三维块体离散元可变形计算方法研究

田振农[1]，李世海[1]，刘晓宇[1]，柳丙善[1, 2]
(1. 中国科学院 力学研究所，北京　100080；2. 中国石油大学 储运工程系，山东 东营　257062)

摘要：在三维刚性块体离散元的基础上，研究可变形块体离散元方法，并编制相应的可变形块体离散元程序。该方法把块体单元看作弹性体，并对其划分有限元网格，对每个可变形单元的计算是假设在力边界条件下求解可变形单元的节点位移；可变形块体之间力和位移的传递是通过构筑的节理单元实现的，节理单元反应岩土工程中实际节理的变形性质和强度特征，结构面破坏前，体现了连续介质计算方法的特点，结构面如果发生破坏，预设节理处的节理单元直接转变化为法向和切向弹簧，体现了离散元计算方法的特点。另外，节理单元有实际的厚度，可以根据实际节理的性质确定计算参数，这一点也体现出了对刚性块体离散元方法的改进。与刚性块体离散元方法比较，该方法可以反映岩体变形性质，如泊松效应、三维岩体中的真实波速，它还可以模拟结构面的破坏演化过程；与有限元方法比较，它可以更好地描述岩体中节理的特征，允许单元有较大的位移；相对于以前的可变性离散元方法，它既克服了有限差分格式带来计算上的复杂，又建立在三维模型的基础上，为有关岩土工程的数值分析提供了一个可行的数值方法。

关键词：数值分析；离散元法；岩体；可变形单元
分类号：O 241　　**文献标识码**　A　　**文章编号**　1000－6915(2008)增 1－2832－09

RESEARCH ON DEFORMABLE CALCULATION METHOD BASED ON THREE-DIMENSIONAL BLOCK DISCRETE ELEMENT

TIAN Zhennong[1]，LI Shihai[1]，LIU Xiaoyu[1]，LIU Bingshan[1, 2]
(1. *Institute of Mechanics*，*Chinese Academy of Sciences*，*Beijing* 100080，*China*；2. *Department of Storage and Transportation Engineering*，*China University of Petroleum*，*Dongying*，*Shandong* 257062，*China*)

Abstract：Deformable block discrete element model is studied on the basis of three-dimensional rigid block discrete element method，and corresponding program is developed for this method. Each block element is considered as an elastic body，and finite element grids are generated. Each node displacement in the deformable block is calculated under the condition of force boundary. Jointed elements are constructed to transfer the force and displacement between adjacent deformable blocks. Jointed elements in the method can represent practical joint characteristics and strength in rock engineering. This method reflects the characteristics of continuous calculative method before breakage of structural plane. If the structural plane is broken，the jointed element will change into the normal and shear springs at the preset joint. So it also reflects the characteristics of discontinuous calculation method. In addition，the jointed element has certain thickness，so the calculative parameter can be determined by those of the actual joint. It embodies the improvement to rigid block discrete element method. Compared with rigid block discrete element method，this method can reflect the deformable character of rock，such as Poisson′s effect of rock mass and the propagation velocity of stress wave in three-dimensional rock mass. Compared with finite element method(FEM)，it presents the jointed characteristics of rock mass more sufficient

收稿日期：2006－11－09；**修回日期：**2007－04－06
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(KJCX2－SW－L1)
作者简介：田振农(1971－)，男，硕士，1996 年毕业于山东矿业学院矿井建设专业，现为博士研究生，主要从事岩土中有关爆炸方面的研究工作。E-mail：zntian_blast@126.com

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

than FEM，and allows large displacement of element. Moreover，it can simulate the failure evolution process of the structural surface. Compared with the former discrete element model of deformable bodies，it overcomes the complicated calculation induced by finite difference method and is also three-dimensional discrete element model. So it provides an available numerical analytical method for geotechnical engineering.

Key words：numerical analysis；discrete element method(DEM)；rock mass；deformable element

1　引　言

在对岩土工程的数值模拟中，如果岩体很完整或者非常破碎，采用有限元法比较合适。该方法把岩体看成连续介质或采用等效介质性质参数的方法考虑不连续面的影响。但是实际工程中大部分岩体处于完整和非常破碎之间，即存在相当多的结构面而不能把它们当作连续介质，每个结构面的具体影响又不能忽略[1]，因此也不适合作等效假设，这种情况下采用离散的数值方法比较合适[2, 3]，最近，离散元方法如 UDEC，DDA 及颗粒离散元在岩土工程中的广泛应用说明了这个问题。地质调查研究还表明天然岩体基本上被 3～4 组平行的结构面分割，这是块体离散元研究的工程基础，块体离散元认为单元的形状比较规则，可以用平行六面体或正六面体表示，块体单元之间为面－面接触。

早期的离散元研究基本上都把块体单元看作刚体或准刚性体。但是实际的岩土材料不只是离散的刚性块体，强调岩体中结构的主导作用时，有时也不能忽视它的可变形性质，特别是对于土石混合体，更应该如此。目前有很多人在进行可变形离散元方法的研究，如 J. V. Lemos 等[4]发展了完全可变形离散元方法，它把每个块体单元离散成有限差分网格来计算块体内部的变形，然而这种方法使计算块体间的相互作用变的很复杂，更显著的缺点是由于有限差分采用的是常应变单元，所以计算精度很低；R. E. Barbosa-Carrillo[5]对 J. V. Lemos 等[4]的可变形模型进行了改进，直接对可变形单元划分有限元网格，并用平均应力计算块体间的相互作用，这个改进的模型，对块体内的变形计算是很精确的，但是单元之间接触面不能反映真实的节理性质；另外，还有一种离散的计算方法 DDA，是 G. H. Shi[6]基于岩体介质的非连续性提出的一种数值计算方法，该方法结合了有限元与离散元的优点，可以解决块体的运动和简单的变形问题，适合模拟硬岩中的动力学问题，但对较大的变形还不适用，单元之间的相互作用依靠假设的弹簧，并用罚函数控制相邻单元的侵入，因此很难描述节理的破坏过程，而且 DDA 还不能考虑水在岩土工程中的影响；最近，中国科学院力学研究所提出了另一种从连续到非连续的计算方法 CDEM，它是 S. H. Li 等[7, 8]在块体－颗粒离散元的基础上研究得出的一种基于连续介质的可变形离散元方法，并对岩土工程中的变形、破坏问题进行了一些探讨，该方法可以模拟单元内部的破坏过程，并且破坏之前与有限元计算结果完全一致，但是破坏判断准则还需要进一步验证。

以上这些离散元方法的进展代表了目前岩土工程中数值模拟的发展趋势，进一步研究岩土工程问题中的机制，必须发展从连续到非连续的数值计算方法[9]。

可变形块体离散元方法是在刚性块体离散元(NURBM-3D)的基础上发展起来的，该方法把块体单元看作弹性体，并对其进行有限元网格划分，对每个可变形单元的计算是假设在力边界条件下求解可变形单元的节点位移[10]；可变形块体之间力和位移的传递方式是通过构筑的节理单元实现的，节理单元反应可岩土工程中实际节理的变形性质和强度特征[11]。在节理单元破坏前，该方法与连续介质数值计算方法等效，如果接触面上的某点达到破坏条件，可变形块体之间力和位移的传递是通过法向或切向弹簧实现的，在这一点上继承了块体离散元方法的计算特点。

2　块体离散元模型

2.1　刚性块体离散元模型

刚性块体离散元模型适合模拟岩土滑坡、爆破振动等问题，到目前为止已利用其研究过茅坪滑坡、武隆滑坡、土石混合体类的滑坡、清江围堰拆除等工程[12~16]。为了解滑坡规律，为分析滑坡形成机制提供了新的方法，做如下基本假设：

(1) 单元视为刚性块体，初始状态下块体之间相互接触但不受力，即节理是密闭的。

(2) 块体单元之间力的传递是通过单元之间相互接触的虚拟弹簧的变形来实现，在假设(1)条件下

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

弹簧的变形综合反映了实际块体和节理的变形。

(3) 单元之间的相互作用力用法向力及切向力来表示，分别与块体之间的法向和切向位移成正比关系，破坏时法向力与切向力之间满足莫尔－库仑准则。

(4) 单元之间可以承受拉力，也可以满足无张拉条件，即块体之间一旦受拉，接触面就相互分开，接触力为 0。

(5) 接触面上不均匀作用力使得块体单元转动，此外在运动过程中块体单元还受到阻尼力的作用。

(6) 单元之间的相对位置，即彼此之间的接触关系在受力过程中保持不变。

(7) 模型中引入阻尼系数来描述真实岩体结构的阻尼特性。

刚性块体离散元模型包括单元划分、块体位移计算、接触力计算三部分，与其他计算方法的最大差别是块体之间的接触力的传递方式，离散元体之间的接触模型如图 1 所示。

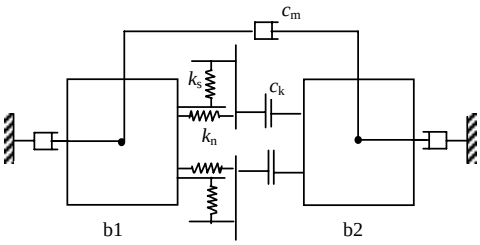


图 1　离散元块体间的接触模型

Fig.1　Contact model between two blocks discrete element

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 *LP* 点，*LP* 点没有质量，仅是力的作用点，每个 *LP* 点上作用的法向力和切向力分别为

$$\left.\begin{aligned} F_{\mathrm{n}}^{LP} &= -K_{\mathrm{n}} A_{\mathrm{s}} \Delta u_{\mathrm{n}} \\ F_{\mathrm{s}}^{LP} &= -K_{\mathrm{s}} A_{\mathrm{s}} \Delta u_{\mathrm{s}} \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中：F_{n}^{LP} 和 F_{s}^{LP} 分别为每个 *LP* 点上作用的法向力和切向力(N)，Δu_{n} 和 Δu_{s} 分别为 *LP* 点处单元之间相对法向与切向位移(m)，K_{n} 和 K_{s} 分别为节理法向与切向刚度(N/m^3)，A_{s} 为 *LP* 点对应的小正方形的面积(m^2)，负号表示位移与作用力方向相反。

在确定边界条件、初始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，如下式所示：

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{u}}(t) + \boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{u}}(t) + \boldsymbol{K}\boldsymbol{u}(t) = \boldsymbol{Q}(t) \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{M}$ 为质量矩阵，$\boldsymbol{C}$ 为阻尼矩阵，$\boldsymbol{K}$ 为刚度矩阵，$\ddot{\boldsymbol{u}}(t)$ 和 $\dot{\boldsymbol{u}}(t)$ 分别为 t 时刻的加速度和速度向量，$\boldsymbol{u}(t)$ 为 t 时刻的位移向量，$\boldsymbol{Q}(t)$ 为载荷列阵。

式(2)是根据弹性动力学方程和力的边界条件带入离散后的位移插值函数后得来的。

2.2　可变形块体离散元模型

可变形块体离散元模型把岩体分为岩石块体单元和节理单元。岩石块体单元被看作是弹性体，在其内部根据力边界条件用有限元求各点的位移；节理单元是根据位移求力，被破坏前也是弹性解，根据力边界条件求位移，破坏后通过确定接触面上多组法向和切向弹簧能够反映节理的非连续性质。其基本假设如下：

(1) 单元视为弹性块体，块体单元之间的节理存在实际意义上的厚度。

(2) 破坏、滑移都发生在预设的节理面上，但要满足莫尔－库仑强度条件和抗张拉破坏条件，块体单元本身只发生变形。

(3) 破坏之前块体单元之间有构造的节理单元，初始计算把岩体看作连续介质，具体的结构面根据预设的强度条件确定，其值应该与工程岩体一致；破坏之后块体之间力的传递靠对应点之间的法向和切向弹簧，由于节理有厚度，所以相邻块体之间可以侵入，节理刚度的取值也有了依据。

(4) 单元之间的相对位置，即彼此之间的接触关系在受力过程中保持不变。

(5) 引入阻尼系数用来描述真实岩体结构的阻尼特性。

2.2.1　单元划分

每个离散元块体单元有两部分组成，即可变形体单元和节理单元，可变形体单元与块体单元质心相同，但是它的 3 个边长分别缩小了 3 个方向的节理单元的厚度，每个块体单元的外部剩余部分与另一块上对应的部分构成了节理单元。可变形体单元又被分为 64 个相似的小六面体单元，这些小六面体单元与有限元里的单元一样，这样可变形体就由 64 个单元、125 个节点组成，对其用连续方法求解。节理单元在接触面法线方向上按实际的节理厚度划分，其他两个方向上单元尺度与可变形体里的小六面体单元尺度一致，只是在块体的两个边界上尺度又与节理面的厚度一致。

可变形体单元描述介质的受力变形性质，当弹

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

性体处理，用有限元求其数值解可得到很好的结果。该模型把可变形体单元被划分成 64 个相似的小六面体单元，如图 2 所示。

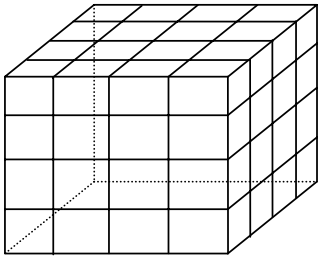


图 2　可变形体单元

Fig.2　Deformable block element

在两个可变形体之间的部分被划分为节理单元，它可以代表实际的节理，厚度根据实际节理厚度而定。由于岩体中一般会同时存在几组节理，节理面的外法线也就有不同的方向，为了计算方便，在节理面上建立局部坐标系，使 z 轴与节理面的外法线方向一致。邻近的两个可变形体之间的部分被划分成 5×5×1 个单元，因为在节理法线方向上尺度一般很小，因此在这个方向上不再划分单元。被划分的节理单元如图 3 所示，根据节理在研究区域中的不同位置，小节理单元在节理面上的位置会有不同。

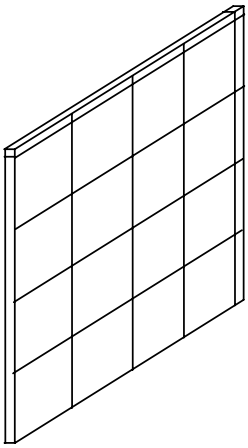


图 3　结构面上的单元

Fig.3　Element of structural plane

2.2.2 计算步骤

(1) 形成可变形块体的质量矩阵

可变形块体的质量矩阵根据下式形成：

$$\boldsymbol{M}^{\mathrm{e}} = \iiint_{V_{\mathrm{e}}} \rho \boldsymbol{N}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{N} \mathrm{d}V \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{N}$ 为插值函数矩阵，其表达式为

$$\boldsymbol{N} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & \cdots & N_8 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & \cdots & 0 & N_8 \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中：N_1，N_2，…，N_8 为单元的插值函数。

由于该模型在节理单元内部没有节点，即节理单元上的节点与可变形体单元共点，因此分配边界上的节点质量时，需要考虑附近节理单元的质量分布，但是这不会改变质量矩阵是对角矩阵的性质。

(2) 形成可变形块体的刚度矩阵

该模型采用的是正六面体单元，其上有 8 个节点，节点编号如图 4 所示。

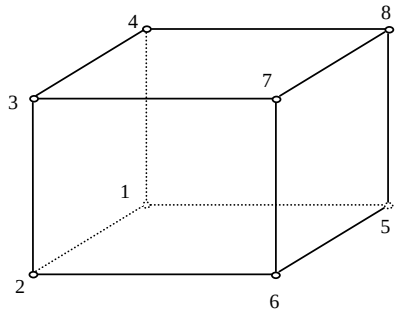


图 4　正六面体单元节点编号

Fig.4　Nodal numbering of cubic element

用 $\boldsymbol{D}$ 表示弹性矩阵，其表达式为

$$\boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} \lambda+2G & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ & \lambda+2G & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ & & \lambda+2G & 0 & 0 & 0 \\ & & & G & 0 & 0 \\ & & & & G & 0 \\ & & & & & G \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中：λ为拉梅常数，G 为剪切模量。

用 $\boldsymbol{B}$ 表示应变矩阵，可通过下式求逆得到：

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{e}} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \mathrm{L}\boldsymbol{u} = \mathrm{L}\{N_1,\ N_2, \cdots,\ N_8\}\boldsymbol{a}^{\mathrm{e}} = \boldsymbol{B}\boldsymbol{a}^{\mathrm{e}} \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{a}^{\mathrm{e}}$ 为节点位移向量，$\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{e}}$ 为应变向量，L 为微分算子。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

这样，单元的刚度矩阵就可以表示为

$$\boldsymbol{k}^{\mathrm{e}}=\int_{\Omega^{\mathrm{e}}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{B}\mathrm{d}\Omega=\begin{bmatrix} K_{1,1} & K_{1,2} & \cdots & K_{1,24} \\ K_{2,1} & K_{2,2} & \cdots & K_{2,24} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{24,1} & K_{24,2} & \cdots & K_{24,24} \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{k}^{\mathrm{e}}$ 为弹性单元的刚度矩阵。

因为每个单元有 8 个节点 3 个方向，所以单元刚度矩阵是 24×24 维的。每个可变形体单元都由 64 个弹性单元组成，这些单元共有 125 个节点，也因为有 x，y，z 三个方向，所以最后形成的变形体单元的刚度矩阵的维数应该是 375×375。每个单元上的 8 个节点号与节点号 0～125 里的数相对应，循环 64 个小块，把相同节点的单元刚度按 x，y，z 三个方向分别加起来，最后形成可变形体单元的总刚度矩阵，如下式所示：

$$\boldsymbol{K}=\begin{bmatrix} K_{1,1} & K_{1,2} & \cdots & K_{1,375} \\ K_{2,1} & K_{2,2} & \cdots & K_{2,375} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{375,1} & K_{375,2} & \cdots & K_{375,375} \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{K}$ 为可变形块体单元的总刚度矩阵。

(3) 形成可变形块体的阻尼矩阵

阻尼对动态问题的数值模拟非常重要，它影响振动的收敛速度，在工程数值计算中一般用瑞利阻尼 c_i 来反映岩体的阻尼特性：

$$c_i=c_\alpha m_i+c_\beta k_i \tag{9}$$

式中：c_α 为质量阻尼比系数，c_β 为刚度阻尼比系数，m_i 为节点代表的质量，k_i 为对角线上的刚度。

根据郭易圆[7]的研究，质量阻尼可以忽略不计，因此瑞利阻尼取为

$$c_i=c_\beta k_i=2\zeta\sqrt{m_i k_i} \tag{10}$$

式中：ζ 为阻尼比。可以看出，阻尼矩阵也为对角阵，从而给计算带来很大的方便。

(4) 形成节理单元的刚度矩阵

节理单元是用来传递力的，计算时，离散元是按照循环节理面上每个节点进行的，需要根据质点位移乘以与其有关的刚度，所以要找出该节点及其周围所有的点，以及这些点所在的单元，并组成相应的刚度矩阵。这些相关单元的结构如图 5 所示，其中节点 8，9 处的力需要通过这 4 个单元计算。

这样的 4 个单元共有 18 个节点，因为有 x，y，z 三个方向，所以形成的总刚度矩阵的维数为 54×54，形式如下：

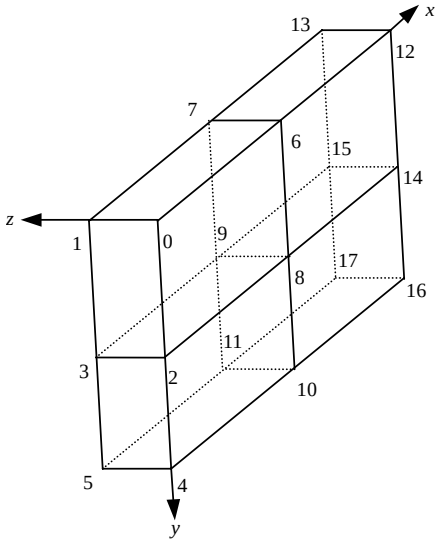


图 5　节理单元

Fig.5　Jointed element

$$\boldsymbol{K}^{\mathrm{j}}=\begin{bmatrix} k_{1,1} & k_{1,2} & \cdots & k_{1,54} \\ k_{2,1} & k_{2,2} & \cdots & k_{2,54} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{54,1} & k_{54,2} & \cdots & k_{54,54} \end{bmatrix} \tag{11}$$

根据节点的位置不同，如图 3 所示，组成的节理单元的总刚度矩阵也不一样，可以分为 9 类节理刚度矩阵，而其中有些是不对称的。

(5) 运动方程的求解

求解如式(2)所示的运动方程时，采用目前世界上比较流行的动态松弛法，它从承载前结构无内力的初始状态出发，仿效结构或构件在临界阻尼下的瞬时振动历程，推算其在振动湮灭时状态，即可得出所期望的分析结果。动态松弛法避免了求解大型的方程组，可以节省内存和机时。

每个时步内的计算分为两步，先根据可变形单元的力边界条件求解可变形单元上节点的位移，循环每个可变形单元，可以得到所有节点上的位移；再根据力边界条件和计算出来的节点位移求解节理单元上节点的力，循环所有节理单元，可以得到各个可变形单元上的边界力。当预设的节理面破坏后，相应的节理单元去掉，直接在对应的点 8，点 9 之间加法向弹簧 k_{n} 和切向弹簧 k_{s}，按摩擦条件给出每个点三个方向上的力。

3　单元网格划分的实现

可变形块体离散元划分网格的方法与刚性块体

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

离散元划分网格的方法不同，主要区别在于块体内部划分了网格，而且节理具有了厚度。具有 8 个块体的可变形块体离散元网格划分如图 6 所示。从图中可以清楚地看到块体单元和节理单元。

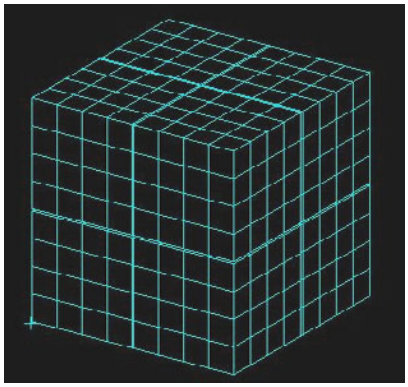


图 6　可变形块体离散元网格划分

Fig.6　Grid division of deformable block discrete element

4　计算示例

4.1　反映泊松效应的数值试验

在块体的上表面施加垂向载荷，底边界固定，通过横向发生的变形反映泊松效应。在这种情况下，刚性块体离散元无法计算出横向变形，用可变形块体离散元模拟时计算区域为 4 m×4 m×4 m，单元总数为 64，节点数为 8 000 个，其他计算参数如表 1 所示。

表 1　单轴压缩下计算参数

Table 1　Calculating parameters under uniaxial compression

岩体密度ρ /(kg • m^{-3})	弹性模量 E/Pa	泊松比 μ	压力 P /kPa
2 400	1.8×10^{10}	0.25	50

为了与解析解比较，结构面上的材料参数与岩块内参数一致。计算结果显示在受压方向上与刚性块体离散元计算结果、理论结果完全一致，侧向变形，该模型计算结果也与理论结果一致，如图 7 所示，图上数据表示侧向位移。而刚性块体离散元模型不能反映泊松效应。

4.2　剪切破坏数值试验

由于存在大变形，连续的数值计算方法很难模拟材料的剪切破坏。可变形块体离散元保持了离散元计算的主要特点，可以很好地演示剪切破坏效果。该数值试验设计如图 8 所示，研究区域为 4 m×4 m×8 m，块体受重力和图 8 所示的侧向力作用，计算参数选取如表 1 所示，节理面上的破坏条件采用莫尔－库仑准则，其中黏聚力为 8×10^5 Pa，内摩擦角为 30°。计算结果如图 9，10 所示。

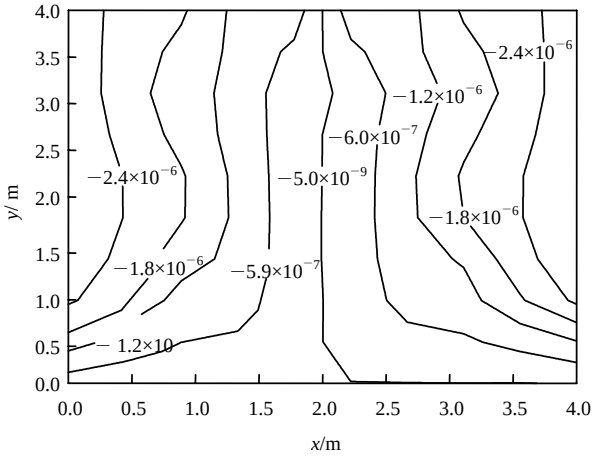


图 7　单轴受压的泊松效应

Fig.7　Poisson effect under uniaxial compression

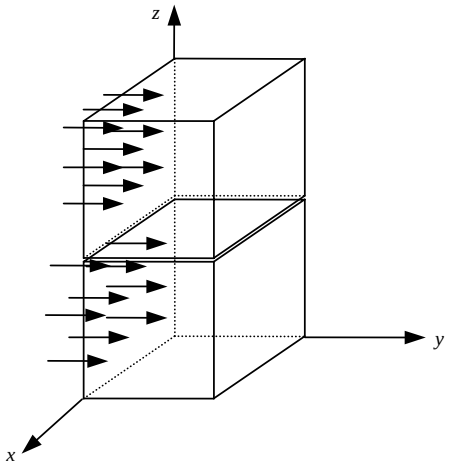


图 8　剪切破坏计算模型

Fig.8　Calculating model of shear failure

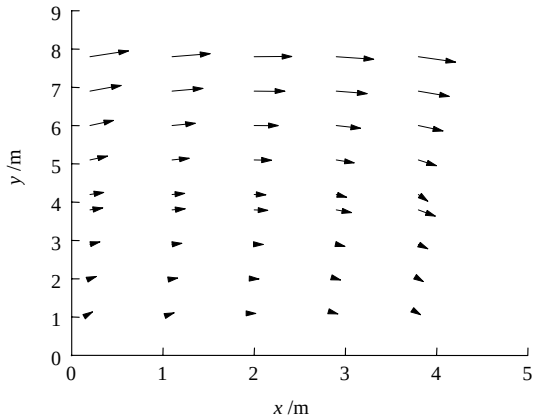


图 9　剪切破坏时位移矢量图

Fig.9　Displacement vector of shear failure

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

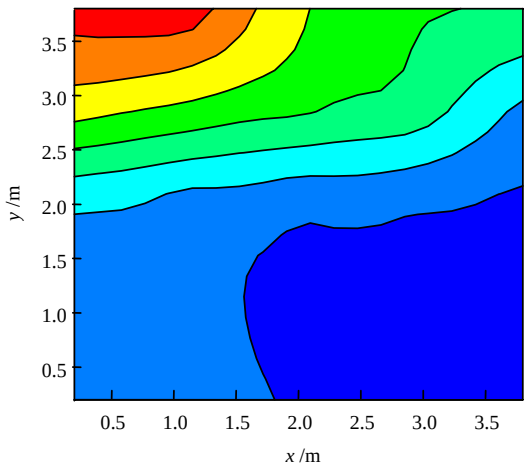


图 10　上层节理面的剪切破坏过程

Fig.10　Shear failure process of upper jointed face

图 9 所示为 xz 截面上各质点在 y 方向上的位移矢量。从图中可以看出 z 方向的中间有一个滑面，因此滑面上部质点的位移与下部质点的位移呈非线性的增加，但在其每一部分内位移变化是线性的。位移矢量呈现弯曲，是因为块体在这种受力方式下会有弯矩产生，其数值与解析解吻合。

如果存在两个节理面，用该模型模拟的破坏过程如图 10，11 所示。

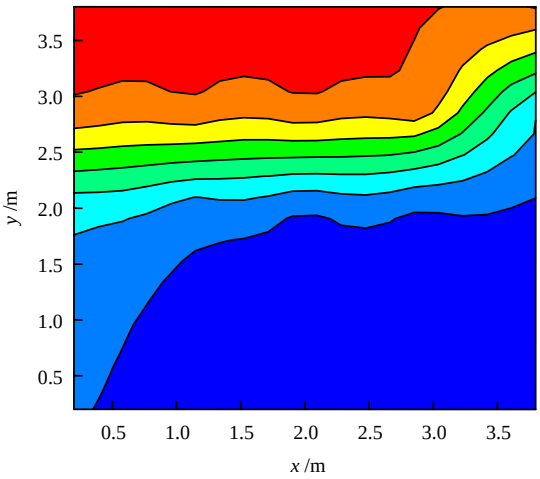


图 11　下层节理面的剪切破坏过程

Fig.11　Shear failure process of lower jointed face

图 10 所示为上层节理面的破坏过程，等值线表示破坏的时间，图 11 所示为下层节理面的破坏过程。从图中可以看出，下层节理面的破坏比上层节理面的破坏要早，初始的破坏都是从一点开始，然后逐渐破坏直至整个面都破坏掉；破坏一经开始，其后呈现加速的趋势；破坏位置都在受力侧，但是破坏发展的速度不同，上层破坏明显要慢很多。

不同高度节理面的破坏过程的推导如下：

载荷施加方式：(1) z 方向设每个小块的所受重力为 G；(2) y 方向，在 $y=0$ 的面施加均布力，每个块上均布力为 $G/8$。

根据莫尔库仑准则：

$$\tau > c+\sigma_{\mathrm{n}}\tan\varphi \tag{12}$$

得到不同深度的滑面上的破坏条件：

$$\frac{G}{8}\frac{l_x}{\mathrm{d}x}\frac{l_z}{\mathrm{d}z} > cs+G\frac{l_x}{\mathrm{d}x}\frac{l_y}{\mathrm{d}y}\frac{l_z}{\mathrm{d}z}\tan\varphi \tag{13}$$

式中：dx，dy，dz 为每个单元的尺寸；l_x，l_y，l_z 分别为研究区域 x，y，z 方向上的尺寸。

式(13)两边同除以 $Gl_xl_y/(8\mathrm{d}x\mathrm{d}y)$，可得

$$1 > \frac{8cs}{G}\frac{\mathrm{d}x\mathrm{d}z}{l_xl_z}+\frac{8l_y}{\mathrm{d}y}\tan\varphi \tag{14}$$

满足式(14)时节理面就会发生破坏，可以看出，只有 l_z 随着深度而变化，并且越深 l_z 越大，因此，随着深度的增加，式(14)右边项在减小，即更有利于滑动。数值计算结果能与该结果吻合。

4.3　简支梁校合试验

用可变形块体离散元对简支梁在线分布载荷下的受力情况做了分析，把破坏前的位移场与有限元计算结果做了比较。计算研究区域为：12 m×3 m×3 m，单元大小为 1 m×1 m×1 m，总单元数为 108 块，总节点数为 13 500 个，介质参数选取如表 1 所示，载荷施加在梁的中部，如图 12 所示，分布载荷为 600 kN/m。计算结果如图 12，13 所示。

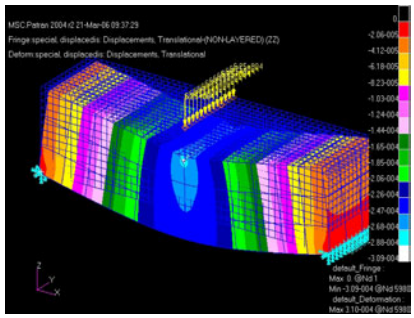


图 12　可变形块体离散元法计算的位移场(单位：m)

Fig.12　Displacement flied calculated by deformable block DEM(unit：m)

从图 12，13 可以看出，二者得到的位移场完全一样，说明对岩土工程中的连续性问题，可变形块体离散元可以满足精度要求。可变形块体离散元的更大优点在于可以计算固体力学中非连续、大变形问题。仍以该简支梁为例，图 14 给出了裂纹扩展时

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

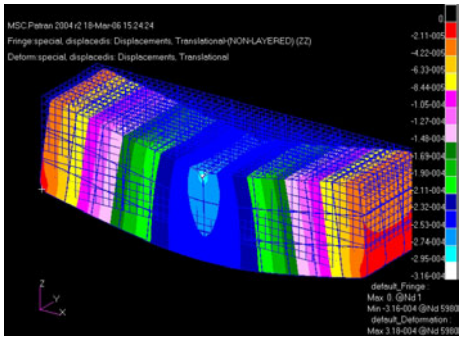


图 13　Nastran 计算的位移场(单位：m)

Fig.13　Displacement flied calculated by Nastran(unit：m)

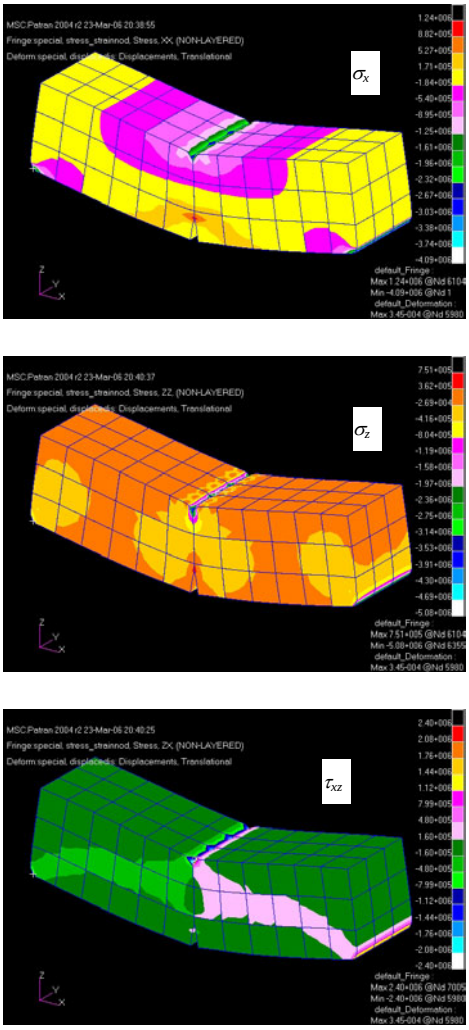


图 14　裂纹扩展时的应力场(单位：Pa)

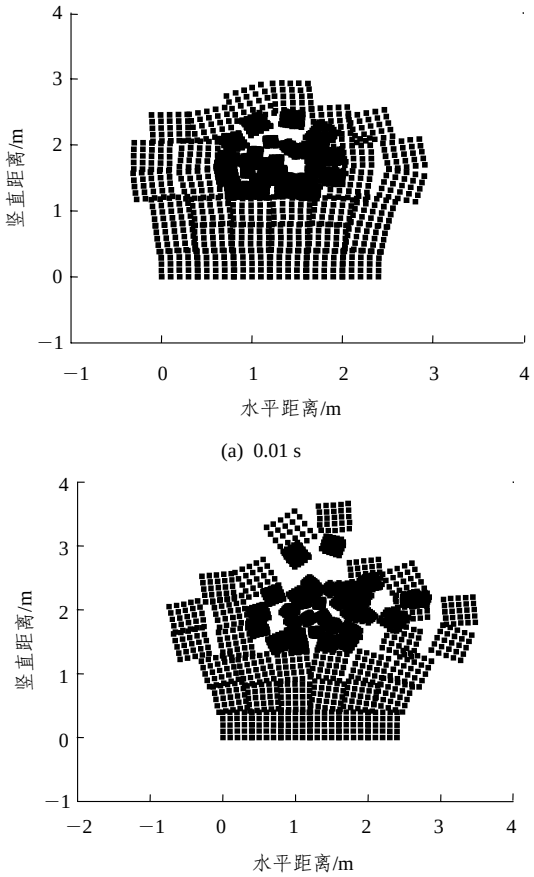
Fig.14　Stress fields when cracks propagate(unit：Pa)

其应力分布情况。从图中可以看出结构面的破坏过程以及在破裂面演化到不同位置时的应力分布情况。

用连续的方法计算这样的实例比较困难，说明可变性块体离散元可以计算连续和非连续问题。

4.4　岩石爆破现象模拟

用可变性块体离散元法演示岩石块体中的爆破现象。岩块为正方形块体，其大小为 2.4 m×2.4 m×2.4 m，块体单元大小为 0.4 m，总节点数为 27 000 个，在底面进行 3 个方向的约束，其他面为自由面，岩石的弹性模量取 30 GPa，泊松比为 0.25。炸药放在中心，药量为 1.0 kg。计算结果如图 15 所示。



(a)　0.01 s

(b)　0.02 s

图 15　岩石中爆破现象模拟

Fig.15　Simulation of blasting phenomena in rock

该数值模拟是把 NURBM-3D 离散元中局部单元细化方法和可变形计算模型结合起来的一个算列。从图 15 中可以看出，在爆炸载荷作用下，随爆源距离的远近，岩石被破碎成大小不同的块体，反映了局部细化的功能；随时间的增加，块体向外不断飞散，这是离散元法固有的特点；还可看出部分块体有明显的变形，体现了可变形计算的功能。从破坏形态上看与实际爆破现象非常相似。

5　结　论

可变形块体离散元方法是在刚性块体离散元模型的基础上研究和发展而来的，它在用有限元法计

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

算块体变形的基础上，保持了离散元法的计算特点，通过预设结构面描述岩体的节理性质，用动态松弛法分别循环块和接触面完成整个计算。算例分析表明：改进后的模型既可以计算连续性问题，又可以计算大变形、非连续问题。

参考文献(References)：

[1] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京：科学出版社，1988.(SUN Guangzhong. Rock structure mechanics[M]. Beijing：Science Press，1988.(in Chinese))

[2] 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(3)：283－353.

[3] 雷晓燕. 岩土工程数值计算[M]. 北京：中国铁道出版社，1999.(LEI Xiaoyan. Numerical computation in rock and soil engineering[M]. Beijing：China Railway Publishing House，1999.(in Chinese))

[4] LEMOS J V，HART R D，CUNDALL P A. A generalized distinct element program for modeling jointed rock mass：a keynote lecture[C]// Proceedings of the International Symposium on Fundamentals of Rock Joints. Lulea，Sweden：Centek，1985：335－343.

[5] BARBOSA-CARRILLO R E. Discrete element models for granular materials and rock masses[Ph. D. Thesis]. Urbana-Champaign：University of Illinois，1990.

[6] SHI G H. Discontinuous deformation analysis，a new numerical model for the static and dynamics of block system[Ph. D. Thesis][D]. Berkeley，USA：Department of Civil Engineering，University of California，1988.

[7] LI S H，ZHAO M H，WANG Y N，et al. A continuum-based discrete element method for continuous deformation and failure process[C]// Proceedings of the 6th World Congress on Computational Mechanics. [S.l.]：[s.n.]，2004：77－78.

[8] ZHAO M H，LI S H，WANG Y N，et al. A computational model for simulation of fractured materials using continuum-based discrete element method[C]// Proceedings of the 6th World Congress on Computational Mechanics. [S.l.]：[s.n.]，2004：271.

[9] 刘凯欣，高凌天. 离散元法研究的评述[J]. 力学进展，2003，33(4)：483－490.(LIU Kaixin，GAO Lingtian. A review on the discrete element method[J]. Advances in Mechanics，2003，33(4)：483－490.(in Chinese))

[10] 王勖成，邵 敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京：清华大学出版社，1995.(WANG Xucheng，SHAO Min. The basic principle and numerical method of finite element method[M]. Beijing：Tsinghua University Press，1995.(in Chinese))

[11] 郭易圆. 爆炸载荷作用下节理岩体远区振动传播规律的三维离散元数值模拟[博士学位论文][D]. 北京：中国科学院力学研究所，2003.(GUO Yiyuan. Simulation of vibration characteristic of particle which is in far area in jointed rock mass under blasting load[Ph. D. Thesis][D]. Beijing：Institute of Mechanics，Chinese Academy of Sciences，2003.(in Chinese))

[12] 陈树辉，林文静，许光耀，等. 索网结构静力分析的动态松弛法[J]. 应用力学学报，2002，19(2)：34－37.(CHEN Shuhui，LIN Wenjing，XU Guangyao，et al. The dynamic relaxation method for static analysis of cable nets[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics，2002，19(2)：34－37.(in Chinese))

[13] 赵 坚，陈寿根，蔡军刚，等. 用 UDEC 模拟爆炸波在节理岩体中的传播[J]. 中国矿业大学学报，2002，31(2)：111－115.(ZHAO Jian，CHEN Shougen，CAI Jungang，et al. Simulation of blast wave propagation in jointed rock mass using UDEC[J]. Journal of China University of Mining and Technology，2002，31(2)：111－115.(in Chinese))

[14] Itasca Consulting Group Inc.. 3DEC—3D distinct element code[R]. Minneapolis，USA：Itasca Consulting Group Inc.，1987.

[15] JIANG Q H，YEUNG M R. A model of point-to-face contact for three-dimensional discontinuous deformation analysis[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2004，37(2)：95－116.

[16] CUNDALL P A. Formulation of a three-dimensional distinct element model—part I：a scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts，1988，25(3)：107－116.

[17] 魏怀鹏，易大可，李世海，等. 基于连续介质模型的离散元方法中弹簧性质研究[J]. 岩石力学与工程学报，2006，25(6)：1 159－1 169.(WEI Huaipeng，YI Dake，LI Shihai，et al. Study on spring properties of continuum-based discrete element method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2006，25(6)：1 159－1 169.(in Chinese))

[18] 王卫华，李夕兵，胡盛斌. 模型参数对 3DEC 动态建模的影响[J]. 岩石力学与工程学报，2005，24(Supp.1)：4 790－4 797.(WANG Weihua，LI Xibing，HU Shengbin. Effect of model parameters on 3DEC dynamic modeling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2005，24(Supp.1)：4 790－4 797.(in Chinese))

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net