

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.01.004

循环爆破震动下露天矿山反倾层状节理岩质边坡 动力稳定性*

刘红岩¹, 张光雄², 甄一豪¹, 刘强², 马平³, 王福瑛⁴, 樊剑男⁴, 毛烽⁴

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 保利民爆哈密有限公司, 哈密 839000;
3. 北京交科公路勘察设计院有限公司, 北京 100088; 4. 中国建设基础设施有限公司, 北京 100044)

摘要: 针对露天矿山反倾层状节理岩质边坡在循环爆破下的动力响应及累积损伤破坏问题展开数值模拟研究, 首先基于前人模型试验采用3DEC软件建立了露天矿山反倾层状节理岩质边坡数值计算模型, 并利用边坡动力响应、破坏模式及稳定性变化规律等模拟结果与已有模型试验结果进行对比, 验证了数值模型的合理性。其次, 通过参数敏感性分析研究了层面和节理面强度参数(即粘聚力和摩擦角)对边坡永久位移及稳定性的影响规律。发现监测点位移随着循环爆破次数的增加而增加, 并在边坡发生破坏时出现陡升现象; 随着层面和节理面强度的增加, 监测点位移减小, 边坡稳定系数增加。而随着循环爆破次数的增加, 监测点位移基本呈波动式增加, 边坡稳定系数则逐渐减小。该研究成果可为循环爆破作用下露天矿山反倾层状节理岩质边坡的稳定性评价提供理论支撑。

关键词: 循环爆破; 反倾层状岩质边坡; PGA; 永久位移; 边坡稳定性系数; 数值模拟

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)01-0029-09

Dynamic Stability of Open-pit Rock Slopes with Anti-dip Layered Joints under Cyclic Blasting Vibrations

LIU Hong-yan¹, ZHANG Guang-xiong², ZHEN Yi-hao¹, LIU Qiang²,
MA Ping³, WANG Fu-ying⁴, FAN Jian-nan⁴, MAO Feng⁴

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing),
Beijing 100083, China; 2. Poly Explosive Hami Co., Ltd., Hami 839000, China;
3. RIOH Transport Consultants Ltd., Beijing 100088, China;
4. China Construction Infrastructure Construction Co., Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: A numerical simulation study is performed to investigate the dynamic response and cumulative damage failure mechanisms of an anti-dip layered jointed rock slope in an open-pit mine subjected to cyclic blasting vibrations. First of all, a numerical model of the anti-dip layered jointed rock slope in the open-pit mine is established using the 3DEC code, building upon prior physical model tests. The simulated dynamic response, failure modes, and slope evolution are compared with experimental results to validate the numerical model's accuracy. Subsequently, a

收稿日期 (Date of reception): 2025-08-28

网络首发日期 (Published online): 2025-10-20

作者简介: 刘红岩(1975-), 男, 河南扶沟人, 博士、教授, 主要从事岩土工程方面的教学与科研工作, (E-mail) lhyan1204@126.com。

基金项目: 新疆维吾尔自治区“天池英才”领军人才计划项目(2023); 巴里坤科技计划项目(2025); 中建基础科技研发课题(CSCIC-2025-KT-5); 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(2024ZD1004106)

About the author: LIU Hong-yan (1975-), male, born in Fugou city, Henan province, Ph. D, professor, doctoral supervisor, mainly engaged in geotechnical engineering teaching and research, (E-mail) lhyan1204@126.com.

Fund Programs: Xinjiang Uygur Autonomous Region ‘Tianchi Talents’ Leading Talent Program (Project No. 2023), Balikan Science and Technology Plan of China (Project No. 2025), Research and Development Item of China Construction Infrastructure Construction Co., Ltd. (Project No. CSCIC-2025-KT-5), Deep Earth Probe and Mineral Resources Exploration-National Science and Technology Major Project (Project No. 2024ZD1004106)

sensitivity analysis is conducted to examine the effects of bedding and joint surface strength parameters (i. e., cohesion and friction angle) on the slope's permanent displacement and stability. The results indicate that the displacement of monitoring points increases progressively with the number of cyclic blasting events, with a sharp surge upon slope failure. Furthermore, higher bedding and joint surface strength parameters lead to reduced displacement and an increased slope stability coefficient. However, as the number of cyclic blasting events increases, the displacement of monitoring points shows an upward trend, while the stability coefficient gradually declines. These findings offer valuable theoretical insights for the design and construction of anti-dip layered jointed rock slopes subjected to cyclic blasting.

Key words: cyclic dynamic load; rock slopes with anti-dip layered joints; PGA; permanent displacement; slope stability coefficient; numerical simulation

露天矿山日复一日的循环爆破施工所产生的爆破震动对其矿坑边坡的累积损伤及稳定性降低是露天矿山在进行爆破设计及边坡稳定性评价时必须面对的问题^[1-3]。

Dong 等基于循环动载下结构面的剪切特性提出了一种考虑结构面性能劣化的循环动载下岩质边坡永久位移计算方法^[4]。Yang 等以白鹤滩水电站高边坡开挖为例^[5],研究了循环台阶爆破对边坡的累积损伤效应,认为在多次爆破作用下,岩体将产生累积损伤,在累积损伤区形成边坡滑移面,导致局部滑坡发生。靳玉娟等首先通过声波测试技术研究了多次爆破对边坡岩体的累积损伤效应^[6],而后采用 FLAC 对多次爆破作用下露天矿山边坡稳定性进行了分析,并提出了相应的加固方案。叶宗昂等利用 PFC 软件和 Midas GTS 软件研究发现多次爆破作用下露天矿山边坡的累积损伤呈近似指数型下降^[7],而每次爆破动荷载使边坡安全系数降低 16.2% ~ 30.3%。杨忠平等基于振动台实验^[8],结合 UDEC 离散元软件,研究了顺倾和反倾岩质边坡在反复微小地震作用下的累积损伤和两种典型边坡的破坏模式。刘新荣等基于振动台实验和三峡库区层状岩质边坡概化模型^[9],利用 UDEC 离散元软件研究了其在频繁微小地震扰动作用下的稳定性变化规律,并得出缓倾、中倾、陡倾和反倾层状岩质边坡在频繁微小地震作用下的破坏特征。李屹等采用 FLAC^{3D} 软件对白马铁矿及坪采东帮边坡在循环爆破作用下的累积位移进行计算^[10],发现爆破振动次数与边坡累积位移呈正相关。刘新荣等通过振动台实验发现水平层状岩质边坡在反复微震和强震作用下累积损伤曲线的三个阶段^[11]:初始损伤阶段、细观裂纹扩展阶段、宏观裂缝扩展阶段。费鸿禄等等依据现场测试研究了边坡在多次爆破下的累积损伤^[12],发现多次爆破造成的累积损伤是边坡失稳的主要原因,并据此建立了相应的岩体累积损伤模型。王智德等基于云南某顺层岩质边坡进行现场爆破试验^[13,14],得出边坡累积损伤速率与振动波的速度有关,得出单

次和多次起爆下爆破药量与损伤范围的关系。凡耀镔等采用 3DEC 软件对循环振动下顺层岩质边坡的渐进破坏规律进行了研究^[15],并讨论了层面倾角及强度参数对边坡累积损伤及稳定性的影响。刘康琦等基于 FLAC^{3D} 软件的二次开发^[16],研究了循环爆破荷载下锁固型岩质边坡的累积损伤机制及稳定性演化规律。

总之,可以看出目前很多学者已对循环爆破震动下露天矿山岩质边坡动力响应、损伤累积及稳定性演化规律进行了较为深入系统的研究,并取得了丰硕的研究成果。但是由于岩质边坡类型较多,且动载形式亦比较复杂,目前的研究未能很好地全面考虑。为此,本研究重点针对反倾层状节理岩质边坡进行研究,重点探讨循环爆破下层面及节理面强度参数对边坡位移及稳定性演化的影响规律,进而为该类边坡在循环爆破震动下的稳定性评估及灾害预防提供技术支撑。

1 反倾层状节理岩质边坡数值模型

1.1 数值模型的建立

由于受到层面与节理组合的切割作用,反倾层状节理岩质边坡通常破碎为离散块状,在动载下很容易沿层面或节理面发生松动、滑落,属于典型的非连续破坏问题,为此采用离散元软件 3DEC 进行模拟分析。

为了验证数值模型的合理性,这里首先以杨忠平等振动台模型试验为基础建立数值模型^[8],该模型试验以三峡库区河谷两岸滑坡作为研究,对反倾层状倾角为 45°的节理化岩质边坡进行重复震动,以研究边坡的动力响应及破坏模式。

为了保证数值模拟结果能够与试验结果进行对比,这里完全按照爆破试验模型尺寸及材料参数建立数值计算模型,即边坡模型几何尺寸及相应的数值模型如图 1 所示,坡高 22.9 m,坡角 60°,设置底座高度 6.87 m,岩层厚度 1 m,层面倾角为反倾层面角 45°,节理长度与间距均为 1 m,节理垂直于层理。岩石本构模型采用 Mohr-Coulomb 理想弹塑性模型,

节理面和层面采用接触-库伦滑动模型。岩石物理力学参数为:密度 2500 kg/m^3 、弹性模量 4.2 GPa 、泊松比 0.30 、抗拉强度 2 MPa 、粘聚力 4.0 MPa 、内摩擦角 41.8° 。层理面参数为:粘聚力 60 kPa 、摩擦

角 32° 、法向及切向刚度分别为 12 GPa/m 和 10 GPa/m 。节理面参数为:粘聚力 12 kPa 、摩擦角 20° 、法向及切向刚度分别为 10 GPa/m 和 8 GPa/m 。

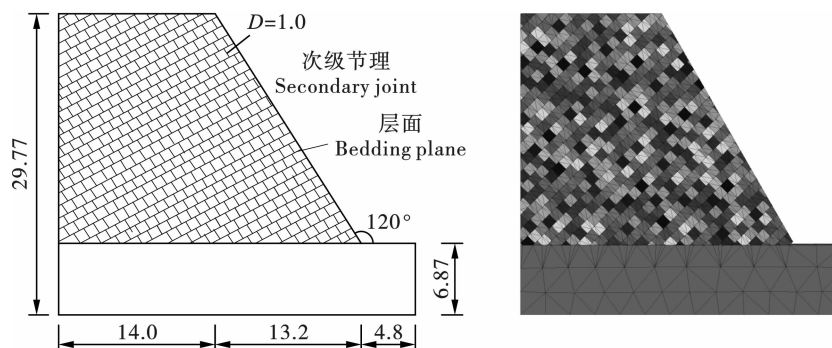


图 1 边坡模型几何及数值模型(单位:m)

Fig. 1 The slope geometry and numerical model(unit:m)

在动力分析中,震动波的传播受限于网格尺寸,综合考虑材料特性及计算机容量,取计算单元尺寸为 1 m 。阻尼设置为局部阻尼,根据相关学者的研究成果^[15],取阻尼系数为 0.05 。

模型边界条件为:模型底座设置为固定边界,模型左右两侧均为吸收边界(采用 40 mm 厚泡沫板以吸收边界处的动载波),模型上边坡和右侧面均为自由边界。通过振动台由模型底部输入 X 方向的正弦波($\text{PGA} = 0.04 \text{ g}$, 频率 $f = 30 \text{ Hz}$)。

1.2 模拟结果验证

1.2.1 动力响应对比分析

边坡动力响应指边坡在外力作用下的加速度、速度和位移等动态变化规律,边坡失稳破坏最重要的因素是由加速度产生的震动惯性力。因此,为便于计算加速度动力响应规律,选取峰值加速度 PGA (Peak Ground Acceleration) 放大系数(即边坡某点处的 PGA 与输入动载波的 PGA 之比)为指标进行分析。

在模型底部 X 方向输入正弦波($\text{PGA} = 0.04 \text{ g}$, 频率 $f = 30 \text{ Hz}$),坡面垂直方向、坡内垂直方向和坡内水平方向的 PGA 放大系数规律如图 2 所示。其中 $H(22.91 \text{ m})$ 为坡底到坡顶的高度, h 为监测点距坡底高度, h/H 为监测点相对高程,比值越大距离坡顶越近; B 为坡顶宽度, b 为监测点到坡面水平距离, b/B 为相对宽度,比值越大距离坡面越远,用坡高 $2/3H$ 处的监测点表示 PGA 放大系数随相对宽度的变化规律。

如图 2 所示,在坡面垂直方向上, PGA 放大系数与相对高程呈非线性正相关,即相对高程越大,

PGA 放大系数越大,4 条线段呈现出越来越急剧的变化规律,距离坡肩越近, PGA 放大系数越大,在坡肩处最为剧烈,达到最大值;在坡内垂直方向上呈现与坡面相似规律, PGA 放大系数随着相对高程的增加而增大,在坡顶处最为剧烈,达到最大值;在同一高程位置,坡内水平方向,距离坡面越近, PGA 放大系数越大,在坡面处达到最大值。因此, PGA 放大系数不但在垂直方向上出现放大效应,即“高程效应”,而且在坡内水平方向上,亦表现出趋向临空面的放大现象,即“趋表效应”,这与目前的研究结果是一致的^[15]。

同时数值模拟结果与振动台模型试验结果也较为一致,说明了数值模型的合理性。

1.2.2 边坡破坏过程分析

如图 3 所示,随着动载作用次数的增加,反倾岩质边坡的损伤不断累积,在多次震动作用下反倾岩质边坡的失稳破坏过程分为 3 个阶段:坡面及坡角开裂阶段、坡面中上部裂缝形成及坡面块体掉落阶段和圆弧破坏面形成阶段。首先是坡面及坡肩开裂阶段:随着震动次数的增加,由于坡体的动力响应非常强烈,坡面与坡肩的块体出现局部的崩落。其次,是坡面中上部裂缝形成及坡面块体掉落阶段:随着震动次数的持续增加,岩质边坡损伤不断累积,坡面与坡肩的局部块体崩落导致节理和层面不断开裂形成裂缝。最后,是圆弧破坏面形成阶段:随着坡体中上部块体的崩落和裂缝的形成,裂隙继续沿节理向坡体内部扩展,中部岩块开始掉落导致坡体上部的岩体失去支撑,上部岩体的永久位移快速增加,造成上部岩体的逐层崩塌破坏,最终形成圆弧破坏面,造

成边坡失稳破坏。上述破坏过程模拟结果与试验结

果基本一致^[8],说明该数值模型是合理的。

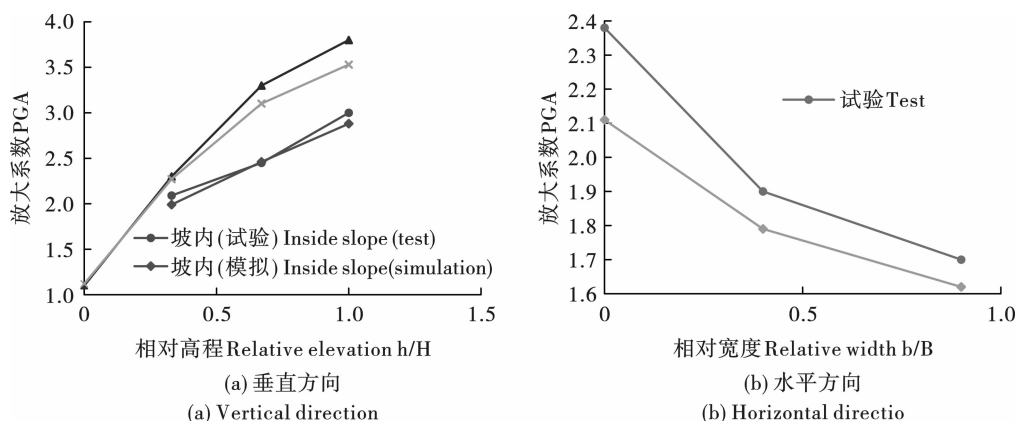


图 2 PGA 放大系数对比

Fig. 2 Comparison of the PGA amplified coefficient

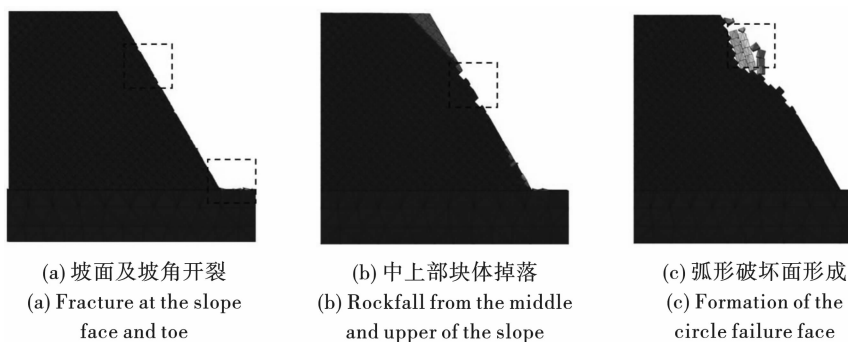


图 3 边坡破坏过程对比分析

Fig. 3 Comparison of the slope failure process

1.2.3 边坡稳定性分析

岩质边坡动力稳定性分析方法主要有动力稳定性系数法和 Newmark 法,动力稳定性系数法虽然可以给出稳定性系数,但临界状态判别标准存在争议,Newmark 法以边坡永久位移作为评价指标,但缺乏统一的破坏标准且无法进行稳定性变化进行判别^[17-20]。本文采用强度折减法计算边坡稳定性系数和监测坡面永久位移两种方法来研究多次动载下反倾岩质边坡稳定性变化规律。

首先采用强度折减法计算如前所述的正弦波每施加 100 次后的稳定性系数,结果如图 4 所示,即随着动载波加载次数的增加,边坡稳定性系数逐渐降低,即由最初的 15.68,到动载作用次数 1492 次时下降到 1,边坡开始发生破坏。

其次,采用永久位移法分析动载作用导致边坡产生的累积永久位移。随着动载作用次数的增加,边坡损伤不断累积,裂隙不断扩展,会首先导致坡体产生不可恢复的永久位移。一般情况下,当动载停止时永久位移会基本保持不变,若在动载加载过程中出现陡升拐点,且对应的边坡稳定性系数小于 1,

此时可判定边坡已发生失稳破坏。

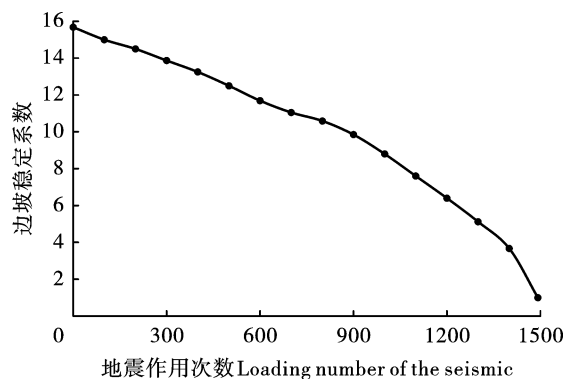


图 4 稳定性系数变化规律

Fig. 4 The variation law of the stability coefficient

采用在坡面设置 $A_1 \sim A_5$ 五个监测点记录动载过程中水平方向上的累积永久位移来研究边坡稳定性变化规律,监测点位移一般是随着动载作用次数的增加缓慢增加,在发生破坏时会出现陡升。

坡表监测点位移变化曲线如图 5 所示, A_1 监测点水平位移在 200 次动载作用时升至 8.3 mm,而后快速回落至 2.6 mm,在 800 次动载作用后快速升至

5.9 mm,最后历经 2000 次动载作用后位移为 8.9 mm; A_2 监测点水平位移在动载作用开始快速升至 6.2 mm,而后位移出现震荡,在动载作用 620 次时位移快速升至 13.6 mm,之后缓慢变化,在动载作用 1492 次时位移发生陡升; A_3 监测点水平位移从开始到 380 次动载作用时快速升值 12 mm,而后缓慢变化,在动载作用至 1870 次时位移陡升; A_4 监测点水平位移从开始到 200 次动载作用时快速升至 5 mm,后续无明显变化; A_5 监测点水平位移几乎无变化,故选择 A_2 监测点位移变化曲线作为本文中监测点水平位移数据分析。

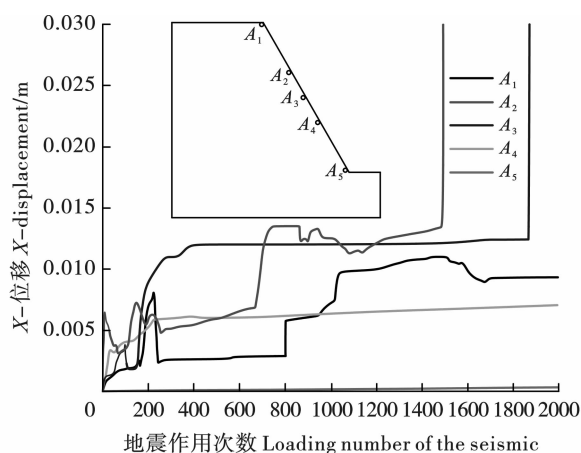


图5 坡表监测点水平位移

Fig. 5 The horizontal displacement of the measuring points on the slope surface

2 层理面强度参数对边坡动力稳定性影响的参数敏感性分析

对于层状边坡而言,岩层面是结构和强度的软弱面,边坡易发生沿层面的破坏,为此下面采用参数敏感性分析重点探究层面强度即粘聚力和摩擦角对边坡动力响应影响规律。取动载波为 $\text{PGA} = 0.16 \text{ g}$ 、持续时间 $t = 10 \text{ s}$ 、 $f = 30 \text{ Hz}$ 的正弦波。这里需要说明的是之所以选择该正弦波为加载波,一方面是与前述章节选取的加载波保持一致,另一方面是通过试算发现,如果采用前述的 $\text{PGA} = 0.04 \text{ g}$,边坡发生破坏的循环加载次数太多,导致计算工作量太大。为此,进行试算,这里采用 $\text{PGA} = 0.16 \text{ g}$ 。同时由于爆破地震波是随着爆心距的增加而逐步衰减的,因此在爆心距较小时,其震动峰值加速度是可以达到 0.16 g ,甚至更高。如朱大鹏等在隧道爆破中测得掌子面一定距离处的质点震动峰值加速度^[21],可达到 200.23 m/s^2 。

2.1 层面粘聚力的影响规律

取岩层面粘聚力分别为 30 kPa、40 kPa、50 kPa 和 60 kPa,其他参数同前,分别研究边坡位移及稳定性的变化规律。

2.1.1 边坡位移变化规律

采用监测点 A_2 的位移及边坡稳定性系数研究层面粘聚力对边坡稳定性的影响规律,由如图 6 所示结果可以看出:①随着层面粘聚力的增加,监测点位移随着动载作用次数增加的速度逐渐变缓,且位移增加量也逐渐减小。同时导致监测点位移出现陡增的动载作用次数亦随之增加;②由于层面粘聚力对监测点位移的影响规律基本一致,因此这里就以层面粘聚力为 30 kPa 的情况为例进行说明。边坡监测点位移随动载作用次数的增加而增加,当动载作用次数由 40 次增加到 102 次时,监测点 X 方向位移由 1 mm 快速增加至 17 mm;当动载作用次数由 103 次增加到 147 次时,监测点 X 方向位移由 17 mm 快速回落到 2 mm,之后进行缓慢增加,当动载作用至 450 余次时,监测点位移急速增加,位移出现陡升,此时边坡开始发生破坏。③总之,监测点位移变化随着动载作用次数不断增加,动载作用次数越多,位移变化越显著,累积损伤到一定程度,边坡发生破坏;层面粘聚力越小,边坡失稳破坏时动载作用次数越少。

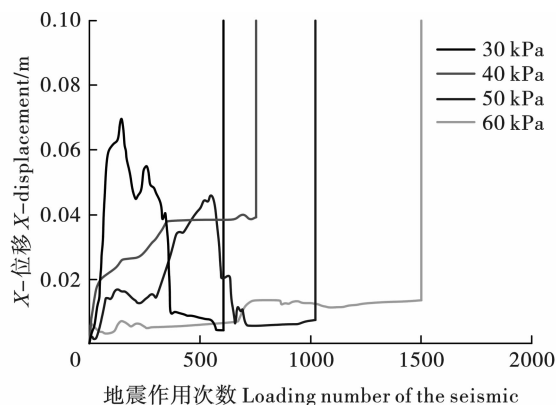


图6 层面粘聚力对监测点 A_2 水平方向位移影响规律

Fig. 6 Effect law of the layer cohesion on the horizontal displacement of the measuring point A_2

2.1.2 边坡稳定性变化规律

不同层面粘聚力的反倾岩质边坡模型稳定性系数随动载作用次数变化规律如图 7 所示,可以看出:①总体而言,4 种工况下,随着动载作用次数的增加,坡内损伤不断累积,稳定性系数均之减小,且随着层面粘聚力的减小,稳定性系数逐渐降低,边坡发生破坏时所需动载作用次数越少,其中层面粘聚力

为 30 kPa 的数值模型破坏时动载作用次数最小。②以层面粘聚力 30 kPa 为例进行说明,稳定性系数从开始的 10.31,在历经 450 次动载时下降到 1,边坡发生破坏。

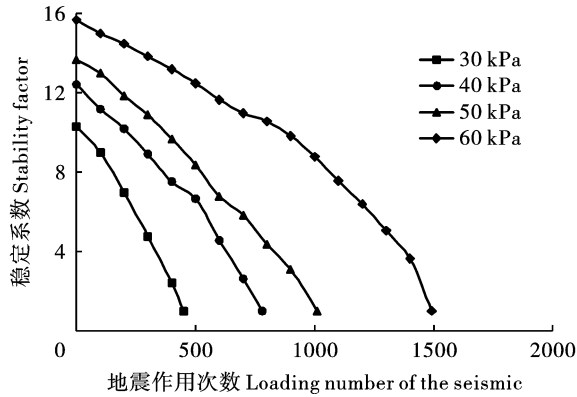


图 7 层面粘聚力对边坡稳定性影响规律

Fig. 7 Effect law of the layer cohesion on slope stability

2.2 层面摩擦角的影响规律

取岩层面摩擦角分别为 22° 、 27° 、 32° 和 37° ,其他参数同前,分别研究边坡位移和稳定性的变化规律。

2.2.1 边坡位移变化规律

采用监测点 A_2 的位移及边坡稳定性系数研究层面摩擦角对边坡稳定性的影响规律,由如图 8 所示结果可以看出:①随着层面摩擦角的增加,监测点位移随着动载作用次数增加的速度逐渐变缓,且位移增加量也逐渐减小。同时导致监测点位移出现陡增的动载作用次数亦随之增加;②由于层面摩擦角对监测点位移的影响规律基本一致,因此这里就以层面摩擦角为 22° 时的工况为例进行说明。随着动载作用次数的增加,边坡监测点 X 方向累积位移在缓慢增加,在动载 50 次到 80 次监测点位移发生 8 mm 范围内的震荡,之后呈现脉冲型震荡变化,在动载 300 次到 380 次监测点位移发生 13.2 mm 范围内的震荡,之后呈现脉冲型震荡变化,在历经 597 次动载后,累积位移在 4.9 mm 时边坡发生破坏。③总之,监测点位移变化随着动载作用次数不断增加,动载作用次数越多,位移变化越显著,累积损伤到一定程度,边坡发生破坏,层面摩擦角越小,边坡发生破坏时动载作用次数越少,层面摩擦角为 22° 时边坡发生破坏时动载作用次数越小。

2.2.2 边坡稳定性变化规律

不同层面摩擦角的反倾岩质边坡模型稳定性系数随动载作用次数变化规律如图 9 所示,可以看出:①总体而言,4 种工况下,随着动载作用次数的增

加,坡内损伤不断累积,稳定性系数均之减小,且随着层面摩擦角的减小,稳定性系数逐渐降低,边坡发生破坏时所需动载作用次数越少,其中层面摩擦角为 22° 时的数值模型破坏时动载作用次数最小。②以摩擦角为 22° 为例进行说明,稳定性系数变化趋势为先快后慢再快,稳定性系数从 9.21 在历经 597 次动载作用时下降到 1,边坡在此时发生破坏。

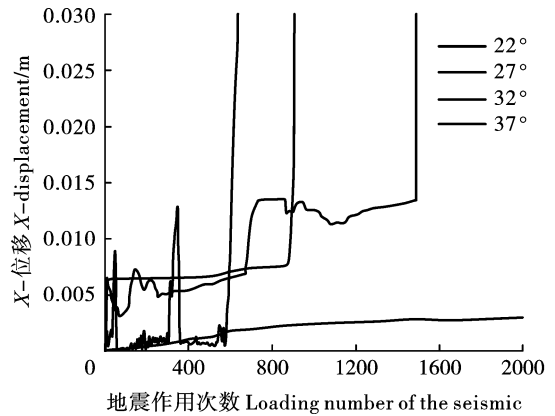


图 8 层面摩擦角对监测点 A_2 水平方向位移影响规律

Fig. 8 Effect law of the layer friction angle on the horizontal displacement of the measuring point A_2

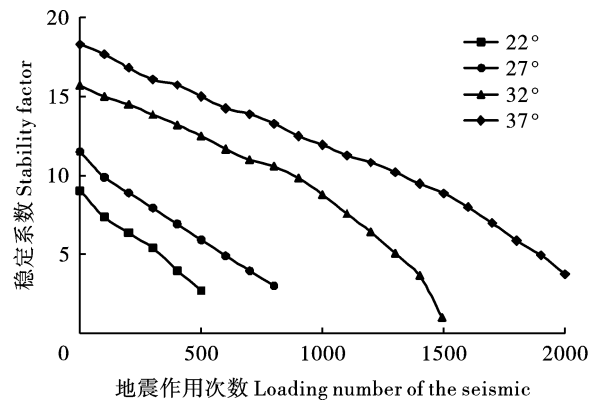


图 9 层面摩擦角边坡稳定性系数的影响规律

Fig. 9 Effect law of the layer friction angle on slope stability

3 节理面强度参数对边坡动力稳定性影响的参数敏感性分析

除层面外,节理面亦是影响边坡动力响应和破坏模式的重要结构弱面,为此下面采用参数敏感性分析重点探究节理面粘聚力和摩擦角对边坡动力响应影响规律。取动载波参数同前。

3.1 节理面粘聚力的影响规律

取节理面粘聚力分别为 6 kPa、8 kPa、10 kPa 和 12 kPa,其他参数同前,分别研究边坡位移和稳定性变化规律。

3.1.1 边坡位移变化规律

采用监测点 A_2 的位移及边坡稳定性系数研究节理面粘聚力对边坡稳定性的影响规律,由如图 10 所示结果可以看出:①随着节理面粘聚力的增加,监测点位移随着动载作用次数增加的速度逐渐变缓,且位移增加量也逐渐减小。同时导致监测点位移出现陡增的动载作用次数亦随之增加;②由于节理面粘聚力对监测点位移的影响规律基本一致,因此这里就以节理面粘聚力为 6 kPa 的情况为例进行说明。此时在动载作用下,边坡监测点的 X 方向位移随着动载作用次数缓慢增加,当作用次数至 244 次时,监测点位移在 5 mm 处陡升,边坡发生破坏。③总之,监测点位移变化随着动载作用次数不断增加,动载作用次数越多,位移变化越显著,累积损伤到一定程度,边坡发生失稳破坏,节理面粘聚力越小,边坡失稳破坏时动载作用次数越小。

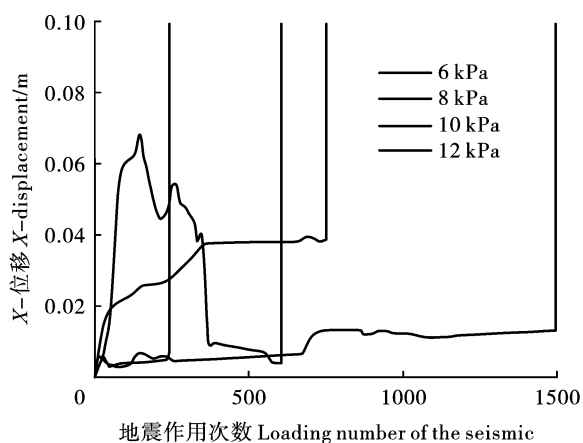


图 10 节理面粘聚力对监测点 A_2 水平方向位移影响规律
Fig. 10 Effect law of the joint cohesion on the horizontal displacement of the measuring point A_2

3.1.2 边坡稳定性变化规律

不同节理面粘聚力的反倾岩质边坡模型稳定性系数随动载作用次数变化规律如图 11 所示,可以看出:①总体而言,4 种工况下,随着动载作用次数的增加,坡内损伤不断累积,稳定性系数均之减小,且随着节理面粘聚力的减小,稳定性系数逐渐降低,边坡发生破坏时所需动载作用次数越少,其中节理面粘聚力为 6 kPa 时的数值模型破坏时动载作用次数最小。②以粘聚力为 6 kPa 为例进行说明,稳定性系数变化趋势为先快后慢再快,稳定性系数从 6.89 在历经 244 次动载时作用时下降到 1,边坡发生破坏。③总之,监测点位移变化随着动载作用次数不断增加,动载作用次数越多,位移变化越显著,累积损伤到一定程度,边坡发生失稳破坏,节理面粘聚力越小,边坡失稳破坏时的动载作用次数越小。

3.2 节理面摩擦角的影响规律

取节理面摩擦角分别为 10° 、 15° 、 20° 和 25° ,其

他参数同前,分别研究边坡位移和稳定性变化规律。

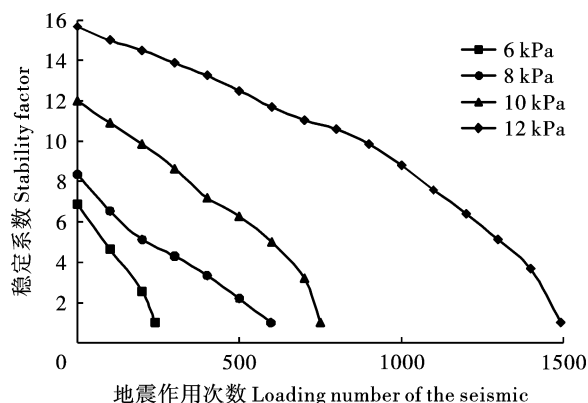


图 11 节理面粘聚力对边坡稳定性影响规律

Fig. 11 Effect law of the joint cohesion on slope stability

3.2.1 边坡位移变化规律

采用监测点 A_2 的位移及边坡稳定性系数研究节理面粘聚力对边坡稳定性的影响规律,由如图 12 所示结果可以看出:①随着节理面摩擦角的增加,监测点位移随着动载作用次数增加的速度逐渐变缓,且位移增加量也逐渐减小。同时导致监测点位移出现陡增的动载作用次数亦随之增加;②由于节理面摩擦角对监测点位移的影响规律基本一致,因此这里就以节理面摩擦角为 10° 的情况为例进行说明。随着动载作用次数的增加,边坡监测点 X 方向累积位移在缓慢增加,在动载作用次数至 168 次时,边坡检测点位移升至 8 mm 时出现陡升。③总之,监测点位移变化随着动载作用次数不断增加,动载作用次数越多,位移变化越显著,累积损伤到一定程度,边坡发生失稳破坏,节理面摩擦角越小,边坡失稳破坏时的动载作用次数越小。

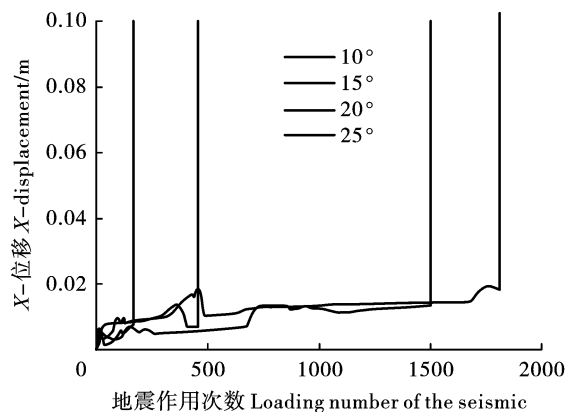


图 12 节理面摩擦角对监测点 A_2 水平方向位移影响规律

Fig. 12 Effect law of the joint friction angle on the horizontal displacement of the measuring point A_2

3.2.2 边坡稳定性变化规律

不同节理面摩擦角的反倾岩质边坡模型稳定性系数随动载作用次数变化规律如图 13 所示,可以看出:①总体而言,4 种工况下,随着动载作用次数的增加,坡内损伤不断累积,稳定性系数均之减小,且随着节理面摩擦角的减小,稳定性系数逐渐降低,边坡发生破坏时所需动载作用次数越少,其中节理面摩擦角为 10° 时的数值模型破坏时动载作用次数最小。②以摩擦角为 10° 的工况为例进行说明,稳定性系数从最初的 3.92,在历经 168 次动载作用后下降到 1,边坡发生破坏。

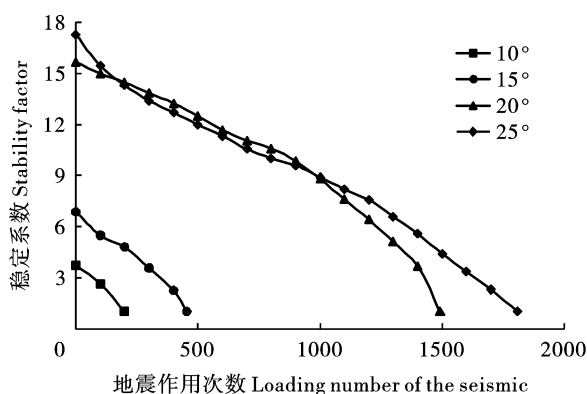


图 13 节理面摩擦角对边坡稳定性影响规律

Fig. 13 Effect law of the joint friction angle on slope stability

4 结论

(1)首先基于 3DEC 软件建立了反倾层状节理岩质边坡数值模型,并通过边坡动力响应、破坏模式及稳定性变化规律等模拟结果与已有振动台模型试验结果的对比,验证了该模型的合理性。

(2)通过参数敏感性分析分别研究了层面和节理面强度参数对边坡位移及稳定性的变化规律。结果表明:①监测点位移随着动载作用次数的增加而增加,动载作用次数越多,位移增加越显著,并在边坡发生破坏时出现陡升现象;且随着层面和节理面强度的增加,监测点位移减小,导致边坡失稳破坏的动载作用次数增加。②边坡稳定性系数随动载作用次数的增加而逐渐减小。且随着层面和节理面强度的增加,边坡稳定性系数增加。

(3)本研究结果可为露天矿山边坡在循环爆破震动下的破坏研究及实际矿山爆破设计提供参考。但是由于本研究主要是采用数值方法,其计算结果的合理性仍需通过模型试验、现场实测等结果进行验证,这也是今后研究的一个主要内容。

参考文献 (References)

- [1] 姜聚宇,邢玉娇,王来贵,等. 循环爆破振动作用下含断层边坡稳定性计算方法[J/OL]. 煤炭科学技术:1-14. [2025. 9. 20]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2402.TD.20250318.1613.003>.
- [1] JIANG Ju-yu, XING Yu-jiao, WANG Lai-gui, et al. Calculation of slope stability of fault-containing slopes under the action of cyclic blast vibration [J]. Coal Science and Technology:1-14. [2025. 9. 20]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2402.TD.20250318.1613.003>. (in Chinese)
- [2] 董源,胡英国,刘美山,等. 均质岩石高边坡开挖爆破累积损伤的演化机制研究[J]. 岩土力学, 2025, 46(9):2929-2942.
- [2] DONG Yuan, HU Ying-guo, LIU Mei-shan, et al. Cumulative damage evolution mechanism in homogeneous rock high slopes induced by excavation blasting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(9):2929-2942. (in Chinese)
- [3] 王子一,吴桂义,罗畅,等. 多次爆破振动下陡边坡振动响应及稳定性研究[J]. 爆破, 2023, 40(3):158-169, 176.
- [3] WANG Zi-yi, WU Gui-yi, LUO Chang, et al. Study on vibration response and stability of steep slope under multiple blasting vibrations[J]. Blasting, 2023, 40(3):158-169, 176. (in Chinese)
- [4] DONG Shan, FENG Wen-kai, YIN Yi-bo, et al. Calculating the permanent displacement of a rock slope based on the shear characteristics of a structural plane under cyclic loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(10):4583-4598.
- [5] YANG Feng, HUANG Zhi-wei, DAI Zhi-ying, et al. Stability analysis of multi-stage blasting rock slopes based on the Hoek-Brown criterion considering cumulative disturbance[J]. Engineering Geology, 2025, 352:108077.
- [6] 靳玉娟,王嘉琪. 考虑损伤累积效应的矿山边坡稳定性分析及加固方案研究[J]. 金属矿山, 2023(10):214-220.
- [6] JIN Yu-juan, WANG Jia-qi. Study on the stability analysis and reinforcement scheme of mine slope considering damage accumulation effect[J]. Metal Mine, 2023(10):214-220. (in Chinese)
- [7] 叶宗昂,谢建斌,李志源,等. 累积爆破作用下露天矿山边坡稳定性变化研究[J]. 工业安全与环保, 2024, 50(10):31-35, 54.
- [7] YE Zong-ang, XIE Jian-bin, LI Zhi-yuan, et al. Study of open-pit mining slope stability under multiple blasting action[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2024, 50(10):31-35, 54. (in Chinese)
- [8] 杨忠平,刘树林,刘永权,等. 反复微震作用下顺层及

- 反倾岩质边坡的动力稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2018,40(7):1277-1286.
- [8] YANG Zhong-ping, LIU Shu-lin, LIU Yong-quan, et al. Dynamic stability analysis of bedding and toppling rock slopes under repeated micro-seismic action[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018,40(7):1277-1286. (in Chinese)
- [9] 刘新荣,何春梅,刘树林,等. 高频次微小地震下顺倾软硬互层边坡动力稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2019,41(3):430-438.
- [9] LIU Xin-rong, HE Chun-mei, LIU Shu-lin, et al. Dynamic stability of slopes with interbeddings of soft and hard layers under high-frequency microseism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019,41(3):430-438. (in Chinese)
- [10] 李屹,徐继业,冷建勇,等. 循环爆破震动下边坡变形累积效应研究[J]. 矿业研究与开发, 2024,44(3):49-56.
- [10] LI Yi, XU Ji-ye, LENG Jian-yong, et al. Study on cumulative effect of slope deformation under cyclic blasting vibration[J]. Mining Research and Development, 2024,44(3):49-56. (in Chinese)
- [11] 刘新荣,邓志云,刘永权,等. 地震作用下水平层状岩质边坡累积损伤与破坏模式研究[J]. 岩土力学, 2019,40(7):2507-2516.
- [11] LIU Xin-rong, DENG Zhi-yun, LIU Yong-quan, et al. Study of cumulative damage and failure mode of horizontal layered rock slope subjected to seismic loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019,40(7):2507-2516. (in Chinese)
- [12] 费鸿禄,苑俊华. 基于爆破累积损伤的边坡稳定性变化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016,35(S2):3868-3877.
- [12] FEI Hong-lu, YUAN Jun-hua. Study of slope stability based on blasting cumulative damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016,35(S2):3868-3877. (in Chinese)
- [13] 王智德,马祖遥. 爆破荷载作用下顺层岩质边坡的损伤特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2018,28(11):72-79.
- [13] WANG Zhi-de, MA Zu-yao. Research on damage characteristics of rock bedding under blasting load[J]. China Safety Science Journal, 2018,28(11):72-79. (in Chinese)
- [14] 王智德,夏元友,周雄,等. 顺层岩质边坡爆破的振动控制及损伤特性[J]. 爆炸与冲击, 2017,37(1):27-36.
- [14] WANG Zhi-de, XIA Yuan-you, ZHOU Xiong, et al. Blasting vibration control and damage characteristics of bedding rock slopes[J]. Explosion and Shock Waves, 2017,37(1):27-36. (in Chinese)
- [15] 凡耀宾,李晓鹏,张光雄,等. 循环振动下岩质边坡渐进性破坏规律的数值模拟[J]. 矿业研究与开发, 2023,43(3):83-91.
- [15] FAN Yao-bin, LI Xiao-peng, ZHANG Guang-xiong, et al. Numerical simulation of progressive failure law of rock slope under cyclic vibration[J]. Mining Research and Development, 2023,43(3):83-91. (in Chinese)
- [16] 刘康琦,刘红岩,霍泽楠,等. 循环爆破作用下锁固型岩质边坡的累积损伤效应及稳定性分析[J]. 爆炸与冲击, 2025,45(4):045202.
- [16] LIU Kang-qi, LIU Hong-yan, HUO Zen-an, et al. Cumulative damage effect and stability analysis of the rock slope with a locked segment under cyclic blasting[J]. Explosion and Shock Waves, 2025,45(4):045202. (in Chinese)
- [17] DAI Jin-hao, YANG Jian-hua, YAO Chi, et al. Study on the mechanism of displacement mutation for jointed rock slopes during blasting excavation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022,150:105032.
- [18] HU Ying-guo, YANG Zhao-wei, HUANG Shu-ling, et al. A new safety control method of blasting excavation in high rock slope with joints[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020,53(7):3015-3029.
- [19] 刘康琦,刘红岩. 地震作用下土石混合体边坡稳定性分析研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022,42(1):224-230.
- [19] LIU Kang-qi, LIU Hong-yan. Stability analysis of soil-rock mixture slope under earthquake[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022,42(1):224-230. (in Chinese)
- [20] JIN Jian, LIN Zhuo-jia, LI Si-kan, et al. Coupled Newmark seismic displacement analysis of cohesive soil slopes considering nonlinear soil dynamics and post-slip geometry changes[J]. Computers and Geotechnics, 2024,174:106628.
- [21] 朱大鹏,谢昌建,许红波. 爆破振动下隧道进口段岩堆动力响应实测研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020,16(增2):875-879,924.
- [21] ZHU Da-peng, XIE Chang-jian, XU Hong-bo. Experimental study on dynamic response of surrounding rock of entrance section of tunnel under blasting vibration[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020,16(S2):875-879,924. (in Chinese)