

离散元法在节理岩体爆破振动分析中的应用*

郭易圆¹ 李世海²

(¹北京航空航天大学理学院 北京 100083) (²中国科学院力学研究所 北京 100080)

摘要 采用自编的离散元刚性块体计算程序,模拟了不同药量时节理岩体中集中药包的爆破过程,计算所得垂直振动速度波形和频谱基本上满足试验测定波形的特点。对计算得到的最大垂直运动速度幅值和频谱进行拟合,结果与试验数据吻合较好。同时,计算结果显示,振动波与节理走向的夹角不同,垂直运动速度波幅值和主频的衰减规律也有所不同,这与真实岩体中波传播特性相符合。

关键词 数值方法,节理岩体,爆破,振动,离散元法

分类号 O 241, TD 824.2

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2002)增2-2408-05

APPLICATION OF DEM IN VIBRATION ANALYSIS OF JOINTED ROCK MASSES UNDER BLASTING LOADING

Guo Yiyuan¹, Li Shihai²

(¹*School of Science, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083 China*)

(²*Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China*)

Abstract Based on the rigid block and face-to-face contact model of distinct element method (DEM), blasts of different charges in rock masses are simulated. The basic characteristics of calculated wave pattern and spectrum agree with those of the spot test. The results show that the attenuation law of maximal vertical velocity amplitude and principal frequency accord well with test data. The attenuation laws are different for different strike angles of wave. This agrees with the characteristics of vibration propagation in jointed rock mass.

Key words numerical method, jointed rock masses, blast, vibration, DEM

1 引言

爆破引起地基振动一直是爆破工程中令人关注的问题,从某种意义上说,它制约着爆破的规模和一些爆破技术的运用。因此,研究地基中爆破振动的传播规律,对于确保作业区周边的建筑物和构筑物的安全性是非常重要的。

近年来,随着爆破理论和计算机技术的发展,岩体中爆破数值计算越来越受到重视。对岩体结构中的爆破过程进行数值分析,一般基于连续介质力

学的方法,通过采用特殊的本构模型从整体上描述岩体的不连续性,或者在计算过程中应用特殊的单元模型从局部来反映不连续结构面的特征。本构模型方面,近来损伤力学和分形理论在爆破模型中的应用成为热点,该方法侧重于岩体在爆破载荷作用下的损伤演化过程,用于爆炸近区取得了比较好的结果^[1]。但是,爆破损伤模型参数过多,参数的确定和试验技术目前还没有完全解决。因此,将该模型推广到工程应用还存在比较大的困难^[2]。而在计算中采用特殊的单元模型仅适用于不连续结构面数目较少的情况,当节理裂隙尺寸较小、数量较多时

2002年6月13日收到初稿,2002年8月1日收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目(10172011)。

作者 郭易圆 简介:女,29岁,博士,1994年毕业于哈尔滨工业大学内燃机专业,现任讲师,主要从事离散元数值计算方面的研究工作。

则存在一定的困难。节理岩体是具有强烈不连续性的介质，在动态和静态载荷作用下的力学性质在很大程度上受控于岩体结构面^[3]。因此，采用基于连续介质力学的方法具有一定的局限性。

而离散元法认为，岩体是由节理等不连续结构面切割成的相互接触的块体单元组成，单元之间不需满足位移连续和变形协调要求，可以很好地反映结构的不连续性。经过多年的发展，离散元法已经被广泛应用于岩体的稳定性研究以及散体的运动分析问题^[4-5]。但是，用离散元法分析岩体中爆破振动传播规律的工作还比较少^[6-7]。本文以面-面接触刚性块体模型为基础，采用自编的离散元动态计算程序分析了节理岩体中集中药包爆炸的振动传播规律，并与现场试验数据进行了比较。结果表明，采用离散元法可以模拟爆炸振动传播的一些基本特点。

2 离散元动态计算模型

2.1 数值计算模型

在岩体结构中，由三组节理面切割成的六面体结构是最具代表性的岩体结构模型^[8]。本文作了进一步简化，用两组垂直节理和一组水平节理将研究区域离散为若干个正六面体刚性单元组成的系统。忽略爆源因素和构造应力的影响，不考虑主节理间的细小节理和裂隙的作用，将岩体结构视为半无限大介质。计算模型剖面示意图如图 1 所示，标注的块体为药包埋放处。研究区域为 $L_x \times L_y \times L_z$ 的长方体。

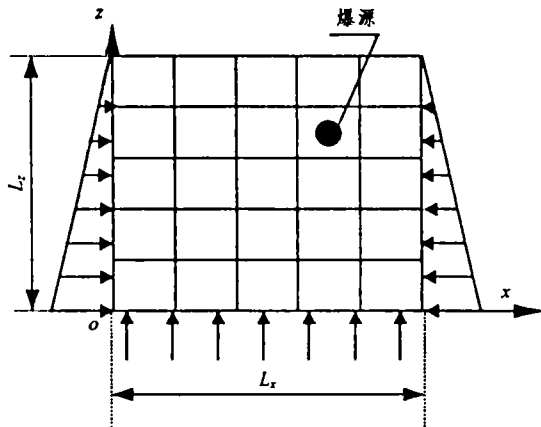


图 1 计算模型剖面示意图

Fig.1 Sketch map of the section of numerical model

2.2 面-面接触刚性块体模型基本方程^[9, 10]

计算区域内的每个单元都与周围的 6 个单元

相互接触，为了描述接触面上力的不均匀性，进而计算块体单元所受的力矩，将接触面分为 4 个小正方形。假设小正方形上的应力分布是均匀的，将形心(LP 点)视为小正方形上力的等效作用点，用点力来代替面力，如图 2 所示。假设单元之间能够相互嵌入，这种嵌入就相当于在两个刚性单元之间加了虚拟弹簧，以此来反映块体和节理引起的变形。相应的每个 LP 点上作用的法向力和切向力为

$$\left. \begin{aligned} F_n^{LP} &= -K'_n A_i \Delta u_n \\ F_t^{LP} &= -K'_t A_i \Delta u_t \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： F_n^{LP} 和 F_t^{LP} 分别为每个 LP 点上的法向作用力和切向作用力，单位为 N； Δu_n 和 Δu_t 分别为 LP 点处单元之间的相对法向位移与相对切向位移，单位为 m； K'_n 和 K'_t 分别为节理法向刚度及节理切向刚度，单位为 N/m^3 ； A_i 为 LP 点对应的小正方形的面积，单位为 m^2 ；负号表示位移与作用力方向相反。

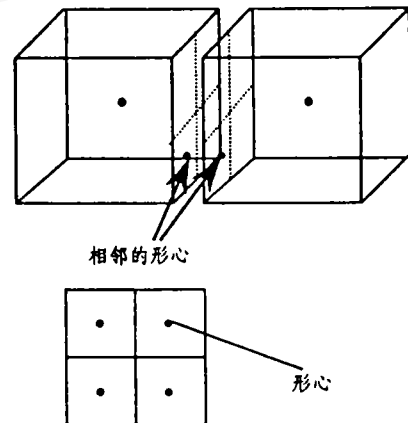


图 2 相邻块体单元及接触面上的形心

Fig.2 Two adjacent blocks and lump points on contact faces

对于面-面接触离散元法，单元视为刚性块体，每个单元的运动由下式确定：

$$M\ddot{u} + C\dot{u} = \bar{F}^{ext} - \bar{F}^{int} \quad (2)$$

式中： \ddot{u} 为块体的加速度向量， \dot{u} 为块体的速度向量， M 为质量矩阵， C 为阻尼矩阵， \bar{F}^{ext} 为作用于块体的外载之和， \bar{F}^{int} 为作用于块体的 6 个面、24 个 LP 点的接触力及其产生的力矩向量。对于药包周围块体，其运动方程为

$$M\ddot{u} + C\dot{u} = \bar{F}^{blast} - \bar{F}^{int} \quad (3)$$

式中： \bar{F}^{blast} 为爆炸载荷，等于爆生气体压力与作用面积的乘积。

除满足公式(1)的线性关系外，每个接触面上 4 个 LP 点上的法向作用力之和 F_n 与切向作用力之和

F_t 还满足摩尔-库仑准则, 即

$$F_t \leq c_n + F_n \tan \phi \quad (4)$$

式中: c_n 为粘聚力, ϕ 为摩擦角。对于岩体结构取粘聚力为零。假设单元之间不能承受拉力作用, 即 $F_n \leq 0$ 时, 令

$$\left. \begin{aligned} F_n &= 0 \\ F_t &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

不考虑炸药的起爆以及在药包内的传播过程, 假设爆炸后瞬间高压气体即充满整个药包所在空间。爆炸产生的能量以压力的形式作用在周围岩体上; 之后, 高压气体的膨胀过程视为绝热过程, 满足多方气体状态方程:

$$PV^{\gamma'} = P_0 V_0^{\gamma'} \quad P \geq P_t \quad (6)$$

$$PV^{\gamma'} = P_t V_t^{\gamma'} \quad P < P_t \quad (7)$$

式中: $\gamma = 3$; $\gamma' = 4/3$; P 和 V 分别为高压气球的瞬态压力和体积; P_0 和 V_0 分别为高压气球初始时刻的压力和药包的体积; P_t 和 V_t 分别为高压气球在两段绝热过程边界上的压力和体积, 其中, P_t 由下式给出^[11]:

$$P_t = P_0 \left\{ \frac{\gamma' - 1}{\gamma - \gamma'} \left[\frac{(\gamma - 1) Q_w}{P_0 V} - 1 \right] \right\}^{\frac{\gamma}{\gamma' - 1}} \quad (8)$$

式中: 爆炸热 Q_w 为 3 688 kJ/kg。初始时刻气体压力为

$$P_0 = \frac{\rho_w D^2}{2(\gamma + 1)} \quad (9)$$

式中: 炸药的密度 $\rho_w = 1\ 000\ \text{kg/m}^3$; 炸药的爆轰速度 $D = 4\ 000\ \text{m/s}$ 。

2.3 边界条件

在 $x=0$, $x=L_x$ 和 $y=0$, $y=L_y$ 表面上, 法向应力 σ_n 满足下式:

$$\sigma_n = \frac{\mu}{1 - \mu} \rho gh \quad (10)$$

在 $z=0$ 的表面上, 法向应力 σ_n 满足下式:

$$\sigma_n = \rho gh \quad (11)$$

式(10), (11)中: $h=L_z$, μ 为泊松比, ρ 为岩体密度, g 为重力加速度。边界面上的其他应力分量为零。在半空间自由表面, 即 $z=L_z$ 平面上, 所有应力分量为零。

为了防止波在研究区域边界处的伪反射, 进行动态计算时, 在 $x=0$, $x=L_x$ 和 $y=0$, $y=L_y$, $z=0$ 的边界面上, 还需施加无反射边界条件, 即边界上的法向应力 $\bar{\sigma}$ 和切向应力 $\bar{\tau}$ 分别取为

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_n &= -\rho c_p v_n \\ \bar{\tau}_t &= -\rho c_t v_t \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: c_p 和 c_t 分别为纵波和横波波速, v_n 和 v_t 分别为该点处的质点法向速度和切向速度。

2.4 初始条件

离散元动态计算过程分为两部分。假设系统的初始时刻的位移和内部应力场为零, 首先对静态载荷(一般为重力荷载及其边界条件)作用下的系统进行计算, 达到平衡状态后求得岩体内部的初始地应力场, 以此时的应力场作为动态计算的初始应力场。初始时刻爆生气体压力由式(9)确定。

利用动态松弛迭代法对上述基本方程和相应的边界条件进行求解。

3 数值计算与现场试验结果的比较

3.1 计算参数

由爆破振动试验测得某石灰石与土构成介质的纵波波速为 2 200 m/s, 横波波速为 800 m/s。由此得岩体结构的节理刚度参数 $SK_n = 1.16 \times 10^{10}\ \text{Pa}$, $SK_t = 2.05 \times 10^9\ \text{Pa}$ 。比较试验测定波形与计算波形的计算时间, 选取岩体结构的阻尼比为 0.01。分别选取自由表面内过震中与 x 轴平行以及与 x 轴夹角成 45° 直线上的点分析最大垂直振动速度, 研究区域大小分别为 $140\ \text{m} \times 44\ \text{m} \times 40\ \text{m}$ 和 $140\ \text{m} \times 140\ \text{m} \times 40\ \text{m}$ 。块体的大小为 $4\ \text{m} \times 4\ \text{m} \times 4\ \text{m}$, 炸药埋设处坐标为(118 m, 22 m, 38 m)。其他计算参数如表 1 所示。

表 1 计算参数

Table 1 Calculation parameters

密度 $\rho / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	摩擦角/ $^\circ$	泊松比
2 400	60	0.42

3.2 试验及计算垂直振动速度典型波形与频谱

现场试验中, 单响无台阶爆破试验药量分为 1, 2, 4, 8 和 27 kg 五种情况, 地表测点距离炮点的距离从十几米到几百米。试验测定质点运动速度幅值不是一开始就达到最大值, 而是在振动若干次后才达到最大; 爆炸引起地基振动的持续时间为 200~400 ms; 速度波形振动主频为 10~40 Hz。分别取不同的药量进行计算, 得到的波形和频谱基本上满足试验测定波形的特点: 质点运动速度幅值在振动若干次后才达到最大; 振动持续时间为 100~400 ms; 振动主频为 15~70 Hz。试验测定和数值计算

得到的垂直振动速度的典型波形和频谱如图 3~6 所示。

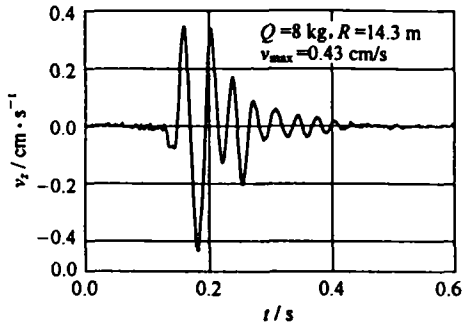


图 3 试验测定的典型波形

Fig.3 Typical waveform in vertical direction(test)

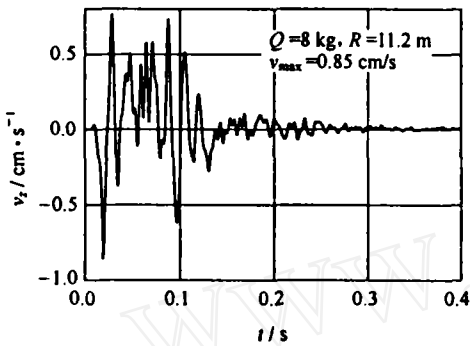


图 4 数值计算的典型波形

Fig.4 Typical waveform in vertical direction(calculation)

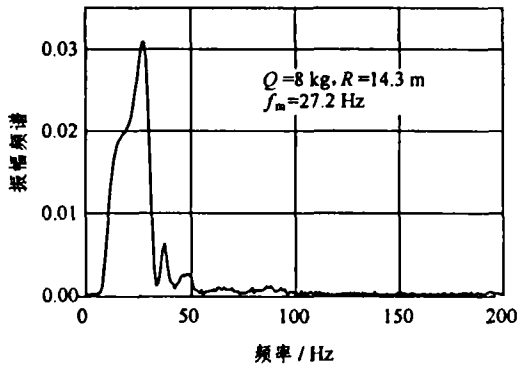


图 5 试验测定的典型频谱

Fig.5 Typical spectrum in vertical direction(test)

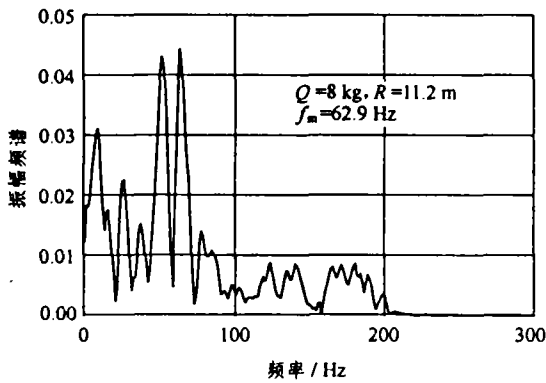


图 6 数值计算的典型频谱

Fig.6 Typical spectrum in vertical direction (calculation)

3.3 试验及计算结果拟合

对试验及计算所得的最大垂直振动速度幅值采用如下公式进行拟合:

$$v_m = k_1 \left(\frac{R}{Q^{1/3}} \right)^{-\alpha} \quad (13)$$

式中: v_m 为最大爆破振动速度幅值, 单位为 cm/s; 药量 Q 的单位为 kg; 测点距爆源距离 R 的单位为 m; k_1 和 α 为与岩体性质有关的衰减系数。对于垂直运动速度波形, 主频采用下式拟合:

$$f_m R = k_2 \left(\frac{R}{Q^{1/3}} \right)^\beta \quad (14)$$

式中: f_m 为垂直方向运动速度波形主频, 单位为 Hz; k_2 和 β 为与岩体性质有关的衰减参数。

拟合结果如图 7~10 所示, 拟合参数见表 2。可见, 振动波与节理走向的夹角不同, 垂直运动速度波幅值和主频的衰减规律也有所不同, 采用离散元法可以模拟真实岩体中波传播的这一特性。图 7 为与 x 轴平行直线上的点的最大垂直运动速度幅值和频谱拟合线与试验结果比较。计算所得的垂直振动速度幅值大于试验测值, 但二者的衰减规律基本一致; 主频离散度比较大, 但是衰减趋势是正确的。与试验结果相比, 计算所得垂直运动速度波主频偏大。图 8 为与 x 轴成 45° 直线上的点的最大垂直运动速度和频谱拟合线与试验结果的比较。可见, 速度幅值及主频的衰减规律与试验结果基本吻合。计算与试验得到的垂直运动速度衰减规律很接近, 垂直运动速度波主频大于试验测值。

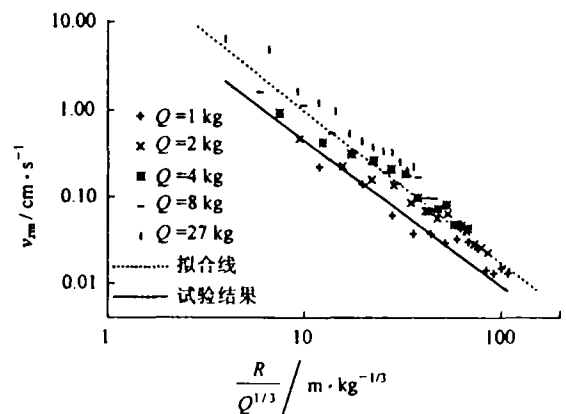


图 7 最大垂直运动速度拟合(与 x 轴平行的直线上的点)

Fig.7 Fit line of peak vertical velocity (points on the line parallel to x axis)

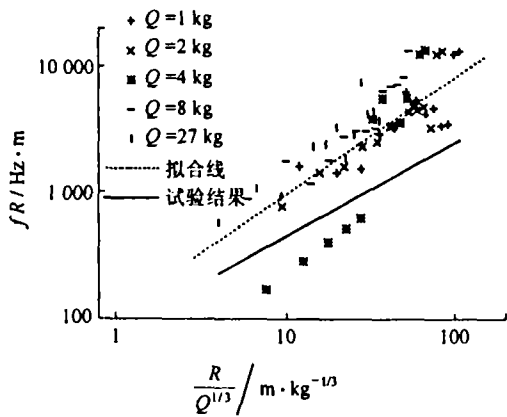


图8 垂直运动速度波频率拟合(与x轴平行直线上的点)
Fig.8 Fit line of principal frequency of vertical velocity (points on the line parallel to x axis)

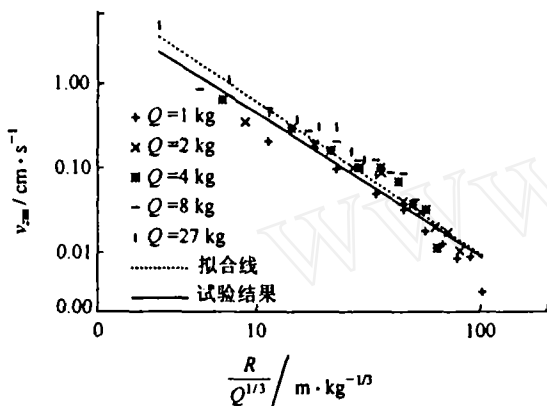


图9 最大垂直振动速度拟合(与x轴成45°角直线上点)
Fig.9 Fit line of peak vertical velocity (points on the line at an angle of 45° to x axis)

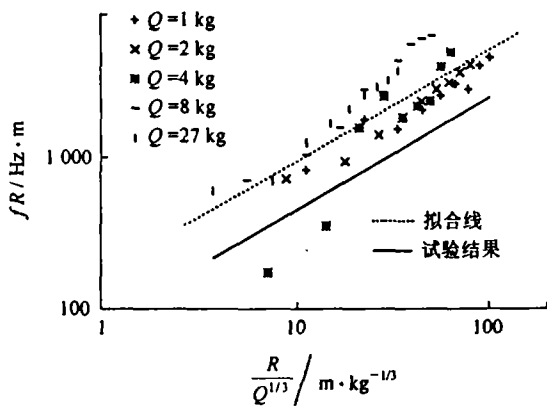


图10 垂直匀动速度频率拟合(与x轴成45°直线上点)
Fig.10 Fit line of principal frequency of vertical velocity (points on the line at an angle of 45° to x axis)

4 结论

采用离散元计算模型模拟了不同药量时节理岩

表2 试验与数值计算数据拟合参数

计算方法	拟合参数					
	k_1	α	相关系数	k_2	β	相关系数
试验	22	1.69	0.868	81	0.74	0.778
计算1	57	1.76	0.946	112	0.93	0.776
计算2	38	1.80	0.956	171	0.74	0.761

注:表中“计算1”和“计算2”分别表示数值计算时,过震中与x轴平行以及成45°角直线上各点的拟合参数。

体中集中药包的爆破过程,得到了垂直方向振动速度波形和频谱图。计算所得垂直振动速度波形和频谱基本上满足试验测定波形的特点。对计算数据进行拟合,结果表明,振动波与节理走向的夹角不同,垂直运动速度波幅值和主频的衰减规律也有所不同,采用离散元法可以模拟真实岩体中波传播的这一特性,过震中与x轴成45°直线上点与试验数据吻合较好。采用离散元法可以模拟节理岩体中应力波传播的一些基本特点。

参考文献

- Liu C, Thomas J A. Stress wave attenuation in shock-damaged rock[J]. J. of Geo. Res., 1997, 102(B3): 5 243~5 250
- 杨 军, 金乾坤, 高文学等. 岩石爆破理论模型及数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1999
- 李先炜. 岩体力学性质[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1990
- 王泳嘉, 邢纪波. 离散单元法及其在岩土力学中的应用[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1991
- 李嗣贵, 邓金银, 李明志. 节理破碎地层井壁稳定的离散元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增): 2 139~2 143
- 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
- 鲁晓兵, 郭易圆, 李世海. 爆炸荷载下三峡三期纵向围堰响应的离散元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 158~162
- 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988
- 郭学彬, 肖正学, 张志呈. 爆破振动作用的坡面效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 83~86
- 郭易圆, 李世海. 有限长岩柱中纵波传播规律的离散元数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1 124~1 129
- 亨利奇 J. 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国译. 北京: 科学出版社, 1987