

应力波在一维节理岩体中传播规律的 试验研究与数值模拟

田振农¹, 李世海¹, 肖南², 姚再兴^{1,3}

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 北京 100083;
3. 辽宁技术大学力学与工程学院, 辽宁 抚顺 123000)

摘要: 在测定撞击载荷形式的基础上, 通过试验研究应力波在一维节理岩体中的传播规律。分析完整岩体中各质点的振动形式以及不同形式的撞击载荷下对质点振动的影响, 在完整岩体中质点的振动形式很有规律, 其振动频率单一, 且与一维岩柱的长度有关; 分析结构面附近质点的振动特征, 试验结果表明结构面附近质点振动有增强现象; 还分析结构面组数对应力波传播衰减规律的影响, 随着结构面组数的增加, 质点振动衰减便快, 应力波随距离的衰减也很明显。在块体离散元的基础上, 研究多尺度离散元模型, 并用它来模拟应力波在节理岩体中的传播规律, 取得较好的效果, 说明块体离散元适合模拟岩体中应力波的传播衰减规律。

关键词: 岩石力学; 离散元; 岩体; 节理; 应力波

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)增 1 - 2687 - 07

EXPERIMENTAL STUDIES AND NUMERICAL SIMULATION OF STRESS WAVE PROPAGATION IN ONE-DIMENSIONAL ROCK MASS

TIAN Zhenong¹, LI Shihai¹, XIAO Nan², YAO Zaixing^{1,3}

(1. *Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;*

2. *School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;*

3. *Department of Mechanics and Engineering Science, Liaoning Technical University, Fushun, Liaoning 123000, China*)

Abstract: On the basis of detecting impact load, studies are carried on regulation of stress wave propagation in one-dimensional rock mass by experimental and numerical simulation. These studies include the vibration form of particle in intact rock mass, the effect of different impact loads on particle vibration, the vibration characteristic of particle near discontinuity, and the effect of multi-strip discontinuity on the regulation of propagation and attenuation of stress wave. The experimental results show that the regulation of particle vibration in intact rock mass is obvious, and its vibration frequency is unitary, indicating that the frequency has close relationship to the length of one-dimension rock mass. The experimental results also indicate that the particle vibration near discontinuity is magnified, and it can be attenuated through the crack if the wave length is not larger than the crack width. And with the number of discontinuity increasing, the attenuation of particle vibration is obvious. In addition, the attenuation of stress wave with space increasing is obvious. Multi-scale model of discrete element method is constructed on the basis of primary block discrete element model. The new model is used to simulate the stress wave propagation regulation in jointed rock mass, and is more rational. The result shows that the improved

收稿日期: 2007 - 03 - 21; **修回日期:** 2007 - 04 - 30

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412703); 中国科学院重要方向性项目(KJXC2 - SW - L1)

作者简介: 田振农(1971 -), 男, 博士, 1996年毕业于山东矿业学院矿井建设专业, 现为助理研究员, 主要从事岩土中有关爆炸方面的研究工作。E-mail: zntian_blast@126.com

block discrete element model is fitful to simulate the propagation regulation of the stress wave in jointed rock mass.

Key words: rock mechanics; discrete element model; rock mass; joint; stress wave

1 引言

研究节理裂隙对应力波在岩体中的传播衰减规律的影响,对地质勘探、桩基测试以及爆破工程都有重要的意义,另外描述结构面的几何形态与其力学性质之间的关系,也是重大岩土工程的力学分析中亟待解决的问题^[1-17]。由于岩体是由节理、裂隙以及由它们分割成的岩块组成的复杂的地质体,给研究带来很大的困难,虽然有不少人通过现场试验研究了爆炸波在岩体中的传播衰减规律,得出了爆破地震波与传播距离、岩石性质、场地条件等有关的经验公式,但单个裂隙特征对应力波的影响,既包括它对幅值的影响,又包括它对频率的影响,试验结论较少;而数值模拟主要基于连续介质模型,但是不连续性、非均匀性和各向异性是岩体材料最主要特性,节理岩体的性质在很大程度上取决于岩块系统的构成,而不是岩石材料本身,通常把含有节理、裂隙的岩体等效为另一种连续、均匀、各向同性的岩体,不仅在计算参数时缺少试验依据,而且无法模拟单个裂隙对应力波传播衰减规律的影响;有些连续方法通过把节理本构模型与岩石本构模型耦合计算岩体中的问题,可以反映岩体的非连续性质,但是当裂隙数量较多时就难以反映波在岩体中的传播规律。离散元方法是一种适合于计算非连续介质中动力学问题的计算方法,自1971年P. A. Cundall^[7]提出离散元法角-面(角-边)接触模型,离散元方法在岩土工程领域得到迅速推广。本文用多尺度离散元方法描述岩体中不同结构对应力波传播规律的影响,可以更加方便地展现结构面的特征,模拟结果与试验吻合较好。

2 一维岩体中应力波传播试验

2.1 试验设备、方案

在实验室内做岩体的应力波传播规律试验,以前的研究主要集中在声速的测量上,由于近年来振动测量装置的快速发展,特别是采样率的提高,能

够在较小的范围内研究各点的不同振动情况。此次试验采用LC01系列压电加速度传感器,可以同时测量3个方向上的加速度,并且自身带有电荷放大器,用CM4016多功能信号调理模块再次放大振动信号,并用工控机采集信号,整个系统的采样频率为3000 Hz。此次试验方案主要如下:

(1) 研究不同的冲击形式引起的应力波的传播衰减规律。

(2) 研究结构面附近的质点振动特征。

(3) 研究结构面组数对质点振动的影响。

试验装置如图1所示,岩石块下面是塑料泡沫板,厚度为0.2 m,经测定其波速为100 m/s,与岩石的摩擦系数为0.1。



图1 试验装置示意图

Fig.1 Sketch map of experiment setting

岩石块的截面尺寸为0.1 m×0.1 m,总长度为2.0 m,其弹性模量为30 GPa,密度为2700 kg/m³,内摩擦角为30°,黏聚力为4.6 MPa,铅球的质量为6 kg,经测定冲击载荷形式如下:

$$P = A_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

式中: A_0 为冲击力的峰值; α , β 为正的常数,但必须是 $\alpha < \beta$, 改变它们的值,可以得到不同冲击脉宽的载荷。

2.2 试验结果与分析

方案一: 完整岩体中的不同冲击形式的振动试验,对应的试验方案如图2所示。

当冲击时间为0.1 ms时,测点5, 4, 2, 1振

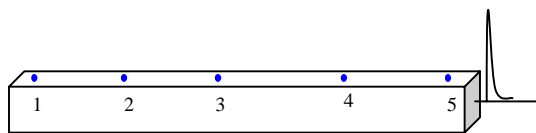


图 2 试验方案一示意图
Fig.2 Experimental sketch of scheme 1

动加速度形式基本相同, 典型的质点振动如图 3 所示, 对应的频谱图如图 4 所示。

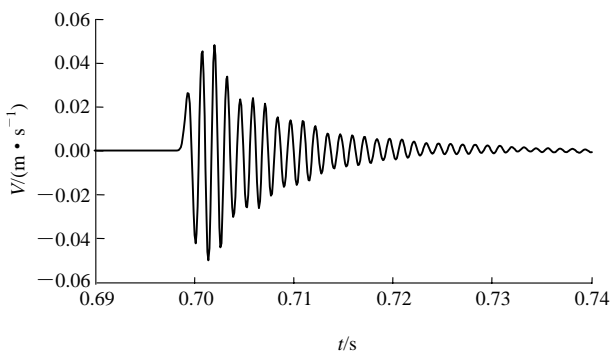


图 3 完整岩体中质点振动形式
Fig.3 Particle vibration in intact rock mass

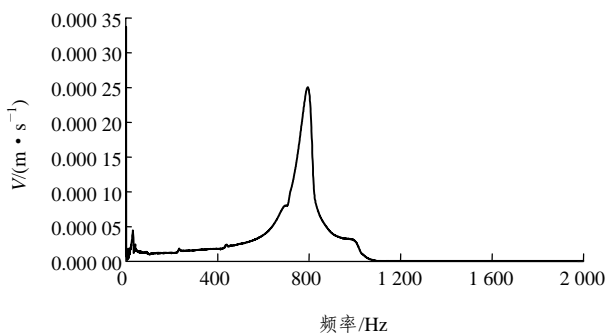


图 4 完整岩体中质点振动形式
Fig.4 Spectrogram of particle vibration in intact rock mass

可以发现这种几个测点的振动规律性较强, 其振动峰值出现在第 2 到第 3 个周期, 振动频率单一, 约为 800 Hz, 振动随距离的增加衰减缓慢, 由于测点 1 靠近左边界, 其结果有放大效应。由于岩柱中在测点 3 附近存在着微小的缺陷(同次岩石样本中的超声波试验, 其声速差别很大, 可以推断岩石中必然存在着微小的缺陷才能影响其声速), 测点 3 的振动形式与其他测点有显著的差别, 见图 5。

图 5 说明微裂纹对其附近质点的振动形式有重要影响。当冲击时间为 0.4, 0.6, 0.8 ms 时, 各质点的振动形式与图 3 相差不大, 当冲击时间为 2.0 ms

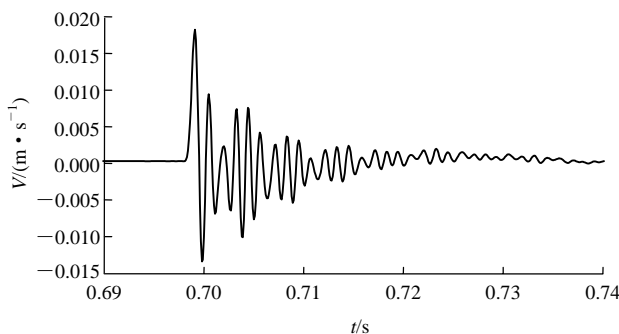


图 5 微裂隙处节点振动形式
Fig.5 Particle vibration near cranny in rock mass

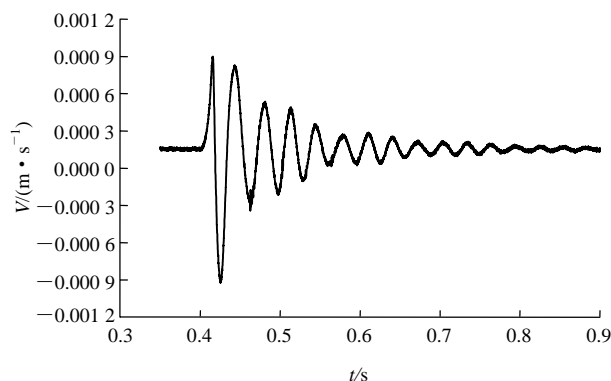


图 6 较缓冲击载荷下的质点振动形式
Fig.6 Particle vibration in intact rock mass when impact force is weak

时, 各质点振动的频率有较大的变化, 测点 3 附近的缺陷对附近质点的振动基本上没什么影响了, 如图 6 所示。

由图 6 可以看出微裂隙对附近质点振动的影响与载荷的形式有较大的关系; 岩柱中质点的振动形式也受外载荷形式的影响, 但这种影响并非连续变化, 只有冲击时间明显加长时, 才会引起振动形式的明显改变; 测定岩体中是否存在结构面与研究问题的尺度有关。

方案二: 冲击载荷作用下岩体中单个裂缝对应力波的影响与裂缝前后质点振动形式。试验结果如图 7, 8 所示。

与完整岩体里质点的振动相比, 结构面不仅影响了质点的振动形式, 第 1 次振动峰值最大, 而且从第 1 次振动到第 2 次振动衰减很明显, 其主振周期变为两个, 一个在 800 Hz 左右, 一个在 1 600 Hz 左右; 总结 5 个质点的振动规律发现: 由于结构面处应力波的反射作用, 在结构面附近的振动有明显的放大; 比较结构面两侧的质点振动, 可以发现

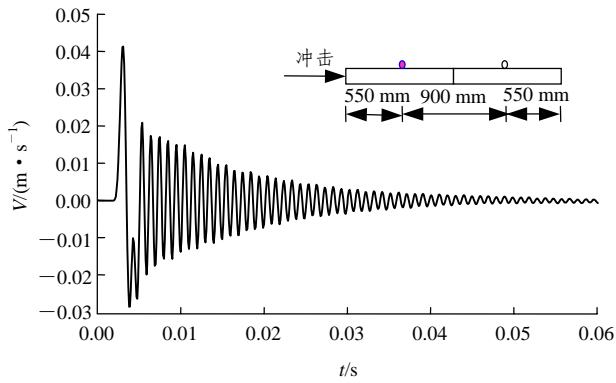


图 7 裂缝前质点的振动形式

Fig.7 Particle vibration before cranny when there is only one cranny

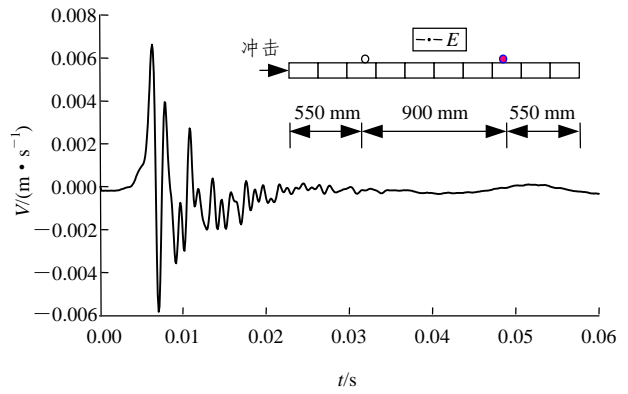


图 10 裂缝后质点的振动形式

Fig.10 Particle vibration after cranny

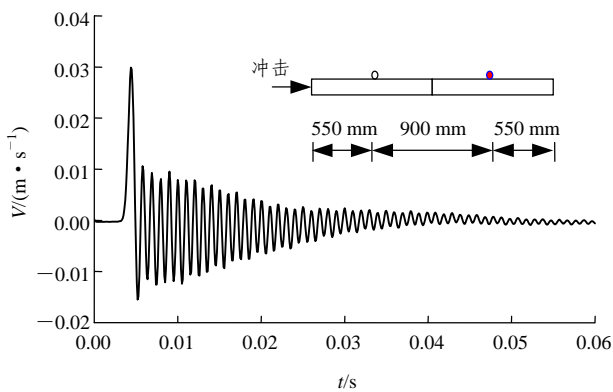


图 8 裂缝后质点的振动形式

Fig.8 Particle vibration after cranny when there is only one cranny

结构面后质点的振动幅值减小，振动形式也略有变化。

方案三：冲击载荷作用下岩体中多个裂缝对应力波的影响。图 9 所示为前部质点的振动形式，图 10 所示为后部质点的振动形式。

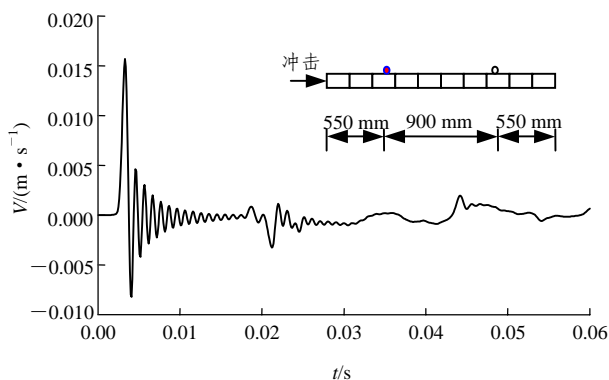


图 9 裂缝前质点的振动形式

Fig.9 Particle vibration before cranny when there are lots of crannys

试验结果显示：随着结构面个数的增多，结构面对应力波的影响更大，不仅振幅有很大的衰减，而且对应力波的反射作用也有很大影响。

通过对一维岩体中应力波传播规律的试验研究，可以看出有无结构面和结构面的多少对质点的振动形式有重要影响，质点的振动图形及其频谱中包含了大量的应力波传播规律的信息，对其幅值的分析、振动图形的分析、频谱分析可以总结应力波在岩体中的传播衰减特点，为探求结构面的存在及其数量提供依据。

3 离散元数值计算模型

在模拟一维问题时，由于不需要考虑泊松效应，如果没有大变形，有限元模型与块体离散元模型计算结果完全一致，但是离散元模型在考虑结构面的影响和大变形问题时优点比较突出。块体离散元假设单元之间有弹簧连接，用这种虚拟的弹簧来反映岩体和节理引起的变形，考虑实际材料的阻尼作用，离散元块体间的接触模型如图 11 所示。

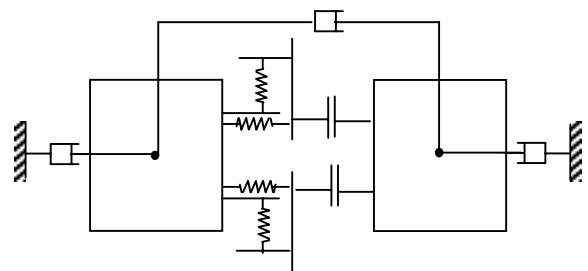


图 11 离散元块体间的接触模型

Fig.11 Contact model between two blocks in DEM

每个接触在两个接触单元上都有一个对应的面, 每个面上有 4 个接触点, 简称为点 lp , 点 lp 没有质量, 仅是力的作用点, 每个点 lp 上作用的法向力和切向力为

$$\left. \begin{aligned} F_n^{lp} &= -K_n A_s \Delta u_n \\ F_s^{lp} &= -K_s A_s \Delta u_s \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: F_n^{lp} , F_s^{lp} 分别为每个 lp 点上的法向作用力和切向作用力(N); Δu_n , Δu_s 分别为点 lp 处单元之间相对法向位移与相对切向位移(m); K_n , K_s 分别为节理法向刚度及节理切向刚度(N/m³); A_s 为点 lp 对应的小正方形的面积(m²); 负号表示位移与作用力方向相反。

确定边界条件和结构面的强度判断准则后, 块体离散元用动态松弛法求解单元的运动方程, 则有

$$m^i \ddot{u}^i + c_m \dot{u}^i + c_k \sum_{j=1}^n (\dot{u}^i - \dot{u}^j) + k \sum_{j=1}^n (\bar{u}^i - \bar{u}^j) = \bar{F}^{ext} \quad (3)$$

$$I^i \ddot{\theta}^i + c_l r_0^2 \dot{\theta}^i + c_k \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^{nl} \{ \bar{r}_l \times [(\dot{\theta}^i - \dot{\theta}^j) \times \bar{r}_l] \} + k \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^{nl} \{ \bar{r}_l \times [(\dot{\theta}^i - \dot{\theta}^j) \times \bar{r}_l] \} = \bar{M} \quad (4)$$

式中: \bar{u}^i , \dot{u}^i , \ddot{u}^i 分别为第 i 个块体的位移、速度、加速度; m^i 为质量; c_m , c_k 分别为质量阻尼和刚度阻尼; k 为刚度; \bar{F}^{ext} 为作用于块体的外载之和; $\bar{\theta}^i$, $\dot{\theta}^i$, $\ddot{\theta}^i$ 分别为第 i 个块体的角位移、角速度、角加速度; c_l 为块体转动时对应的阻尼系数; I^i 为转动惯量; r_0 为回转半径; \bar{r}_l 为点 lp 的失径; \bar{M} 为外力矩。

三维离散元多尺度计算方法是在原来块体离散元的基础上, 通过局部单元不隔级细分的自适应分裂来实现的。单元分裂以后, 大小块间力和位移的传递方式如图 12 所示。

平动部分: 对块体单元 1 其质心位移在一个时步内由平动引起的变化为

$$\left. \begin{aligned} u_{ik}^1 &= \Delta t (v_{ik}^1 - v_{ik}^2) \\ u_k^1 &= \sum_{i=1}^4 u_{ik}^1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

转动部分: 对块体单元 1 其质心位移在一个时

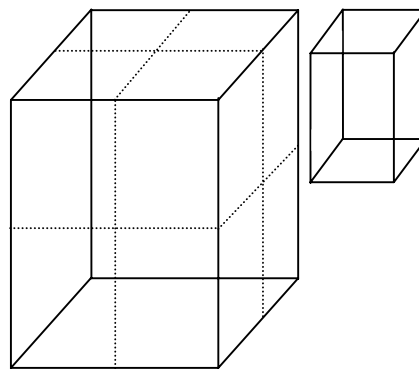


图 12 不同尺寸块体之间力和位移的传递方式
Fig.12 Transfer mode of force and displacement of the different size bloc

步内由转动引起的变化为

$$\left. \begin{aligned} u_{ik}^1 &= \Delta t (\omega_{ik}^{12} \times r_i^1) \\ u_k^1 &= \sum_{i=1}^4 u_{ik}^1 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: u_k^1 为块体 1 的质心位移; Δt 为时步; I 为接触点号; k 为坐标系的 3 个方向; v_{ik}^1 , v_{ik}^2 为速度; r_i 为质心到第 i 个接触点的失径; ω_{ik}^{12} 为两个块的相对转动角速度。

块体单元 2 其质心的平动位移和由转动引起的位移在一个时步内的变化同理可得。

小单元上每个面在质心产生合的力可以表示为

$$F_i' = \sum_{i=1}^4 f_{ik}' \quad (7)$$

大单元上每个面在质心产生合的力可以表示为

$$F_i = \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^4 f_{i'jk} \quad (8)$$

式中: i' 为力或力矩的方向, k 为每个接触面上接触的点数, j 为大单元上的面被划分的区域, f 和 f' 为每个接触点上的力或其相对于质心产生的力矩。

4 试验结果与模拟结果对比分析

对三维块体离散元, 结构面的性质反映在接触面上, 在结构面附近对单元细分能更准确反映结构面的特性。一维岩体中单元划分如图 13 所示。

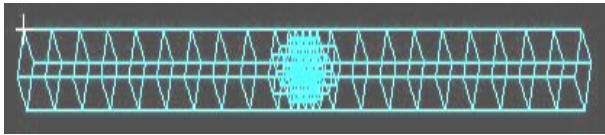


图 13 一维岩体计算单元划分示意图

Fig.13 Sketch map of grids structure in DEM

用三维块体离散元程序对完整岩体、岩体中含有一条裂缝、含有多组裂缝的情况进行了数值模拟，模拟材料参数与实际一致，单元划分：基本单元与试验情况一致，在裂缝附近对单元进行细化，如图 13 所示。

模拟结果如图 14~17 所示。

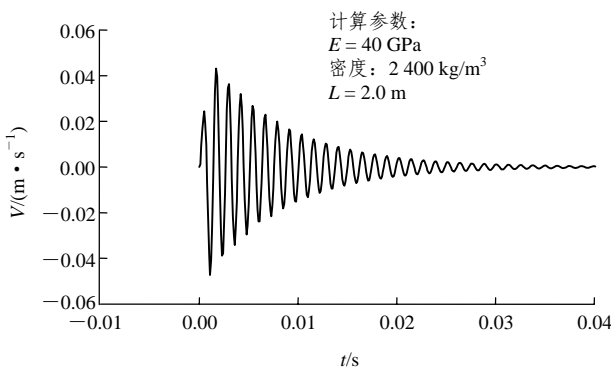


图 14 模拟完整岩体中质点的振动形式

Fig.14 Particle vibration simulated by DEM in intact rock mass

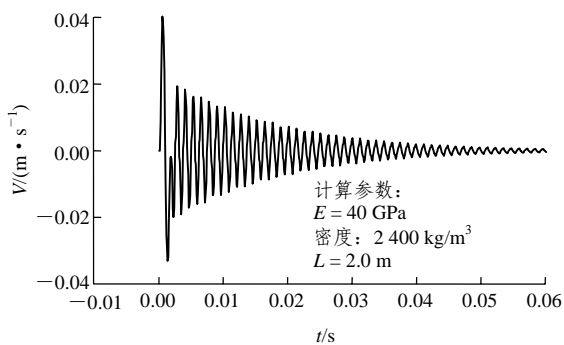


图 15 模拟岩体中一个结构面前面质点的振动形式

Fig.15 Vibration simulated of frontal particle by DEM when rock mass includes only one cranny

把这 4 个图与前面的实测图比较，可以看出，细化前离散元可以很好的模拟在冲击载荷下完整岩体中一维应力波的传播规律，无论是波形、振动频率还是振动持续时间，都可以被很好的模拟出来，需要说明的是波形与载荷的形式有很大关系，振动频率在一定的冲击载荷形式下仅与一维杆的长度有

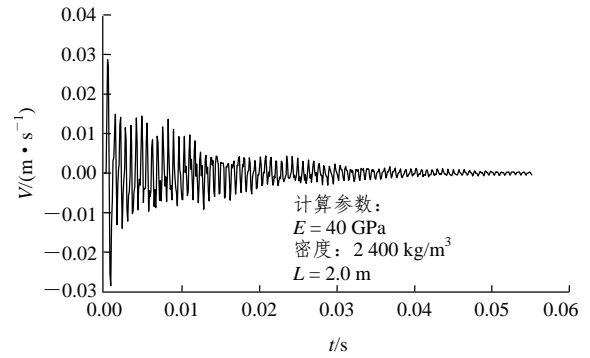


图 16 模拟岩体中一个结构面后面质点的振动形式

Fig.16 Vibration simulated of back particle by DEM when rock mass contains only one cranny

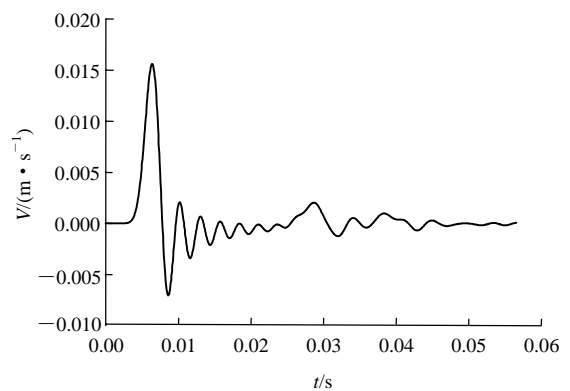


图 17 模拟岩体中有多个结构面时质点的振动形式

Fig.17 Particle vibration by DEM when rock mass contains lots of crannies

关。细化的离散元程序可以模拟裂缝对应力波传播的影响，裂缝的定义是根据单元之间的强度破坏准则确定的，假设完整岩体时相邻单元之间强度很大，有裂缝存在时剪切强度很小，且抗拉强度为 0 MPa。模拟结果显示裂缝前后的质点振动形式有较大的差别，其主振频率与完整岩体里的主振频率也有很大变化，在完整岩体里，主振频率为 800 Hz，当有一条裂缝存在时，主振频率有两个，即 800 和 1 600 Hz。

5 结 论

通过试验可以看出：如果应力波的波长不能远大于结构面的厚度，结构面对应力波的传播有重要影响，由于结构面的反射作用，结构面附近的质点振动明显增大，应力波穿过结构面时，所有频率的应力波都会衰减，但高频部分衰减更快，结构面增

多, 应力波衰减更明显。块体离散元的数值模拟表明它可以很好模拟岩体中应力波的传播特征以及不同数目的节理对应力波传播的影响。把试验与数值模拟结合起来, 有可能反演出结构简单的岩体里的弱面或岩体中较大的结构面。

参考文献(References):

- [1] LEMOS J V, HART R D, CUNDALL P A. A generalized distinct element program for modeling jointed rock mass[C]// International Symposium on Fundamentals of Rock Joints. Bjokliden: [s.n.], 1985: 335 - 343.
- [2] 张 奇. 应力波在节理处的传递过程[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(6): 99 - 105.(ZHANG Qi. The transfer process of stress wave at joint[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(6): 99 - 105.(in Chinese))
- [3] 王明洋, 钱七虎. 爆炸应力波通过节理裂隙带的衰减规律[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 42 - 46.(WANG Mingyang, QIAN Qihu. Attenuation law of explosive wave propagation in cracks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(2): 42 - 46.(in Chinese))
- [4] 董永香. 爆炸波在多层介质中传播与衰减特性研究[博士学位论文][D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2004.(DONG Yongxiang. A study on characteristic of explosive wave propagation in multi-layer media[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2004.(in Chinese))
- [5] FAN S C, JIAO Y Y. On modeling of incident boundary for wave propagation in jointed rock masses using discrete element method[J]. Computers and Geotechnics, 2004, 31(1): 57 - 66.
- [6] RICARDO E, BARBOSA-CARRILLO. Discrete element models for granular materials and rock masses[Ph. D. Thesis][D]. [S. 1.]: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1990.
- [7] CUNDALL P A. A Computer model for simulating progressive large scale movements in blocky systems[C]// Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics. Nancy, France: [s. n.], 1971: 2 - 8.
- [8] ITASCA Consulting Group. 3DEC—3D distinct element code[R]. [S. 1.]: ITASCA Consulting Group, 1987.
- [9] HUANG H Y. Discrete element modeling of tool-rock interaction[Ph. D. Thesis][D]. [S. 1.]: University of Minnesota, 1999.
- [10] XU H M. Hysteresis and nonlinear wave propagation in rock and soil[Ph.D. Thesis][D]. San Diego: University of California, 1998.
- [11] 国胜兵, 高培正, 钱七虎, 等. 爆炸波在准饱和砂土中的传播规律[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1 897 - 1 902.(GUO Shengbing, GAO Peizheng, QIAN Qihu, et al. Explosive wave propagation in quasi-saturated sandy soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(12): 1 897 - 1 902.(in Chinese))
- [12] 郭易圆, 李世海. 离散元法在节理岩体爆破震动分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增 2): 2 408 - 2 412.(GUO Yiyuan, LI Shihai. Application of DEM in vibration analysis of jointed rock masses under blasting loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Supp.2): 2 408 - 2 412.(in Chinese))
- [13] 陈 颀, 黄庭芳. 岩石物理学[J]. 北京: 北京大学出版社, 2001.(CHEN Yu, HUANG Tingfang. Rock physics[J]. Beijing: Peking University Press, 2001.(in Chinese))
- [14] 刘凯欣, 高凌天. 离散元法在求解三维冲击动力学问题中的应用[J]. 固体力学学报, 2004, 25(2): 182 - 185.(LIU Kaixin, GAO Lingtian. The application of discrete element method to solving three-dimensional impact dynamics problem[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2004, 25(2): 182 - 185.(in Chinese))
- [15] JING L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modeling for rock mechanics and rock engineering[J]. International Journal of Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(2): 283 - 353.
- [16] HAO H, WU C, ZHOU Y. Numerical analysis of blast-induced stress wave in a rock mass with anisotropic continuum damage models[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2002, 35(2): 79 - 94.
- [17] 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.