

文章编号: 1001-1455(2005)03-0255-05

冲击载荷作用下岩体破坏规律的 数值流形方法模拟研究*

刘红岩, 杨 军, 陈鹏万

(北京理工大学爆炸灾害预防、控制国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为了更好地模拟岩体这种典型的连续与非连续介质共存的复杂结构体在冲击载荷作用下的破坏规律, 在近年来新出现的数值流形方法基本理论的基础上, 利用其算法程序对岩体中存在的不连续面如节理、裂隙等对岩体破裂效果的影响进行了数值模拟分析, 计算结果充分显示了数值流形方法在模拟这类问题中的准确性和有效性。

关键词: 固体力学; 数值流形方法; 模拟研究; 节理岩体; 冲击载荷

中图分类号: O346.1

国标学科代码: 130 · 1545

文献标志码: A

1 引 言

数值流形方法是石根华继提出不连续变形分形方法 (DDA) 之后, 提出的一种新的数值分析方法^[1~2]。虽然该方法是在 90 年代初才被提出, 但是由于其所具有的明显优越性, 从开始它就吸引了很多人的注意力。目前该方法已在岩土工程分析中得到了较为广泛的应用^[3]。然而, 由于其提出的时间比较短, 应用范围相对来说还比较狭窄, 不像有限元和离散元那么普遍。从流形方法建立的理论基础来看, 它是一种涵盖有限元和离散元的一种统一的数值分析方法。众所周知, 有限元方法、离散元方法和不连续变形分析方法都已被成功地应用于岩石冲击破坏的数值计算中, 所以由这一点可以设想数值流形方法应该也是可以用来模拟岩石冲击破坏的, 而且通过开发流形程序来模拟岩石破坏过程的工作对于促进和改善现有岩石冲击破坏数值模拟现状也是非常必要的。由于岩石是一种由连续与非连续介质组成的复杂地质体, 在有限元方法中, 岩石被看作是连续介质, 而其中的一些不连续缝、节理等对岩石力学性质的影响, 也被用等效模量的方法来替代或采用特殊的节理单元来模拟^[4], 这种方法虽然在模拟岩石冲击破坏的力学过程中, 也取得了一定的成功, 但是其缺陷也是很明显的; 而且当节理数较多时, 采用节理单元来模拟也是不符合实际的。同样采用另一种极端方法如离散元和 DDA, 即把岩石看作是完全不连续的块体单元时, 模拟结果与实际也有较大的偏差。正确的方法是把岩石当作由连续与非连续介质共同组成的复合地质体, 这样既考虑到了岩石中存在的天然缺陷如裂缝等, 又考虑到了不存在缺陷的连续部分。而数值流形方法正是用来模拟连续介质与非连续介质及连续变形与非连续变形共存的数值分析方法, 从这点来说, 数值流形方法是目前最为合理的模拟岩石冲击破坏过程的数值方法。然而由于数值流形方法刚被提出不久, 所以目前其应用范围还主要限于模拟岩土工程中的裂纹扩展、边坡滑动等问题, 而到目前为止, 还未见有利用数值流形方法来模拟岩石冲击破坏过程的文献发表, 所以笔者在此尝试利用数值流形方法来对岩石的冲击破坏过程进行模拟。

2 数值流形方法的基本原理

2.1 位移函数及动力学方程

在有限覆盖的基础上建立起来的数值流形方法是以微分流形和拓扑流形为基础, 利用现代数学中

* 收稿日期: 2004-08-12; 修回日期: 2004-10-12

作者简介: 刘红岩(1975—), 男, 博士研究生。

流形分析的有限覆盖技术而建立起来的一种新的可以涵盖连续和非连续变形力学问题的统一数值分析方法。与传统的有限元方法不同,流形方法是在分析域内建立可相互重叠、相交的数学覆盖和覆盖全部材料体的物理覆盖,数学覆盖由用户选择,它定义近似解的精度;而包括材料体边界、裂缝等不连续面的物理网格决定其积分区域。物理网格对数学覆盖的再剖分就形成了覆盖材料全域上的物理覆盖。两个或多个物理覆盖的公共区域就形成了所谓的流形单元。

流形单元形成以后,下步就是要表示出各物理覆盖 U_i 上的覆盖位移函数。对于二维流形方法,定义在物理覆盖 U_i 上的位移函数 $U_i(x, y)$ 和 $V_i(x, y)$, 其中 $(x, y) \in U_i$, 它们可以是常量、线性、高阶多项式或局域级数。这些覆盖位移函数可用权函数 $w_i(x, y)$ 连接在一起, 并且 $w_i(x, y)$ 应满足: 当 $(x, y) \in U_i$ 时, $w_i(x, y) \geq 0$; 当 $(x, y) \notin U_i$ 时, $w_i(x, y) = 0$; $\sum_{(x, y) \in U_i} w_i(x, y) = 1$ 。

整个物理覆盖系统上的位移函数可用覆盖位移函数和权函数表示如下

$$\begin{Bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^n w_i(x, y) \begin{Bmatrix} u_i(x, y) \\ v_i(x, y) \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [T_{ij}(x, y)] \{D_{ij}\} = \sum_{i=1}^n [T_i(x, y)] \{D_i\} \quad (1)$$

式中: $[T_{ij}(x, y)]$ 、 $\{D_{ij}\}$ 、 $[T_i(x, y)]$ 和 $\{D_i\}$ 的含义及具体表达式参见文献[2]。采用如上所定义的整体函数,数值流形方法就可以用来求解变形、接触及块体运动等各种问题。

流形方法所使用的方程为结构动力学方程^[5]

$$\mathbf{M}\ddot{\delta} + \mathbf{C}\dot{\delta} + \mathbf{K}\Delta\delta = \Delta\mathbf{F} \quad (2)$$

式中: \mathbf{M} 为质量矩阵, \mathbf{C} 为阻尼矩阵, $\Delta\delta$ 为位移增量, $\dot{\delta}$ 、 $\ddot{\delta}$ 分别是位移速度和加速度。 $\mathbf{K} = \mathbf{K}_e + \mathbf{K}_{cn} + \mathbf{K}_{cs} + \mathbf{K}_f$, \mathbf{K}_e 是刚度矩阵, \mathbf{K}_{cn} 、 \mathbf{K}_{cs} 分别为块体及不连续面之间的接触矩阵, \mathbf{K}_f 是约束矩阵。 $\Delta\mathbf{F}$ 为总载荷增量, $\Delta\mathbf{F} = \mathbf{F}_p + \mathbf{F}_b + \mathbf{F}_f - \mathbf{F}_0 + \mathbf{F}_{cn} + \mathbf{F}_{cs} + \mathbf{F}_{fr}$, \mathbf{F}_p 是外载荷向量, \mathbf{F}_b 是体积力向量, \mathbf{F}_f 是已知约束位移引起的等效载荷向量, \mathbf{F}_0 是初应力向量, \mathbf{F}_{cn} 、 \mathbf{F}_{cs} 分别为法向和切向接触引起的等效载荷向量, \mathbf{F}_{fr} 为接触面之间的摩擦力引起的等效载荷向量。

方程(2)可用 Newmark 法求解, 设

$$\delta_{t+\Delta t} = \delta_t + \dot{\delta}\Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha \right) \ddot{\delta}_t + \alpha \ddot{\delta}_{t+\Delta t} \right] \Delta t^2, \quad \dot{\delta}_{t+\Delta t} = \dot{\delta}_t + [(1 - \beta)\dot{\delta}_t + \beta\dot{\delta}_{t+\Delta t}] \Delta t \quad (3)$$

式中: α 、 β 为两个插值系数, $\beta = 0.5$, $\alpha \geq 0.25(0.5 + \beta)$ 。

将式(3)代入动力学方程(2)得

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{K}}\Delta\delta &= \tilde{\mathbf{F}}, & \tilde{\mathbf{K}} &= \frac{1}{\alpha\Delta t^2}\mathbf{M} + \frac{\beta}{\alpha\Delta t}\mathbf{C} + \mathbf{K}, \\ \tilde{\mathbf{F}} &= \Delta\mathbf{F} + \left[\left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{\delta}_t + \frac{1}{\alpha\Delta t} \dot{\delta}_t \right] \mathbf{M} + \left[\left(\frac{\beta}{\alpha} - 1 \right) \dot{\delta}_t + \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\beta}{\alpha} - 2 \right) \ddot{\delta}_t \right] \mathbf{C} \end{aligned} \quad (4)$$

以上为动力学问题得求解方法,对于静力学问题,只需将方程(4)的等效刚度矩阵中的质量矩阵与阻尼项去掉,将等效载荷中的阻尼力去掉即可。

2.2 大变形及接触分析

在数值流形方法中,大位移和大变形是由分步的小位移和小变形累加而成的。它在接触问题的处理方法上完全借鉴 DDA 中关于对接触问题的处理方法^[2]。在计算块体运动和变形时,它要求块体之间必须满足无拉伸和无嵌入的条件。这是通过在块体间添加或移去接触弹簧来实现的,如果块体在接触处发生了侵入,则施加刚度很大的弹簧将其沿原路推回;如果两块体间有接触拉力,则应移去两块体间的弹簧,所以这一过程也是通过反复的开合迭代来实现的。

3 岩体冲击破坏过程的模拟分析

3.1 岩石爆破过程的力学特征及简化处理

冲击载荷的形式是多种多样的,一方面为了和实际问题进行有效地连接,另一方面为了能够和实际情况进行对比分析。在本文中,取爆炸载荷作为施加的冲击载荷。相应的实际问题是对一球形装药在

一半无限域内爆炸后形成爆破漏斗的过程进行模拟。炸药在炮孔中起爆后,岩石将发生如下的破碎过程^[6]:(1)强大的冲击波压应力使炮孔周围岩石受压破碎,在瞬时形成压缩破碎和初始裂隙;(2)环向拉应力及应力波反射拉应力使岩石中的裂隙扩展,引起岩石进一步破裂,包括初始裂隙的形成和二次裂隙的扩展;(3)爆生气体膨胀作用使岩石中的裂隙贯穿形成碎块,碎胀体积增加,岩石运动,形成爆破漏斗。

岩石爆破时,按炮孔周围空间上爆炸应力波的大小可把岩体分为下列三个区域:(1)爆破近区,即强烈冲击区(流体力学区)。该区的爆炸压力大大超过岩石的抗压强度,岩石表现出明显的流体性质,但该区应力衰减很快,所以该区范围一般为炮孔半径的2~3倍^[7]。由于对该区处理存在数学及其它方面的困难,同时又由于该区范围很小,所以在实际中,该区常常可以忽略。(2)爆破中区(非线性过渡区)。该区是岩石破碎的主要区域,也是爆破理论研究最关心的区域。该区的岩石处于爆生气体准静态压力场中,岩石中大量裂纹尖端是应力集中最明显之处,且尖端的塑性是有限的,易于造成断裂破坏。(3)爆破远区(线弹性区)。在该区应力波的强度已衰减的很低,不足以对岩石造成破坏,仅使其产生弹性变形。岩石爆破数值模拟也主要是针对爆破中区进行的。因此,在满足工程要求的条件下,可以对岩石爆破破坏的过程进行简化处理,通过在炮孔内壁上施加一均布的冲击三角波载荷来模拟爆炸荷载,冲击载荷的升压时间为80 μs,降压时间为220 μs,整个荷载作用时间为300 μs,载荷的最大峰值压力为50 MPa^[8]。

3.2 计算模型

3.2.1 模型尺寸及参数选取

本文中所建立的计算模型是一二维分析域内的圆形装药在一半无限域岩体内爆炸后,形成爆破漏斗的过程。该半无限域内的岩体被一条裂隙所切割。为了能够对该半无限域进行计算模拟研究,必须对该半无限域选定一定的尺寸,为了使模拟的结果尽可能符合实际过程,在计算模型参数的选取上尽量使炮孔的半径远小于爆破岩体的范围。所以取计算模型的尺寸为:长10 m,宽10 m,圆形直径0.8 m,炮孔中心坐标为(0,0)。由于分析域和载荷都是对称的,因此为了节约机时和内存,在本文中,选取一半的计算模型来进行计算。

3.2.2 裂纹的产生与扩展判据

在冲击载荷作用下,岩石的破坏过程一方面是由于材料内部已存在的裂纹被激活扩展,而另一方面就是在外载作用下,材料内部的应力超过了材料的抗拉或抗剪强度而导致材料被拉断或剪坏。因为岩石是一种抗压强度远远大于其抗拉和抗剪强度的材料,除了在距炮孔中心很近的粉碎区外,岩石基本上都是被拉断或剪断的,同时也由于目前的数值流形程序还不能用来模拟材料的压缩破坏,所以在本文中,主要考虑岩石在爆炸载荷作用下的拉伸破坏和剪切破坏。

数值流形方法在模拟裂纹扩展方面有很强的优势,这是因为数值流形方法在计算中采用了两套覆盖的原因。裂纹在外力作用下可以沿任意方向扩展,如果采用有限元网格作为数学覆盖,在模拟裂纹扩展的过程中数学覆盖保持不变,即相当于有限元网格保持不变,则模拟裂纹扩展的问题变得简单。

在判断新裂纹的起裂和已存在裂纹的扩展问题中,可以采用不同的标准。对于新裂纹的起裂,一般考虑采用以应力为变量的判据。在本文中采用摩尔-库仑准则作为裂纹起裂的判据^[9~10]:(1)当第一主应力大于材料的抗拉强度时,材料被拉伸破坏,产生新裂纹;(2)当某点的最大剪应力大于材料的抗剪强度时,材料被剪切破坏,产生新裂纹。用 σ_1 、 σ_3 分别表示第一和第三主应力, T_0 为材料抗拉强度, C 为粘结力, ϕ 为摩擦角。则以上判断标准可以表示如下:(1)拉伸破坏: $\sigma_1 = T_0$ 。(2)剪切破坏:当 $\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} > 0, 0$

$< \sigma_1 < T_0$ 时, $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = C$; 当 $\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} < 0, 0 < \sigma_1 < T_0$ 时, $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = C \cos \phi - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi$ 。

对于已存在的裂纹,根据应力强度因子理论采用材料的断裂韧性 K_{IC} 作为裂纹是否起裂的判断标准,在裂纹的起裂方向上采用最大环向应力理论来确定裂纹扩展的方向。裂纹的扩展方向与现有裂纹方向的夹角 θ 可由下式来确定

$$K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1) = 0 \quad (5)$$

在目前的研究中,都认为裂纹在扩展过程中没有能量损失,因此这就要求新形成的覆盖必须与原来的覆盖有相同的速度、应力和坐标。

3.3 模拟结果及分析

在本算例中,所采用的计算参数:岩石的弹性模量为 50 GPa;泊松比为 0.20;密度为 2700 kg/m^3 ;动态断裂韧性为 $0.5 \text{ MN/m}^{3/2}$;节理面的摩擦角为 60° ;粘结力为 2.0 MPa;抗拉强度为 1.0 MPa。裂隙弱面的粘结力为 0.1 MPa;摩擦角为 20° 。分析类型为动态分析。

根据以上参数,对含初始裂纹和不含初始裂纹的两种情况的破坏过程进行模拟,结果如图 1 所示。

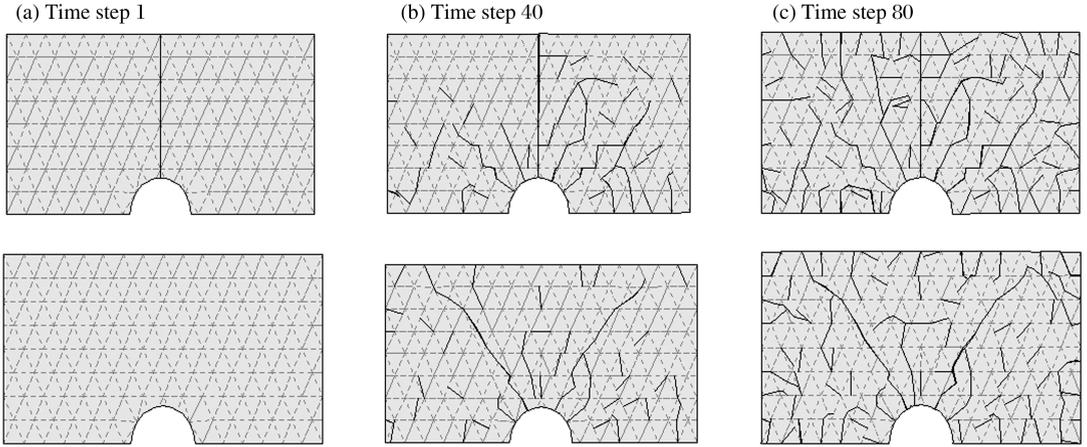


图 1 计算结果示意图

Fig. 1 Scheme of the calculation results

从以上的模拟结果可以看出,岩体在冲击载荷作用下,裂纹首先由炮孔中心向外扩展,其中可以明显看出有两条斜对角的主裂纹发展的优势最为明显,且这两条主裂纹的夹角符合爆破漏斗的形状;但是对于含有初始裂纹的岩体来说,这两条主裂纹并不是十分占优势,这充分说明初始裂纹对爆破漏斗的形状是有影响的;同时还可以看出,在后期含有初始裂纹的岩体比未含初始裂纹的岩体破坏严重,尤其在裂纹附近。另外从两种情况下的模拟结果中都可以很明显地看到裂纹的分岔现象,即裂纹并不是沿着最初出现的裂纹一直向前发展,而是在发展过程中会偏离原来的路径而分为两条或多条分支裂纹,甚至在原裂纹没有到达的地方出现了新的小裂纹,这是裂纹动态扩展中一个最常见的现象之一^[1]。在岩石爆破过程中,应该充分利用裂纹的分岔现象使岩石得以很好地破碎。

4 结 语

在本文中,通过一个算例对岩石在爆炸冲击载荷作用下的破坏过程进行了动态模拟,从模拟结果来看,数值流形方法在模拟材料的破坏方面还是有很大潜在优势的,但同时还应该看到,由于数值流形方法出现的时间不长,所以在具体的实践中,还有很多实际问题有待于研究。如在爆破近区岩石的破坏情况,目前还没有办法通过数值流形方法来进行有效模拟。同时在模拟块体的飞散方面也不是很有效。不过从以上的模拟结果中可以看出数值流形方法能够很好地模拟出裂纹的产生及扩展情况,这一点可以为以后的爆破块度预测提供一条新思路。所以在前人工作的基础上,大胆地把数值流形理论及算法引入到岩石冲击破坏模拟中,尽管目前还存在着很多问题,但是其发展前景还是可以肯定的,有望对目前岩石爆破冲击破坏理论研究开创出一条新途径。

参考文献:

- [1] SHI Gen-hua. Manifold method of material analysis[A]. Transactions of the Ninth Army Conference on Applied Mathematics and Computing[C]. Minneapolis, Minnesota, USA, 1992:51-76.
- [2] 石根华. 数值流形方法与非连续变形分析[M]. 裴觉民,译. 北京:清华大学出版社,1997:3-15.

- [3] 王芝银, 王思敬, 杨志法. 岩石大变形分析的流形方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(5): 399-404.
WANG Zhi-yin, WANG Si-jing, YANG Zhi-fa. Manifold method in analysis of large deformation for rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(5): 399-404.
- [4] Goodman R E, Taylor R L, Brekke T L. A model for the mechanics of jointed rock[J]. ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1968, 14(SM3): 637-659.
- [5] 张国新, 彭静. 二阶流形元与结构变形分析[J]. 力学学报, 2002, 34(2): 261-269.
ZHANG Guo-xin, PENG Jing. Second-order manifold method in structure failure analysis[J]. Acta Mechanica Sinica, 2002, 34(2): 261-269.
- [6] 杨善元. 岩石爆破动力学基础[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1991.
- [7] 钮强. 岩石爆破机理[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1990.
- [8] 戴晨, 朱传云, 舒大强, 等. DDA 及其在爆破过程仿真中的应用[J]. 爆破, 2001, 18(增刊): 4-6.
DAI Chen, ZHU Chuan-yun, SHU Da-qiang, et al. DDA and its application on the simulation of blasting process [J]. Blasting, 2001, 18(supple): 4-6.
- [9] Zhang G X, Sugiura Y, Saito K. Failure simulation of foundation by manifold method and comparison with experiment[J]. Journal of Applied Mechanics, 1998, (1): 427-436.
- [10] ZHANG Guo-xin, Sugiura Y, Hasegawa H. Crack propagation by manifold and boundary element method[J]. Proceedings of Third International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation (ICADD-3)[A]. Colorado, USA, 1999: 273-282.
- [11] 刘再华, 解德, 王元汉, 等. 工程断裂动力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996.

Simulation study on rockmass failure law with numerical manifold method under impact loading

LIU Hong-yan^{*}, YANG Jun, CHEN Peng-wan

(State Key Laboratory of Prevention and Control of Explosion Disasters,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Rockmass is a kind of typically complicated structure body with continuous and discontinuous media, and how to simulate the rock failure rule under impact loading is always a hotspot task in numerical simulation research. The Finite Element Method that regards rockmass as a continuous media body, the Discontinuous Element Method and DDA that regards rockmass as a completely discrete body do not either accurately reflect the failure characteristics. The numerical manifold method developed in recent years is a good method, which can simulate the failure behavior of the rockmass. Based on the basic theory of the numerical manifold method, the numerical simulation analysis is made to ascertain the influence of the discontinuous face such as joint, crack and so on on the rock rupture effect. The calculation result shows that numerical manifold method is accurate and effective in simulating this kind of problems.

Key words: solid mechanics; numerical manifold method; simulation research; jointed rockmass; impact loading

* Corresponding author: LIU Hong-yan
E-mail address: liuhy@bit.edu.cn
Telephone: 010-68912858