

模拟岩石材料脆性破裂过程的三维离散元模型¹⁾

韩永臣²⁾ 刘晓宇 李世海

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要 发展一种能够模拟岩石材料脆性破裂过程的三维不规则、可变形块体离散元模型。一方面，在裂纹扩展过程中动态地将潜在破坏的连续块体沿潜在破坏方向细化为若干子块体，并在子块体之间的界面上设置连接型弹簧；另一方面，连接型弹簧在满足张拉-剪切复合破坏准则时发生脆性破裂，转变为接触型弹簧，实现材料由连续到非连续的破裂。借助动态松弛技术完成求解，通过计算实例验证该方法的适用性。

关键词 岩石材料，脆性破坏，离散元，张拉-剪切复合破坏

中图分类号： O39 TU537 文献标识码： A 文章编号： 1000-0879(2010)03-050-07

DISCRETE ELEMENT MODELING OF BRITTLE FAILURE PROCESS OF ROCK MATERIALS¹⁾

HAN Yongchen²⁾ LIU Xiaoyu LI Shihai

(Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China)

Abstract A 3D irregular deformable discrete element model is developed to model the brittle failure process of rock materials. Under the external loadings, continuous blocks near the failure limits are cut into several smaller blocks, and connect-type springs are assigned on the interface between these blocks. Under the tension-shear failure criterion, the connect-type springs are broken into the contact-type springs. As a result, a continuous-discontinuous modeling of brittle failure of rock materials is implemented. Dynamic relaxation technique is applied to obtain solutions without assembling the global matrix. The model is validated by typical examples.

Key words rock material, brittle failure, discrete element, tension-shear failure criterion

引言

岩石是一种含有大量细、微观裂纹的高度非均匀材料，其变形破坏过程实质上是岩石材料中裂纹的形成、扩展、相互作用直至最后贯通破坏的动态演化过程。由于演化过程涉及到不连续位移场的描述问题，有关岩石破坏过程的数值模拟至今仍是计算破坏力学中极具挑战性的难题^[1-3]。

传统的有限元模型^[4]、离散元模型^[5]、非连续变形分析模型^[6]均采用界面裂纹扩展方法，裂纹沿着单元的边界扩展。该方法实现比较方便，但初始网格划分会对模拟结果产生较大影响，特别是在裂纹扩展路径难以预测的情况下。另外一些数值模型采用网格重划分方法^[7-8]，将裂纹看作移动边界，

在裂纹扩展过程中不断地进行网格拓扑调整。这种数值方法可以实现裂纹沿任意方向的扩展，但计算工作量相对前者较大，尤其是在模拟三维问题的情况下。近年来发展的扩展有限元法^[9-11]能够在无需网格重划分的情况下模拟裂纹扩展，但在处理大位移和非线性材料特性方面仍有大量工作有待开展。

本文在三维不规则、可变形块体离散元模型中，引入了一种基于块体细化的界面裂纹扩展方法，用以模拟岩石材料的脆性破裂过程。一方面，根据研究对象内部应力场状态，在计算过程中动态地选取裂纹可能扩展到的块体，并沿潜在破坏方向将该块体细化为子块体，消除裂纹扩展对初始网格的依赖性；另一方面，根据实际裂纹尖端应力场的分布情

2009-05-20 收到第 1 稿， 2009-09-03 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金项目 (10602057), 国家自然科学基金重点项目 (10632100) 资助。

2) 韩永臣, 1983 年生, 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程中的数值计算方面的工作。E-mail: hanyongchen@imech.ac.cn

况，采用界面裂纹扩展技术实现裂纹的扩展。为验证模型的可靠性及适用性，文末将进行两个典型算例的计算及讨论。

1 三维不规则、可变形块体离散元模型

将求解区域划分为有限多个完全独立的块体集合。在几何形态上，每个块体为凸多面体，拥有独立的几何和拓扑信息；在力学性质上，每个块体为可变形体，通过内部的四面体网格划分，建立独立的动力学求解方程。块体与块体之间在未形成裂纹前完全连续，在出现裂纹后允许发生滑动或分离。

1.1 单个块体的几何、力学描述

考虑到裂纹在萌生及扩展过程中，初始块体可能被裂纹所切割，形成各种不规则形状的子块体。因此，将块体看作一个具有任意不规则形状的凸多面体，并借助顶点、棱边和表面三类几何元素来描述其几何、拓扑信息，如图1所示。其中，顶点代表块体的角点，表示空间中的单个位置，有X、Y、Z坐标值；棱边代表连接两角点之间的线段；表面代表由封闭棱边围成的外边界和零个内边界定义的二维多边形。

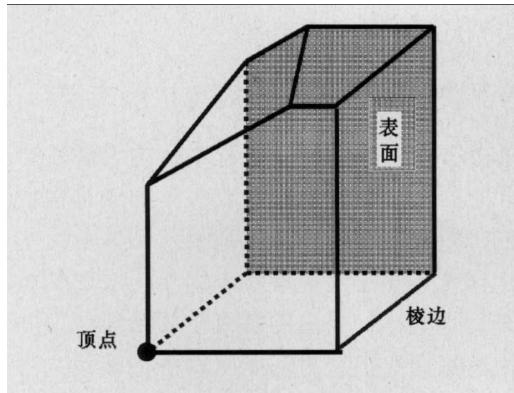


图1 不规则块体示意图

将块体看作内部没有任何不连续面的连续体。基于连续介质力学思想，块体的力学行为可采用三维动力学基本微分方程来描述，即

$$\text{平衡方程 } \sigma_{ij,j} + f_i - \rho u_{i,tt} - \mu u_{i,t} = 0 \quad (1)$$

$$\text{几何方程 } \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (2)$$

$$\text{物理方程 } \sigma_{ij} = C_{ijst}\varepsilon_{st} \quad (3)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{边界条件} \quad u_i = \bar{u}_i \text{ 在位移边界上} \\ \sigma_{ij}n_j = \bar{t}_i \text{ 在力边界上} \end{array} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{初始条件} \quad u_i(x, y, z, 0) = u_i^0(x, y, z) \\ u_{i,t}(x, y, z, 0) = u_{i,t}^0(x, y, z) \end{array} \right\} \quad (5)$$

式中， σ_{ij} 、 ε_{ij} 、 u_i 和 f_i 分别表示应力、应变、位移和体积力； ρ 和 μ 分别表示质量密度和阻尼系数； C_{ijst} 为刚度张量； \bar{u}_i 和 \bar{t}_i 分别为位移和力的边界条件； u_i^0 和 $u_{i,t}^0$ 分别为初始时刻的位移和速度。

为求解块体域内的动力学问题，采用四面体网格划分，将块体离散为四面体单元。如图2所示，每个四面体单元都包括1个位于块体体心处的节点、1个位于块体面心处的节点和2个位于块体表面上端点处的节点。使用形函数插值方法，四面体单元内位移 (u^h, v^h, w^h) 由其4个节点位移 (u_i, v_i, w_i) 进行逼近，即

$$\left\{ \begin{array}{l} u^h(x, y, z) \\ v^h(x, y, z) \\ w^h(x, y, z) \end{array} \right\} = \sum_{i=1}^4 N_i(x, y, z) \left\{ \begin{array}{l} u_i \\ v_i \\ w_i \end{array} \right\} \quad (6)$$

利用变分原理，联立方程(1)~(5)，即可导出块体的动力学求解方程

$$M\ddot{\mathbf{u}}(t) + C\dot{\mathbf{u}}(t) + K\mathbf{u}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (7)$$

式中， $\ddot{\mathbf{u}}(t)$ 、 $\dot{\mathbf{u}}(t)$ 和 $\mathbf{u}(t)$ 分别是块体内所有节点的加速度列阵、速度列阵和位移列阵， M 、 C 、 K 和 $\mathbf{F}(t)$ 分别为质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和节点外部荷载列阵，由各自的单元矩阵和列阵组装集成。

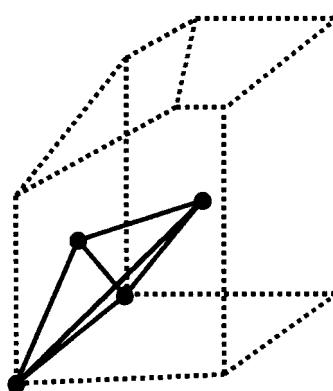


图2 划分块体的四面体单元

1.2 块体之间的作用方式

在相邻两块体的界面上，位于角点和面心处的节点尽管位置相同，但分属于不同块体。它们两两构成一对邻居节点。在离散元模型中，块体之间的相互作用正是利用连接于这些邻居节点之间的弹簧来实现的。考虑到块体之间既允许完全连续，也允许

存在裂纹，将连接相邻块体的弹簧分为两种类型：连接型和接触型。

当相邻两块体之间完全连续时，邻居节点之间的弹簧为连接型弹簧，遵循线弹性本构关系

$$\left. \begin{array}{l} F_n = \frac{EA_c}{L} u_n \\ F_s = \frac{GA_c}{L} u_s \end{array} \right\} \quad (8)$$

式中， u_n 和 u_s 分别为邻居节点的相对位移在界面法向和切向上的分量； F_n 和 F_s 分别为邻居节点间作用力在界面法向和切向的分量； E 和 G 分别为界面的弹性模量和剪切模量； L 和 A_c 分别为界面的等效厚度以及弹簧的代表面积。

当相邻两块体之间存在裂纹时，邻居节点之间的弹簧为接触型弹簧，为模拟裂纹面的分离或滑动，接触型弹簧遵循如下非线性本构关系

$$F_n = 0, F_s = 0, \text{ 当 } u_n > 0 \quad (9a)$$

$$\left. \begin{array}{l} F_n = \frac{EA_c}{L} u_n \\ F_s = \frac{GA_c}{L} u_s \end{array} \right. , \text{ 当 } u_n \leq 0 \text{ 且 } |F_s| \leq f|F_n| \quad (9b)$$

$$\left. \begin{array}{l} F_n = \frac{EA_c}{L} u_n \\ F_s = \text{sgn}(u_s)|F_n|\tan\varphi \end{array} \right. , \text{ 当 } u_n \leq 0 \text{ 且 } |F_s| > f|F_n| \quad (9c)$$

式中 φ 为界面的内摩擦角。

当连接型弹簧满足张拉-压剪复合破坏准则时，连接型弹簧将发生张拉或压剪模式的弹脆性破坏，转变为接触型弹簧。其中，张拉模式的弹脆性破坏采用最大张拉力准则模拟

$$F_n > \sigma_t A_c \quad (10)$$

压剪模式的弹脆性破坏采用莫尔-库仑准则模拟

$$F_s > |F_n|\tan\varphi + c_0 A_c \quad (11)$$

式中， σ_t 和 c_0 分别为界面的抗拉强度和抗剪强度。

2 动态松弛方法

不同于有限元方法组装总刚度矩阵，三维不规则、可变形块体离散元模型在建立块体的动力学求解方程后，无需组装总刚度矩阵，而是采用动态松弛方法进行求解。动态松弛方法通过在动态计算中引入阻尼项，使得初始不平衡的振动系统逐渐衰减

到平衡位置，是一种将静力学问题转化为动力学问题进行求解的显式方法。该方法基本流程如下：

(1) 从已知的初始状态开始，在每一个时间步长(如第 N 步)结束后，固定研究区域内所有块体；

(2) 根据式(8)或式(9)，计算每个块体界面上节点的弹簧力 $F_N^{(\text{spring})}$ ，并将 $F_N^{(\text{spring})}$ 和已知外力 $F_N^{(\text{ext})}$ 求和得到节点合外力

$$F_N^{(\text{total})} = F_N^{(\text{spring})} + F_N^{(\text{ext})} \quad (12a)$$

(3) 根据式(7)，计算每个块体上节点的不平衡力

$$F_N^{\text{out-of-balance}} = F_N^{(\text{total})} - C\dot{u}_N - Ku_N \quad (12b)$$

(4) 根据每个块体上节点的不平衡力，计算这些节点的加速度

$$a_{N+1} = M^{-1}F_N^{\text{out-of-balance}} \quad (12c)$$

(5) 根据加速度和时步 Δt ，同时放松所有的节点

$$\left. \begin{array}{l} \dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + a_{n+1}\Delta t \\ u_{n+1} = u_n + \dot{u}_{n+1}\Delta t \end{array} \right\} \quad (12d)$$

(6) 在新位置上固定所有节点，循环下一次迭代，直到满足收敛条件结束。

3 基于块体细化的界面裂纹扩展方法

在岩石材料脆性破裂过程中，由于裂纹产生的位置和它扩展的方向是在研究对象加载过程中动态生成的，裂纹经常不可避免地要从某些单元的内部穿越。传统界面裂纹扩展技术由于无法对初始网格拓扑进行调整，计算出的裂纹扩展路径往往并不准确。为消除裂纹扩展对初始网格的依赖性，将裂缝可能扩展到的块体进行细化，提前创建出潜在的裂纹扩展路径。

3.1 细化块体选取标准

在研究岩石材料脆性破坏问题时，通常将岩石的破坏方式分为两种：(1) 由拉应力引起的张拉破坏，主要的破坏准则为 Griffith 准则

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_3 = -\sigma_t, \quad \text{当 } \sigma_1 + 3\sigma_3 < 0 \\ \frac{(\sigma_1 + 3\sigma_3)^2}{\sigma_1 + \sigma_3} = 8\sigma_t, \quad \text{当 } \sigma_1 + 3\sigma_3 \geq 0 \end{array} \right\} \quad (13)$$

最有利破裂方向角与最大主应力所成角度

$$\psi = \frac{1}{2} \arccos \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2(\sigma_1 + \sigma_3)} \quad (14)$$

(2) 由剪应力引起的剪切破坏，主要的破坏准则为 Mohr-Coulomb 准则

$$\tau = c_0 + \sigma \tan \varphi \quad (15)$$

最有利破裂方向角与最大主应力所成角度

$$\psi = \frac{\pi}{2} \pm \frac{\varphi}{2} \quad (16)$$

为创建潜在裂纹扩展路径，需要在块体真正破裂前就对其进行预先细化。基于 Griffith 准则和 Mohr-Coulomb 准则，本研究采用如下块体细化标准选取拟细化的块体

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_3 + \sigma_t = \sigma_t^\delta, \quad \text{当 } \sigma_1 + 3\sigma_3 < 0 \\ \tau - c_0 - \sigma \tan \varphi = \tau^\delta, \quad \text{当 } \sigma_1 + 3\sigma_3 \geq 0 \end{array} \right\} \quad (17)$$

式中， σ_t^δ 和 τ^δ 分别为张拉和剪切破坏发生前允许块体细化的阈值。块体选取后，它们的细化方向将沿式(14)和式(16)给出的破裂方向。考虑到块体在进行剪切模式细化时，同时存在两个剪动方向相逆的共轭剪裂方向，选择沿剪裂方向滑动趋势更为明显的一个作为细化方向。

从创建潜在裂纹扩展路径的角度讲，一个块体细化出的子块体数越多，沿块体边界扩展的界面裂纹可选择的扩展路径就越多，数值模拟给出裂纹路径准确度也越高。另一方面，块体细化数目的增多将导致计算规模的增大以及网格质量的下降，计算精度将随之降低。综合以上两方面的考虑，对于每一个选定细化的块体，使用间距相等、方向沿该块体破裂方向的 3 个切割平面，将该块体细化为 4 个子块体。

3.2 块体细化技术

在确定细化块体及其切割平面后，采用扩展有限元中使用的 level set 函数^[9]来实现块体快速、有效的细化。具体算法如下：

(1) 对于给定的切割平面方程 $\Phi(x) = 0$ ，给出切割面 Γ 、切割面上方 Ω^+ 和切割面下方 Ω^- 的 level set 函数

$$\left. \begin{array}{l} \Phi(x) > 0, \text{ 在 } \Omega^+ \text{ 内} \\ \Phi(x) = 0, \text{ 在 } \Gamma \text{ 上} \\ \Phi(x) < 0, \text{ 在 } \Omega^- \text{ 内} \end{array} \right\} \quad (18)$$

(2) 利用 level set 函数遍历块体所有表面，检查各表面与切割面之间的关系：(a) 当表面节点集合

I^f 中元素的坐标满足条件

$$\left. \begin{array}{l} \max(\Phi(x_i)) \cdot \min(\Phi(x_i)) \geq 0 \\ \Phi(x_i) \geq 0 \end{array} \right\}, \quad i \in I^f \quad (19a)$$

该表面未被切割面切割，将归属于位于切割面上部的子块体；(b) 当 I^f 中元素的坐标满足条件

$$\left. \begin{array}{l} \max(\Phi(x_i)) \cdot \min(\Phi(x_i)) \geq 0 \\ \Phi(x_i) \leq 0 \end{array} \right\}, \quad i \in I^f \quad (19b)$$

该表面未被切割面切割，且归属于位于切割面下部的子块体；(c) 当 I^f 中元素的坐标满足条件

$$\max(\Phi(x_i)) \cdot \min(\Phi(x_i)) < 0, \quad i \in I^f \quad (19c)$$

该表面将被切割面切割为上、下两个子面，并分别归属于位于切割面上部和下部的子块体。为产生位于切割面上部和下部的两个子面，采用与式(19)同样的方法，使用 level set 函数检查该表面上每条边的归属。如果边未被切割面穿过，则该边归于上子面或下子面中的某一个；如果被穿过，则该边被切割成两条子边，分属于两个子面，每条子边包含细化块体上的一个节点及与切割面的交点。交点坐标由下式获得

$$x = x_1 + \frac{|\Phi(x_1)|}{|\Phi(x_1)| + |\Phi(x_2)|} (x_2 - x_1) \quad (20)$$

式中， x_1, x_2 为细化块体边上两个节点的坐标；(d) 将所有交点构成一个单独的表面，分别归属于上部和下部子块体，构成切割面上部块体和下部子块体之间的接触表面。

(3) 分别根据归属于上部和下部子块体的表面，形成上部和下部子块体。同时，为子块体添加质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵等力学信息以及两子块体界面间的弹簧信息。

尽管块体细化技术必然产生新的单元和节点，模型的拓扑结构随着裂纹的发展而不断变化，但由于采用动态松弛方法，新产生的子块体只需要代替原有块体即可。与传统有限元每计算一步需要集成一次整体刚度矩阵相比，块体细化技术将不会导致求解计算效率的降低。

3.3 节点插值技术

当 1 个细化块体被分裂为 4 个子块体后，将出现这几个子块体同时共有一个邻居块体情况，如图 3 所示。在子块体与邻居块体之间的界面上，子块体上的一些节点位置与其相邻块体的节点不重合，

无法形成邻居节点关系。以图4为例，子块体表面 $A'E'F'D'$ 上的节点 E' 和另一子块体表面 $B'C'F'E'$ 上的节点 F' ，在表面 $ABCD$ 上都找不到与之对应的邻居节点。由于在这些新产生的、没有邻居的节点上无法产生弹簧力，如何计算它们的位移和速度将成为困难。

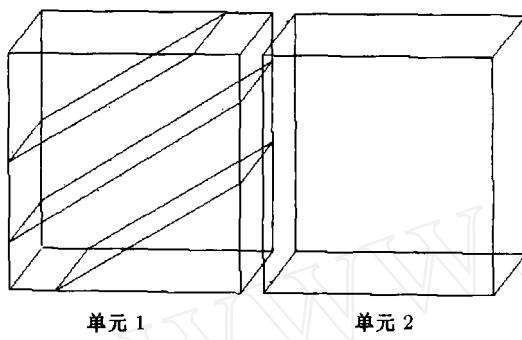


图3 块体细化形成的块体间一对多邻居关系

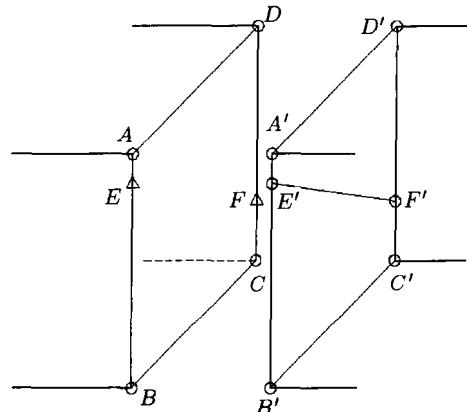


图4 当节点不能对齐时应设立插值节点

为解决上述问题，采用了节点插值技术：

(1) 对应于这些新产生的、没有邻居的节点，在邻居块体上设置插值节点，并在节点之间建立弹簧。例如，对于节点 E' 和 F' 在表面 $ABCD$ 上分别设置插值节点 E 和 F ，并在节点 $E'-E$ 和 $F'-F$ 之间设置弹簧；

(2) 由于插值节点不是独立节点，为满足邻居块体内位移和速度的连续性，插值节点的位移和速度需要由邻居块体其他3个节点的位移 u 和速度 v 根据线性插值函数

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^3 N_i \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix} \quad (21)$$

来获得。式(20)中， N_i 为邻居块体第*i*个节点的权重， u_i 和 v_i 为第*i*个节点的位移和速度。如插值节点 E 的位移由 A, B, O 三个节点的位移插值；

(3) 根据式(12a), (12b)计算出插值节点的不平衡力 $\mathbf{F}^{\text{out-of-balance}}$ ，并将该力利用插值函数

$$\mathbf{F}_i^{\text{out-of-balance}} = N_i \mathbf{F}^{\text{out-of-balance}}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (22)$$

分别施加于邻居块体的那3个节点上。如插值节点 E 处计算的不平衡力将分别返回 A, B, O 三个节点上。

4 计算实例

4.1 岩样单轴压缩破坏

为了验证程序的适用性，首先开展单轴受压岩石试件破坏过程模拟。岩样的长、高和厚度尺寸分别为0.3 m, 0.3 m 和 0.03 m，岩石材料参数见表1。该试件前后两面进行法向位移约束，底面3个方向进行位移约束，顶面水平两个方向进行位移约束，竖直方向施加30 MPa的面力。初始时刻该岩样被划分为100个正方体块体，每个块体的边长为0.03 m。采用MSC.Patran作为位移场显示工具。

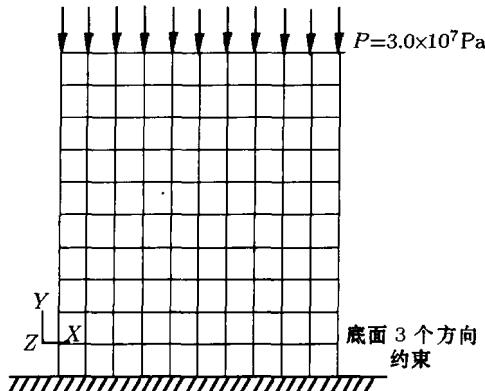


图5 单轴压缩二维模型网格、边界条件示意图

表1 岩石材料参数

属性	值
弹性模量 / Pa	3.00×10^{10}
泊松比	0.25
密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 500
抗剪强度 C_0 / Pa	8.00×10^6
摩擦角 φ / ($^\circ$)	30
抗拉强度 / Pa	5.00×10^6

荷载一次加载，弹性阶段计算收敛之后判断单元破坏切割，得到的切割图像如图6。允许接触面弹簧破坏之后的X方向位移云图，如图7。从图7的计算结果可以看出破坏形态是呈X型，与实验结果一致。

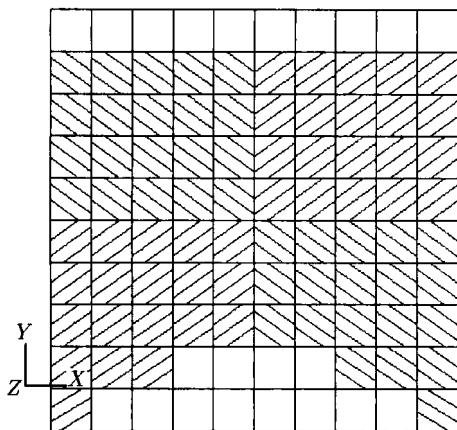


图 6 单轴压缩二维模型单元切割图像

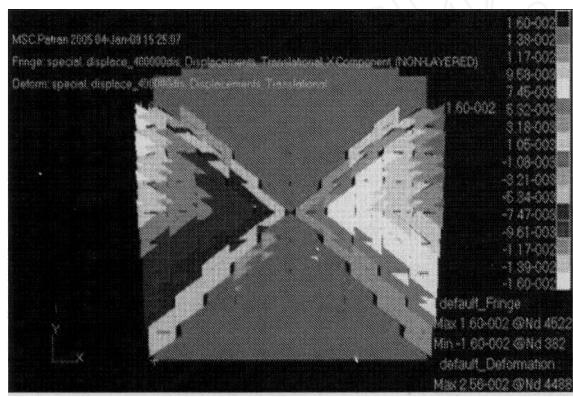


图 7 允许接触面弹簧破坏之后的 X 向位移云图

4.2 三点弯曲梁预设偏裂缝扩展

用预设裂缝的三点弯曲梁算例验证程序。所用材料为岩石，岩石材料参数见表 2。岩样的长、高和厚度尺寸分别为 1.23 m, 0.30 m 和 0.03 m, 初始时刻岩样被划分为 410 个均匀的正方体块体，每个块体边长 0.03 m (如图 8 所示)。前后方向法向位移约束，底面左端和右端处 3 个方向位移固定，顶面正中处施加 $P = 2.5 \times 10^4$ N 竖向压力，在底面偏离正中 0.18 m 处预设裂缝，裂缝高度 0.03 m。采用 MSC.Patran 作为位移场显示工具。

在计算中分步骤控制切割细化的过程，即在前一步细化之后，等计算能量收敛并且细化单元之间的弹簧充分破坏之后，再进一步细化，共细化 3 次。

表 2 岩石材料参数

属性	值
弹性模量 / Pa	2.74×10^{10}
泊松比	0.25
密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2500
抗剪强度 C_0 / Pa	10.0×10^6
摩擦角 φ / (°)	30
抗拉强度 / Pa	2.0×10^6

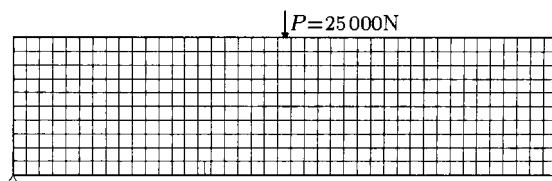


图 8 三点弯曲梁模型网格及边界条件示意图

其偏裂纹扩展结果如图 9，接触面弹簧破坏之后的 X 方向位移云图如图 10。可以发现，偏裂缝有向中间发展的趋势，扩展的路径在位移云图的 X 向正负位移的分界线上可以体现出来。计算得到的裂缝扩展路径与实验结果一致。

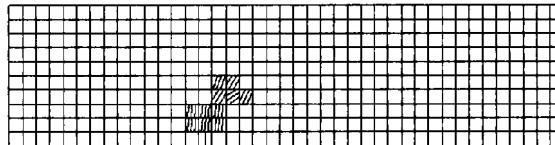


图 9 三点弯曲梁偏裂缝扩展

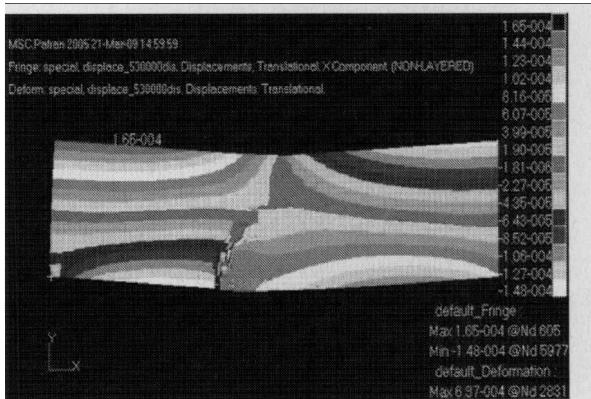


图 10 接触面弹簧破坏之后的 X 向位移云图

5 结 论

本文采用离散元的思路研究岩石脆性材料的破裂，离散元在计算的弹性阶段可以得到与其他数值方法一致的结果，在处理破裂问题时，离散元相比其他数值方法更简洁、方便。在计算过程中采用动态松弛法，避免了组装总刚度矩阵，简化了计算。当细化网格时，只需要用新生成的单元代替原单元，也非常适合用动态松弛法处理。引入了基于块体细化的界面裂纹扩展方法，这种方法根据内部应力场分布而动态选取裂纹扩展到的块体单元，并将该单元细化，从而生成潜在破坏面。单轴压缩和三点弯曲梁预设偏裂缝 2 个算例表明，本方法可以得出与实验现象一致的结果。

参 考 文 献

- 1 de Borst R. Some recent issues in computational failure mechanics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2001, 52: 63–95
- 2 Jing L. A review of techniques advances and outstanding issues in numerical modeling for rock mechanics and rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40(3): 283–353
- 3 张楚汉. 论岩石、混凝土离散 - 接触 - 断裂分析. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 217–235 (Zhang Chuhan. Discrete-contact-fracture analysis of rock and concrete. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(2): 217–235(in Chinese))
- 4 Goodman RE. Methods of Geological in Discontinuous Rocks. San Francisco: West Publishing Company, 1976
- 5 Cundall PA. Formulation of three dimensional distinct element model, part I—a scheme to detect and represent contact in system composed of many polyhedral blocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1988, 25(3): 107–116
- 6 焦玉勇, 张秀丽, 刘泉声等. 用非连续变形分析方法模拟岩石裂纹扩展. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 682–691 (Jiao
- Yuyong, Zhang Xiuli, Liu Quansheng, et al. Simulation of rock crack propagation using discontinuous deformation analysis method. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(4): 682–691 (in Chinese))
- 7 Carter BJ, Wawrzynek PA, Ingraffea AR. Automated 3-D crack growth simulation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2000, 47: 229–253
- 8 Bremberg D, Dhondt G. Automatic crack-insertion for arbitrary crack growth. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75: 404–416
- 9 Dolbow J, Moes N, Belytschko T. An extended finite element method for modeling crack growth with frictional contact. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2001, 190: 6825–6846
- 10 Liu XY, Xiao QZ, Karihaloo B L. XFEM for direct evaluation of mixed mode SIFs in homogeneous and bi-materials. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004, 59: 1103–1118
- 11 李录贤, 王铁军. 扩展有限元法 (XFEM) 及其应用. 力学进展, 2005, 35(1): 5–20 (Li Luxian, Wang Tiejun. The extended finite element method and its applications—a review. *Advances in Mechanics*, 2005, 35(1): 5–20 (in Chinese))

(责任编辑: 何漫丽)

《涌潮随笔——一种神奇的力学现象》序言

戴世强

(上海大学, 上海市应用数学与力学研究所, 上海 200027)

这是中国力学学会大众力学丛书编委会奉献给读者的丛书第八册。请大家聆听一位与钱塘江涌潮相伴了大半生的老教授述说涌潮的林林总总。

有很多人知晓钱塘江涌潮, 凡是观赏过钱塘江涌潮的朋友无不倾倒于它的气势和魅力。涌潮会给你带来无限遐想: 它有怎样的前世今生? 它有怎样的神奇传说? 它是怎样产生的? 它的巨大能量是怎样积聚起来的? 它是怎样演化推进的? 为什么它有让人眼花缭乱的千姿百态? 它的是非功过应该怎样评说? 它能否听从人类驾驭? 对于这些问题, 这本书会给你满意的回答。

本书作者林炳尧是浙江省钱塘江管理局已退休的教授级高工, 与钱塘江涌潮相伴相随三十年, 把自己的美好年华献给了涌潮的研究、管理和治理, 并在实践中积累了丰富的学识和经验。在这本书里, 他引领大家去欣赏钱塘江的种种美景: 一字潮、交叉潮、回头潮……; 告诉大家有关涌潮的传奇故事; 更重要的是, 他妙笔生花, 把涌潮生成、演化和传播的科学道理娓娓道来, 使你兴趣盎然地不知不觉地增进学识。领悟力学对解释自然现象的作用。

这本书的写作是催逼出来的。我对涌潮一向情有独钟, 在青年时代, 曾用流体力学和应用数学知识研究过涌潮的机理。到上海工作之后, 多次应林炳尧教授之邀前去观潮, 涌潮的气势磅礴、绚丽多彩令我折服。三年前开始策划编辑大众力学丛书时, 我就暗下决心, 一定要推出一本“涌潮与力学”的书。找谁来写? 我的学弟林炳尧教授自然地进入我的

视线范围。他从复旦数学系力学专业毕业后, 始终摸爬滚打在水利战线, 近 30 年来, 一直与钱塘江涌潮打交道, 对其习性了如指掌。2008 年钱塘江管理局成立 100 周年之际, 他出版了专著《钱塘江涌潮的特性》, 以水动力学和潮汐学知识, 对涌潮特征做了精彩的阐述, 获得了学界的好评。另外, 他的文学修养很好, 文笔生动, 叙事清晰。因此, 我认定, 在我国学界, 他是这本书的最合适的选择。但与他商量时, 却碰了钉子。原因是: 他近年来身体欠佳, 而写科普书并非易事, 深怕难以担当这一重任。几经商议, 他总算看在我这个学兄的面子上, 允诺了下来。

林炳尧教授先后用了一年时间, 精心搜集资料, 去芜存精, 去伪存真, 反复斟酌, 几易其稿, 还专门找人绘制插图, 终于捧出了这本精彩纷呈、引人入胜的科普著作。我对这位学弟真是由衷地钦佩和感谢。

全书共分 19 小节, 分别叙述: 涌潮的表观特征; 如何观潮、听潮; 涌潮产生机理和传播特性; 几种特殊涌潮的形成和形态; 涌潮的功过和治理; 涌潮的未来。综观此书, 取材精到, 叙述浅显, 有高中文化程度就可轻易读懂, 而且可以回味无穷。对于想要进一步了解涌潮的学术内涵的朋友, 建议大家阅读上面提到的专著《钱塘江涌潮的特性》。本书之末, 把对该专著的一篇评介文章作为本书的跋刊出, 供有兴趣的读者参考。

相信朋友们一定会喜欢这本书。