

地震作用下露天矿节理岩质边坡稳定性数值模拟研究

谢仁青,刘明淳,姜海涛,魏锡康,陈智斌

(福建岩土工程勘察研究院有限公司)

摘要:为研究地震作用下节理边坡的稳定性,以蒙特卡洛方法建立了随机节理裂隙网络模型,运用离散元程序 3DEC 开展了地震作用下某露天矿边坡稳定性的数值仿真研究。结果表明:地震作用下,坡底部位振动强度、位移等明显强于坡顶部位,坡体节理裂隙对地震波的传播能量具有显著的削弱作用,坡底主要表现为剪切破坏模式,日常生产过程中需加强坡底结构抗震能力。

关键词:露天开采;边坡;节理裂隙;随机节理裂隙网络;地震作用;数值仿真;稳定性

中图分类号:TD325

文章编号:1001-1277(2024)07-0006-05

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20240702

引言

露天矿的地质条件通常比较复杂,其边坡稳定性一直备受关注^[1]。然而,在地震作用下,露天矿的边坡稳定性问题愈加突出。地震产生的地震波会引发边坡位移、滑坡和岩石崩塌,严重威胁矿山工作人员的生命安全,对环境造成长期不可逆的破坏,同时导致生产设备和矿区基础设施受损^[2]。因此,深入研究露天矿在地震作用下的边坡稳定性问题具有极其重要的实际意义^[3]。

在研究地震作用下岩质边坡稳定性时,许多学者采用了连续介质力学方法。例如:郑颖人等^[4-5]基于强度折减法研究了地震作用下边坡的失效模式。陈星等^[6]采用有限元差分法分析了地震作用下边坡关键点的动态响应特征,揭示了边坡在地震作用下的失稳机制。陈晓利等^[7]利用 FEPC 有限元程序分析了水平和垂直加载方式下地震边坡的应力场和位移场的变化规律。张江伟等^[8]采用有限元等方法建立了边坡前缘和后缘边界尺寸的概化模型,实现了远置边界在边坡地震分析中的可行性。叶帅华等^[9]以框架预应力锚杆加固多级高边坡为基础,获得了边坡在地震作用下的动态响应特征,为框架预应力锚杆加固多级高边坡的抗震技术提供了一定的依据。这些研究成果对于地震作用下边坡稳定性研究具有积极的现实意义。然而,这些研究成果往往没有充分考虑节理和裂隙对边坡稳定性的影响^[10-13],导致分析结果与实际工程可能存在较大差异。

蒙特卡洛方法、随机节理网络方法 (DFN)^[14-15]等可以使用节理分布概率数学模型对空间节理岩体进行量化描述。在传统的节理岩体三维裂隙网络研究方面已经取得了相当大的进展。目前,商业软件中已经可以很好地构建随机节理裂隙网络模型 (DFN)。例如:在三维离散元数值分析软件 3DEC^[16]中使用节理倾角、倾向、节理间距及迹长等统计参数进行随机节理裂隙网络的构建。这些节理统计参数通常符合某种概率密度函数模型,如高斯分布模型、负指数分布概率模型、均匀分布模型等。

本文选取某露天矿边坡为研究背景,运用数理统计学方法描述了节理间距和迹长等参数的统计特性,并构建了反映这些特性的分形分布概率模型。在此基础上,使用离散元分析软件 3DEC 建立了随机节理裂隙网络模型,并结合动力分析模型,引入地震波对节理岩质边坡的动态响应和稳定性进行了详尽研究。全面了解了节理岩质边坡在地震作用下的动态响应和稳定性,有助于减轻地震对边坡稳定性的影响,确保了露天矿的安全高效开采。

1 露天矿边坡节理裂隙调查统计

选取国内某露天矿节理发育段(如图 1 所示)作为采样区域。针对现场实际情况共布置 3 条测线,获得 220 条节理测量数据,采用统计学方法将节理样本划分为 1[#]~3[#]共 3 个优势组。其中,1[#]优势组 75 条,2[#]优势组 68 条,3[#]优势组 56 条,倾向、倾角、节理密度、迹长等均服从正态分布,如表 1 所示。



图 1 某露天矿边坡节理裂隙发育区域

Fig. 1 Development zone of joint fractures in an open-pit mine slope

表 1 节理几何参数统计数据

Table 1 Statistical data of joint geometric parameters				
产状	组号	分布形式	平均值	标准差
倾向/(°)	1 [#]	正态分布	168.87	25.64
	2 [#]	正态分布	270.89	26.78
	3 [#]	正态分布	87.94	25.15
倾角/(°)	1 [#]	正态分布	65.67	11.43
	2 [#]	正态分布	55.89	10.19
	3 [#]	正态分布	52.28	8.56
节理密度/m ⁻²	1 [#]	正态分布	0.40	0.2
	2 [#]	正态分布	0.35	0.6
	3 [#]	正态分布	0.20	0.4
迹长/m	1 [#]	正态分布	6.2	1.2
	2 [#]	正态分布	5.8	1.5
	3 [#]	正态分布	4.3	0.9

该露天矿边坡高度为 25 m,坡脚为 35°,坡顶后缘长度为 70 m。整个计算模型的尺寸为 150 m (长)、50 m (高)、20 m (宽)。在边坡走向方向,岩性、节理分布及结构面存在较大差异。为更好地反映工程实际情况,根据边坡实际情况对岩体区域进行了划分。将对边坡稳定性影响基本相同的区域归为同一区域,总共划分为 3 个区域,并选择了典型剖面进行计算和稳定性分析。

2 基于蒙特卡洛的随机节理裂隙网络建模

该露天矿节理调查和分布统计在边坡台阶上进行,而地震作用下边坡破坏是沿着边坡岩体内部的节理发生的,因此,通过边坡表面的节理分布来模拟边坡岩体内部的节理分布极其重要。基于边坡表面的节理统计与分析结果,采用 Beacher 圆盘节理模型^[17],运用蒙特卡洛方法进行模拟,形成随机节理裂

隙边坡岩体三维模型(如图 2 所示)。

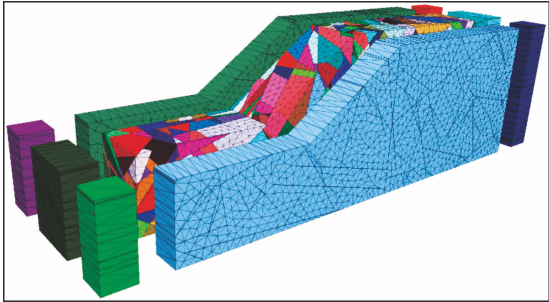


图 2 随机节理裂隙边坡岩体三维模型及自由边界场

Fig. 2 3D model of random jointed fracture rock mass in slope and free boundary field

在动力分析之前,首先进行静力分析,静力分析时,前后及两侧水平方向采用位移约束,底部采用竖向位移约束。动力分析时,前后及左右两侧设置为 3DEC 中独有的自由边界场,底部施加黏性边界,并在模型底部施加 EL - CENTRO 地震波(如图 3 所示)^[18]时程,方便后续边坡动态稳定性的分析。

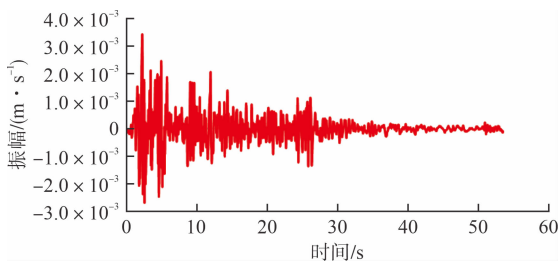


图 3 EL - CENTRO 地震波形

Fig. 3 EL - CENTRO seismic waveform

数值模型中完整岩石力学参数如表 2 所示,节理参数如表 3 所示。在用离散元程序 3DEC 进行数值模拟时,将岩体划分为四边形网格单元。Kuhlemeyer 和 Lysmer 的研究表明,应力波能够在模型中精确传播的充分条件是网格尺寸(Δl)要小于等于应力波波长的 1/10 ~ 1/8,即:

$$\Delta l \leq \left(\frac{1}{10} \sim \frac{1}{8} \right) \lambda \tag{1}$$

$$\lambda = \frac{C}{f} \tag{2}$$

式中:Δl 为四边形网格尺寸(m);λ 为应力波波长(m);C 为应力波的传播速度(m/s),取 C_p 和 C_s 中的较小者;f 为应力波的频率(Hz)。

为了真实地反映模拟输入地震波在随机节理裂隙网络边坡中的传播,尽可能防止波形失真,将最大网格尺寸设置为 2.5 m,则数值模型中地震波传播不失真的最高频率(f_{max})为:

$$f_{\max} = \frac{C}{\lambda} = \frac{C}{10\Delta l} \tag{3}$$

本文中 S 波最大波速为 2 828 m/s,计算得到的

表2 完整岩石力学参数

节理组	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	抗拉强度/ MPa	内聚力/ MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
1 [#]	2 600	3.24	1.85	0.01	0.024	20
2 [#]	2 650	5.87	3.74	0.01	0.022	20
3 [#]	2 700	9.86	5.83	0.01	0.025	25

表3 节理参数

节理组	抗拉强度/ MPa	内聚力/ MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	法向刚度/ GPa	切向刚度/ GPa
1 [#]	0.01	0.024	20	150	60
2 [#]	0.01	0.022	20	150	60
3 [#]	0.01	0.025	25	200	100

最高频率为 113.12 Hz,远大于地震波传播频率 1 ~ 5 Hz,因此,网格尺寸采用 2.5 m 是完全合理可行的。

3 边坡稳定性数值仿真结果及分析

3.1 加速度、速度和位移

分别在边坡纵剖面处选取了 A(坡顶平面)、B(坡顶)、C(坡面中点)、D(坡脚)和 E(坡底平面)这

5 个监测点(如图 4 所示),对其加速度、速度、位移和主应力进行地震响应分析。

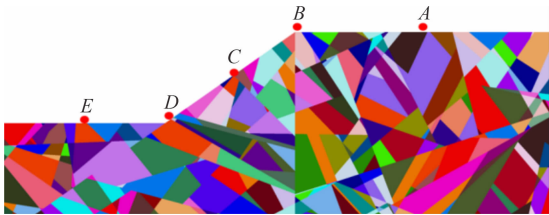


图4 边坡纵剖面上监测点布置示意图
Fig. 4 Diagram of monitoring points layout on the longitudinal section of the slope

经计算,5 个监测点的速度、加速度和位移时程曲线如图 5 ~ 7 所示。3 个方向的速度变化显示:坡顶平面和坡顶处振幅较小,坡底平面在 3 个方向的振幅均较大,坡面中点在 y 方向和 z 方向的振幅较大,坡脚处的振幅虽然在幅值上不及坡底平面的振幅,直观看,其振荡程度不及坡底平面处的振荡程度,但不能排除其危险性低于坡底平面处。总体上看,各监测点在 x、y 方向上的速度变化趋势差异性较大,而在 z 方向的速度变化趋势较为一致,但幅值上的差异较为明显,这主要与地震波在边坡节理中的折射、反射有关,由于随机节理裂隙网络的复杂性,增加了地震波预测的复杂性和难度,为此,在日常生产中,应该加强地震波的监测。

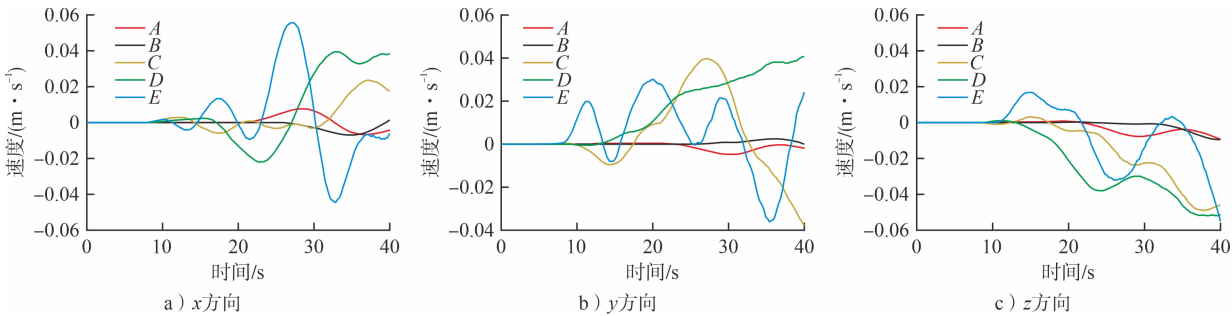


图5 监测点 x、y、z 方向速度时程曲线

Fig. 5 Time-history curves of velocity in x,y, and z directions at monitoring points

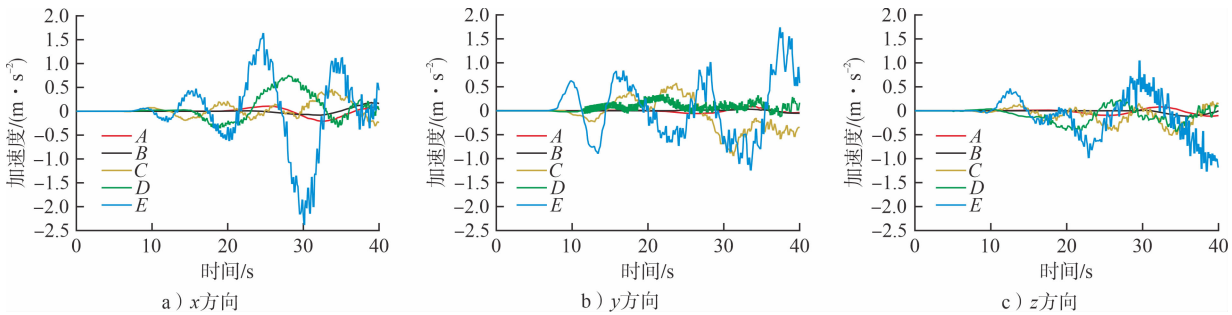


图6 监测点 x、y、z 方向加速度时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of acceleration in x,y, and z directions at monitoring points

从各监测点不同方向的加速度时程曲线看,坡脚和坡底平面(监测点 D、E)处更易产生锯齿状的加速度曲

线,产生的噪声信号较大。监测点 E 处 x 方向加速度最大值为 2.5 m/s^2 ,峰值速度为 0.056 m/s ;y 方向加速

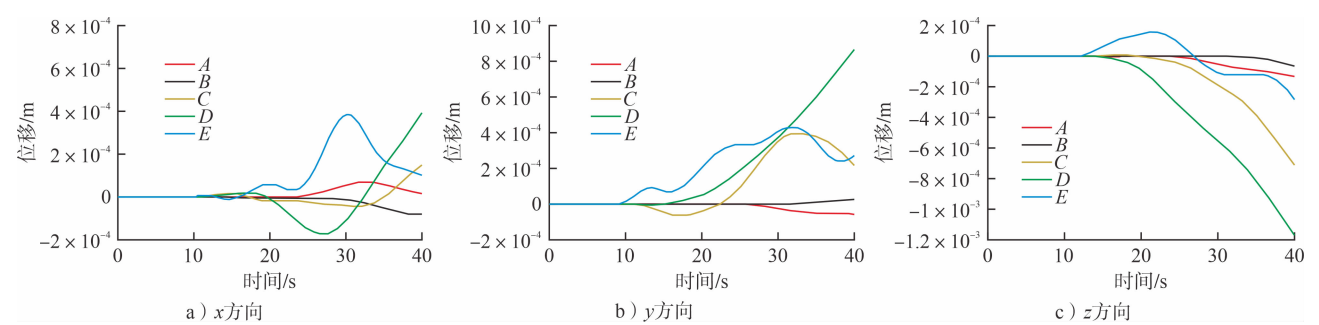


图 7 监测点 x 、 y 、 z 方向位移时程曲线

Fig. 7 Time-history curves of displacement in x , y , and z directions at monitoring points

度最大值为 1.8 m/s^2 ，峰值速度为 0.038 m/s ； z 方向加速度最大值为 1.1 m/s^2 ，峰值速度为 0.059 m/s 。边坡在地震载荷作用下， x 、 z 方向的振动幅度相当，但 x 方向峰值加速度更大。总体而言，在随机节理裂隙条件下，边坡腰部以下包括坡面底部、坡脚等部位的振动幅度大于坡顶平面和坡顶。

从 x 、 y 、 z 3 个方向的位移时程曲线看：坡顶和坡顶平面在各个方向上的位移极易收敛，而坡面中点以下，各监测点的位移不易收敛，特别是在坡脚 D 处，3 个方向上产生的位移较大，在 z 方向上，坡脚 D 处产生较大的沉降，且趋势不可控。这也就进一步表明，在地震作用下，坡体以下特别是坡脚处，边坡发生失稳破

坏的风险较高，是需要进行重点风险防控的部位。

3.2 傅里叶变换分析

对 5 个监测点 3 个方向的速度进行傅里叶变换分析，各监测点 x 、 y 、 z 方向频谱如图 8 所示。由图 8 可知，在 x 、 y 主震作用方向，主要由 $0\sim10\text{ Hz}$ 地震波主导，且坡脚 D 处低频振幅较其他几处监测点大，说明地震波在此处传播的能量越高，破坏性越大，这也与上一节所做分析对应。在 z 方向上，坡脚 D 处的低频地震波主要集中在 $0\sim4\text{ Hz}$ ，其频谱变化趋势与 z 方向位移变化趋势较为相似，也就是说， z 方向产生的位移越大，地震波传播到监测点处低频信号产生的振幅越高，由此推断地震波传播的能量越高。

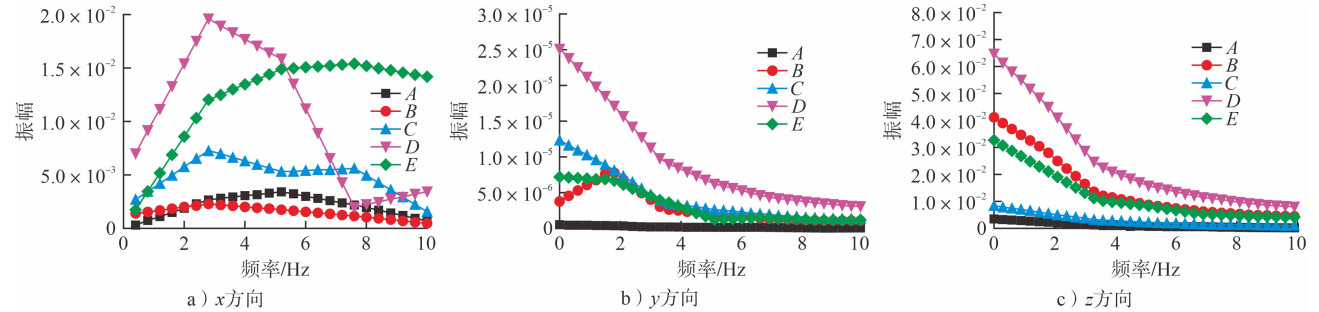


图 8 监测点 x 、 y 、 z 方向频谱

Fig. 8 Frequency spectrum in x , y , and z directions at monitoring points

因此，从能量传播角度看，边坡整体受到的地震波传播能量较高处为坡脚 D 、坡底平面 E 。坡面中点 C 受到地震波传播能量适中，其余部位受到地震波传播能量较小。随着地震波在节理中的反射、折射，使得坡面以上部位大部分能量耗散掉，坡体上部岩体失稳的风险要小于坡体下部岩体失稳的风险。

3.3 边坡受力分析

对地震作用下坡体的最大剪应力和 $Mise$ 等效应力进行了比较，结果如图 9、图 10 所示。从云图上直观观察，可以看到二者的空间分布特点高度相似，由于地震波从模型底部开始传播，应力集中一般在模型底部聚集，沿着坡体向上，由于随机节理裂隙网络的非均匀分布，导致了应力分布的不均匀性。坡底平面 E 到坡脚 D 范围内，易形成较大范围的剪应力和

$Mise$ 等效应力升高区，而坡顶 B 部位，由于随机节理裂隙的影响，导致了地震波传播过程中能量的耗散，使得受力变化不明显，仅有零星部位存在较高的应力集中现象。因此，从受力角度看，坡体存在高风险失稳区域，这与动态响应（速度、位移、加速度）和能量（傅里叶变换）分析所得出的结果较为一致。也就是说，在日常生产管理上，应加强坡体底部的监测工作，对不稳固区域进行相应支护，尽可能降低地震作用造成坡体失稳的风险。

4 结 论

通过对某露天矿在地震作用下的稳定性数值仿真研究，得到的主要研究结论如下：

1) 在地震作用下，随机节理裂隙网络对地震波

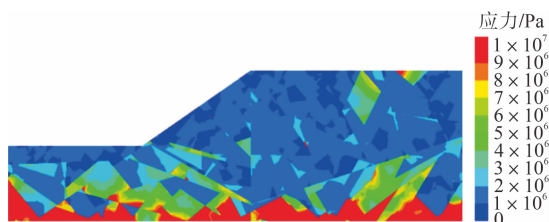


图9 最大剪应力云图

Fig. 9 Diagram of maximum shearing stress

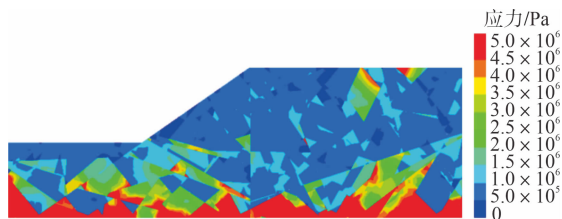


图10 Mises 等效应力云图

Fig. 10 Diagram of Mises equivalent stress

的传播具有一定的削弱作用,坡顶产生的位移明显要弱于坡底产生的位移,坡脚处产生的永久沉降量大于1 mm,且有继续增大的趋势。

2)从能量角度看,经过傅里叶变换,地震波低频信号可以在一定程度上反映地震波能量的大小,坡脚处的低频振幅明显强于其余部位的低频振幅。可以从这个观点上对坡脚在地震作用下失稳的风险性进行评估。

3)地震作用下,该露天矿边坡应力集中区主要聚集在坡体底面下部,坡顶表面和坡面中点应力集中程度较低,边坡应力集中状态基本和动态响应及能量分析结果较为一致。在日常生产管理中,加强对坡底和坡底面的监测,并采用必要的风险防控措施手段,降低地震作用带来的边坡失稳风险。

[参考文献]

[1] 宋卫东,王佐成,宫东峰,等. 紫木垌金矿露天转地下开采边坡稳定性数值模拟研究[J]. 黄金,2008,29(11):20-24.

- [2] 徐亮,裴向军,吴景华. 西冲矿山岩质边坡在地震动力作用下失稳机制模拟研究[J]. 黄金,2010,31(5):35-39.
- [3] 彭博,陈玉明,袁利伟. 基于 PFC^{2D} 马鞍山铁矿 2 号露天采场边坡稳定性分析[J]. 黄金,2014,35(12):37-40.
- [4] 郑颖人,叶海林,黄润秋. 地震边坡破坏机制及其破裂面的分析探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(8):1714-1723.
- [5] 郑颖人,叶海林,黄润秋,等. 边坡地震稳定性分析探讨[J]. 地震工程与工程振动,2010,30(2):173-180.
- [6] 陈星,李建林,王家成. 基于 FLAC^{3D} 的边坡地震反应分析[J]. 中国农村水利水电,2010(1):59-62.
- [7] 陈晓利,李杨,洪启宇,等. 地震作用下边坡动力响应的数值模拟研究[J]. 岩石学报,2011,27(6):1899-1908.
- [8] 张江伟,周爱红,迟明杰,等. 边坡地震响应数值模拟中最优边界范围研究[J]. 防灾减灾工程学报,2022,42(1):34-41.
- [9] 叶帅华,时铁磊,龚晓南,等. 框架预应力锚杆加固多级高边坡地震响应数值分析[J]. 岩土工程学报,2018,40(增刊1):153-158.
- [10] 马鹏飞,郭德龙,许文年,等. 内部裂隙对节理岩质边坡失稳影响的数值分析[J]. 安全与环境工程,2023,30(1):128-139.
- [11] 孙铭. 含两组节理裂隙岩质边坡渗流稳定性计算方法[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(8):57-62.
- [12] 郭晓旭,常来山,李振涛. 露天矿裂隙岩体边坡离散单元法模拟分析[J]. 有色金属(矿山部分),2019,71(3):30-33.
- [13] 常远. 露天矿节理岩体高边坡卸荷损伤与能量突变研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2019.
- [14] LI A, LI Y, WU F, et al. Simulation method and application of three-dimensional DFN for rock mass based on monte-carlo technique[J]. Applied Sciences,2022,12(22):11385.
- [15] 姚荣文,张云辉,赵晓彦,等. 岩体裂隙三维可视化新方法及其应用[J]. 地球科学,2022,47(9):3463-3476.
- [16] 蒋水华,陈佳栋,邹宗毅,等. 基于通用椭圆盘模型及 3DEC 实现的节理岩质边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(7):1610-1622.
- [17] 刘铁新,郑俊,刘爱娟,等. 圆盘节理模型的量化评价与优化方法[J]. 中南大学学报(自然科学版),2020,51(10):2917-2924.
- [18] 董启暖. El-Centro 地震波作用下的金属滑移隔震支座系统减震性能分析[D]. 济南:山东大学,2011.

Numerical simulation study on the stability of jointed rock slopes in open-pit mines under seismic action

Xie Renqing, Liu Mingchun, Jiang Haitao, Wei Xikang, Chen Zhibin

(Fujian Geotechnical Engineering Investigation and Research Institute Co., Ltd.)

Abstract: To investigate the stability of jointed slopes under seismic action, a random joint fracture network model was established using the Monte Carlo method. The discrete element program 3DEC was utilized to conduct a numerical simulation study on the stability of an open-pit mine slope under seismic action. The results indicate that under seismic action, the vibration intensity and displacement at the bottom of the slope are significantly stronger than those at the top. The joint fractures within the slope have a notable attenuating effect on the energy of seismic waves. The bottom of the slope primarily exhibits a shear failure mode, indicating the need to reinforce the seismic resistance of the slope's bottom structure during routine production.

Keywords: open-pit mining; slope; joint fracture; random joint fracture network; seismic action; numerical simulation; stability