

露天开采

基于倾斜航测与FLAC3D的矿山边坡地震动力稳定性分析

Seismic Dynamic Stability Analysis of Mine Slopes Based on Oblique Photogrammetry and FLAC3D

尚玉森¹, 王卫红^{1,2,3}, 王立娟⁴, 蔡嘉伦^{1,2,3}

(1. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010; 2. 西南科大四川天府新区创新研究院, 四川 成都 610299;
3. 国家遥感中心绵阳科技城分部, 四川 绵阳 621010; 4. 四川省安全科学技术研究院, 四川 成都 610046)

摘要:本文旨在利用无人机航测技术结合FLAC3D数值模拟软件,对攀西地区及及坪露天采场边坡进行地震动力稳定性分析。本研究采用无人机倾斜摄影测量技术获取高精度影像数据,利用Midas GTS-NX软件将航测数据转化为FLAC3D可识别的网格文件,并通过设置合理的参数,模拟边坡在地震作用下的动力响应。研究结果表明,地震作用对边坡稳定性有显著影响,地震前后边坡的安全系数分别为1.289和1.199;东帮边坡的滑移和沉降量较大,分别达到了62.50 mm和62.59 mm,且塑性区集中分布在边坡顶部和坡脚处,存在滑坡风险。因此,建议加强东帮边坡的日常监测与支护,以确保矿山的安全生产。

关键词:边坡稳定性; 倾斜摄影测量; FLAC3D数值模拟; 地震动力响应; 矿山安全

中图分类号: P231; P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)01-0025-07

Abstract: The dynamic stability of slopes is a critical concern in mining engineering. This paper aims to analyze the seismic dynamic stability of the slopes at the Panzhuhua-Xichang region's open-pit mine using UAV aerial photogrammetry combined with FLAC3D numerical simulation software. High-precision image data was obtained using UAV oblique photogrammetry, and the Midas GTS-NX software was employed to convert the photogrammetric data into mesh files recognizable by FLAC3D. By setting appropriate model parameters, the dynamic response of the slope under seismic conditions was simulated. The results indicate that seismic activity significantly impacts slope stability, with safety factors of 1.289 before and 1.199 after the seismic event. The east slope exhibited substantial displacement and settlement, reaching 62.50 mm and 62.59 mm, respectively, with plastic zones predominantly concentrated at the slope crest and toe, indicating a landslide risk. Therefore, it is recommended to strengthen routine monitoring and support of the east slope to ensure safe mining operations.

Key words: slope stability; oblique photogrammetry; FLAC3D numerical simulation; seismic dynamic response; strength reduction method

1 前言

地震动力作用对边坡稳定性有显著的影响,造成稳定性不断降低^[1],露天矿山采场边坡一旦失稳,往往会造成严重的人员伤亡和财产损失^[2],因此,露天矿山边坡的稳定性对矿山的正常生产和员

工的生命安全至关重要。露天矿山边坡自开挖后其高度和坡度一直处于动态调整和变化中,这就要求露天矿山边坡稳定性分析方法应该具备快速、高效和准确的特性^[3]。

随着计算机技术的飞速发展,数值模拟在边坡稳定性分析中的应用越来越广泛,解决了许多实际工程问题^[4]。在岩土工程方面,FLAC3D模拟软件表现出强大的价值和实用性^[5-6]。宋丹青等^[7]通过构建数值模型模拟地震动力下岩性对高陡岩质边坡的响应特征;卢坤林等^[8]采用极限平衡法分析获得安全系数进而对坡面形态效应的影响因素和变化规律进行分析;张云飞等^[9]结合极限平衡方法和有限单元方法分析边坡稳定性取得了较好的效果;张诏

[基金项目] 国家自然科学基金(U22A20565,42171355);西南科技大学博士基金(22ZX7171,21ZX7106);教育部产学研合作协同育人项目(231104718062123)

[作者简介] 尚玉森(1999—),男,四川广元人,硕士研究生,主要从事非煤矿山灾害防治技术和安全生产等研究。

[引用格式] 尚玉森,王卫红,王立娟,等.基于倾斜航测与FLAC3D的矿山边坡地震动力稳定性分析[J].中国矿山工程,2025,54(1): 25-31.

飞^[10]等结合 FLAC3D 数值模拟和真实孔径边坡雷达两种手段实现了滑坡区域、滑坡时间的精准预报。

在数值模拟中,地形测量的准确性对构建精确的边坡模型十分重要^[11]。Stumpf 等^[12]采用无人机摄影测量技术捕获边坡表面的地形及裂隙影像资料,实现了对边坡裂缝发育状况的精准评估与失稳倾向的预测分析。Liu^[13]等运用无人机摄影测量技术精确获取边坡地形地貌及关键块体的几何数据,将这些数据与数字高程模型(DEM)相结合,通过 3D-DDA 软件,最终实现对边坡稳定性的综合评估与结果输出。

以上研究表明,尽管数值模拟与无人机摄影测量技术在边坡稳定性分析中展现出巨大潜力,但目前仍存在模型简化、数据处理复杂度高及实时监测时效性不足等挑战。本文构建了一套基于无人机航测数据驱动的边坡三维模型地震动力稳定性分析方法,该方法具有快速、高效和准确的特性,为露天矿山边坡稳定性评价提供了新的思路和技术手段。

2 研究区概况

研究区及及坪采场(图 1)位于四川省攀枝花市米易县白马矿区,矿区位于我国西南地区南北向地震带中段的石棉—元谋地震带上。该地震带所发生的地震具有分段集中的特点,在其西北的南坝和西南的桐子林(分别距白马矿区 10 km 和 40 km)为Ⅷ度地震危险区。因此,对研究区进行地震动力分析十分必要。

采场南北长约 2.30 km,东西宽约 1.10 km,面积约 2.53 km²。采场东帮边坡顶部分布有厚度不等的松散覆盖层,岩性主要为残坡积粉质黏土、全风化辉长岩。松散覆盖层岩质松软,易软化,雨季期在雨水冲刷作用下,极易沿台阶边坡发生顺层滑动。2018 年雨季期间,该区域形成三处小型浅层单台阶垮塌,分别位于 2 110 ~ 2 125 m、2 140 ~ 2 155 m、2 170 ~ 2 185 m 坡段松散覆盖层坡体中。2019 年

初,2 095 ~ 2 065 m 段,断层(238°∠61°)与节理面(345°∠50°)与坡面(262°∠63°)组合形成楔形体破坏引起边坡垮塌,垮塌方量约为 4 000 m³(图 2)。



图 1 研究区现状



图 2 采场边坡垮塌现状

3 无人机倾斜摄影测量

3.1 边坡数据获取

倾斜摄影通过将多个相机安装在无人机、车辆或建筑物上,并按照特定的角度和方向进行拍摄,获取多角度、多方向、高精度的影像数据^[14]。倾斜相机是进行倾斜摄影测量的核心载荷,同时,飞行平稳、续航强劲的无人机也是在海拔较高、环境干扰较大的矿山航摄中不可或缺的一环。

(1)选用飞马 D2000S 无人机对边坡进行数据采集,无人机标准起飞重量 2.8 kg,标准荷载 200 g,续航时间 74 min,配备了双差分天线,有精准地形跟随飞行功能、自动避障功能,该无人机既满足了配备重量稍大的倾斜相机的要求,又满足了在矿山持久作业、适应复杂地形的功能。倾斜相机选用五镜头的 D-OP4000,相机参数见表 1。

表 1 D-OP4000 倾斜相机

相机型号	分辨率	有效像素	像元尺寸	传感器尺寸	镜头焦距
SONY A7R4	9 504 × 6 336	6 100 万 × 5	3.76 μm	35.7 mm × 23.8 mm	40 mm 定焦(下视) 56 mm 定焦(斜视)

(2)根据测区地形特点,结合 UAVmanager 软件中的模块设计航线,采用仿地飞行,由于矿山边坡高差大,仿地飞行会导致无人机处于频繁升降的过程,

会耗费更多的时间,但精度会更高。航向重叠度设置为 80%,旁向重叠度设置为 75%,航高设置为 320 m。

(3)在矿区 4 km² 范围内均匀布置 10 处像控点,为便于后期刺点识别,用涂抹石灰的方式布设像控点,有明显可识别地物时可将其直接确定为像控点。

在天气状况良好的情况下,选择车流量较少的场地作为无人机起降平台,进行倾斜摄影测量,由于研究区海拔较高,风速较大,飞马 D2000S 无人机最大抗风能力为 6 级风(10.8 ~ 13.8 m/s),如飞行途中遇更大风速,应立刻命令无人机返回,避免造成损失。

3.2 边坡航测数据处理

整理航测获取的相片数据,检查相片 POS 数据经纬度、高程数据准确完整后,在 PIX4D 软件中经初始化处理,确保图像校准、相机内方位元素差异、地面控制点误差等质量合格,即可生成密集点云,密集点云的生成可以有效提高后续产品的质量。通过密集匹配得到的高密度真彩色点云(图 3a),构建 TIN 三角网,形成高分辨率、高精度的数字表面模型(DSM),在获取 DSM 数据后,对其进行滤波处理,并融合有差异的匹配单元,构成最终数字表面模型(图 3b)。同时,PIX4D 可以生成共矿山管理、指挥、决策使用的正射影像图和三维模型(图 3c,图 3d),但此处构建的三维模型并不能用于数值模拟,供 FLAC3D 进行数值模拟计算的模型不仅要有准确的几何形态,还需要包含材料力学参数、模型边界条件、各种荷载的作用。

4 边坡数值模拟三维模型构建

4.1 模型的建立

在具体建模中根据弹塑性力学理论——圣维南原理来考虑 FLAC3D 计算模型的大小^[15],数值模型的计算范围可以根据开挖范围的尺寸关系进行合理确定。

Midas GTS-NX 不仅能够快速、准确划分网格,并且可对其进行编辑和检查,同时它提供了矿山、边坡等各种实际工程的准确建模与分析,大幅缩短了建模时间,在要求快速建模及稳定性分析的条件下能充分发挥作用。

通过 ArcGIS 软件从航测获取的 DSM 中提取出间隔 1 m 的等高线,并去除多余地物。Midas GTS-NX 软件中的地形数据生成器能够识别等高线(DXF 格式)并建立边坡地形表面图(图 4a),通过将曲面拉伸,通过已有的地形剖面图、地层分布状况将实体

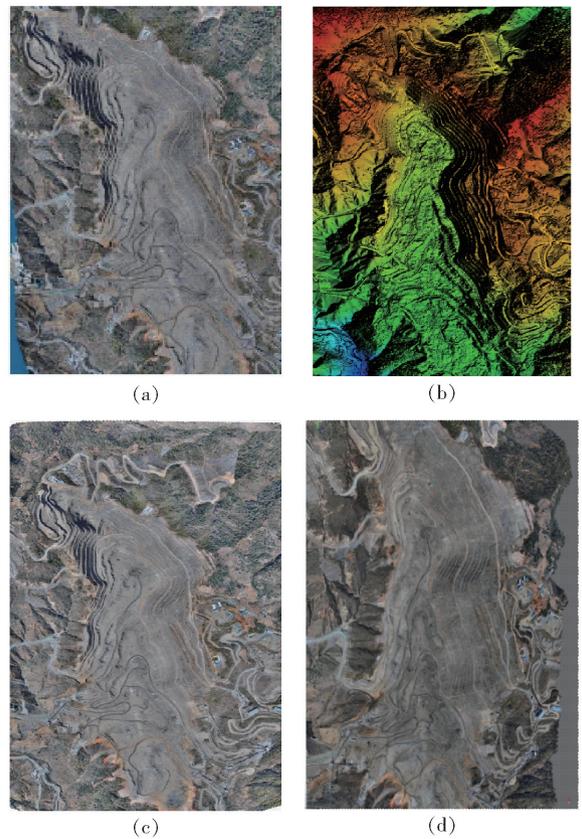


图 3 无人机航测成果

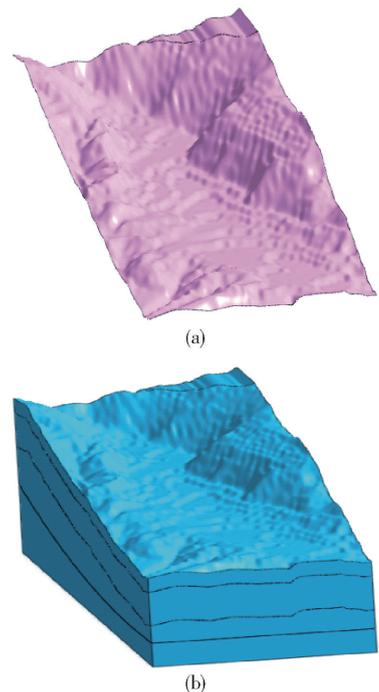


图 4 模型的建立

进行切割,建立含地层的实体三维模型(图 4b)。

将生成好的模型划分网格,为保证模型的精度,网格类型采用混合网格,生成好的网格文件如图

5a,模型尺寸 $X \times Y \times Z = 2\ 500 \times 900 \times 1\ 000$,含 569 101 个单元体,节点数为 324 869。通过插件生成 FLAC3D 可识别的 .f3grid 网格文件,即得到 FLAC3D 数值模拟三维模型(图 5b)。

4.2 模型参数与边界条件

为了更好地模拟岩土体的受力特点,岩土体均采用弹塑性模型中的 Mohr-Coulomb 本构模型^[16],稳定性计算岩体力学参数选取工程已有资料中的岩土体的物理力学指标,见表 2。

在实际工程中,模型都处在半无限大的地层中,因此不可能选取整个半无限区域进行分析,为了模拟模型在半无限场所的条件,因此进行计算求解时,需要采用静力边界条件,模型的四周和底部约束其法向速度,而模型的上表面为自由边界。

4.3 初始地应力求解

首先计算由无人机航测数据驱动生成的采场三维模型在重力作用下生成的初始地应力场,重力加速度取 9.81 m/s^2 。计算结果如图 6 所示, x 方向水平应力最大值为 9.27 MPa ,垂直方向最大水平应力

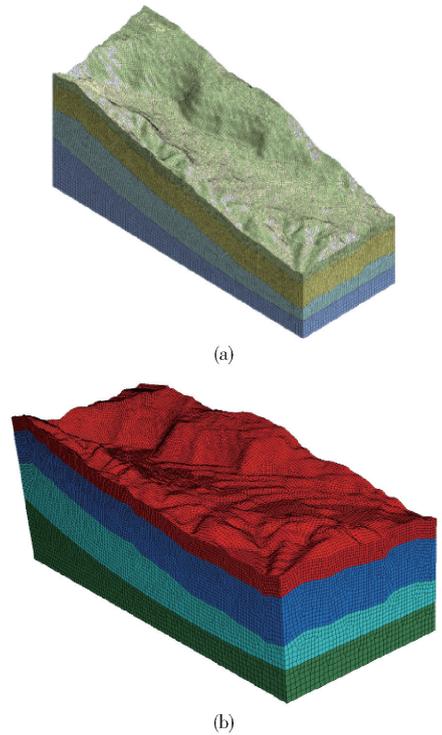


图 5 网格的划分

表 2 岩土体的物理力学指标

岩土层	重度 $\gamma/$ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(\text{°})$	抗拉强度 c/kPa
残质黏土坡积粉	19.32	18	0.35	23	21.3	/
全风化辉长岩	20.15	50	0.32	150	28.4	100
强风化辉长岩	22.50	5 013	0.28	1 505	28.1	1 200
中-微风化细粒辉长岩	27.90	16 100	0.26	4 500	35.0	4 000

为 19.99 MPa ,地应力呈分层分布,且与深度成正比,可以认为模型设置的边界条件无误。

5 边坡数值模拟稳定性分析

5.1 地震动力分析

1) 边界条件设置

地震动力作用会对边坡稳定性造成十分显著的影响。根据《中国地震动参数区划图》(GB18306—2015)和《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010),研究区抗震设防烈度为Ⅶ度,该场地工程设计时应按不低于Ⅶ度设防,设计基本地震加速度值为 0.15 g ,设计地震分组为第三组,设计特征周期值为 0.45 s 。

模型如果采用静力边界条件,地震波向外传播会反射回来,因此为了解决这一问题,需要采用动力边界条件,本次模拟采用自由场边界,自由场边界以模型土体的网格为基础,通过在模型的四周生成网格(如图 7a),并且用阻尼器将土体的网格与自由场

边界节点相重合,在动力分析计算时,自由场运动和模型二者之间计算同步进行。因此,自由场边界不仅不会回弹地震波,还会将地震波吸收,向上传播的平面波在边界处不仅不会发生任何的失真,也可以得到地下结构在地震作用下准确的数据。

本次模拟选取 EI Centro Site 地震波(图 7b),将地震波进行缩放,使地震波的峰值为 0.15 g ,将缩放完的地震波以加速度方式从底部施加在模型边界上,在进行地震分析时,还需要考虑土体的阻尼作用。由于阻尼作用,岩土体在振动条件下其能量也能不断的耗散,影响阻尼有多方面因素,比如材料、尺寸、力学性质等等,常常用具体的数学模拟来模拟它,阻尼种类主要有:瑞利阻尼、局部阻尼和滞后阻尼等。为了模拟地震作用下结构的真实响应,合理的阻尼设置至关重要。本文采用了 FLAC3D 软件中的局部阻尼方法,以控制结构在地震波作用下的振

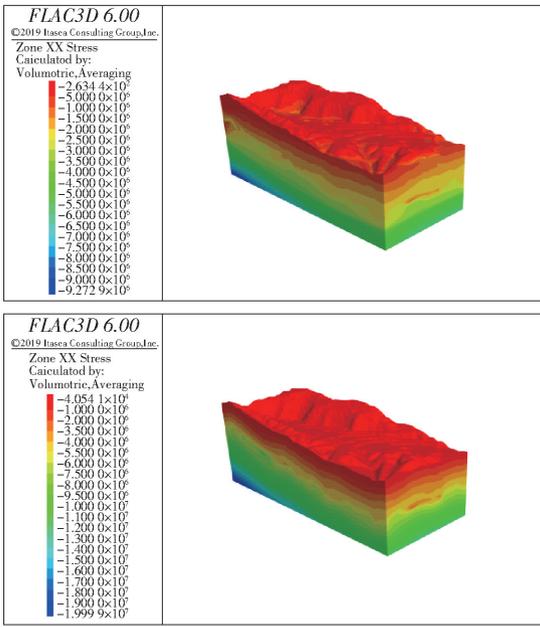
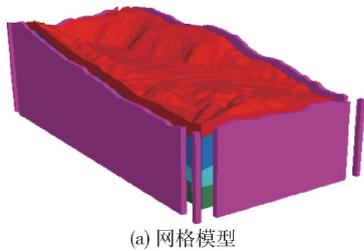
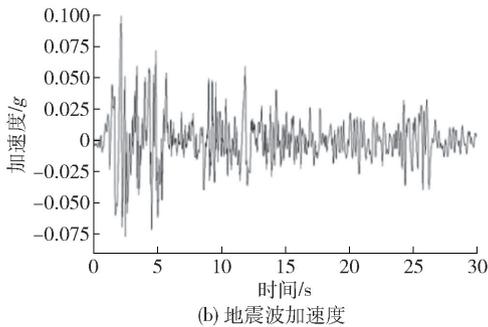


图6 初始地应力

动衰减过程,局部阻尼被设置为 $0.157(\pi \times 0.05)$, 以模拟材料在动态加载下的能量耗散。



(a) 网格模型



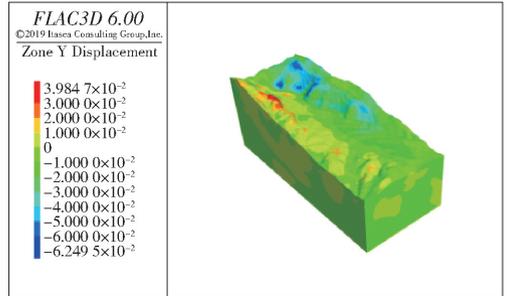
(b) 地震波加速度

图7 边界条件和阻尼设置

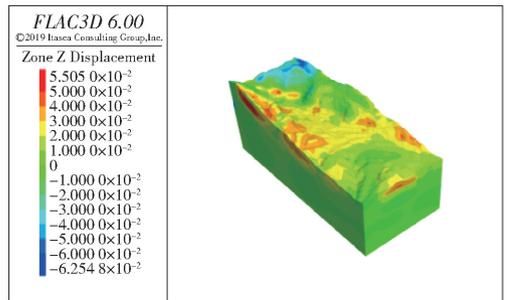
2) 位移分析

图8a为地震结束后的y方向位移状态,当地震结束后,东西两帮的边坡都发生了不同程度的位移,其中东帮边坡最大位移量达到了62.59 mm,西帮边坡最大位移量达到了39.85 mm,东帮边坡受地震影响更大,更容易发生坍塌,但边坡整体位移不大,整体处于安全状态。因此,需要加强位移较大处边坡的日常监测,尤其是东帮边坡,必要时可以采用挂网喷混的方式进行边坡支护。

从图8(b)及图9可见边坡在地震结束后z方向的位移状态,数值模拟的结果显示的是终了时刻的模型状态,由于地震波对土地结构影响的复杂性,所以会出现沉降或者隆起的不同情况,东帮边坡地表最大沉降值为62.59 mm,最大位移区域在 $X = 200, Y = 600, Z = 900$ 及周边单元处,西帮边坡地表最大隆起量为42.15 mm,最大位移区域在 $X = 850, Y = 90, Z = 720$ 及周边单元处。因此,需要加强坐标位置处地表沉降监测,防止发生较大塌陷。



(a) y方向位移



(b) z方向位移

图8 位移分析

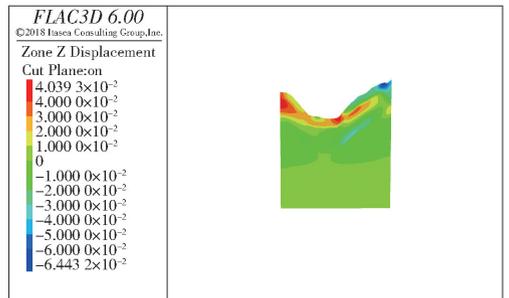


图9 位移剖面

3) 塑性区分析

图9所示为边坡在地震结束后的塑性状态,可以看出,当地震结束后,边坡塑性区主要集中在东帮边坡的边坡顶和东帮边坡的坡脚处,从东帮边坡剖面(图10)来看,塑性区并未贯通,但仍存在滑坡风险,而西帮边坡塑性区主要集中在坡面,坡脚暂未发现大面积塑性区。因此,在日常的工作中,应着重观察东帮边坡的坡脚、坡顶等危险区域的监测与保护。

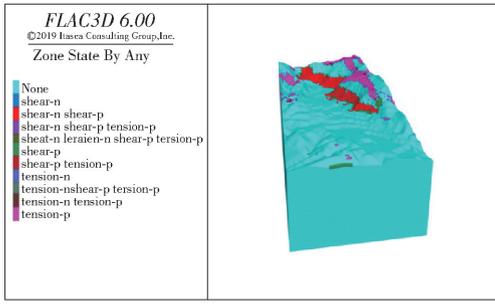


图 10 塑性区

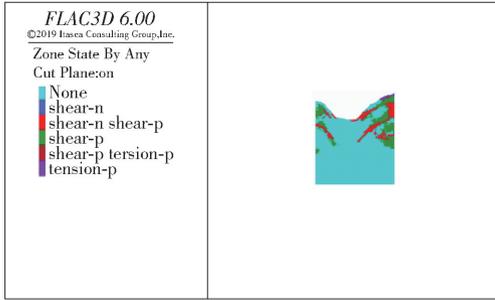


图 11 东帮边坡剖面塑性区

5.2 边坡安全系数分析

1) 强度折减法

强度折减法的基本思想在于,通过降低岩土体的抗剪强度参数来模拟边坡在外力作用下的稳定性变化。具体实施过程中,将岩土体的黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 同时除以一个折减系数 F ,形成新的抗剪强度参数 c' 和 ϕ' ,即:

$$c' = c/F$$

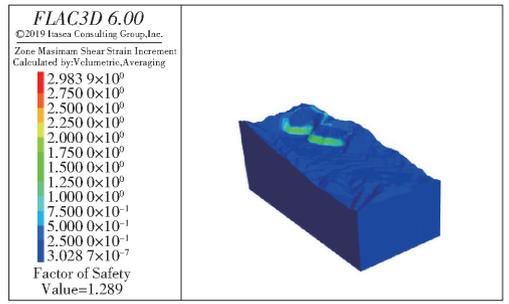
$$\phi' = \arctan\left(\frac{1}{F}\tan\phi\right)$$

并将其代入到计算模型中。随着折减系数 F 的逐渐增大,边坡的稳定性逐渐降低,直至达到一个临界状态,此时边坡发生整体滑动或局部失稳,此时的折减系数 F 即为所求的安全系数 F_s 。

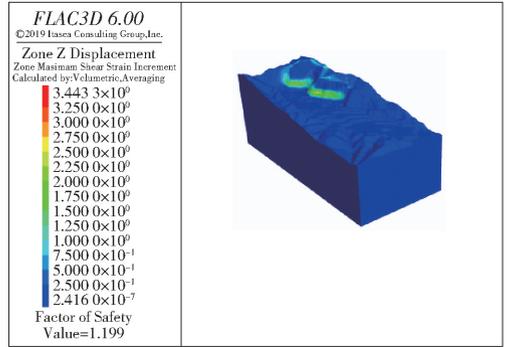
2) 地震前后安全系数求解

依据强度折减法计算得出,地震前后边坡的安全系数分别为 1.289 和 1.199,地震导致边坡的安全系数降低,但总体处于一个稳定状态,具体如图 10 所示。根据《非煤露天矿边坡工程技术规范》,现状边坡最大高度为 285 m,属中边坡,确定边坡安全等级为 I 级,计算结果满足规范要求,边坡稳定性良好。

从图 13 可见,最大剪切应变增量主要集中于东帮边坡,剪切应变增量从坡顶贯通至坡脚形成贯通,地震前最大剪切应变增量为 2.984,地震结束后,边坡最大剪切应变增量为 3.443。并且,最大剪切应

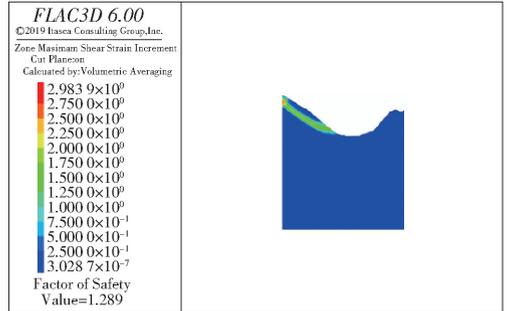


(a) 震前安全系数

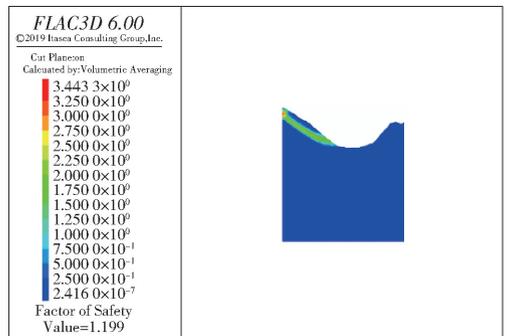


(b) 震后安全系数

图 12 边坡安全系数



(a) 震前最大剪应变增量



(b) 震后最大剪应变增量

图 13 最大剪应变增量

变增量的最大值都发生在东帮边坡坡顶处。因此,可以认为,相比于西帮边坡,东帮边坡更容易发生滑坡,这与 4.1 节得到的结论一致。因此,需要加强东帮边坡的保护与日常监测,防止东帮边坡发生大规模的滑坡、坍塌等自然灾害现象。

6 结论

本文通过无人机倾斜航测手段采集数据,应用FLAC3D软件研究露天矿山边坡在地震动力作用下的稳定性,主要结论如下:

(1)无人机倾斜摄影测量精度能够为建立边坡地质三维模型提供可靠的数据支撑,并具备高效、高精度等优势。结合Midas GTS-NX软件构建了符合FLAC3D计算要求的边坡三维模型,实现了从无人机数据到数值模拟模型的完整转换。

(2)通过FLAC3D数值模拟软件对地震动力响应进行分析。结果表明,地震对边坡稳定性有显著影响,特别是东帮边坡在地震作用下的滑移量62.50 mm和沉降值62.59 mm较西帮边坡大,易发生滑坡和坍塌。

(3)采用强度折减法计算了地震前后的边坡安全系数,结果显示地震前后边坡的安全系数分别为1.289和1.199,地震导致边坡安全系数降低,但总体仍处于稳定状态。同时,通过塑性区分析和最大剪应变增量分析,进一步确认了东帮边坡为潜在危险区域,需要加强日常监测和提供保护措施。

[参考文献]

- [1] 刘泉,王晨.地震动力响应下某矿山排土场边坡稳定性分析[J].有色金属(矿山部分),2024,76(2):76-79.
- [2] 徐晓东,杜文秀.融合Bishop算法和FLAC3D的露天矿边坡安全系数敏感性分析[J].金属矿山,2023,(6):200-206.
- [3] 成建华.无人机摄影测量等效边坡模型建立及稳定性分析[J].测绘通报,2023,(S1):36-41.
- [4] 岳西蒙,伍法权,沙鹏,等.基于三维点云建模的矿山边坡稳定性分析[J].中国矿业,2021,30(04):89-95+114.
- [5] 张武,赵兴东,于文龙,等.基于FLAC3D的开采扰动下巷道稳定性研究[J].金属矿山,2024,(08):

59-63.

- [6] 李志辉,杨小彬,原文杰,等.考虑块石块度及分布的人工土石混合边坡稳定性分析[J].金属矿山,2023,(09):76-82.
- [7] 宋丹青,黄进,刘晓丽,等.地震作用下岩体结构及岩性对高陡岩质边坡动力响应特征的影响[J].清华大学学报(自然科学版),2021,61(08):873-880.
- [8] 卢坤林,朱大勇.坡面形态对边坡稳定性影响的理论与试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(01):35-42.
- [9] 张文飞,任奋华,郭奇峰,等.降雨作用下和尚桥铁矿内排土场边坡稳定性分析[J].金属矿山,2022,(05):205-211.
- [10] 张诏飞,席伟.基于FLAC3D-RAR的边坡稳定性分析和监测预警[J].矿业研究与开发,2023,43(05):63-68.
- [11] 金爱兵,陈帅军,赵安宇,等.基于无人机摄影测量的露天矿边坡数值模拟[J].岩土力学,2021,42(01):255-264.
- [12] Stumpf A, Malet J-P, Kerle N, et al. Image-based mapping of surface fissures for the investigation of landslide dynamics [J]. Geomorphology, 2013, 186: 12-27.
- [13] Liu C, Liu X, Peng X, et al. Application of 3D-DDA integrated with unmanned aerial vehicle-laser scanner (UAV-LS) photogrammetry for stability analysis of a blocky rock mass slope [J]. Landslides, 2019:
- [14] 贾曙光,金爱兵,赵怡晴.无人机摄影测量在高陡边坡地质调查中的应用[J].岩土力学,2018,39(03):1130-1136.
- [15] 李玉良,何宇轩,楚盖,等.基于最小二乘的工程结构边界载荷反求误差消减方法[J].计算力学学报,2020,37(03):284-292.
- [16] 谭文辉,孙中华,李聪聪,等.考虑水平地应力作用的边坡三维极限平衡法研究[J].采矿与安全工程学报,2015,32(04):683-688.