$ 。堆积体未出现明显的滑动迹象。

斜坡 BTXP2 坡向  $293^\circ$ 、坡角  $60^\circ$ ,岩层 Y 倾向



图 5 边坡崩塌成因分析

Fig. 5 Analysis of the cause of the slope collapse

$307^\circ$ 、倾角  $70^\circ$ ,层理面顺向不临空、对斜坡稳定性的不利影响小,斜坡整体稳定。裂隙 L5 倾向  $292^\circ$ 、倾角  $51^\circ$ ,与斜坡 BTXP2 同向且倾角小于斜坡坡角,裂隙外倾临空、倾角大、对斜坡稳定性的不利影响大,易于诱发斜坡 BTXP2 岩体失稳。裂隙 L2 倾向  $119^\circ$ 、倾角  $29^\circ$ ,与斜坡 BTXP1 相切,倾向坡外。由此可知,外倾裂隙 L5 诱发斜坡 BTXP2 岩体失稳,切向临空裂隙 L2 造成失稳的岩体向 BTXP1 所在斜坡冲沟侧滑。

### 1.4 边坡稳定性因素分析

目前整个边坡处于相对稳定状态,影响其稳定性的因素包括:

1)地质构造。矿区未发现大的断层,仅裂隙发育、构造较为复杂。总体上地质构造较好。

2)地震。勘察范围内地震动峰值加速度小于 0.05g,地震基本烈度为 VI 度,地震动反应谱特征周期 0.35 s。

3)水文地质条件。该矿山属于长江水系,最低侵蚀基准面位于矿山申请开采最低标高之下。冬春季为枯水期,夏秋两季尤其是洪水季节,主要需考虑暴雨工况下的边坡稳定性。

4)气候条件。该区域属亚热带温暖湿润季风气候区,具有冬暖、春早、雨量充沛,空气湿度大,云雾多、日照偏少等特点。需考虑降雨集中时的边坡稳定性。

5)人类工程活动。矿山以林地为主,人类工程活动主要为采矿活动,矿区破坏地质环境的人类工程活动较为强烈。

## 2 分析原理与方法

借助无人机摄影技术得到边坡的几何信息及结构面信息(图 1),之后将获得的数据进行提取,得到边坡的平面图(图 3),然后利用有限元分析软件建立三维模型并进行数值计算,其基本原理是有限元强度折减法。

### 2.1 有限元分析软件

采用的软件 Midas GTS NX 可以进行二维和三维建模,支持静力分析、动力分析、渗流分析、应力-渗流耦合分析、固结分析、边坡稳定分析等多种分析类型,大量应用于地铁、隧道、边坡、基坑、桩基、矿山等各种实际工程的准确建模与分析,并提供了多种专业化建模助手和数据库。数值模拟得到的结果十分接近真实情况,受到众多岩土领域研究学者的青睐。

Midas GTS NX 中有丰富的岩土体本构模型和多样的单元库,可以针对不同的计算工况和使用条件进行选择。弹性本构模型有线弹性模型、横向各向弹性模型、邓肯-张(E-B、E-V)模型、Jardine 模型、

日本电力中央研究所(D-min)模型等。弹塑性本构模型有莫尔-库伦模型、修正莫尔-库伦模型(可考虑先期固结压力)、硬化土模型、霍克-布朗模型、广义霍克-布朗模型、修正剑桥-黏土模型等。单元库有岩土单元、结构单元、特殊单元、钢混截面库、实体内力提取单元等。

## 2.2 强度折减法

Zienkiewize在1975年开始使用有限元方法进行边坡稳定分析<sup>[17]</sup>。将岩土体的黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 除以一个折减系数 $F_s$ ,可以得到新的抗剪强度参数 $c'$ 和 $\varphi'$ ,再将新的指标进行计算,重复上述计算过程,使系统达到不稳定状态。有限元计算不收敛,此时的折减系数就是安全系数,如式(1)、式(2)所示。

$$c' = \frac{c}{F_s} \quad (1)$$

$$\varphi' = \arctan\left(\frac{\tan \varphi}{F_s}\right) \quad (2)$$

式中: $c$ 为黏聚力,MPa; $\varphi$ 为内摩擦角,(°); $c'$ 为折减后的黏聚力,MPa; $\varphi'$ 为折减后的内摩擦角,(°); $F_s$ 为折减系数。

目前使用较多的为莫尔-库伦模型(MC模型),采用应力张量的第一不变量 $I_1$ 、偏应力张量的第二不变量 $J_2$ 和应力罗德角 $\theta_\sigma$ 表达的莫尔-库伦模型的屈服条件为

$$\sqrt{J_2} \left( \cos \theta_\sigma - \frac{\sin \theta_\sigma}{\sqrt{3}} \sin \varphi \right) + \frac{1}{3} I_1 \sin \varphi - c \cos \varphi = 0 \quad (3)$$

有限元强度折减法比极限平衡法更为严格,能考虑土体的非线性弹塑性本构关系,以及变形对应力的影响,反映土体与支护的共同作用。不需要假定滑移面的形状与位置,可以对具有复杂地貌、地质的边坡进行计算。

## 3 稳定性结果分析

基于三维倾斜摄影数据,构建了矿山边坡三维地质模型,通过强度折减法对多空间尺度的矿山边坡开展了数值计算,对边坡的塑性变形趋势进行分析和对比,揭示边坡稳定性对于降雨的响应规律。所涉及的典型剖面共4个,包括1个横剖面和3个纵剖面,如图6所示。

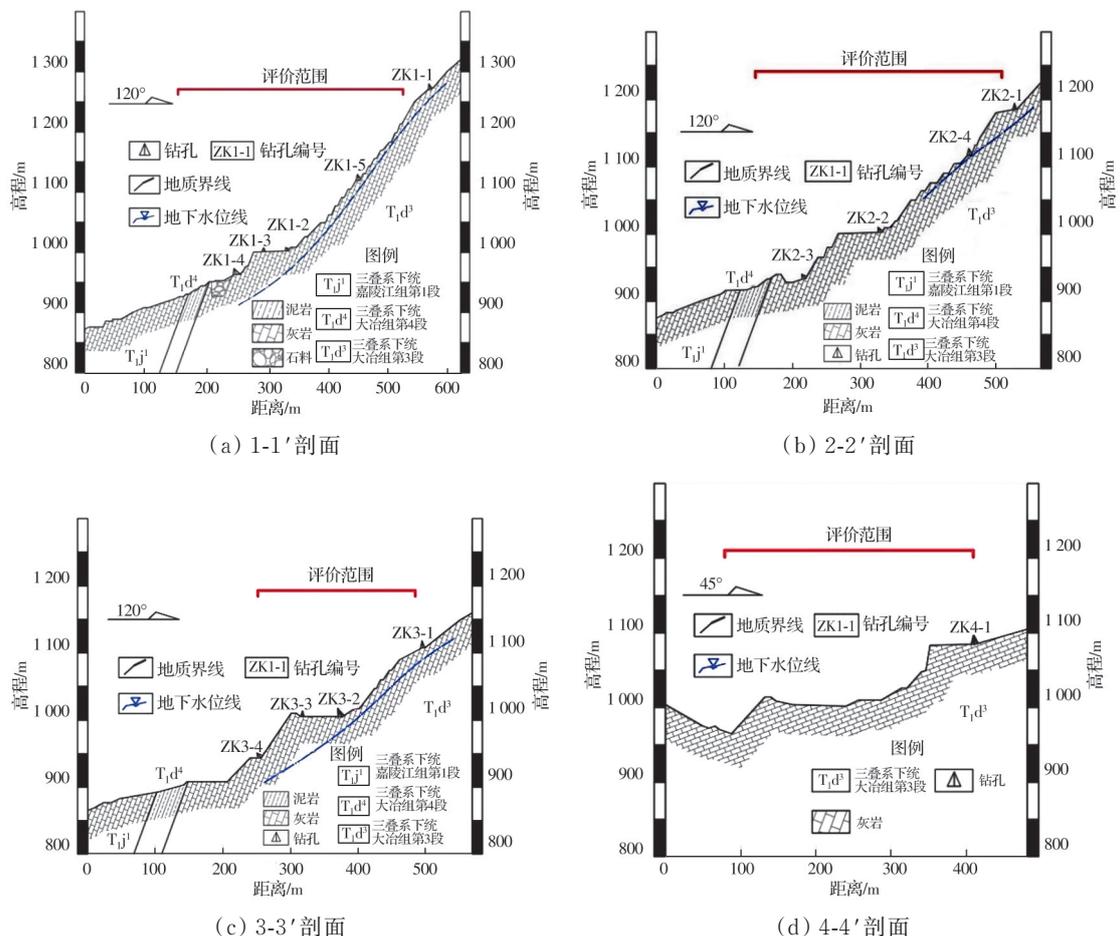


图6 典型地层剖面图

Fig. 6 Typical stratigraphic profiles

在计算的过程中,将边坡的多个剖面简化为地质力学模型,且不考虑地下水位在边坡内部的分布,选取天然工况和暴雨工况 2 种工况下的边坡稳定性进行分析。

其中暴雨工况在天然工况的基础上考虑了岩土体的重度等参数,通过调整参数模拟暴雨工况下

的边坡稳定性。

由于嘉陵江组第 1 段和大冶组第 4 段对边坡的影响较小,故仅对大冶组第 3 段中占比较大的中厚层状微晶灰岩进行钻孔取样测试,并通过室内试验得到各项参数,如表 2 所示。

表 2 数值计算所选用的参数

Table 2 The parameters selected for numerical calculations

天然重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	饱和重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	天然抗压强度 标准值/MPa	饱和抗压强度 标准值/MPa	抗拉强度标 准值/MPa	泊松比	弹性模量/ (10 <sup>4</sup> MPa)	天然内摩擦 角 $\varphi$ /(°)	天然黏聚力 $c$ /MPa
27.1	27.2	40.82	34.28	0.60	0.26	0.5	36.7	2.53

### 3.1 整体分析

不同工况下的位移云图如图 7 所示。由图 7 可知,两种工况下,最大变形区均集中在边坡顶部,并向着边坡底部逐渐减小。其中,暴雨工况下变形较大,最大位移可达 0.591 7 m;天然工况下,变形较小,其最大位移为 0.451 6 m。

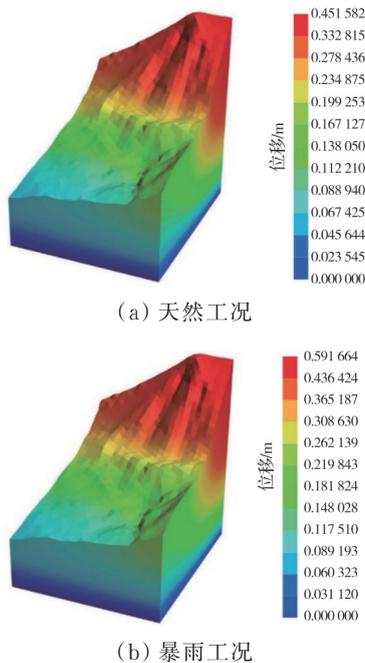


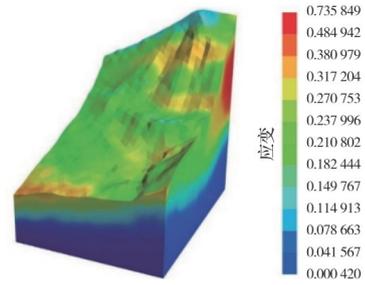
图 7 边坡变形云图

Fig. 7 The deformation distribution of the slope

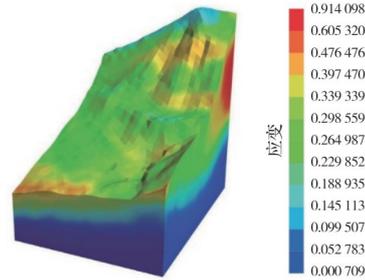
不同工况下塑性应变云图如图 8 所示,分析可知,天然工况下,塑性应变峰值可达 0.735 8;暴雨工况下塑性应变峰值有所增加,可达 0.914 1。两种工况下边坡的塑性应变区均集中分布在边坡后部,边坡表面产生应变较小。

### 3.2 1-1' 剖面稳定性分析

1-1' 剖面在不同工况下的位移云图如图 9 所示。分析可知,两种工况下,最大变形区均集中在边坡顶部,并向着边坡底部逐渐减小。其中,暴雨



(a) 天然工况(FOS=4.86)



(b) 暴雨工况(FOS=4.59)

图 8 塑性应变云图

Fig. 8 Plastic strain distribution of the slope

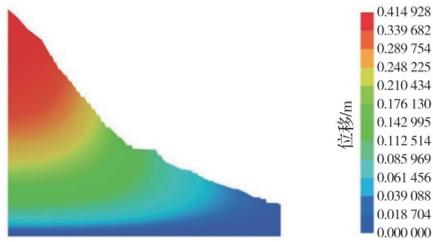
工况下变形较大,最大位移可达 0.542 2 m;天然工况下变形较小,其最大位移为 0.414 9 m。

1-1' 剖面在不同工况下的塑性应变云图如图 10 所示。分析可知,天然工况下塑性应变峰值可达 0.107 9;暴雨工况下塑性应变峰值有所增加,可达 0.221 8。两种工况下边坡的塑性应变区均集中分布在边坡左侧及小部分坡面处,呈圆弧状。

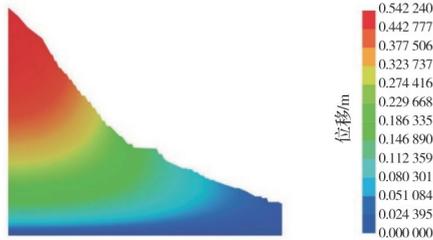
根据数值模拟的结果可以发现:在 1-1' 剖面分析下较为稳定;坡顶处出现最大位移,但位移量较小;塑性应变区集中在边坡左侧和部分坡面处,塑性应变较小,FOS 数值较大,整体较为稳定,暴雨工况下的边坡稳定性会有所下降。

### 3.3 2-2' 剖面稳定性分析

2-2' 剖面在不同工况下的位移云图如图 11 所示。由图 11 可知,两种工况下,最大变形区均集中



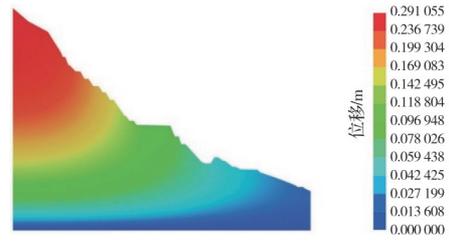
(a) 天然工况



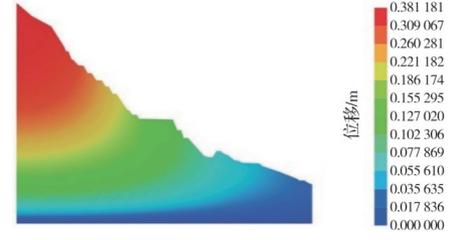
(b) 暴雨工况

图 9 1-1'剖面变形云图

Fig. 9 Deformation distribution of section 1-1'



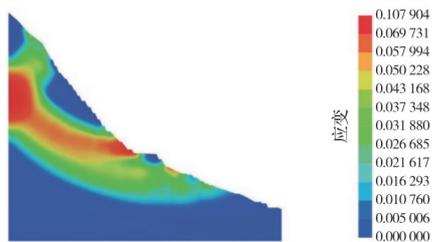
(a) 天然工况



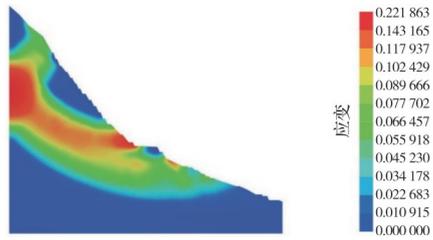
(b) 暴雨工况

图 11 2-2'剖面变形云图

Fig. 11 Deformation distribution of section 2-2'



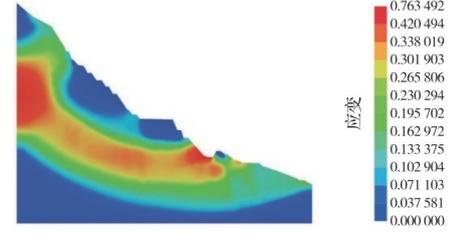
(a) 天然工况 (FOS=3.22)



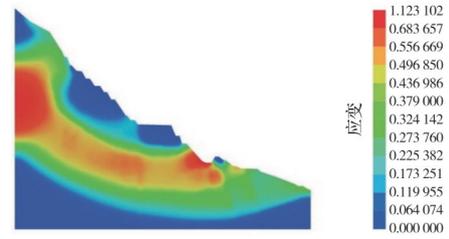
(b) 暴雨工况 (FOS=3.01)

图 10 1-1'剖面塑性应变云图

Fig. 10 Plastic strain distribution of section 1-1'



(a) 天然工况 (FOS=4.05)



(b) 暴雨工况 (FOS=3.84)

图 12 2-2'剖面塑性应变云图

Fig. 12 Plastic strain distribution of section 2-2'

在边坡顶部,并向着边坡底部逐渐减小。其中,暴雨工况下变形较大,最大位移可达 0.381 2 m;天然工况下变形较小,其最大位移为 0.291 1 m。

2-2'剖面在不同工况下的塑性应变云图如图 12 所示。由图 12 可知,天然工况下塑性应变峰值可达 0.763 5;暴雨工况下塑性应变峰值有所增加,可达 1.123。两种工况下边坡的塑性应变区均集中分布在边坡左侧及小部分坡面处,呈圆弧状。

根据数值模拟的结果可以发现:在 2-2'剖面分析下较为稳定;坡顶处出现最大位移,但位移量较小;塑性应变区集中在边坡左侧及小部分坡面处,塑性应变较小,FOS 数值较大,整体较为稳定,暴雨

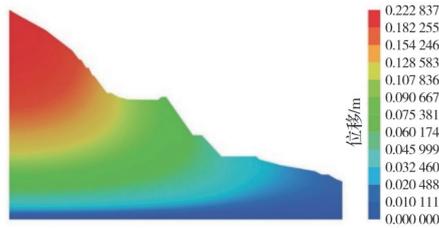
工况下的边坡稳定性会有所下降。

### 3.4 3-3'剖面稳定性分析

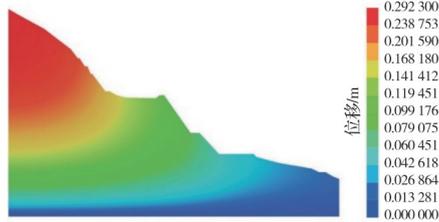
3-2'剖面在不同工况下的位移云图如图 13 所示。由图 13 可知,两种工况下,最大变形区均集中在边坡顶部,并向着边坡底部逐渐减小。其中,暴雨工况下变形较大,最大位移可达 0.292 3 m;天然工况下变形较小,最大位移为 0.222 8 m。

3-3'剖面在不同工况下的塑性应变云图如图 14 所示。由图 14 可知,天然工况下塑性应变峰值可达 0.830;暴雨工况下塑性应变峰值有所增加,可达 1.309。两种工况下边坡的塑性应变区均集中分布在边坡左侧及小部分坡面处,呈圆弧状。

根据数值模拟的结果可以发现:在 3-3'剖面分



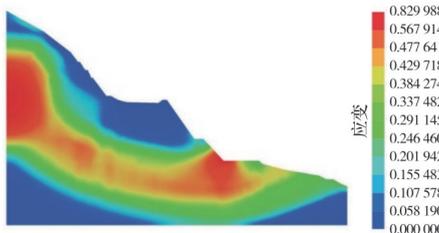
(a) 天然工况



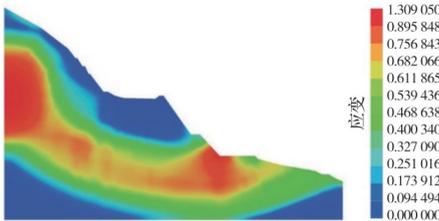
(b) 暴雨工况

图 13 3-3'剖面变形云图

Fig. 13 Deformation distribution of section 3-3'



(a) 天然工况 (FOS=4.71)



(b) 暴雨工况 (FOS=4.47)

图 14 3-3'剖面塑性应变云图

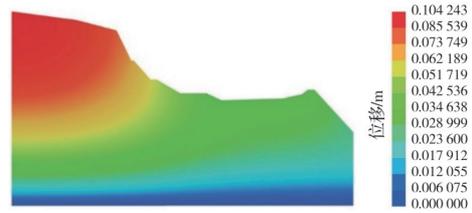
Fig. 14 Plastic strain distribution of section 3-3'

析下较为稳定;坡顶处出现最大位移,但位移量较小;塑性应变区集中在边坡左侧和部分坡面处,塑性应变较小,FOS数值较大,整体较为稳定,暴雨工况下的边坡稳定性会有所下降。

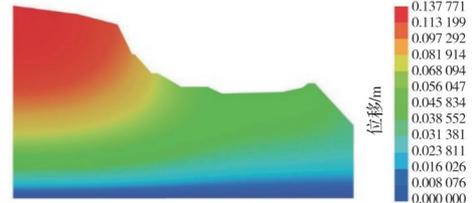
### 3.5 4-4'剖面稳定性分析

4-4'剖面在不同工况下的位移云图如图 15 所示。由图 15 可知,两种工况下,最大变形区均集中在边坡顶部,并向着边坡底部逐渐减小。其中,暴雨工况下变形较大,最大位移可达 0.137 8 m;天然工况下变形较小,其最大位移为 0.104 2 m。

4-4'剖面在不同工况下的塑性应变云图如图 16 所示。由图 16 可知,天然工况下塑性应变峰值可达 0.363 8;暴雨工况下塑性应变峰值有所增加,可达



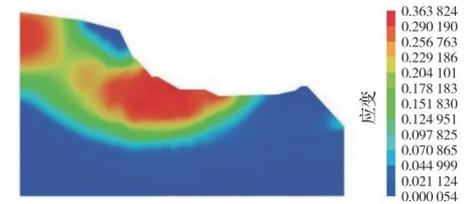
(a) 天然工况



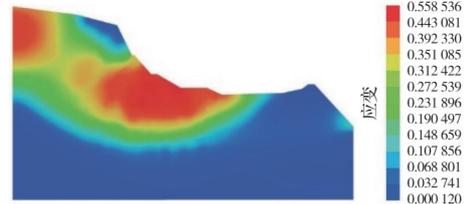
(b) 暴雨工况

图 15 4-4'剖面变形云图

Fig. 15 Deformation distribution of section 4-4'



(a) 天然工况 (FOS=5.81)



(b) 暴雨工况 (FOS=5.40)

图 16 4-4'剖面塑性应变云图

Fig. 16 Plastic strain distribution of section 4-4'

0.558 5。两种工况下边坡的塑性应变区均集中分布在边坡左侧及中部。

根据数值模拟的结果可以发现:在 4-4'剖面分析下较为稳定;右侧坡顶处出现最大位移,但位移量较小;塑性应变区均集中分布在边坡左侧及中部,FOS数值较大,整体较为稳定,暴雨工况下的边坡稳定性会有所下降。

### 3.6 典型剖面稳定性结果分析

将 4 个典型剖面的变形、应变、安全系数进行汇总归纳,形成如表 3 所示的结果。

根据模拟结果可知,1-1'剖面的最大变形值在 4 个典型剖面中最大,最大变形中,各剖面暴雨工况下的最大变形均比天然工况大,大约高 30%。3-3'剖面的最大应变在 4 个典型剖面中最大,除 1-1'剖面暴雨工况下的最大应变比天然工况高 100% 左右

表3 4个典型剖面有限元模拟结果汇总

Table 3 Summary of finite element simulation results for four typical sections

剖面	最大变形			最大应变			安全系数		
	天然工况/m	暴雨工况/m	增大百分比/%	天然工况	暴雨工况	增大百分比/%	天然工况	暴雨工况	增大百分比/%
1-1'	0.415	0.542	30.60	0.108	0.222	105.56	3.22	3.01	6.52
2-2'	0.291	0.381	30.93	0.764	1.123	46.99	4.05	3.84	5.19
3-3'	0.223	0.292	30.94	0.830	1.309	57.71	4.71	4.47	5.10
4-4'	0.104	0.138	32.69	0.364	0.559	53.57	5.81	5.40	7.06

外,其他各剖面暴雨工况下的最大应变比天然工况高出40%~60%不等。各剖面暴雨工况下的安全系数均比天然工况下的安全系数小,各剖面减小5%~7%。

从稳定性分析结果可以看出,暴雨工况会在一定程度上影响边坡稳定性,使边坡产生更大的变形和应变,同时还会减小边坡的安全系数,需进一步研究暴雨工况下是否需要进一步加固。

## 4 结论

通过数值计算对边坡区域三维模型及典型二维剖面进行分析,得到了不同工况下矿山边坡位移-应力分布特征以及安全系数,主要结论如下:

1)提出了现场调查、室内试验、三维模型初步判定、二维剖面重点分析的综合研究方法。

2)通过天然工况及暴雨工况下矿山边坡的有限元数值模拟,有效揭示多空间尺度矿山边坡力学状态对降雨的响应规律,定量化降雨对矿山边坡位移、塑性应变以及稳定性的影响。

3)与天然工况相比,暴雨工况下边坡变形和应变更大,安全系数更小,由数值计算判定获取的边坡关键变形区,可以通过现场调查做进一步核定。

## 参考文献

[1] 高来举, 岳豪. 高质量发展阶段能源资源安全挑战与对策[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(5): 66-73.  
GAO L J, YUE H. Challenges and solutions of energy and resources security in high-quality development stage [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(5): 66-73. (in Chinese)

[2] 张丹丹, 付俊, 石飞. 江西某金属矿露天采区边坡稳定性分析[J]. 世界有色金属, 2022(22): 190-194.  
ZHANG D D, FU J, SHI F. Slope stability analysis of a metal mine open pit in Jiangxi [J]. World Nonferrous Metals, 2022(22): 190-194. (in Chinese)

[3] 李军成. 基于SLIDE软件矿山边坡稳定性分析的研究[J]. 中国矿山工程, 2023, 52(2): 15-20.  
LI J C. Research on stability analysis of mine slope based on SLIDE software [J]. China Mine Engineering, 2023, 52(2): 15-20. (in Chinese)

[4] 刘杨, 彭亮, 祝鑫, 等. 降雨条件下含缓倾软弱夹层矿山高边坡稳定性分析[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(7): 71-79.

LIU Y, PENG L, ZHU X, et al. Stability analysis of high slope with gently inclined weak interlayer under rainfall condition in mine [J]. Mining Research and Development, 2022, 42(7): 71-79. (in Chinese)

[5] 巫辅宇, 饶运章, 石亮, 等. 强降雨条件下离子型稀土矿山边坡稳定性分析[J]. 有色金属科学与工程, 2022, 13(5): 148-154.

WU F Y, RAO Y Z, SHI L, et al. Analysis on stability of ionic rare earth slope under heavy rainfall [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2022, 13(5): 148-154. (in Chinese)

[6] 李丞, 蔡立明, 张伟锋, 等. 初始渗流场对渣土场边坡降雨入渗特征及其稳定性的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(2): 1-9.

LI C, CAI L M, ZHANG W F, et al. Influence of initial seepage field on rainfall infiltration characteristics and stability of municipal solid waste landfill [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(2): 1-9. (in Chinese)

[7] 张帮鑫, 贾剑青, 赖远明, 等. 考虑分区各向异性和渗流作用的边坡稳定性研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(4): 41-48.

ZHANG B X, JIA J Q, LAI Y M, et al. Slope stability considering zonal anisotropy and seepage effects [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(4): 41-48. (in Chinese)

[8] ZHANG W G, GU X, HAN L, et al. A short review of probabilistic slope stability analysis considering spatial variability of geomaterial parameters [J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2022, 7(4): 249.

[9] 蒋青江, 邓亚虹, 杨楠, 等. 基于严格条分法的拟动力地震边坡稳定性分析方法研究[J]. 地震工程学报, 2023, 45(3): 716-723.

JIANG Q J, DENG Y H, YANG N, et al. Pseudo-dynamic seismic slope stability analysis based on rigorous slice method [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(3): 716-723. (in Chinese)

[10] 王红雨, 闫超, 曹静. “坝前淤积面加坝”边坡稳定性分析上限解[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(Sup1):

- 3578-3588.
- WANG H Y, YAN C, CAO J. Upper bound solution of slope stability analysis for “filling earth from upstream deposited silt” [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(Sup1): 3578-3588. (in Chinese)
- [11] 王思源, 童小东. 基于动态强度折减-改进矢量和法的边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(7): 1384-1392.
- WANG S Y, TONG X D. Stability analysis of slopes based on dynamic strength reduction-improved vector sum method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(7): 1384-1392. (in Chinese)
- [12] LIU Y, ZHANG W G, ZHANG L, et al. Probabilistic stability analyses of undrained slopes by 3D random fields and finite element methods [J]. Geoscience Frontiers, 2018, 9(6): 1657-1664.
- [13] ZHANG K Q, WANG L Q, ZHANG W G, et al. Formation and failure mechanism of the Xinfangzi landslide in Chongqing city (China) [J]. Applied Sciences, 2021, 11(19): 8963.
- [14] ZHOU X Z, WEN H J, LI Z W, et al. An interpretable model for the susceptibility of rainfall-induced shallow landslides based on SHAP and XGBoost [J]. Geocarto International, 2022, 37(26): 13419-13450.
- [15] GU X, WANG L, CHEN F Y, et al. Reliability analysis of slope stability considering temporal variations of rock mass properties [J]. Computers, Materials & Continua, 2020, 62(3): 263-281.
- [16] 马彦彬, 李红蕊, 王林, 等. 机器学习方法在滑坡易发性评价中的应用[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(1): 53-67.
- MA Y B, LI H R, WANG L, et al. Machine learning algorithms and techniques for landslide susceptibility investigation: A literature review [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(1): 53-67. (in Chinese)
- [17] 徐文刚, 余旭荣, 年廷凯, 等. 基于FLAC3D的三维边坡稳定性强度折减法计算效率改进算法及其应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(5): 1347-1355.
- XU W G, YU X R, NIAN T K, et al. Optimization and application of FLAC3D strength-reduction computation in three-dimension slope stability analysis [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(5): 1347-1355. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)