文章编号：1001-1455(2012)02-0157-07

岩石爆破开挖诱发振动的等效模拟方法*

杨建华[1,2]，卢文波[1,2]，陈 明[1,2]，周创兵[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：岩石爆破开挖过程中爆炸荷载的复杂性、岩石介质模型的多变性、本构方程的多样性、以及群孔爆破模拟计算工作量巨大等诸多因素使得准确模拟爆破诱发的围岩振动存在较大的困难，鉴于此提出一种等效数值模拟方法。根据爆破过程炮孔周围岩石破坏范围的空间分布特征，确定群孔起爆条件下爆炸荷载作用的等效弹性边界；通过分析炸药起爆后炮孔空腔动力膨胀、岩体裂纹扩展、炮孔堵塞物运动以及爆生气体的逸出，计算了等效边界上沿炮孔轴向变化的爆炸荷载。结合瀑布沟水电站 1# 尾水隧洞爆破开挖监测，基于动力有限元法运用该等效技术模拟了围岩的质点振动速度。数值模拟与现场实测数据的对比表明该等效模拟技术用于岩石爆破开挖围岩响应的计算是合适的。计算结果同时还显示，等效边界邻近岩体力学参数的选取对计算结果有重要影响。

关键词：爆炸力学；等效模拟方法；动力有限元；岩石；等效弹性边界；爆炸荷载；爆破振动

中图分类号：O382 **国标学科代码**：1303520 **文献标志码**：A

随着爆破理论和计算机技术的发展，数值模拟成为研究爆破振动效应的重要手段。如 J. Toraño 等[1]通过有限元法模拟了台阶爆破诱发的振动，分析了影响爆破地震波传播特性的各种因素；G. W. Ma 等[2]、C. Q. Wu 等[3]采用有限元 AUTODYN 程序模拟了地下硐室爆破时爆源近区的岩石动力响应；S. G. Chen 等[4]、夏祥等[5]将离散元软件 UDEC 运用于节理岩体不同爆心距处质点振动速度的模拟，确定了节理岩体质点峰值振动速度和振动主频随爆心距的衰减规律。但岩体爆破从炸药的爆轰开始，到冲击波作用下周围岩体的破碎、抛掷及堆积，最后至地震波的激发，爆破本身的瞬时性、复杂性以及爆破介质的多变性使准确模拟爆破开挖诱发的围岩振动仍然存在较大的困难。

首先，炸药起爆后，随着爆炸产物的生成，炮孔空腔径向动力膨胀、周围岩体裂纹扩展、堵塞物运动、高温高压气体从孔口及缝隙向外飞逸。数值模拟中很难描述这种复杂的力学过程，现有模拟技术中多采用半经验半理论的三角形曲线或高能炸药的 JWL 状态方程模拟爆炸荷载[2-7]，但经验公式中没有全面考虑爆破参数且忽略了爆生气体准静态作用；JWL 状态方程仅能精确描述有效堵塞条件下炮孔空腔膨胀致使压力衰减的过程，未考虑爆生气体的逸出。其次，整个爆破过程中炮孔附近的岩石由连续介质经过破裂、破碎，变为不连续介质，最终完成碎块的抛掷，计算中需要采用不同的介质模型；炮孔周围岩石根据其所处的应力状态，分别为流塑性、弹塑性、弹性介质，数值模拟中需采用不同的本构方程。再次，由于炮孔尺寸远小于工程岩体尺寸，这给多孔起爆模型的建立、网格划分、爆生气体和岩体间接触问题的处理带来了很大的困难，计算量巨大。可见，需寻求一种简单实用的爆破振动等效模拟方法[8-9]。

本文中拟根据岩石爆破过程中炮孔周围岩石破坏范围的空间分布特征，建立群孔起爆条件下爆炸荷载作用的等效弹性边界，并从理论上计算等效边界上沿炮孔轴向变化的爆炸荷载曲线；结合瀑布沟尾水隧洞的爆破开挖采用动力有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 计算不同段别雷管起爆时的质点振动速度，并与现场监测结果进行比较。

* **收稿日期**：2010-12-24；**修回日期**：2011-05-19

基金项目：国家自然科学基金项目(50779050，50909077)；
国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB732003)

作者简介：杨建华(1986—)，男，博士研究生。

1 爆炸荷载作用边界的等效

在炸药近区,由于高温高压作用,岩体的变形性质类似于流体,介质中传播的是冲击波;冲击波作用区外传播的是应力波,最后衰减为爆炸地震波。冲击波和应力波对岩体造成不同程度的破坏,形成粉碎区和破碎区。弹性模型适用于计算弹性地震波的传播,但不能将炮孔附近的岩体视为弹性体;并且爆破近区为非连续介质,而弹性振动区为连续介质。为了采用基于连续介质力学的统一的本构关系模拟爆破振动,将整个非弹性区(粉碎区和破碎区)等效为爆炸的振动源,将爆炸荷载作用在等效弹性边界上。

1.1 弹性边界的确定

柱状装药条件下,单个炮孔在半无限岩体中起爆时的粉碎区和破碎区半径可由下式求得[10]

$$r_1=\left(\frac{\rho_r c_p^2}{5\sigma_c}\right)^{1/2}\left(\frac{p}{\sigma^*}\right)^{1/4}r_0,\qquad r_2=\left[\frac{\mu p}{(1-\mu)\sigma_t}\right]^{1/\beta}r_0 \tag{1}$$

式中:r_0为炮孔半径;r_1、r_2分别为粉碎区半径和破碎区半径;ρ_r、μ分别为岩体的密度和泊松比;c_p为纵波波速;σ_c、σ_t分别为岩体的单轴动抗压强度和动抗拉强度;σ^*为多向应力条件下的岩体动抗压强度;p为炮孔壁上的爆炸荷载;β为应力波区荷载传播衰减指数,$\beta=2-\mu/(1-\mu)$。

常规炸药引起的粉碎区半径r_1为装药半径的3～5倍,破碎区半径r_2为装药半径的10～15倍[10-13]。忽略炮孔间的相互影响,则每一个掏槽孔起爆均类似于柱状炸药在半无限介质中起爆,所以掏槽段群孔起爆时的等效弹性边界为各孔各自所形成的破碎区的包络线。各圈崩落孔、缓冲孔和周边孔都是在已有临空面条件下,通过本圈炮孔爆破所形成的裂缝在相邻炮孔中轴线上相互贯通来抛掷拟爆岩体,因此近似认为新形成的自由面为等效弹性边界,如图1所示。

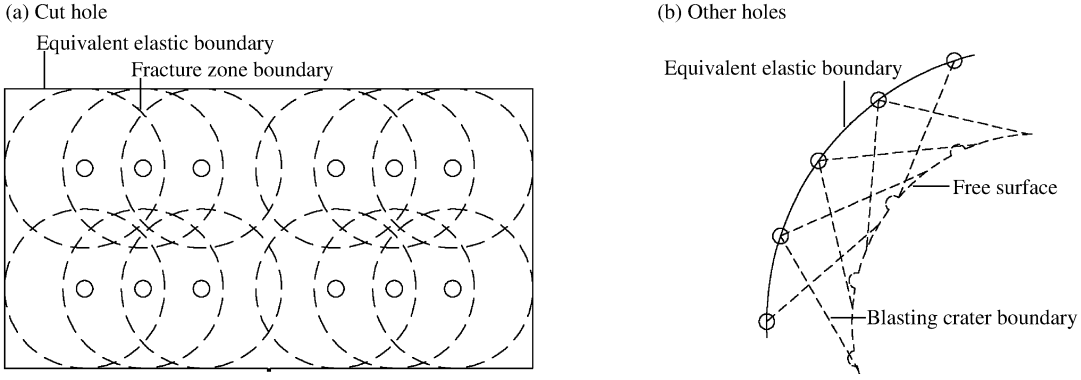

图1 等效弹性边界示意图

Fig. 1 Diagrammatic representation of the equivalent elastic boundary

1.2 弹性边界上岩体参数的选取

动力计算中岩石材料的物理力学参数需采用动态参数。尽管弹性边界上爆炸应力波已经衰减至不能使岩石破碎或发生塑性变形,但爆炸产物仍可以使岩体原生裂纹开裂或扩展,导致岩体质量劣化、弹性模量降低。因此数值模拟中需降低等效边界邻近岩体的力学参数。

2 等效边界上的爆炸荷载

2.1 炮孔壁上爆炸荷载

根据凝聚炸药爆轰波的CJ理论,对于耦合装药,炮孔初始平均爆轰压力p_0为波阵面后最大压力的一半,即

$$p_0=\frac{\rho_0 D^2}{2(\gamma+1)} \tag{2}$$

对于不耦合装药条件,若不耦合系数较小,炮孔初始平均压力

$$p_0=\frac{\rho_0 D^2}{2(\gamma+1)}\left(\frac{a}{b}\right)^{2\gamma} \tag{3}$$

若不耦合系数较大，气体的膨胀需经历 $p \geqslant p_c$ 和 $p < p_c$ 等 2 个阶段，p_c 为气体临界压力。计算中将 γ 视作分段常数处理，当 $p \geqslant p_c$ 时，取 $\gamma=3.0$；当 $p < p_c$ 时，取 $\gamma=\nu=4/3$；则式(3)变为

$$p_0 = \left[\frac{\rho_0 D^2}{2(\gamma+1)}\right]^{\nu/\gamma} p_c^{(\gamma-\nu)/\gamma}\left(\frac{a}{b}\right)^{2\nu} \tag{4}$$

式中：ρ_0、D 分别为炸药的初始密度和爆轰速度；γ 为等熵指数；a 为装药直径；b 为炮孔直径。

爆炸加载是一个复杂的力学过程：随着爆轰波的传播，孔内平均爆炸荷载上升至最大值。受爆炸荷载作用，炮孔空腔产生径向动力膨胀，炮孔周围岩体开裂并在爆生气体驱动下进一步扩展，炮孔堵塞物受到压缩并产生整体抛掷运动，致使炮孔压力降低。随着炮孔堵塞物的冲出及裂纹贯通，高温高压气体迅速向外逸出，产生一束向孔底传播的稀疏波。根据波动理论，稀疏波传播至孔底固壁端时反射稀疏波，并向孔口传播，导致炮孔压力进一步降低。

炮孔压力不仅随时间不断衰减，且沿炮孔轴向分布是不均匀的[14-15]。对一个装药直径 $a=35$ mm，孔径 $b=42$ mm，孔深 $L=3.0$ m，装药长度 $L_1=2.5$ m 的炮孔，采用 2# 岩石乳化炸药从孔底起爆，取炸药密度 $\rho_0=1$ t/m^3，爆轰波速 $D=3.6$ km/s，气体临界压力 $p_c=200$ MPa。炮孔壁上不同位置的荷载曲线如图 2 所示，$x=0.00$ m 表示孔口，$x=3.00$ m 表示孔底。

2.2　弹性边界上的爆炸荷载

设任意时刻炮孔壁上的爆炸荷载为 $p(x,t)$，单个爆孔周围荷载随距离的衰减规律为[16]

$$p_a(x,t) = p(x,t)\ (r/r_0)^{-\alpha} \tag{5}$$

式中：r 为距炮孔中心的距离；α 为荷载传播衰减指数，在冲击波作用区 $\alpha=2+\mu/(1-\mu)$，在应力波作用区 $\alpha=\beta=2-\mu/(1-\mu)$。

所以，对于群孔起爆时的掏槽孔，等效到弹性边界的爆炸荷载

$$p_e(x,t) = kp(x,t)\left(\frac{r_1}{r_0}\right)^{-2-\frac{\mu}{1-\mu}}\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{-2+\frac{\mu}{1-\mu}} \tag{6}$$

式中：k 为群孔起爆时的荷载影响因数，与同响起爆的炮孔个数及炮孔的分布有关。

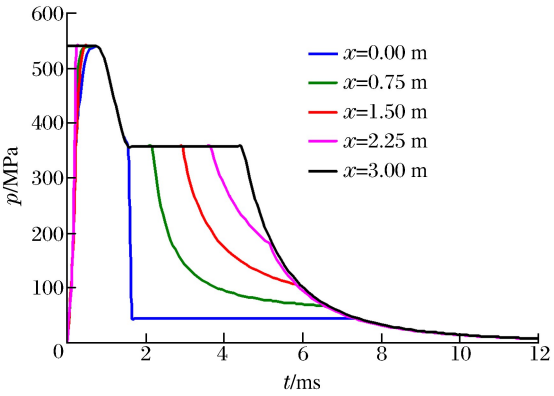

图 2　炮孔壁上不同点的爆炸荷载曲线

Fig. 2　Blasting loads on different cross sections of blasthole wall

对于非掏槽孔，将炮孔爆炸荷载等效到同段炮孔中心连线与炮孔轴线所确定的面上

$$p_e(x,t) = 2r_0 p(x,t)/s \tag{7}$$

式中：s 为相邻 2 炮孔间的距离。

爆炸荷载沿炮孔轴向分布是不均匀的，三维计算中沿孔深在等效弹性边界上施加不同的荷载。由于计算过程中作了一些理想的假定，并且特性参数的选取也与实际有一定的差异，因此在有现场实验的前提下可以根据实测的质点峰值振动速度对施加在弹性边界上的爆炸荷载大小进行一定的修正。

3　等效模拟结果及与实测资料的对比

3.1　工程实例背景

瀑布沟水电站平行布置了两条尾水隧洞，开挖断面呈圆拱直墙形，尺寸为 20.0 m×24.2 m（长×宽），围岩为纵波波速大于 4.5 km/s 的花岗岩。尾水隧洞分 3 层开挖，每层高约 8.0 m，上层开挖采用中导洞超前、两侧扩挖跟进的方式。针对 1# 尾水洞上层的中导洞开挖，在 1# 洞底板部位进行了围岩振动监测。中导洞爆破设计见图 3，炮孔直径为 42 mm，掏槽孔、崩落孔和光面爆破孔内的药卷直径分别为 35、32 和 25 mm，采用 2# 岩石乳化炸药。

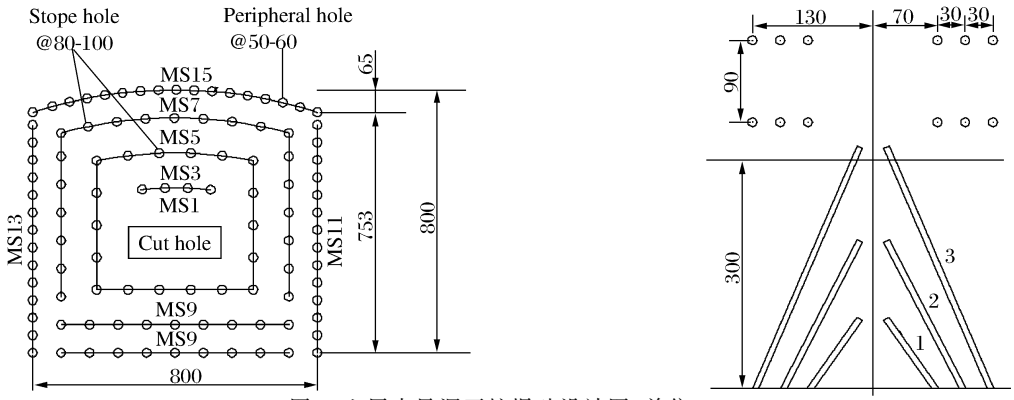

图 3 上层中导洞开挖爆破设计图(单位:cm)

Fig. 3 Blasting design for excavation of the upper center leading tunnel (unit: cm)

3.2 计算模型与工况

爆破开挖诱发的围岩振动采用动力有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 进行计算,有限元计算模型如图 4 所示。为减少动荷载作用下边界反射波的影响,模型四周设为透射边界。计算中掏槽孔起爆时取粉碎区为 3 倍装药半径,破碎区为 10 倍装药半径,由 1.1 节可以得到掏槽孔起爆时的等效弹性边界,如模型中央的矩形所示。取掏槽孔群孔起爆时的荷载影响因数 $k=10$,由式(6)得等效到弹性边界的爆炸荷载峰值为 56.0 MPa;崩落孔和光爆孔起爆时等效边界上的爆炸荷载分别为 14.8、5.5 MPa;荷载上升时间与正压作用时间与炮孔壁上荷载一致,曲线形式见图 2。

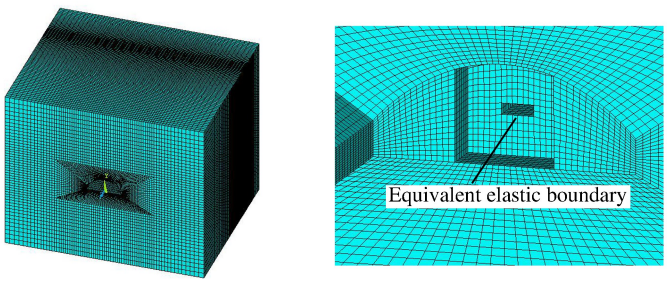

图 4 动力有限元计算模型

Fig. 4 Dynamic finite element model in calculation

为说明振动源附近以及传播路径上岩石力学特性对爆破振动特征的影响,计算了 3 种工况:(1)整个模型的岩石力学参数一致;(2)已挖隧洞表面弹性模量降低 10%~20%;(3)在工况 2 的基础上等效弹性边界附近岩体弹性模量降低 30%~50%。各种工况的岩石力学参数及其参数折减区域见表 1,E_r 为动弹性模量。

表 1 各种计算工况的岩石力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock in each calculated condition

工况	工况 1	工况 2		工况 3	
区域	整个模型	隧洞表面		等效附近面	
		0~1.0 m	1.0~2.0 m	0~0.5 m	0.5~1.0 m
E_r/GPa	47.2	37.8	42.5	23.6	33.0
ρ_r/(t/m^3)	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
μ	0.23	0.27	0.25	0.35	0.30

3.3 计算结果分析

以掏槽孔 MS1 段、崩落孔 MS3 段、MS5 段起爆诱发的围岩振动为例,选取 1# 隧洞底板距掌子面 25.0 m 测点的竖直向和水平径向振动速度进行说明。从图 5~6 可以看到,工况 1 计算的质点振动速度变化规律与实测一致,但振动频率较大;降低隧洞表面的岩石力学参数仅能够改变爆破振动幅值,对振动频率基本没有影响(仅以 MS1 段为例进行说明)。

工况 3 降低爆炸荷载作用边界附近的岩石弹性模量后,振动频率降低,计算结果与实测数据一致,误差在工程应用的允许范围内,如图 7 所示。这表明,本文中提出的等效模拟技术计算岩石爆破开挖诱

发的围岩振动是适用的，模拟中等效弹性边界邻近岩体力学参数的选取至关重要。炸药对周围介质的脉冲荷载作用被周围介质滤波后传播出去，通过对计算结果的分析可知，这种滤波作用不仅取决于介质的非弹性性质（如阻尼），也取决于振动源附近弹性区的岩石力学特性与地质结构，这与文献[9]一致。

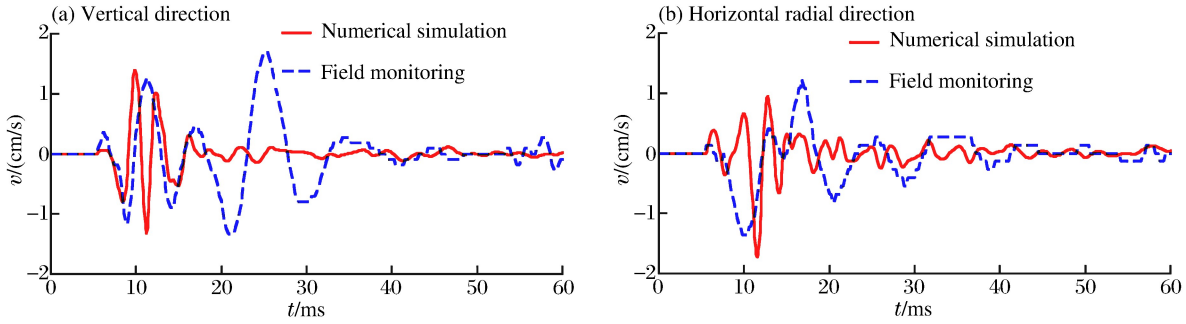

图 5　工况 1 中质点振动速度时程曲线

Fig. 5　Particle vibration velocity varied with time in condition 1

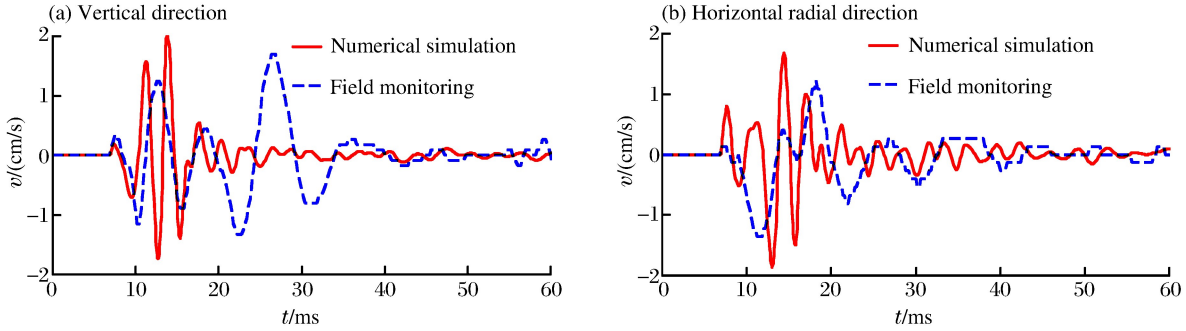

图 6　工况 2 中质点振动速度时程曲线线

Fig. 6　Particle vibration velocity varied with time in condition 2

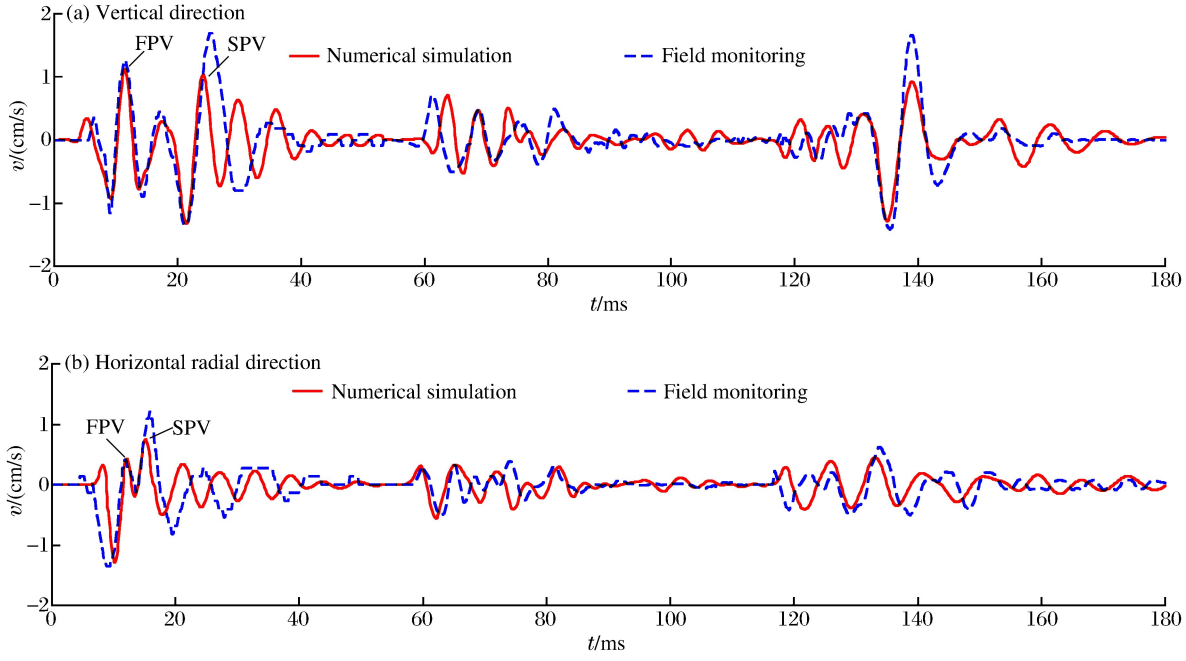

图 7　工况 3 中质点振动速度时程曲线线

Fig. 7　Particle vibration velocity varied with time in condition 3

称振动曲线中第 1 次出现的较大波峰值为第 1 峰值(FPV),第 2 次出现的较大波峰值为第 2 峰值(SPV)。值得注意的是,工况 3 的计算结果在第 1 峰值与实测结果大致相等的情况下,第 2 峰值明显小于实测数据。这是由于瀑布沟尾水隧洞处于高地应力区(约 20 MPa),且掌子面上存在应力集中,高地应力条件下岩体爆破开挖瞬态卸荷诱发的振动可能会增大围岩总体响应。

4 结 论

(1)岩石爆破开挖诱发围岩振动的数值模拟中,存在爆炸荷载复杂、岩体介质模型多样、本构方程多变、以及群孔爆破模拟计算工作量巨大等诸多困难,须寻求简单实用的等效数值模拟技术。

(2)工程实测资料证明了爆炸荷载作用边界的等效与爆炸荷载作用过程的等效的正确性,用该等效数值模拟技术计算岩石爆破开挖围岩响应是适用的,可根据该计算结果进行爆破振动的预测与控制。

(3)爆源附近弹性区的弹性参数和地质结构影响爆破地震波的传播特性,等效弹性边界邻近岩体力学参数的选取对数值模拟计算结果有重要影响。

虽然可以利用本文中建议的等效模拟方法计算爆破远区的动力特性,但不能模拟岩体爆破破碎、周围岩体损伤破坏等复杂的爆破近区问题。

参考文献:

[1] Toraño J, Rodríguez R, Diego I, et al. FEM models including randomness and its application to the blasting vibrations prediction[J]. Computers and Geotechnics, 2006,33(1):15-28.

[2] Ma G W, Hao H, Zhou Y X. Modeling of wave propagation induced by underground explosion[J]. Computers and Geotechnics, 1998,22(3/4):283-303.

[3] Wu C Q, Lu Y, Hao H. Numerical prediction of blast-induced stress wave from large-scale underground explosion [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2004,28(1):93-109.

[4] Chen S G, Zhao J. A study of UDEC modelling for blast wave propagation in jointed rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998,35(1):93-99.

[5] 夏祥,李俊如,李海波,等.爆破荷载作用下岩体振动特征的数值模拟[J].岩土力学,2005,26(1):50-56.
XIA Xiang, LI Jun-ru, LI Hai-bo, et al. UDEC modeling of vibration characteristics of jointed rock mass under explosion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005,26(1):50-56.

[6] Ocuorey F O. Measurement and predictions of borehole pressure variations in model blasting system[C]// First International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Lulea, Sweden, 1983:7-20.

[7] 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 Shock Waves, 2007,27(1):50-56.

[8] Gibson Jr R L, Toksöz M N, Dong W. Seismic radiation from explosively loaded cavities in isotropic and transversely isotropic media[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1996,86(6):1910-1924.

[9] Ding H, Zheng Z M. Source model for blasting vibration[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2002,45(4):395-407.

[10] 王文龙.钻眼爆破[M].北京:煤炭工业出版社,1983.

[11] 王明洋,邓宏见,钱七虎.岩石中侵彻与爆炸作用的近区问题研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2859-2863.
WANG Ming-yang, DENG Hong-jian, QIAN Qi-hu. Study on problems of near cavity of penetration and explosion in rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(16):2859-2863.

[12] Ханукаев А Н. 矿岩爆破物理过程[M].刘殿中,译.北京:冶金工业出版社,1980.

[13] Esena S, Onederraa I, Bilgin H A. Modelling the size of the crushed zone around a blasthole[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003,40(4):485-495.

[14] 卢文波,陶振宇.预裂爆破中炮孔压力变化历程的理论分析[J].爆炸与冲击,1994,14(2):140-146.
LU Wen-bo, TAO Zhen-yu. Theoretical analysis of the pressure-variation in borehole for pre-splitting explosion

[J]. Explosion and Shock Waves, 1994,14(2):140146.

[15] 杨建华,卢文波,陈明. 炮孔爆炸荷载变化历程的确定[C]//第二届全国工程安全与防护学术会议. 北京,2010:773-777.

[16] 陈士海,王明洋,赵跃堂,等. 岩石爆破破坏界面上的应力时程研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(11):1784-1788.
CHEN Shi-hai, WANG Ming-yang, ZHAO Yue-tang, et al. Time-stress history on interface between cracked and uncracked zones under rock blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003,22(11):1784-1788.

An equivalent simulation method for blasting vibration of surrounding rock*

YANG Jian-hua[1,2], LU Wen-bo[1,2], CHEN Ming[1,2], ZHOU Chuang-bing[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: To overcome the difficulties in simulating accurately the blasting vibration of surrounding rock, an equivalent simulation method was presented. The equivalent elastic boundary subjected to the blasting load was developed for multiple boreholes according to the spatial character of rock damage around boreholes. Blasting loads on the equivalent boundary varying along the borehole axis was calculated theoretically through analyzing the expansion of borehole volume, the development of cracks, the movement of stemming and the outburst of detonation gases. Combined with the blasting excavation of the No. 1 tailrace tunnel in Pubugou Hydropower Station, particle vibration velocities in the surrounding rock were simulated by employing this equivalent method based on the dynamic finite element method. The comparison between the simulation results and the monitoring data indicates that this equivalent simulation method is applicable to calculating the response of surrounding rock during blasting excavation; and that the selection of mechanical parameters of the rock near the equivalent elastic boundary has a significant impact on calculation results.

Key words: mechanics of explosion; equivalent simulation method; dynamic finite element; rock; equivalent elastic boundary; blasting load; blasting vibration

---

* Received 24 December 2010; Revised 19 May 2011
Supported by the National Natural Science Foundation of China (50779050,50909077);
the National Basic Research Program of China (973 Program) (2010CB732003)
Corresponding author: LU Wen-bo, wblu@whu.edu.cn

(责任编辑　张凌云)