文章编号: 1001 - 487X(2000) 增刊 - 0019 - 05

三维离散元法在岩体爆破过程研究中的应用

郭易圆、李世海、柳春图

(中国科学院力学研究所 北京市 100080)

摘要:采用三维离散元程序研究了岩体中爆炸波的传播过程。首先,通过与弹性解析解的比较, 验证了该程序的可靠性;然后用面面接触模型模拟了爆炸引起的地面振动,结果表明离散元法基 本上可以客观地描述振动过程的一些性质。

关键词:三维离散元法;岩体结构;爆炸

中图分类号: TD 235.1 文献标识码: A

Application of Three - dimensional Discrete Component Method in the Process of Rock Blasting

GUO Yi-yuan, LI Shi-hai, LIU Chun-tu

(Mechnics Research Institute, China Scientific Academy, Beijing 100080)

Abstract: The three - dimensional discrete component process is applied to study the propagation course of explosive wave in rock. The relaibility of the process is vertified after comparing it with the elastic analytical solution, the ground vibration is simulated by contracted blasting, the results reveal that the discrete component method can fundamentally describe the properties of vibration course.

Key words: three - dimensional discrete component method; rock structure; explosive

引言 1

爆炸引起的地面振动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使用。通过长期的工程实践,人们总结出了相应的经验公式,而对于爆炸 产生的地震波机理的认识还有待提高。

对岩体结构进行数值分析,一般采用连续介质力学方法,如:有限元法,有限差分法等。但 是由于岩体结构往往被层面和节理面等弱结构面所切割,而呈现出结构的不连续性,采用上述 方法具有一定的局限性。而离散元法则按岩体的节理和裂隙将其划分为相互接触的单元,相 邻单元之间可以分开。考虑到了在节理面上的不连续性,从而能够较好地模拟岩体结构的特 性,被公认为是对节理岩体进行数值模拟的一种行之有效的方法[1]。

本文采用三维离散元法面面接触模型,用理想的水平,垂直节理将研究区域划分为刚性的

正方体单元, 拟和了在半无限大空间弹性体表现上作用竖直集中力时, 弹性体内任意点的位移 和应力的解析解,还对岩体结构中爆炸引起的地面振动波形进行了拟和。

2 离散元法

2.1 基本假设

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单元组成。一个单元与 其相邻单元的接触可以分开,单元之间不需满足位移连续和变形协调要求。对于面-面接触模 型的离散元法来说。存在如下假定:

- (1) 单元视为刚性块体,每个单元的运动则根据其受力情况由牛顿运动定律确定。
- (2) 单元之间力的传递是通过单元之间相互接触的虚拟弹簧叠合量来表示的。单元之间 能够相互嵌入,从而反映了单元的变形和节理引起的变形。
- (3) 单元之间的作用力用法向力及切向力来表示,分别与法向和切向位移成正比关系。 在计算半无限大岩体的过程时,法向力与切向力之间满足摩尔 —库仑准则:且单元相互分离 时,单元之间接触力为零。
 - (4) 单元之间始终为面 面接触 块体的转动以接触面上不均匀作用力表示。
 - (5) 单元之间的相对位置在受力过程中不变。
 - (6) 单元之间的节理用等效块体刚度表示。

2.2 基本方程

离散元法中的每个刚性块体单元满足牛顿运动定律:

$$M \ddot{u} + C \dot{u} = F^{ext} - F^{int} \tag{1}$$

其中,证为块体的加速度矢量,业为块体的速度矢量,M 为质量矩阵,C 为阻尼矩阵,Fext为 作用于块体的外载之和,Fint为作用于块体的接触力之和。

而单个块体单元与相邻单元之间的相互作用力满足:

$$F_n = k_n u_n \qquad F_s = k_s u_s \tag{2}$$

其中, F1 和 F2 分别为单元之间法向作用力和切向作用力增量, u1 和 u2 分别为这单 元之间相对法向位移增量与相对切向位移增量,k,和 k。分别为法向刚度及切向刚度。在计算 半无限大岩体中爆炸过程时,假设在单元之间的力服从无张拉条件与摩尔 — 库仑准则,即:

$$F_n = 0$$
 (单元之间法向分离) (3)

$$F_s = C + F_n t g \phi$$
 (单元之间产生相对滑动) (4)

2.3 边界条件

对于半无限大的空间,假设所选择的研究区域 xL xvL xzL 足够大。采用固定边界条件 即除了上表面 z=zL 以外的其它五个面 ,x=0 ,x=xL ,y=0 ,y=yL ,z=0 的面上有:

$$u = 0 \tag{5}$$

其中:u 为边界上的位移。

由式(2)-(4)可求出作用于块体形心的合力,将(5)式的边界条件代入(1)式,采用动态松

驰法对其进行求解。利用中心差分格式按时步迭代,直至达到平衡状态为止。

3 算例

如图 1 所示,考虑半无限空间弹性基础表面上作用一竖直集中力 P,弹性体内所引起的应力和位移存在解析解[2],大小为:

$$x = \frac{3P}{2} \cdot \left\{ \frac{x^2 z}{R^5} + \frac{1-2}{3} \left[\frac{1}{R(R+z)} - \frac{(2R+z)x^2}{(R+z)^2 R^3} - \frac{z}{R^3} \right] \right\}$$

$$y = \frac{3P}{2} \cdot \left\{ \frac{y^2 z}{R^5} + \frac{1-2}{3} \left[\frac{1}{R(R+z)} - \frac{(2R+z)y^2}{(R+z)^2 R^3} - \frac{z}{R^3} \right] \right\}$$

$$z = \frac{3P}{2} \cdot \frac{z^3}{R^5}$$
(6a)

$$xy = \frac{3P}{2} \cdot \left[\frac{xyz}{R^5} - \frac{1-2}{3} \cdot \frac{(2R+z)xy}{(R+z)^2 R^3} \right]$$

$$yz = \frac{3P}{2} \cdot \frac{yz^2}{R^5}$$

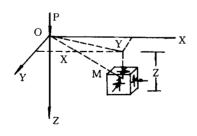
$$zx = \frac{3P}{2} \cdot \frac{xz^2}{R^5}$$
(6b)

$$\overline{u} = \frac{P}{4} \frac{xz}{G} [\frac{xz}{R^3} - (1 - 2)] \frac{x}{R(R + z)}$$
 (7 a)

$$\overline{v} = \frac{P}{4} \int_{R}^{QZ} \left[\frac{yz}{R^3} - (1 - 2) \right] \frac{y}{R(R + z)}$$
 (7b)

$$\overline{w} = \frac{P}{4 G} \left[\frac{z^2}{R^3} + 2(1 - \frac{1}{R}) \right]$$
 (7c)

其中, $_x$, $_y$, $_z$ 为 $_x$, $_y$, $_z$ 法向应力: $_x$, $_y$, $_z$, $_z$, 为剪应力: $_u$, $_v$, $_w$ 为 $_M$ 点 $_x$, $_y$, $_z$ 方向的位移: $_G$ 和 分别为材料的变形模量和泊松比,分别取 $_G$ = 3 ×10 9 , = 0.3。



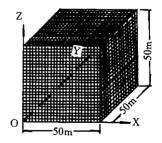


图 1 集中力与应力和位移关系图

图 2 网格划分示意图

取研究区域的大小为 50 x50 x50 m,坐标如图 2 所示,将其划分为 15 625 个单元,每个块体的大小为 2 x2 x2m。单个块体视为刚性块,满足公式(1);而块体单元之间满足公式(2),即块体单元之间的接触为线性弹性关系,取力 $P=100~{\rm KN}$ 。取对在工程中影响比较大的竖直法向应力,其解析解和数值计算结果如图 3 和 4 所示,其中位移的数量级在 10^{-7} 和 10^{-8} 之间。

从图 3 和图 4 可以看出,数值计算结果同解析解比较接近。由于没有考虑块体的弹性变形,块体所受的应力偏小,在 x 和 y 方向上的位移也小于解析解,而在 z 方向的位移则稍大于

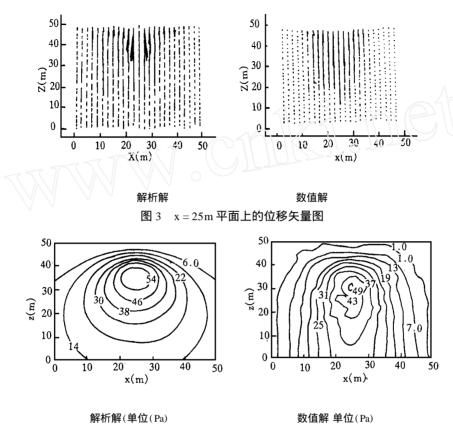


图 $4 ext{ } x = 13 ext{ } m$ 平面上的竖直法向应力等值线图

解析解。此外由于受位移边界条件的限制,边缘块体的位移和应力也受到一定的影响。以上结果基本验证了该三维离散元面面接触模型程序的可靠性。

4 爆破过程的模拟

近期我所的三峡课题组在京郊的大灰场进行了一系列的岩体结构爆破试验,对岩体结构中爆破引起地面振动速度波进行了测量,典型的速度波形和频谱如图 5 所示。

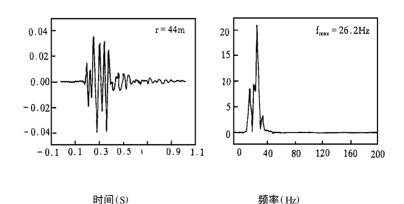
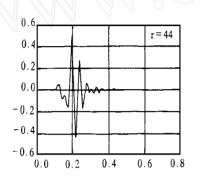


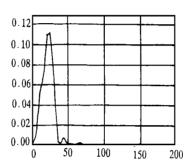
图 5 试验测定的典型速度波形和频谱图 距震源距离 r = 43.7 m

结合试验结果,本文利用离散元法对岩体结构中爆炸引起的振动进行了模拟。试验区基本上可以视为半无限大的岩体结构,选取研究区域的大小为 212 ×212 ×60 m,将其划分为 42 135 块,每个块体的大小为 4 ×4 ×4 m,区域边界满足公式(5)的边界条件。首先对岩体结构施加重力载荷,待系统平衡后按如下公式施加爆炸压力 P 载荷^[3]:

$$P = P_m (1 - \frac{1}{2})^{\nu-1} \qquad P_m = \frac{wD^2}{2(k+1)}$$
 (8)

对于球形化学装药 v=3, $\sim 10^{-4}$, 炸药密度 $w=1~000~kg/m^3$, 爆轰速度 D=2~500~m/s, 多方指数 k=3。计算得地面振动的速度波形和频谱如图 6 所示。





时间(S)

频率(Hz)

图 6 数值计算所得的速度波形和频谱图 距震源距离 r = 44m

由上述结果可以看出,数值计算所得的波形基本上满足试验测定波形的特点:震动持续时间在百毫秒量级;最大频率一般在 20~40 Hz 之间;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。与震源距离相同的点,数值计算所得的主频为 25.4 Hz,同实测值 26.2 Hz 十分接近。但是,由于爆炸瞬间的压力及其在介质中的传播很难描述,在离散元程序中也不易实施,只能用公式(8)近似计算,使得加在爆炸点周围块体的压力 P 值偏大,作用时间过短,从而导致速度波的计算幅值与实测值差别较大。此外,速度波幅值随着距震源距离增大而衰减的规律,以及速度波的主频与测点距震源距离的关系,还有待于进一步的探讨。

5 结论

本文采用离散元法用面面接触模型,考虑了岩体的节理裂隙等缺陷,将岩体作为非连续介质,比较好的模拟了集中力作用于半无限大弹性体的位移和应力场;研究了岩体中爆炸波的传播过程,拟和了半无限大岩体中爆炸引起的地面振动的波形。结果表明,用离散元法基本上可以比较客观地描述岩体结构在静载荷和动载荷作用下的一些性质,在岩体等不连续结构的研究中有着比较好的应用前景。

参考文献

- [1] 王泳嘉 .邢纪波 . 离散单元法及其在岩土力学的应用[M]. 沈阳:东北工学院出版社 .1991.
- [2] 陈仲颐,周景星,王洪瑾. 土力学[M]. 清华大学出版社,1994.
- [3] J. 亨利奇. 熊建国等译. 爆炸动力学及其应用[M]. 北京:科学出版社,1987.