

文章编号: 1001-1455(2009)05-0474-07

# 节理岩体的爆破松动机理<sup>\*</sup>

金 李<sup>1,2</sup>, 卢文波<sup>1</sup>, 陈 明<sup>1</sup>, 周创兵<sup>1</sup>

(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. 湖北省电子勘测设计院, 湖北 武汉 430024)

**摘要:** 利用应力波理论对节理岩体的爆破松动机理进行了探讨, 同时利用动力有限元数值模拟方法验证了理论分析结果。研究表明, 爆破荷载的加载阶段对岩体的挤压蓄能和快速卸载阶段的弹性回复是岩体产生后续松动位移的根本原因; 节理岩体的爆破松动在开挖面的法向表现为岩体的剪切错动, 在平行于开挖面方向表现为结构面的张开; 拉格朗日坐标下的动力有限元数值方法, 如 ANSYS/LS-DYNA 程序, 能够较好地用来模拟节理岩体的爆破松动过程。

**关键词:** 爆炸力学; 爆破松动; 动力有限元; 节理岩体; 卸载

**中图分类号:** O382.2      **国标学科代码:** 130 · 3520      **文献标志码:** A

## 1 引 言

随着西部大开发的推进, 我国西南地区将逐步建成一批大规模的水利水电工程。受制于高山峡谷的地理条件, 其中高边坡的开挖一般都采取爆破的方式。爆破作用的动力扰动究竟会给工程安全造成多大程度的影响日益成为岩土工程界关注的重点, 所以, 有必要对岩体爆破开挖造成的动力松动效应开展研究。

关于岩体开挖的松动效应, 已进行了广泛研究。C. M. Sayers<sup>[1]</sup>对卸荷松动损伤机理进行了分析, P. C. Kelsall 等<sup>[2]</sup>研究了松动区岩体变形和力学特性, J. Molinero 等<sup>[3]</sup>提出了开挖卸荷效应的数值模型及计算方法, S. C. Maxwell 等<sup>[4]</sup>在开挖松动范围现场检测等方面作了深入的研究, 这些研究取得了丰富的成果。三峡工程建设中永久船闸岩石高边坡开挖卸荷变形控制难题, 使得岩体开挖卸荷效应的研究倍受重视, 周维垣等<sup>[5]</sup>、张强勇等<sup>[6]</sup>、盛谦等<sup>[7]</sup>提出了考虑卸荷效应的岩体稳定与变形的计算模型与数值方法, 黄润秋等<sup>[8]</sup>、石安池等<sup>[9]</sup>、夏熙伦等<sup>[10]</sup>分析了高边坡卸荷带形成机理及力学性状, 吴刚等<sup>[11]</sup>、赵明阶等<sup>[12]</sup>、沈军辉等<sup>[13]</sup>研究了裂隙岩体卸荷变形和强度特性, 任建喜等<sup>[14-15]</sup>在节理岩石卸荷损伤破坏的 CT 实时检测技术等方面开展了深入研究。目前已经初步建立了岩体卸荷力学的系统研究体系。

然而, 以往的卸荷分析多是利用静力学分析模式。卢文波等<sup>[16]</sup>的初步研究表明, 中高地应力状态下岩体开挖卸荷的准静态处理会带来较大的误差。但是研究局限于瞬态卸荷的假设, 同时没有对爆破荷载和初始地应力场的卸荷进行区分。许红涛等<sup>[17]</sup>的研究表明爆破过程中的动态卸载会在岩体中激发拉应力, 从而对岩体松动区构成影响。易长平等<sup>[18]</sup>采用动力学的方法分别研究了地下洞室开挖时初始地应力场和爆破冲击荷载的振动效应, 但未就爆破开挖的松动问题进行探讨。

本文中主要采用应力波理论和动力有限元数值模拟的方法, 对爆破荷载作用下的岩体松动规律进行计算和分析, 探讨岩体松动的力学机理, 为岩体爆破开挖时的变形控制及稳定分析提供参考。

\* 收稿日期: 2008-06-13; 修回日期: 2008-10-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(50779050, 50909077); “十一五”国家科技支撑计划(2008BAB29B01);

国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB732003);

雅砻江水电开发联合研究基金项目(50639100)

作者简介: 金 李(1983—), 男, 博士研究生。



设阶段 1 末的位移  $u(x, t_e) = u_1(x)$ , 速度为  $\left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{t=t_e} = v_1(x)$ 。

对于阶段 2, 边界条件和初始条件为

$$\begin{cases} u|_{x=0} = 0, & \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=l} = 0 \\ u(x, t_e) = u_1(x), & \left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{t=t_e} = v_1(x) \end{cases} \quad (3)$$

设阶段 2 末的位移  $u(x, t_s + t_e) = u_2(x)$ , 速度为

$$\left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{t=t_s+t_e} = v_2(x)$$

对于阶段 3, 边界条件和初始条件为

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, & \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=l} = 0 \\ u(x, t_s + t_e) = u_2(x), & \left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{t=t_s+t_e} = v_2(x) \end{cases} \quad (4)$$

针对式(2)~(4)中不同的条件, 对方程(1)进行求解, 得到阶段 1 的解为

$$\begin{aligned} u(x, t) = & \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \left[ -\frac{16\sigma l^2}{Ec\pi^3} \left. \frac{d\sigma(t)}{dt} \right|_{t=0} \frac{\sin(n\pi/2)}{n^3} \sin \frac{cn\pi t}{2l} + \right. \\ & \left. \frac{2l}{cn\pi} \int_0^t F_n(\tau) \sin \frac{cn\pi(t-\tau)}{2l} d\tau \right] \sin \frac{n\pi x}{2l} + \frac{\sigma(t)}{E} x \end{aligned} \quad (5)$$

式中

$$F_n(\tau) = \frac{2fg}{l} \int_0^l \sin \frac{n\pi x}{2l} dx - \frac{8l}{E\pi^2} \frac{d^2\sigma}{dt^2} \frac{\sin(n\pi/2)}{n^2}$$

做时间变换  $\bar{t} = t - t_e$ , 得到阶段 2 的解为

$$u(x, \bar{t}) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \left[ \varphi_n \cos \frac{cn\pi\bar{t}}{2l} + \frac{2l}{cn\pi} \psi_n \sin \frac{cn\pi\bar{t}}{2l} + \frac{2l}{cn\pi} \int_0^{\bar{t}} f_n(\tau) \sin \frac{cn\pi(\bar{t}-\tau)}{2l} d\tau \right] \sin \frac{n\pi x}{2l} \quad (6)$$

式中

$$\varphi_n = \frac{2}{l} \int_0^l u_1(x) \sin \frac{n\pi x}{2l} dx, \quad \psi_n = \frac{2}{l} \int_0^l v_1(x) \sin \frac{n\pi x}{2l} dx, \quad f_n(t) = \frac{2fg}{l} \int_0^l \sin \frac{n\pi x}{2l} dx$$

做时间变换  $\bar{\bar{t}} = t - t_s - t_e$ , 得到阶段 3 的解为

$$\begin{aligned} u(x, \bar{\bar{t}}) = & \frac{fg}{2} \bar{\bar{t}} + \psi_0 \bar{\bar{t}} + \varphi_0 + \\ & \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} \left[ \varphi_n \cos \frac{cn\pi\bar{\bar{t}}}{l} + \frac{l}{cn\pi} \psi_n \sin \frac{cn\pi\bar{\bar{t}}}{l} + \frac{l}{cn\pi} \int_0^{\bar{\bar{t}}} f_n(\tau) \sin \frac{cn\pi(\bar{\bar{t}}-\tau)}{l} d\tau \right] \cos \frac{n\pi x}{l} \end{aligned} \quad (7)$$

式中

$$\begin{aligned} \varphi_0 &= \frac{1}{l} \int_0^l u_2(x) dx, & \psi_0 &= \frac{1}{l} \int_0^l v_2(x) dx, \\ \varphi_n &= \frac{2}{l} \int_0^l u_2(x) \cos \frac{n\pi x}{l} dx, & \psi_n &= \frac{2}{l} \int_0^l v_2(x) \cos \frac{n\pi x}{l} dx, \\ f_n(\bar{\bar{t}}) &= \frac{2fg}{l} \int_0^l \cos \frac{n\pi x}{l} dx \end{aligned}$$

利用式(5)~(7), 可以求出岩块在爆破荷载作用下的位移变化过程。可以看出, 受到爆破荷载冲击后, OA 处将出现明显的张开位移, 其大小由  $u(0, t_e)$  给出, 亦即岩体出现松动。参考文献[16]的取值, 取岩块密度  $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ , 弹性模量  $E = 40 \text{ GPa}$ ; 岩块长度  $l = 5.0 \text{ m}$ ; 爆破荷载后的峰值荷载  $\sigma_{\max} = 160 \text{ MP}$ , 荷载上升时间为  $50 \text{ ms}$ , 下降时间为  $125 \text{ ms}$  (利用多项式拟合, 曲线 2 阶光滑可导), 即  $t_u = 50 \text{ ms}$ ,  $t_e = 175 \text{ ms}$ ; 摩擦因数取为  $0.30$ , 重力加速度  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

由式(5)~(7)计算出节理岩体在左右两端(OA 和 BC 处)的位移分别为 21.9 mm 和 22.1 mm。作出 BC 端( $x=5.0$  m) $x$  方向位移时程曲线如图 3 所示,可以看出,岩体存在负向的压缩位移,这是爆破荷载的加载阶段引起的。

虽然理论分析较清晰地揭示了岩体爆破开挖的松动机理,但对分析条件进行了较多的限制和假设,同时,阶段 2 和阶段 3 初始条件的准确表述存在困难。因此,下面考虑利用数值模拟的方法对理论分析的结果及所揭示的工程现象进行检验。

### 3 数值模拟

#### 3.1 计算模型

数值计算同样采用直立边坡模型,不考虑构造应力,仅考虑岩体自重。如图 4 所示,模型的总体尺寸为 50 m×30 m×50 m,开挖后形成 2 级台阶,中间平台宽度为 5.0 m;上层台阶高度为 5.0 m,下层台阶高度为 10.0 m,底部基础高度为 35.0 m,假设下层台阶中存在一被节理面切割的块体,其尺寸为 10 m×6 m×10 m。爆破开挖形成下层边坡直立,仅施加爆破荷载于下层台阶中间被切割的块体,从而对岩体松动情形进行计算和分析。数值模拟采用 ANSYS/LS-DYNA 程序。

#### 3.2 岩体物理力学参数

一般来说,岩石和节理的物理力学参数是与应变率相关的。参考岩石的静态力学参数,岩体物理力学参数取值为:密度为 2.7 t/m<sup>3</sup>,动弹性模量为 40 GPa,泊松比为 0.25,纵波速度为 4.216 km/s,横波速度为 2.434 km/s。

对于岩体节理,采用软件中自动接触的 Surface-to-surface 进行模拟,分析时假定节理面无粘结强度,动摩擦因数为 0.30,粘聚力为 0,抗拉强度为 0。

#### 3.3 爆破荷载

爆破等效荷载施加于开挖轮廓面上,荷载峰值  $\sigma_{\max}=160$  MPa,  $t_u=50$  ms,  $t_e=175$  ms。荷载作用时间历程见图 2。

#### 3.4 网格划分和计算边界

网格划分与输入的荷载信号有关,R. L. Kuhlemeyer 等<sup>[19]</sup>指出有限元计算时的网格尺寸应小于输入波最高频率对应的波长的 1/8~1/10,本文中取 1/10。当网格最小尺寸为 1.0 m 时,输入波的最高频率小于 243 Hz。

同时为了避免人为设置的计算边界对计算结果的影响,模型四周的 4 个面(面 1、面 2、面 3 和面 4)采用无反射边界,如图 5 所示。

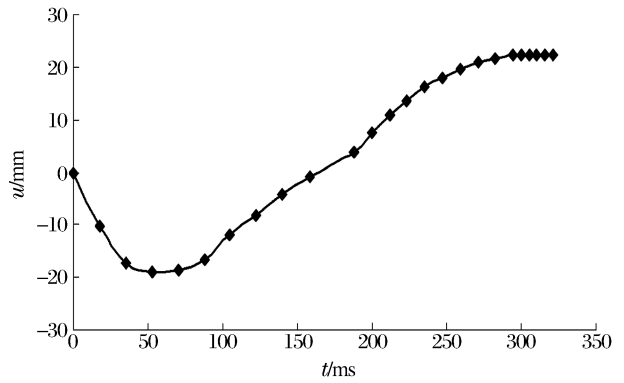


图 3 BC 端的  $x$  方向位移变化曲线  
Fig. 3  $x$ -displacement curve of line BC

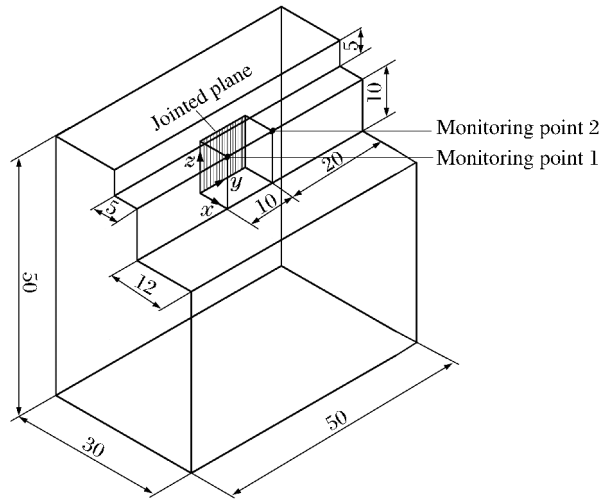


图 4 计算模型(单位:m)  
Fig. 4 The analyzed model (unit:m)

### 3.5 岩体松动计算结果

考虑爆炸冲击荷载作用情形,模拟岩体的松动过程,计算时间为 1.0 s,以台阶上 2 个监测点(如图 4 所示)的松动位移值为考察指标。将上层边坡截去后得到岩体松动情形如图 6 所示,岩体松动位移的矢量图如图 7 所示,监测点 1 和监测点 2 的  $x$  方向位移时程变化如图 8 所示。

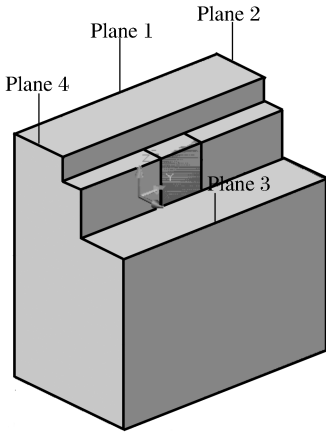


图 5 无反射边界面

Fig. 5 Non-reflected boundary planes

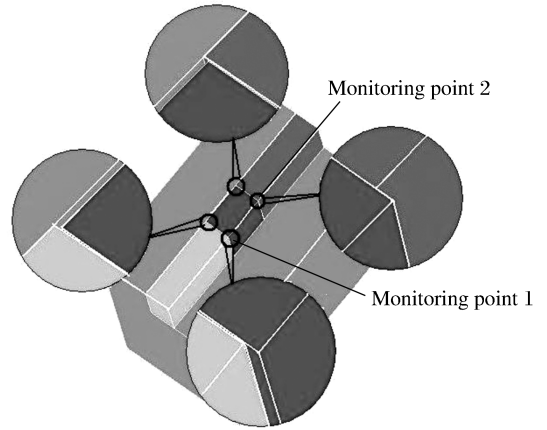


图 6 岩体松动情形

Fig. 6 Appearance of loose rock

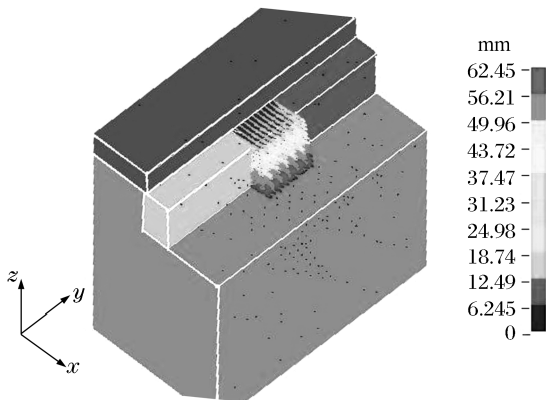


图 7 岩体松动位移矢量图

Fig. 7 Displacement vectors of loose rock

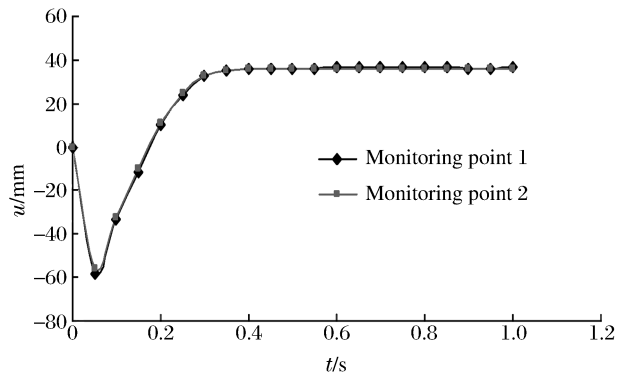


图 8 监测点的  $x$  方向位移变化曲线

Fig. 8  $x$ -displacement curves of monitoring points

从图 6~7 可以看出岩块松动特征明显,爆破开挖松动在开挖面的法向表现为岩体的剪切错动(产生质点水平位移),在平行于开挖面方向表现为弱结构面张开。岩体受爆破冲击荷载扰动后,节理张开出出现张裂缝,监测点获得冲击速度,被节理切割的岩块发生整体的刚体位移。这些都是强冲击荷载作用下岩体松动的明显特征。

从图 3、8 结果来看,松动位移时程曲线与理论计算得到的曲线相似,都可以看出爆破荷载加载阶段对岩体有一个明显的“挤压蓄能”过程。但数值模拟结果(36.3 mm)比理论计算值(22.1 mm)要大,这是由于数值模拟中基岩采用了弹性材料,在卸载时也释放了应变能。

## 4 结论

(1)应力波理论计算和动力有限元数值模拟均表明:岩体爆破开挖诱发松动的原因之一是爆炸冲击荷载的加、卸载作用,爆破荷载的加载阶段对岩体的挤压蓄能和快速卸载阶段的弹性回复是岩体产生后



续松动位移的根本原因。

(2) 节理岩体的爆破松动在开挖面的法向表现为岩体的剪切错动, 在平行于开挖面方向表现为结构面的张开。

(3) 以应力波理论为基础的解析分析方法能定性解释爆破作用下节理岩体的松动机理, 但分析过程复杂; 拉格朗日坐标下的动力有限元数值方法, 如 ANSYS/LS-DYNA 程序, 能够较好模拟平行节理岩体的爆破松动过程。

为了探明爆炸荷载作用下的节理岩体松动机理, 本文中并没有考虑初始地应力开挖卸荷诱发岩体松动的耦合作用。另外, 受篇幅限制, 也没有就边坡几何形状及块体尺寸影响进行讨论, 这是本文的不足之处。对于更具工程实际背景的爆破开挖诱发松动问题, 还有待深入研究。

## 参考文献:

- [1] Sayers C M. Orientation of microcracks formed in rocks during strain relaxation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1990,27(5):437-439.
- [2] Kelsall P C, Case J B, Chabannes C R. Evaluation of excavation-induced changes in rock permeability[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1984,21(3):123-135.
- [3] Molinero J, Samper J, Juanes R. Numerical modeling of the transient hydrogeological response produced by tunnel construction in fractured bedrocks[J]. Engineering Geology, 2002,64(4):369-386.
- [4] Maxwell S C, Young R P, Read R S. A micro-velocity tool to assess the excavation damaged zone[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998,35(2):235-247.
- [5] 周维垣, 杨若琼, 剡公瑞. 岩体边坡非连续非线性卸荷及流变分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1997,16(3):210-216.  
ZHOU Wei-yuan, YANG Ruo-qiong, YAN Gong-rui. Nonlinear and discontinuous deformation and rheological analysis for unloaded rock slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997,16(3):210-216.
- [6] 张强勇, 朱维申, 陈卫忠. 三峡船闸高边坡开挖卸荷弹塑性损伤分析[J]. 水利学报, 1998(8):19-22.  
ZHANG Qiang-yong, ZHU Wei-shen, CHEN Wei-zhong. Analysis of elastoplastic damage for high jointed slope of the three gorges project shiplock during unloading due to excavation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998(8):19-22.
- [7] 盛谦, 丁秀丽, 冯夏庭, 等. 三峡船闸高边坡考虑开挖卸荷效应的位移反分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000,19(增1):987-993.  
SHENG Qian, DING Xiu-li, FENG Xia-ting, et al. Displacement back analysis for the high slope of the three gorges project considering the effect of excavation unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000,19(Supp1):987-993.
- [8] 黄润秋, 林峰, 陈德基, 等. 岩质高边坡卸荷带形成及其工程性状研究[J]. 工程地质学报, 2001,9(3):227-232.  
HUANG Run-qiu, LIN Feng, CHEN De-ji, et al. Formation mechanism of unloading fracture zone of high slopes and its engineering behaviors[J]. Journal of Engineering Geology, 2001,9(3):227-232.
- [9] 石安池, 赵明华, 薛果夫. 三峡工程永久船闸高边坡岩体变形特征与机理分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001,20(5):638-642.  
SHI An-chi, ZHAO Ming-hua, XUE Guo-fu. Characteristics and mechanism of deformation of high rock slope of the three gorges project shiplock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001,20(5):638-642.
- [10] 夏熙伦, 周火明, 盛谦, 等. 三峡工程船闸高边坡岩体松动区及其性状[J]. 长江科学院院报, 1999,16(4):1-5.  
XIA Xi-lun, ZHOU Huo-ming, SHENG Qian, et al. Excavation loosened zone and mechanical behaviors of rock mass of rock's high slope of TGP[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1999,16(4):1-5.
- [11] 吴刚, 孙钧. 卸荷应力状态下裂隙岩体的变形和强度特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1998,17(6):615-621.  
WU Gang, SUN Jun. Deformation and strength characteristics of jointed rock mass under unloading stress states [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998,17(6):615-621.
- [12] 赵明阶, 徐蓉. 裂隙岩体在受荷条件下的变形特性分析[J]. 岩土工程学报, 2000,22(4):465-470.  
ZHAO Ming-jie, XU Rong. Research on deformation character of cracked rock mass under loading and unloading

- [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000,22(4):465-470.
- [13] 沈军辉,王兰生,王青海,等.卸荷岩体的变形破裂特征[J].岩石力学与工程学报,2003,22(12):2028-2031.  
SHEN Jun-hui, WANG Lan-sheng, WANG Qing-hai, et al. Deformation and fracture features of unloaded rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003,22(12):2028-2031.
- [14] 任建喜,葛修润,蒲毅彬.节理岩石卸载损伤破坏过程CT实时检测[J].岩土力学,2002,23(5):575-578.  
REN Jian-xi, GE Xiu-run, PU Yi-bin. Real-time CT test of damage failure process of jointed rock sample in unloading confining pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002,23(5):575-578.
- [15] 任建喜.冻结裂隙岩石加卸载破坏机理CT实时试验[J].岩土工程学报,2004,26(5):641-644.  
REN Jian-xi. Real time CT test of damage failure mechanism of frozen cracked rock in loading and unloading condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004,26(5):641-644.
- [16] 卢文波,金李,陈明,等.节理岩体爆破开挖过程中的动态卸荷松动机理研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(增1):4653-4657.  
LU Wen-bo, JIN Li, CHEN Ming, et al. Study on the mechanism of the loosening of the jointed rock mass caused by the dynamic unloading of initial stress during rock blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(Suppl):4653-4657.
- [17] 许红涛,卢文波.爆破破岩过程中的动态卸载效应探讨[J].岩土力学,2003,24(6):969-973.  
XU Hong-tao, LU Wen-bo. Study on dynamic unloading effect during process of fragmentizing rock by blasting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003,24(6):969-973.
- [18] 易长平,卢文波,许红涛,等.岩体初始应力场动态卸荷效应研究[J].岩石力学与工程报,2005,24(增1):4750-4754.  
YI Chang-ping, LU Wen-bo, XU Hong-tao, et al. Study on effects of dynamic unloading on initial stress during rock excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(Suppl):4750-4754.
- [19] Kuhlemeyer R L, Lysmer J. Finite element method accuracy for wave propagation problems[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1973,99(5):421-427.

## Mechanism of jointed rock loosening under blasting load

JIN Li<sup>1,2\*</sup>, LU Wen-bo<sup>1</sup>, CHEN Ming<sup>1</sup>, ZHOU Chuang-bing<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China;

2. Hubei Electric Power Design Institute, Wuhan 430024, Hubei, China)

**Abstract:** With the theory of stress wave, it discussed mechanism of jointed rock loosening under blasting load. And this was verified by a numerical simulation using the dynamic finite element method. Results show that, compression of blasting load can store strain energy in rocks and quick unloading of the stresses can lead to elastic recovery, which are the essential reason for rock loosening during blast excavation. Blast disturbance can induce rock loosening, typical characteristics are shear moving of rocks in the normal direction of excavation surface and opening of weak planes in the parallel direction. The dynamic finite element method, which adopts Lagrange coordinates, can be used to simulate better the loosening process of jointed rock under blasting load. For example, the program of ANSYS/LS-DYNA is good for this case.

**Key words:** mechanics of explosion; blast loosening; dynamic finite element; jointed rock; unloading

\* Corresponding author: JIN Li

E-mail address: jl19830927@126.com

(责任编辑 张凌云)