DOI: 10.11883/1001-1455(2015)04-0555-06

轮廓爆破下柱状节理岩体开裂过程的数值模拟*

朱 亮[1],陈 明[1,2],卢文波[1,2],严 鹏[1,2]
(1.武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北 武汉 430072;
2.武汉大学水工岩石力学教育部重点实验室,湖北 武汉 430072)

摘要:以白鹤滩水电站柱状节理玄武岩为研究对象,根据现场的柱状节理分布统计资料生成数值模型,模拟边坡开挖轮廓爆破下柱状节理岩体的开裂过程。结果表明:轮廓爆破时,柱状节理面对岩体裂纹的发展起着导向和控制作用;爆炸荷载作用下炮孔周围的节理面首先张开,然后裂缝沿着炮孔连心线附近的节理面扩展,最后形成贯通的由大量柱状节理面连接而成的裂缝;预裂爆破条件下,预裂缝宽度先增大后减少,最后达到稳定的开度,而且预裂爆破在柱状节理岩体中产生的裂纹范围比光面爆破产生的大。

关键词:爆炸力学;开裂过程;轮廓爆破;岩体;柱状节理
中图分类号:O383 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

中国西南已建、在建和将建的多个水电站中,均揭露出大量二叠系峨眉山玄武岩组。如四川乐山境内的铜街子水电站和金沙江中下游的溪洛渡和白鹤滩水电站,均存在柱状节理玄武岩,其中以白鹤滩水电站最为典型,其边坡、坝基和地下厂房勘探平洞均揭露大量密集发育的细长状柱状节理的玄武岩组。

柱状节理玄武岩一般较为破碎,岩石质量指标(RQD)值较低,完整性较差,是西南地区一种比较典型的非贯通节理岩体[1]。针对柱状节理岩体特殊的构造和对工程产生的影响,许多人做了研究。R. Mallet[2]在 1875 年就对玄武岩柱状节理特征和形成机制的进行了研究。刘海宁等[3]开展的柱状节理玄武岩体的脆性材料模型真三轴物理模拟试验表明其强度变形的各向异性特征显著。石安池等[4]系统分析了白鹤滩柱状节理玄武岩的基本力学特性和不同试验加载条件下的岩体变形机制。徐卫亚等[5-6]认为 RMR 法和 GSI 法能较好的反映白鹤滩柱状节理岩体的工程力学特性,采用各向异性弹塑性模型计算更能反映柱状节理的特殊性。朱珍德等[7]认为 Cosserat 各向异性本构模型比各向同性本构模型更能反映工程实际,对工程优化设计有着重要的意义。可见,研究者对柱状节理玄武岩的成因、力学特性、本构关系及静力破坏特性等方面的研究均取得了很大进展,但其爆破开挖动力扰动荷载下的破坏特性等方面有待进一步研究。王志亮等[8]采用 LS-DYNA 和 UDEC 相结合的方法,研究了爆炸荷载作用下节理岩体中裂纹的发展过程。结果显示 UDEC 中自带的泰森多边形节理生成器在构造节理面分布及体现爆炸荷载作用下裂纹扩展具有很大的优势。

节理岩体在爆炸荷载作用下的破坏情况与节理的存在有很大关系[9]。UDEC 程序在研究节理岩体方面的方法简单、结果真实,因此本文中采用 UDEC 模拟研究轮廓爆破下柱状节理岩体的开裂过程。

1 柱状节理岩体裂纹发展机理分析

柱状节理玄武岩是一种典型的节理岩体,岩石强度大,节理面发育且强度低。爆炸荷载作用下,炮孔壁附近的节理面容易发生破坏产生裂纹。根据成艳[10]对长白山第四纪玄武岩隧道光面爆破的研究,爆炸荷载作用下,柱状节理岩体中的裂纹的发展满足:

$$\left.\frac{\partial K}{\partial \theta}\right|_{\theta=\delta}=0,\qquad \left.\frac{\partial^2 K}{\partial \theta^2}\right|_{\theta=\delta}>0 \tag{1}$$

* **收稿日期**:2013-01-10;**修回日期**:2014-05-06
基金项目:国家自然科学基金项目(51279146);国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2011CB013501)
第一作者:朱 亮(1990—),男,硕士研究生;**通讯作者**:陈 明,whuchm@yahoo.com.cn。

式中：K 为应变能密度因子，θ 为裂纹发展的方向与已经存在的节理裂隙之间的夹角，δ 为起裂角。在爆破作用下产生的裂纹主要属于张开型裂纹[11]，裂纹尖端的应变能密度因子为

$$K=[2(1+\mu)K_1^2/(16\pi E)][(1+\cos\theta)(3-4\mu-\cos\theta)] \tag{2}$$

式中：K_1 为裂纹尖端的应力强度因子；E 为岩石的弹性模量；$\mu=0.2$，为岩石的泊松比。式两端同时对 θ 求导，结合式(1)，可得：

$$\theta=0 \text{ 或 } \arccos(1-2\mu) \tag{3}$$

$$\begin{cases} \left.\dfrac{\partial^2 K}{\partial\theta^2}\right|_{\theta=0}=\dfrac{(1+\mu)K_1^2}{2\pi E}>0 \\ \left.\dfrac{\partial^2 K}{\partial\theta^2}\right|_{\theta=\arccos(1-2\mu)}=\dfrac{(1+\mu)(\mu-1)}{4\pi E}<0 \end{cases} \tag{4}$$

从式(3)～(4)可以看出在爆炸荷载作用下，节理岩体中产生的裂纹会沿着 $\theta=0$ 的方向发展，也就是沿着岩体中原有的节理裂隙的方向发展。因此，当炮孔壁附近的节理面破坏产生裂纹时，柱状节理裂隙对之后裂纹的发展起着控制和导向的作用。

2 柱状节理岩体开裂模拟的数值模型

2.1 离散元模型

参照文献[5]的分类方法，可将白鹤滩柱状节理岩体分为 3 类：(1) 非规则小型，柱状节理呈细长状密集发育，直径为 13～25 cm；(2) 非规则中型，柱状节理发育不规则，未切割成完整的柱体，直径为 25～40 cm，其内微裂隙较发育，但相互咬合，未完全切断；(3)非规则大型，柱状节理发育不规则，柱体粗大，直径 0.5～2.5 m，切割不完全，嵌合紧密。本文中以大量出现的第 2 类岩体为研究对象，采用 Voronoi 随机节理生成器，在 10 m×8 m 的区域内，设置节理平均边长 0.25 m，令迭代次数小于 100 来控制柱面形状，使其以四边形和五边形为主，模型如图 1 和 2 所示。为了利于能量的耗散，模型下侧边界和左右边界均设为无反射边界。光面爆破布置 3 个炮孔，光爆孔的抵抗线为 1.5 m，孔径为 90 mm，孔距 1 m，爆破药卷直径 25 mm。预裂爆破布置 3 个炮孔，预裂孔的抵抗线为 5.5 m，孔径为 90 mm，孔距 1 m，爆破药卷直径32 mm。

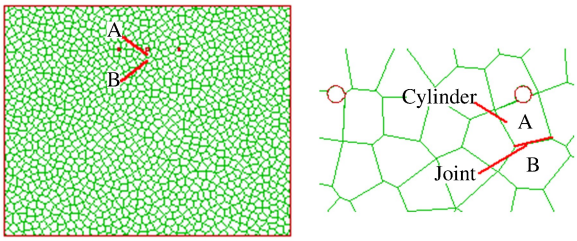

图 1 光面爆破数值模拟

Fig. 1 Numerical simulation model of smooth blasting

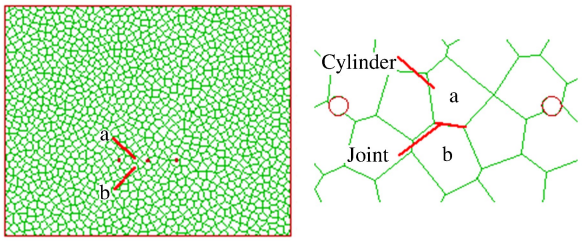

图 2 欲裂爆破数值模拟

Fig. 2 Numerical simulation model of pre-splitting blasting

轮廓爆破不可避免的会对保留岩体造成损伤，岩体中产生裂纹。通过监测节理面两侧柱体面向临空面(y 方向)的速度和位移，揭示裂纹的发展变化过程。光面爆破监测点位置如图 1 所示，A 位于炮孔下侧 0.03 m，B 位于炮孔连心线下侧 0.07 m。预裂爆破过程中，通过监测炮孔连心线上节理面两侧柱体的速度和位移，表明预裂缝发展过程。监测点位置如图 2 所示，a 位于炮孔连心线上侧 0.01 m，b 位于炮孔连心线下侧 0.02 m。

2.2 计算参数

2.2.1 爆破荷载

UDEC 计算中爆炸波输入通常被简化为三角脉冲，参数包括峰值、冲击时间和脉冲宽度。轮廓爆

破采用不耦合装药，这能够有效的降低作用于炮孔壁上的峰值压力，且爆生气体充满炮孔时的压力通常小于临界压力。此时孔壁的初始冲击波峰值压力为[12]

$$p_{b0}=\left[\frac{\rho D^2}{2(\gamma+1)}\right]^{\frac{\nu}{\gamma}} p_k^{\frac{\gamma-\nu}{\gamma}}\left(\frac{d_c}{d_b}\right)^{2\nu} \tag{5}$$

式中：$\rho=1.1$ g/cm^3，为炸药密度；$D=4\,000$ m/s，为炸药爆速；$\gamma=3$，为炸药等熵指数；$\nu=1.4$，为绝热指数；d_c 和 d_b 分别为装药和炮孔的直径；$p_k=200$ MPa，为爆生气体膨胀过程中的临界压力。计算知光面爆炸荷载峰值为17 MPa，预裂爆破荷载峰值为34 MPa。设荷载上升时间为2 ms，下降时间为6 ms，总历程为8 ms。三角形荷载(σ)曲线见图 3。

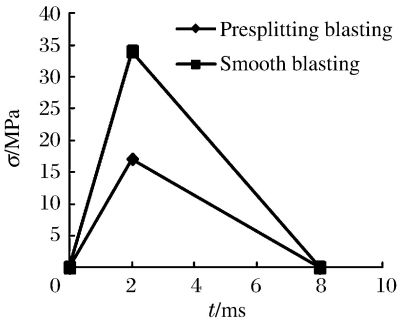

图 3 爆破荷载曲线

Fig. 3 The history of blasting load

2.2.2 岩体物理力学参数

柱状节理构造是玄武岩中最为常见的一种规则柱体形态的原生张性破裂构造，UDEC 中将柱状节理岩体视为完整的岩石被岩体中的不连续面分割而成。岩石采用 UDEC 程序中的 Mohr-Coulomb 模型，节理面满足库仑滑移准则。数值模型采用文献[13-14]中的柱状节理岩体岩石以及节理面的有关力学参数，如下表 1 和表 2 所示，表 1 中：p_R 为内聚力，α 为摩擦角，σ_s 为抗剪强度；表 2 中：K_n 为法向刚度，K_t 为切向刚度，α_i 为内摩擦角，ρ_J 为粘聚力，σ_t 为抗拉强度。

表 1 岩石力学参数

Table 1 Mechanical parameters of the rock

ρ/(kg·m^{-3})	E/GPa	μ	p_R/MPa	α/(°)	σ_s/MPa
2 800	60	0.2	0.9	45	5

表 2 节理面力学参数

Table 2 Mechanical parameters of the joint mass

K_n/GPa	K_t/GPa	α_i/(°)	p_J/MPa	σ_t/MPa
52.9	12.8	28	0.75	0.78

3 模拟结果分析

3.1 岩体新增裂纹特性

图 4 和图 5 分别给出了光面爆破和预裂爆破的裂纹发展过程。光面爆破采用不耦合装药，作用于爆孔壁上的冲击荷载峰值压力低于柱状节理岩体中岩石的动极限抗压强度，炮孔壁附近岩体没有被“压碎”。柱状节理岩体的柱体紧密嵌合成为一个整体，节理面的抗拉强度很小。冲击荷载作用下，岩体中产生径向压应力和环向拉应力。拉应力大于节理面的抗拉强度，与连心线夹角小的节理面张开，如图 4(a)所示，炮孔壁周围产生沿着柱状节理面的张拉裂纹(红色)。同时在压缩应力作用下与连心线夹角大的节理面发生剪切屈服，出现剪切裂纹(蓝色)。裂纹优先沿着已有裂纹的方向发展，同时相邻炮孔具有导向作用，形成沿着连心线的贯通裂纹。裂纹继续向自由面扩张，如图 4(c)所示，此时岩体中已产生了大量裂隙，并能在模型上部临空面上看到轻微鼓包现象。随着保留岩体中产生通向自由面的贯通裂纹，爆生压力作用结束。最后岩体在惯性作用下进一步发生破坏和抛掷。

对比图 4 和图 5，可以看出预裂爆破和光面爆破下柱状节理岩体中初始裂纹的产生过程和形状都

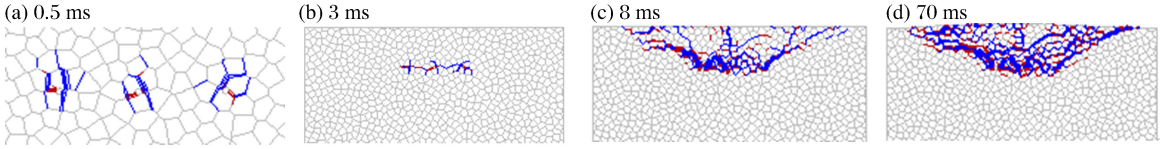

图 4 光面爆破裂纹发展过程

Fig. 4 Developing process of cracks in smooth blasting

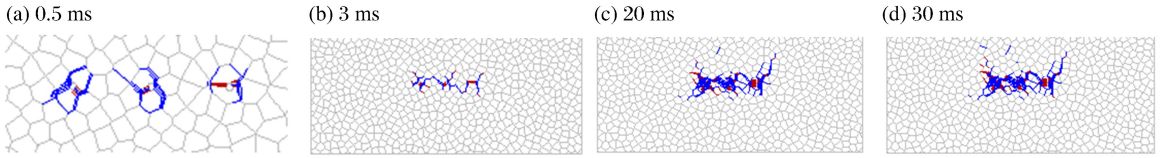

图 5 预裂爆破裂纹发展过程

Fig. 5 Developing process of cracks in presplitting blasting

比较相似。从 2 种工况的裂纹分布来看,裂纹范围不均匀。爆破过程中,裂纹沿着已有的柱状节理面发展。由于柱状节理面分布随机,有利于裂纹产生的方向,岩体的破坏程度大,节理分布对岩体产生裂纹的范围有很大影响。

图 6 给出了 2 种爆破的细部图。可以看出,2 种工况保留岩体的损伤程度不同。光面爆破下保留岩体中裂纹的最大范围为 0.31 m,预裂爆破下保留岩体的裂纹范围为 0.61 m,说明预裂爆破对保留岩体产生的损伤比光面爆破大。由于预裂爆破的抵抗线以及爆炸荷载峰值压力比光面爆破的大,因此预裂对保留岩体的损伤程度大于光面对保留岩体的损伤程度。

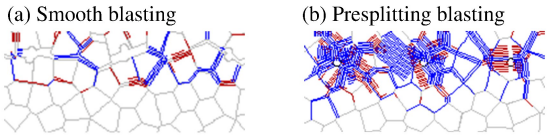

图 6 轮廓爆破细部图

Fig. 6 Detail drawing of contour blasting

从图 6 可以看出,光面和预裂缝的形成与柱状节理面关系密切。相邻炮孔同时起爆后,径向裂隙不再沿着炮孔连心线的方向贯通,而是沿着连心线附近的节理面产生并贯通。爆炸荷载作用下,炮孔附近的节理面张开,产生裂纹。当新裂纹扩展到柱状节理面时,其扩展路径严重受到其影响,裂纹扩展归并到柱状节理面上。同时其他方向的裂纹扩展受到抑制,岩体裂纹沿着节理面形成贯通,最终形成由柱状节理面连接而成的光面和预裂缝。可见,当岩体中的节理面破坏后,岩体的破坏将一直沿着对岩体的破坏起控制性作用的柱状节理面发生,柱状节理的存在对岩体的破坏具有导向作用。

3.2 裂纹发展过程

由监测结果可以得出节理面两侧柱体的相对速度和位移,由此说明爆炸荷载作用下岩体中裂纹的发展状况。图 7～8 给出了 2 种爆破的位移(r)和速度(u)曲线。

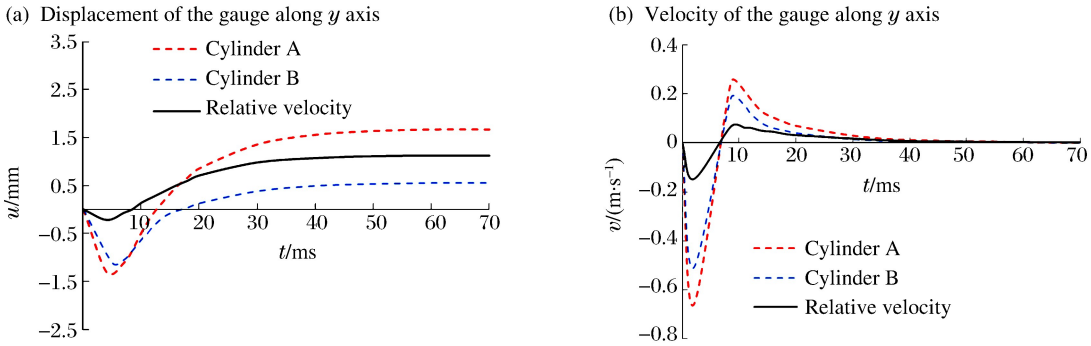

图 7 光面爆破裂纹发展曲线

Fig. 7 Developing curves of the crack in smooth blasting

图 7(a)表明伴随爆炸荷载的作用,玄武岩柱体之间逐渐产生相对位移,节理面之间产生滑移及张开变形。爆炸荷载的加载阶段岩体存在负向的压缩位移,与文献[15]的理论研究及数值模拟一致。加载过程结束后,裂纹发展逐渐停止。爆炸荷载作用下,岩体中产生强烈的爆炸压缩波,保留岩体被压缩。应力波过后,压缩应变回弹。节理面上侧柱体 A 获得冲击速度并发生刚体位移,节理面张开。随着柱体与周围柱体之间的相互作用损耗大量能量,相对速度逐渐减少为零,裂纹开度达到稳定(图 7(b))。

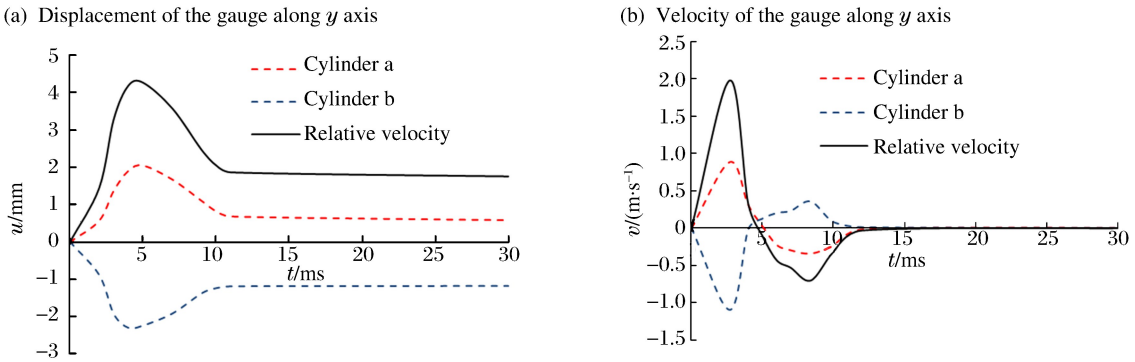

图 8　预裂爆破预裂缝发展曲线

Fig. 8　Developing curves of precracking in presplitting blasting

图 8 监测结果表明，预裂爆破过程中，柱状节理面开度达到最大后缓慢减小，最后形成稳定的预裂缝。预裂孔位于岩体深处，待开挖岩体和保留岩体在爆炸压缩波作用下，向相反方向移动。连心线上节理面张开，同时岩体内部积蓄压缩势能。应力波过后，压缩应变回弹，预裂缝逐渐减小，最后达到稳定。

4　结　论

采用离散元 UDEC 数值模拟技术，对轮廓爆下柱状节理岩体的开裂过程进行了分析，得到以下初步结论。

（1）轮廓爆破时，由于柱状节理岩体的节理强度较低，沿着节理面产生张拉或剪切破坏，而柱体强度高，一般不产生贯穿柱体的裂纹。

（2）光面爆破和预裂爆破的成缝过程基本一致；炮孔壁附近的柱状节理面首先张开，裂纹沿着节理面贯通，形成由柱状节理面连接而成的轮廓面；柱状节理面对裂缝的发展起着控制和导向作用。

（3）光面爆破时，保留岩体在爆炸应力波的作用下被压缩，作用过程结束后，岩体应变回弹，节理面张开产生裂纹；预裂爆破中，预裂缝的形成是一个先张开后逐渐缩小稳定的过程；光面爆破下保留岩体的裂纹范围比预裂爆破的小。

参考文献：

[1]　张倬元，王士天，王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京：地质出版社，1994.

[2]　Mallet R. On the origin and mechanism of production of the prismatic (or columnar) structure of basalt[J]. Philosophical Magazine, 1875,4(50):122-135,201-226.

[3]　刘海宁，王俊梅，王思敬. 白鹤滩柱状节理岩体真三轴模型试验研究[J]. 岩土力学，2010,31(1):163-171.
Liu Hai-ning, Wang Jun-mei, Wang Si-jing. Experimental research of columnar jointed basalt with true apparatus at Baihetan Hydropower Station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010,31(1):163-171.

[4]　石安池，唐鸣发，周其健. 金沙江白鹤滩水电站柱状节理玄武岩岩体变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报，2008,27(10):2079-2086.
Shi An-chi, Tang Ming-fa, Zhou Qi-jian. Research of deformation characteristics of columnar jointed basalt at Baihetan Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(10):2079-2086.

[5]　徐卫亚，郑文棠，石安池. 水利工程中的柱状节理岩体分类及质量评价[J]. 水利学报，2011,42(3):262-279.
Xu Wei-ya, Zheng Wen-tang, Shi An-chi. Classification and quality assessment of irregular columnar jointed basaltic rock mass for hydraulic engineering[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011,42(3):262-279.

[6]　徐卫亚，郑文棠，宁宇，等. 柱状节理坝基岩体三维各向异性数值分析[J]. 岩土力学，2010,31(3):949-955.
Xu Wei-ya, Zheng Wen-tang, Ning Yu, et al. 3D anisotropic numerical analysis of rock mass with columnar for dam foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010,31(3): 949-955.

[7]　朱珍德，秦天昊，王士宏. 基于 Cosserat 理论的柱状节理岩体各向异性本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报，

2010,29(2):4068-4076.
Zhu Zhen-de, Qin Tian-hao, Wang Shi-hong, et al. Study of anisotropic constitutive model of columnar jointed rock masses based on cosserat theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,29(2):4068-4076.
[8] Wang Z L, Konietky H. Modeling of blast-induced fractures in jointed rock masses[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009,76:1945-1955.
[9] 刘红岩,秦四清,杨军.爆炸荷载下岩石破坏的数值流形方法模拟[J].爆炸与冲击,2007,27(1):50-56.
Liu Hong-yan, Qin Si-qing, Yang Jun. Simulation of rock failure by numerical manifold method under blasting load [J]. Explosion and Sock Waves, 2007,27(1):50-56.
[10] 成艳.长白山第四纪玄武岩隧洞光面爆破研究[D].吉林:吉林大学建设工程学院,2012.
[11] 齐景嶽,刘正雄.隧道现代爆破技术[M].北京:中国铁道出版社,1995.
[12] Ding D, Zhu C. Estimaing amount of explosive for fracture plane control blasting with notched boreholes[J]. Transactions of NFsoc, 1993,3(2):18-21.
[13] 邴凤山.中国水力发电年鉴 2010[M].北京:中国电力出版社,2011.
[14] 朱道建,杨林德,蔡永昌.柱状节理岩体压缩破坏过程模拟及机制分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(4):716-724.
Zhu Dao-jian, Yang Lin-de, Cai Yong-chang. Simulation of compressive failure of columnar jointed rock mass and its failure mechanism analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(4):716-724.
[15] 金李,卢文波,陈明,等.节理岩体的爆破松动机理[J].爆炸与冲击,2009,29(5):274-280.
Jin Li, Lu Wen-bo, Chen Ming, et al. Mechanism of jointed rock loosing under blasting load[J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(5):274-280.

Numerical simulation on the cracking process of columnar jointed rock masses in contour blasting

Zhu Liang[1], Chen Ming[1,2], Lu Wen-bo[1,2], Yan Peng[1,2]
(1. *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan* 430072, *Hubei, China*;
2. *Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan* 430072, *Hubei, China*)

Abstract: With Baihetan columnar joints basalt as the research object, numerical model is generated according to the local distribution statistics. Based on numerical analysis, the cracking process of columnar jointed rock masses with the slope excavated by contour blasting is simulated. The results show that the columnar joints control and lead the generation of cracking in contour blasting. The joints around the hole are firstly opened by the explosion load. Then they extend along the joints near the defiled line of holes. Finally the cracks formed by a large number of columnar joints are connected. The process of the width of pre-splitting crack is that it reduces to stabile opening after increases under the condition of pre-splitting blasting. And the range of cracks in pre-splitting blasting is larger than these in smooth blasting.

Key words: mechanics of explosion; cracking process; contour blasting; rock; columnar joints

(责任编辑 王小飞)