

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.01.008

动态卸荷诱发节理岩体松动的数值模拟*

向晓锐¹, 吴亮^{1,2}, 陈洋¹

(1. 武汉科技大学理学院 中铁港航-武汉科技大学爆破技术研究中心, 武汉 430065;
2. 水能资源利用关键技术湖南省重点实验室, 长沙 410014)

摘要: 高地应力条件下岩体开挖面临着初始地应力动态卸荷诱发的节理松动问题。为了提出控制节理松动方案, 采用理论与数值模拟方法研究了初始地应力动态卸荷诱发节理松动机理。首先, 将计算模型与简单的初始应力瞬态卸载理论结果进行了对比, 验证了计算模型及其参数的正确性。其次, 采用动力松弛法对地应力初始化, 计算了地应力水平、卸荷路径以及卸荷时长对节理岩体松动的的影响。结果表明: 节理岩体张开位移与卸荷时长成负相关, 与地应力水平成正相关; 相同条件下, 指数型卸荷路径引起的节理岩体刚体位移最大, 三角函数型卸荷次之, 线性卸荷最小。建议工程中通过改善装药结构和孔间距等钻爆参数来增加卸荷时长, 从而有效地控制节理岩体松动效应。

关键词: 节理岩体; 地应力; 动态卸载; 松动变形

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2020)01-0059-06

Numerical Simulation of Jointed Rock Mass Loosing Induced by Dynamic Unloading

XIANG Xiao-rui¹, WU Liang^{1,2}, CHEN Yang¹

(1. Wuhan University of Science and Technology, College of Science, Blasting Technology Research Center, CRPCE-WUST, Wuhan 430065, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Key Technology on Hydropower Development, Changsha 410014, China)

Abstract: The excavation work of rock mass under high ground stress is faced with the problem of joint loosening caused by dynamic unloading. In order to propose a scheme to control the looseness of joints, a combination of theory and numerical simulation was used to explore the mechanism of dynamic unloading induced joint loosening. The formula of joint loose displacement was derived based on elastic wave theory. The dynamic relaxation method was used to initialize the ground stress, and calculate the joint opening distance under different unloading paths, unloading time and ground stress conditions. The results show that the joint opening distance is inversely proportional to the unloading time and proportional to the ground stress level. Under the same conditions, the exponential path unloading causes the largest opening distance, the simple harmonic unloading is the second, and the linear unloading is the smallest. The root cause is still related to the length of unloading. The numerical simulation results are in good agreement with the theoretical results, and the reliability of the numerical simulation results is verified. It is suggested that the drilling blasting parameters such as the charge structure and the hole spacing be extended in the project to extend the unloading time, thereby the joint loosening effect can be controlled effectively.

Key words: jointed rock mass; in-situ stress; dynamic unloading; loose deformation

我国西部地区各类水利水电、铁路桥隧工程往往涉及到高地应力条件下大规模的坝基、高边坡和地下洞室群的岩体爆破开挖工作, 开挖瞬态卸荷引

起节理松动是诱发大规模地质灾害的重要原因。因此, 深部岩体开挖工程中卸荷松动问题是相关领域学者关注的重要问题之一。随着理论研究的深

人和工程监测技术的提高,国内外对于深部岩体开挖卸荷松动问题已经取得了不少进展,例如:Bayisa R等建立了矿山诱发岩体运动的不连续模型^[1],并采用DEM方法模拟了节理岩体的松动变形;Aziznejad S等采用PFC2D模拟了节理岩体在瞬态荷载作用下响应规律^[2];卢文波等研究发现^[3-5]:高应力区岩体开挖卸荷是一个动态卸荷的问题,动态卸荷会导致节理岩体发生张开位移;裴书锋等采用单孔声波、钻孔摄像等原位测试技术,研究了白鹤滩水电站节理玄武岩的开挖卸荷时效松弛特性^[6];王鹏等利用单孔声波法研究了地应力和尺寸效应对节理岩体松动的影 响^[7];王晗等采用离散元 UDEC 模拟了地下洞室柱状节理玄武岩爆破开挖过程,研究发现地应力水平越高,开挖卸荷导致的松动变形范围越大^[8]。

目前对于深部岩体开挖诱发节理岩体松动研究只关注了瞬态卸荷情况(不考虑卸荷持续时间),实际上,岩体初始应力场的卸载需要经历一定时间^[5],而实验难以控制地应力卸载时间。针对上述问题,基于LS-DYNA,采用动力松弛法对模型地应力进行初始化,再结合显式动力分析方法研究卸载路径、卸荷时长和初始应力水平对节理岩体松动影响,并提出有效控制地应力卸荷诱发节理松动方案。

1 计算模型与理论分析

1.1 计算模型

西部某水电站地下厂房处于高地应力条件下,其底层拉槽爆破开挖过程中面临着强烈的地应力卸荷,并引起节理松动^[9]。该地下厂房底层拉槽爆

破开挖的简化模型如图1所示,假定岩体内存在AB和BC两组贯穿正交节理,节理面上粘结强度较低,计算中忽略不计。开挖前轮廓面CD上存在水平初始地应力 σ_0 。一般而言,典型的开挖卸荷路径有三种,如图2所示,曲线1~3分别对应于线性、三角函数型和指数型路径,卸荷函数对应式(1)。

$$\begin{cases} \sigma(t) = \sigma_0 \cdot (1 - \frac{t}{T_s}) \\ \sigma(t) = \sigma_0 \cdot \cos(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{t}{T_s}) \\ \sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{\alpha t}{T_s}} \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期:2019-01-03

作者简介:向晓锐(1993-),男,硕士研究生,主要从事岩石动力学研究,(E-mail)1091638184@qq.com。

通讯作者:吴亮(1980-),男,副教授、博士,主要从事工程爆破与岩石动力学研究,(E-mail)wuliangwust@sina.com。

基金项目:武汉科技大学2018年度研究生创新创业基金项目(JCX201826);国家自然科学基金项目(51479147、51779

式中: T_s 为卸荷持续时间; α 为指数衰减系数, α 取17。

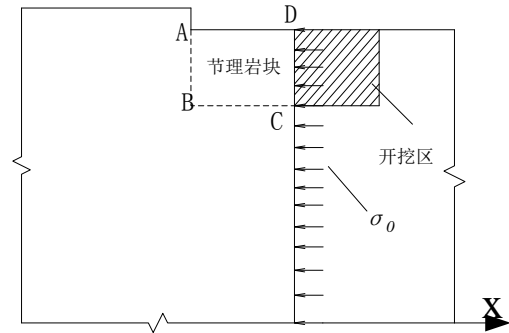


图1 节理岩体开挖卸荷示意图

Fig. 1 Jointed rock mass excavation unload diagram

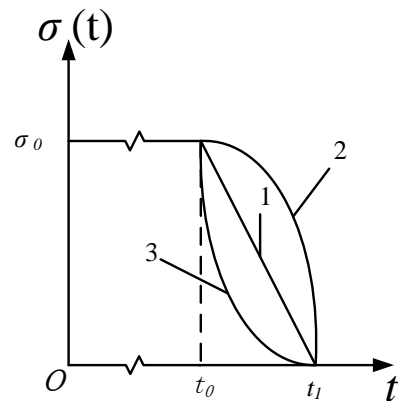


图2 卸荷曲线示意图

Fig. 2 Unloading curve diagram

1.2 理论分析

工程监测资料与研究表明^[10,11],在深部岩体爆破开挖卸荷后,节理岩体除了会产生弹性回复位移(应变位移)外,还会产生刚体位移(节理张开位移),且节理松动以刚体位移为主。根据弹性波理论,开挖卸荷引起的卸载波从CD面向岩体内部传播,该过程的控制方程为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + gf \quad (2)$$

式中: $u(x, t)$ 为距原点距离为 x 的截面在 t 时刻的水平位移; C 为应力波在岩石中的传播速度, $C = \sqrt{E/\rho}$,其中 E 为岩体的弹性模量, ρ 为岩块的密度; g 为重力加速度; f 为摩擦因数。

假设卸荷持续时间为0,即开挖面上的初始应力在一瞬间卸除,根据能量守恒定理^[12]

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_h^2}{E} l = \frac{1}{2} \rho g f \frac{\sigma_h}{E} + \rho g l f \Delta \quad (3)$$

考虑摩擦力和岩体自重作用,节理岩体ABCD初始储存的弹性应变能在动态卸载后,一部分转化

为节理岩体的动能驱使节理岩块运动,一部分用于克服摩擦力做功,直至节理岩块停止运动,该能量全部转换为摩擦力所做的功,由此结合应力波传播控制方程和能量守恒方程求解,得节理岩体张开位移的计算公式为

$$\Delta = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_h^2}{E\rho g f} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_h}{E} \quad (4)$$

式中: Δ 为节理张开位移; σ_h 为初始地应力; l 为节理岩块长度。

根据式(6)计算不同初始应力水平下节理张开位移如图3所示,随着初始应力增大,节理张开位移逐渐增大。并且结合式(4)可知,节理张开位移与初始应力水平成正相关关系。

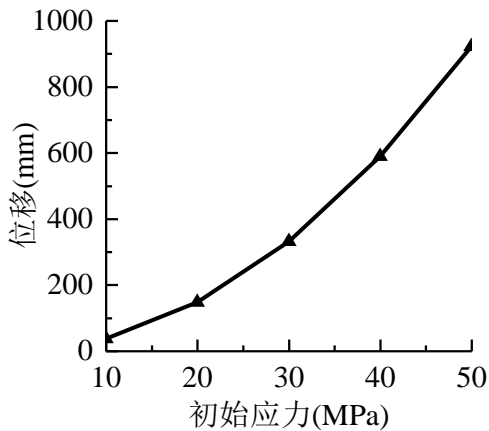


图3 不同初始应力下节理岩块位移理论计算结果

Fig. 3 Theoretical calculation results of joint rock mass displacement under different initial stresses

2 节理岩体动态卸荷松动数值模拟

理论分析可以阐明节理岩体动态卸载松动机理,并能够充分说明初始应力瞬态卸荷过程中,节理岩块会产生刚体位移,导致结构面被拉开,岩体产生松动现象,且计算结果也表明节理张开位移随初始地应力增加而增大。但理论分析基于对实际工程问题的简化与假设,难以应用在复杂的问题上,例如不同卸荷时长与路径。运用LS-DYNA动力松弛求解功能进行应力初始化,再将初始应力按指定卸载曲线卸除,从而模拟节理岩体动态卸载过程,不仅能验证理论分析的准确性,而且能更加深入的了解节理岩体动态卸载松动机理。

2.1 模型建立

根据现有资料建立如图4所示的计算模型^[13],模型考虑了构造应力和岩体自重,其尺寸为30 m×25 m×20 m,开挖后形成2级台阶,拉槽爆破开挖区

宽度为8.0 m。在拉槽爆破区域前存在节理岩块,其尺寸为5 m×5 m×7 m,节理岩块与母岩之间存在贯穿的结构面,在LS-DYNA软件中节理岩体和母岩之间的接触采用自动面面接触;网格划分最小尺寸为0.5 m,模型四周边界设置为无反射边界。岩石采用线弹性材料,节理岩块弹性模量 $E_1=50$ GPa,母岩弹性模量 $E_2=200$ GPa,岩石密度为 $\rho=2700$ kg/m³,泊松比 $\mu=0.2$,节理岩块与母岩接触动摩擦系数 $f=1.0$ 。开挖面上的初始地应力为 σ_0 ,按照图2所示的三种路径卸荷。

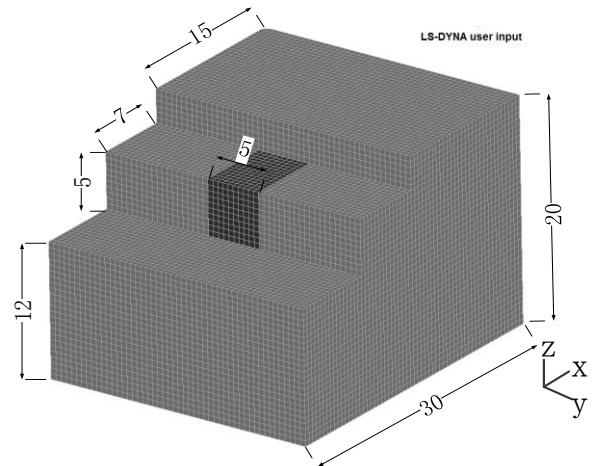


图4 数值模型(单位:m)

Fig. 4 Numerical model (unit: m)

2.2 应力初始化

在初始地应力条件下,岩体开挖动态卸载是一个动、静荷载耦合作用的岩体响应问题。LS-DYNA软件在处理静态应力场时,通常有两种方法:一是采用隐式—显式顺序求解,即先采用隐式求解器计算静态应力场,然后用显式求解器计算动态应力场,但该方式只能用于线弹性初始应力场求解。另一种方式是在显式求解器中采用动力松弛法计算静态应力场,其基本原理是通过人工阻尼消除模型的动能,以达到计算静态应力场的目的,一般需指定一个动能阈值 K_c ,当模型总动能小于该阈值即认为模型达到静平衡状态。本文数值模拟采用第二种方式,其流程如图5所示。

2.3 计算结果及分析

节理岩体卸荷松动程度主要取决于岩石应力释放的快慢、原岩应力的大小与积聚应变能的程度、围岩脆性高低和围岩破坏时岩体能量消耗的大小等因素^[14]。实际工程中,地下厂房所处位置的初始地应力可达10~50 MPa。当开挖装药段长度为3~5 m时,根据文献[5]的估算方法,卸荷持续时间约

在1~10 ms范围。首先采用数值软件模拟了瞬态卸载的情况,即假定卸荷持续时间为0,初始地应力在一瞬间释放,并将数值模拟结果与理论计算结果进行了对比;其次,选取不同卸荷时长、不同卸荷路径和不同初始应力水平作为变量,考察不同因素对节理岩体松动的影响规律。

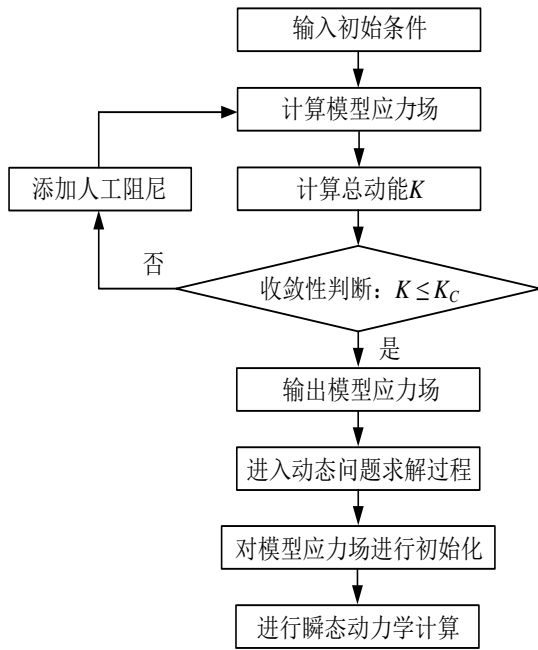


图5 动力松弛实现方法

Fig. 5 Dynamic relaxation realization method

2.3.1 瞬态卸载模拟结果与理论结果对比

为了验证数值模拟计算的正确性,将卸载时间取很短(10⁻⁹s),近似认为是瞬态卸载,取初始应力分别为10 MPa、20 MPa、30 MPa、40 MPa和50 MPa,初始应力卸载后节理位移计算结果见表1。从表1中可以看出数值模拟结果和理论结果基本吻合,但

由于数值模拟中母岩采用线弹性材料,卸载时也释放应变能,因此数值结果比理论结果略大。

2.3.2 不同卸载时长的影响

表1 瞬态卸载节理张开位移

Table1 The opening displacement of joint under transient unloading

初始应力水平/MPa	节理张开位移	
	模拟值/mm	理论计算/mm
10	41.9	36.3
20	151.2	146.7
30	341.7	331.2
40	612.1	589.8
50	930.7	922.4

初始应力σ₀施加在开挖轮廓面上,其大小为20 MPa,方向为X轴方向,卸荷时长t₀分别按8.0 ms、4.0 ms、2.67 ms、2.0 ms和1.6 ms取值。初始应力卸载后,节理岩块向开挖临空面方向运动,即X轴负方向。图6(a)~(c)分别为初始应力线性衰减、三角函数型衰减和指数型衰减时节理岩块的刚体动态位移曲线。

在初始应力卸载前,岩体在初始水平应力作用下处于静止平衡状态,节理岩块内储存有弹性应变能,开挖瞬间轮廓面上的初始应力开始卸载,节理岩块内的弹性应变能转化为动能,驱使节理岩块脱离母岩向外运动,同时节理岩块底面受到摩擦力的阻碍作用,致使岩块上部将先于底面发生运动。节理岩块在克服静摩擦产生运动后逐渐完成整体运动,因此,在岩块的位移曲线中,卸载瞬间节理岩块的位移有一个回复的阶段,同理,在节理岩块停止运动时也有位移回复阶段。

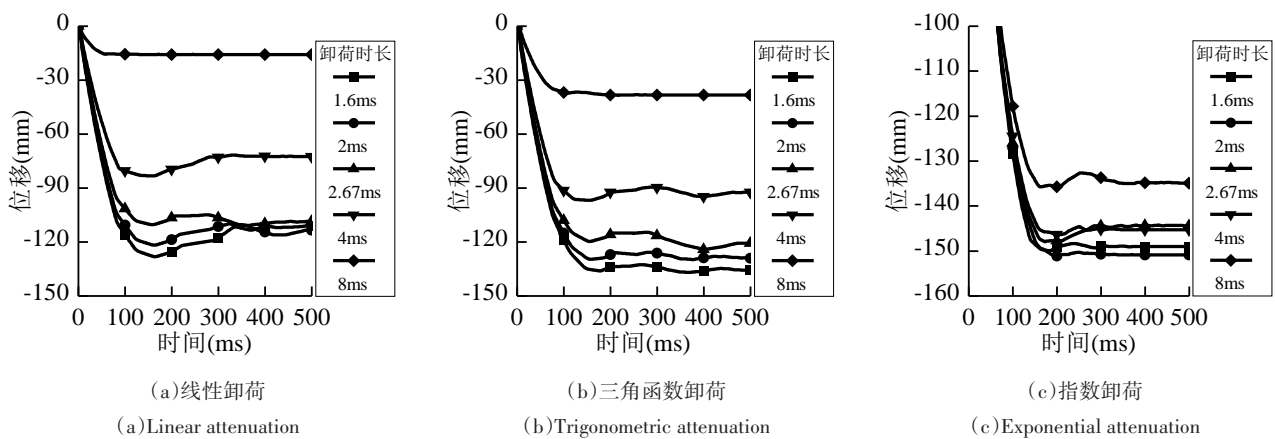


图6 不同卸荷时长条件下节理岩块位移时程曲线

Fig. 6 Displacement time history curves of jointed rock mass under different unloading time conditions

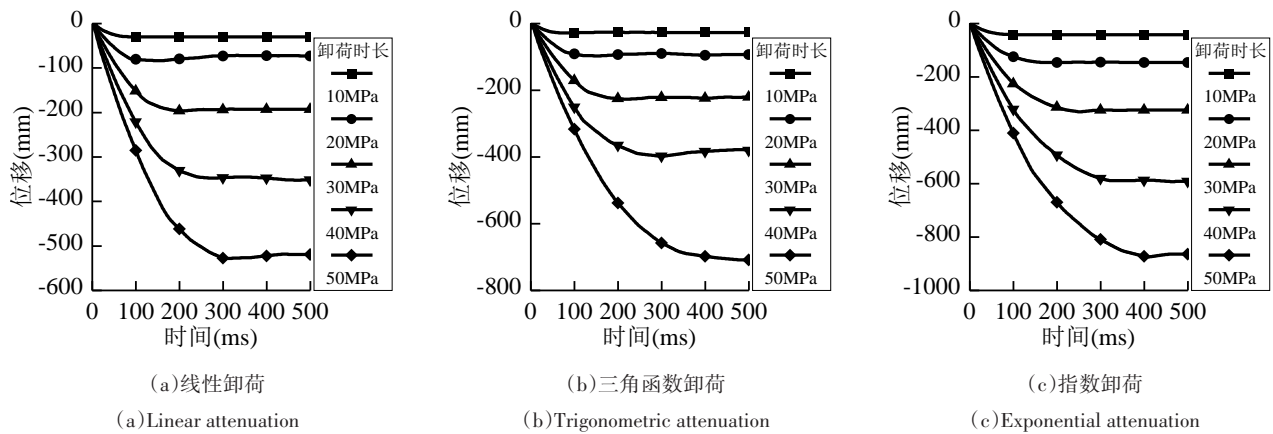


图 8 不同初始应力条件下节理岩块位移时程曲线

Fig. 8 Displacement time history curves of jointed rock mass under different initial stress conditions

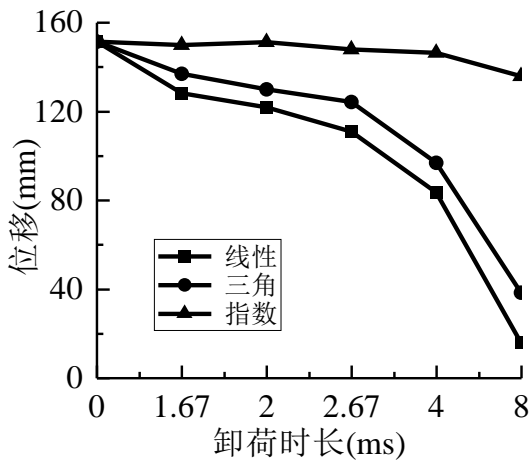


图 7 卸荷时长与节理岩块位移峰值变化曲线

Fig. 7 Variation curves of unloading time and peak displacement of jointed rock masses

初始地应力作用下的节理岩块在 t_s 时间完成卸载, 在此卸荷过程中, 岩块中储存的初始弹性势能随着时间逐渐转化为动能以及克服摩擦力做的负功, 卸荷时间越短则卸载后转化为节理岩块的动能就越多, 节理岩块产生的刚体位移就越大。

卸荷时长与节理岩块位移峰值变化见图 7, 计算结果表明: 卸荷时长 t_s 越短, 节理岩块产生的刚体位移越大; 三种典型卸荷方式中指数函数卸荷所引起的刚体位移最大, 三角函数卸荷其次, 线性卸载最小, 主要原因在于卸荷速率所致, 即卸荷速率越大, 动态卸荷效应越强, 而指数型卸荷前半段以及三角函数型卸荷后半段卸荷速率均大与线性卸荷, 同时, 三种不同的卸荷方式中, 节理岩块位移与卸荷时长成负相关, 进一步说明卸荷速率与节理岩块位移的关系密切; 另外, 该计算条件下, 当卸荷时长大于 4 ms 时, 节理岩体卸后刚体位移明显减小。

2.3.3 不同应力水平的影响

卸荷时间为 4 ms, 初始应力分别按 50 MPa、40 MPa、30 MPa、20 MPa 和 10 MPa 取值计算。初始应力线性衰减、三角函数型衰减和指数型衰减时节理岩块的刚体动态位移曲线分别见图 8(a)~(c)。

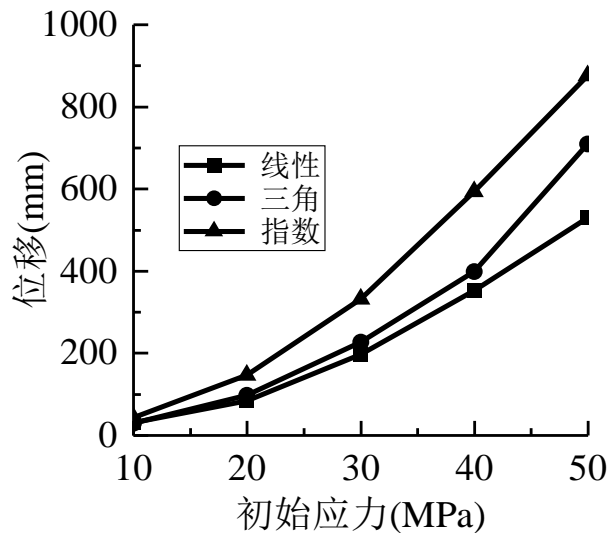


图 9 初始应力水平与节理岩块位移峰值变化曲线

Fig. 9 Curve of initial stress level and peak displacement of jointed rock mass

相同条件下, 岩体中储存的弹性势能与初始应力水平成正相关, 因此, 岩体卸荷所释放的弹性形变能就越多, 节理岩块产生的刚体位移就越大。初始应力水平与节理岩块位移变化曲线见图 9。结果表明: 节理岩块的位移与初始应力水平成正相关; 三种典型卸荷方式的计算结果对比规律与上节类似; 随着初始应力的增大节理岩块的位移峰值也呈现增大趋势, 且变化趋势基本和理论变化趋势一致, 不同卸荷方式下节理岩块位移峰值差距也越

显著。

3 结 论

采用动力松弛法进行应力初始化,模拟深部岩体爆破开挖卸荷诱发节理岩体的松动效应,理论结果验证计算模型准确性;另外,模拟不同卸载时长与卸载路径条件下节理张开位移,得到以下结论:

(1)节理岩块张开位移与初始地应力卸荷持续时间成负相关,与初始应力水平成正相关。

(2)相同初始地应力和卸荷时间条件下,岩体中储存的弹性势能转化为动能和克服摩擦做功的效率受卸荷速率的影响,计算表明:指数型卸荷引起的节理岩体刚体位移最大,三角函数型卸荷次之,而线性卸荷最小。

(3)在实际工程中,可以通过改善装药结构和孔间距等钻爆参数来增加卸荷时长,从而有效地控制地应力动态卸荷所诱发的节理松动效应。

需要说明的是在实际岩体爆破开挖工程中,节理岩块卸荷松动与爆破冲击也密切相关,因此,高应力区节理岩体开挖动态卸荷松动问题还需考虑地应力和爆破荷载耦合作用,其相关研究还有待进一步开展。

参考文献(References)

- [1] BAYISAREGASSA, XU Neng-xiong, MEI Gang. An equivalent discontinuous modeling method of jointed rock masses for DEM simulation of mining-induced rock movements [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 108:1-14.
- [2] AZIZNEJAD S, ESMAIELI K, HADJIGEORGIOU J, et al. Responses of jointed rock masses subjected to impact loading [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(4):16-26.
- [3] 卢文波,金 李,陈 明,等. 节理岩体爆破开挖过程的动态卸载松动机理[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(a01):4653-4657.
- [3] LU Wen-bo, JIN Li, CHEN Ming, et al. Study on the mechanism of jointed rock mass loosening induced by dynamic unloading of initial stress during rock blasting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(a01):4653-4657. (in Chinese)
- [4] 卢文波,陈 明,严 鹏,等. 高地应力条件下隧洞开挖诱发围岩振动特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(a01):3329-3334.
- [4] LU Wen-bo, CHEN Ming, YAN Peng, et al. Study on vibration characteristics of surrounding rock induced by tunnel excavation under high in-situ stress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(a01):3329-3334. (in Chinese)
- [5] 卢文波,周创兵,陈 明,等. 开挖卸荷瞬态特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11):2184-2192.
- [5] LU Wen-bo, ZHOU Chuang-bing, CHEN Ming, et al. Research on transient characteristics of excavation unloading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11):2184-2192. (in Chinese)
- [6] 裴书锋,冯夏庭,张建聪,等. 高边坡坝基柱状节理玄武岩开挖卸荷时效松弛特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(10):245-256.
- [6] PEI Shu-feng, FENG Xia-ting, ZHANG Jian-cong, et al. Time-dependent relaxation characteristics of columnar jointed basalts in high-slope dam foundation during excavation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(10):245-256. (in Chinese)
- [7] 王 鹏,洪望兵,宋 刚. 柱状节理玄武岩松弛圈尺寸效应及地应力影响 [J]. 岩土工程学报, 2018(1):139-146.
- [7] WANG Peng, HONG Wang-bing, SONG Gang. Influences of size effect and in-situ stress of columnar jointed basalt relaxation zone [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018(1):139-146. (in Chinese)
- [8] 王 晗,陈 明,卢文波,等. 柱状节理岩体爆破开挖松动的数值模拟[J]. 爆破, 2016, 33(1):34-39.
- [8] WANG Han, CHEN Ming, LU Wen-bo, et al. Numerical simulate on loosen blasting excavation in columnar jointed rock mass [J]. Blasting, 2016, 33(1):34-39. (in Chinese)
- [9] 江 权,樊义林,冯夏庭,等. 高应力下硬岩卸荷破裂:白鹤滩水电站地下厂房玄武岩开裂观测实例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5):1076-1087.
- [9] JIANG Quan, FAN Yi-lin, FENG Xia-ting, et al. Unloading break of hard rock under high geo-stress condition: inner cracking observation for the basalt in the Baihetan's underground powerhouse [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5):1076-1087. (in Chinese)
- [10] 罗 忆,卢文波,周创兵,等. 高地应力条件下地下厂房开挖动态卸荷引起的变形突变机制研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5):1553-1560.
- [10] LUO Yi, LU Wen-bo, ZHOU Chuang-bing, et al. Mechanism study of abrupt deformation of underground powerhouse induced by excavation unloading under high in-situ stress [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5):1553-1560. (in Chinese)