

文章编号: 1006-2467(2011)S-0007-04

# 不同围压下岩石破坏全过程数值模拟

柯长仁<sup>1, 2</sup>, 葛修润<sup>1, 3</sup>, 蒋俊玲<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 湖北工业大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430068; 3. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

**摘要:** 虚内键模型认为固体材料在细观上是由离散的质量微粒组成, 质量微粒之间由虚内键连接, 通过虚内键之间特定的连接法则和相互作用推导出了材料的宏观本构方程并将破坏准则嵌入了本构方程中. 采用 Monte-Carlo 方法来描述岩石材料的非均质性, 并假定微元强度服从 Weibull 分布, 通过虚内键的密度或刚度演化, 再现了不同围压下岩石破坏全过程. 根据数值模拟结果, 利用最小二乘法的线性拟合, 得出了岩石强度随围压变化的表达式.

**关键词:** 岩石; 破坏; 数值模拟; 围压; 虚内键

**中图分类号:** TU 45      **文献标志码:** A

## Fracturing Simulation of Rock Under Various Confining Pressures

KE Chang-ren<sup>1, 2</sup>, GE Xiu-run<sup>1, 3</sup>, JIANG Jun-ling<sup>2</sup>

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering,  
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. School of Civil Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

3. Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** It is viewed that solid materials are constructed by discrete quality particles at meso scale by the virtual internal bond model (abbreviated as VIB), and quality particles are connected by VIB, through the special cohesive force law and the interactions. The macro constitutive equation is then drawn, in which the fracture guideline is built. Monte-Carlo method is used to describe the heterogeneous of rock material in this paper, and the elements are supposed to yield to Weibull distribution, and by the density or rigid evolvement of VIB, the whole process of fracturing simulation of rock under various confining pressures are done. According to the simulation results, an equation to describe the rock intensity under various confining pressures is obtained with linear matching by the method of least square.

**Key words:** rock fracture; numerical simulation; confining pressure; VIB

地下岩石在没有受到开挖扰动之前, 一般都处于三向受压状态, 埋深不同, 岩石所受的侧压也不相同. 一般来说, 埋深越深, 所受的侧压也就越大. 研究岩石在不同侧压下的破坏过程并掌握其规律, 对岩

土工程的评价、设计与施工有着非常重要的意义. 不同围压下岩石破坏过程及其规律的研究, 取得了非常多的成果, 陶振宇等针对不同围压对岩石力学性质的影响进行了试验<sup>[1-3]</sup>, 然而由于样品的有限性及

收稿日期: 2008-08-23

作者简介: 柯长仁(1974-), 男, 讲师, 博士, 主要从事岩石力学与工程方面的教学和研究工作. E-mail: longmanke@163.com.

试验经费的限制, 他们的研究均只能针对有限样品的试验结果展开分析. 唐春安等开发了一套岩石破坏与失稳分析系统, 对围压下岩石破裂过程进行了大量的研究<sup>[4]</sup>, 但是该系统是以连续介质力学为理论基础, 而实际上岩石在破坏过程中, 原有的连续场被破坏, 变为不连续场. 因此, 研究和新的岩石破坏理论, 既有理论意义, 又有现实意义.

近年来, Gao 等在模拟固体材料扩展时提出了虚内键模型理论 (Virtual Internal Bond Model, VIB)<sup>[5,6]</sup>. 该模型认为, 连续的固体材料在微观上是由离散的质量微粒组成的, 微粒之间由一虚内键连接, 并根据微粒之间的相互作用推导出了材料的宏观本构方程. 该模型是一种多尺度模型, 通过细观上质量颗粒的连接法则, 将固体材料的破坏准则嵌入到了本构方程中, 从而无需另外的强度准则就能实现对材料破坏的数值模拟. 张振南在 VIB 的基础上, 提出了一种分析材料破坏行为的新方法, 即材料的宏观响应归因于微观虚内键的演化, 并发展了多维虚内键模型 (VMIB)<sup>[7]</sup>. 然而, 通过对岩石破裂过程的细观试验分析<sup>[2]</sup>, 岩石破裂过程中裂缝呈张开型, 宏观上的破裂带是多个细观单元破坏后的宏观汇集, 而质量微粒之间的虚内键伸缩变形构成的空间格构模型相比 VMIB 更为简洁. 基于以上认识, 作者将 VIB 应用到岩石破坏的数值模拟中, 并成功地进行了岩石破坏全过程曲线的模拟<sup>[8-10]</sup>, 本文在前面研究的基础上, 尝试用 VIB 研究不同围压下岩石破坏的全过程.

## 1 模型建立及参数选择

### 1.1 虚内键模型理论

虚内键模型如图 1 所示.

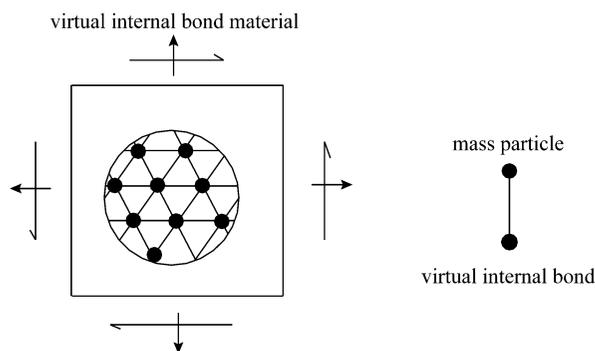


图 1 虚内键模型

Fig. 1 Virtual internal bond model

在第一个层次即有限元网格划分层次上, 它采用连续介质力学模型. 在第二个层次即微观上将固体材料视为由质量微粒组成, 微粒之间通过由虚内

键组成的网络结构相互作用. 根据相关研究结果<sup>[8-10]</sup>, 材料单元的四阶弹性张量为

$$C_{ijmn} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} k \xi_i \xi_j \xi_m \xi_n D(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi \quad (1)$$

式中:  $k$  为虚内键的刚度系数;  $\xi_i, \xi_j, \xi_m, \xi_n$  为虚内键的方向向量, 在球形坐标系  $(r, \theta, \varphi)$  中,

$$\xi = (\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta)^T$$

$D(\theta, \varphi)$  为虚内键的分布密度.

如果代表微元内质点的集合体在宏观上力学性质上等效为相应的连续介质微元, 则有

$$k = \frac{15E}{8\pi(1+\mu)} \quad (2)$$

式中,  $E, \mu$  分别为材料的弹性模量和泊松比.

对于平面应力问题, 有

$$k = \frac{2E}{(1-\mu)\pi} \quad (3)$$

对于平面应变问题, 有

$$k = \frac{2E}{(1-2\mu)(1+\mu)\pi} \quad (4)$$

### 1.2 岩石材料的模型描述

作为一种地质材料, 岩石的一个基本特性是非均质性以及岩石内部存在的天然缺陷和孔隙. 为了描述岩石的这种性质, 本文采用 Monte-Carlo 方法和统计描述相结合的方法对岩石微元进行随机赋值, 并假定微元强度服从 Weibull 分布. 这里有一个层次选择问题, 即选择对虚内键层次还是在微元层次. 本文选择在微元层次, 即对微元的弹性张量进行随机赋值. 具体方法如下: 假定微元强度服从 Weibull 分布, 首先产生  $N$  个符合 Weibull 分布的随机数  $x_i (i=1, 2, \dots, N)$ ,  $N$  为微元个数, 然后将这  $N$  个随机数的值赋给网格划分后的单元, 即在单元刚度矩阵时, 第  $i$  个单元的弹性张量为

$$C_{ijmn}^i = x_i C_{ijmn}$$

## 2 模型验证

为了验证模型的有效性, 本文对岩石在不同围压下的三轴试验进行了数值模拟. 模型的数据来源于作者在中科院武汉岩土力学研究所 MTS815.03 电液伺服岩石力学试验机上所进行的样品试验, 试件的尺寸和边界条件如图 2 所示, 材料常数如表 1 所示.

表 1 岩石材料参数和模型参数

Tab. 1 Rock parameters and the corresponding model parameters

岩石材料参数				模型参数	
$E/GPa$	$\mu$	$\sigma_b/MPa$	$\epsilon_b \times 10^3$	$c_1$	$c_2$
27.35	0.322	86.03	8.623	7.0	0.39

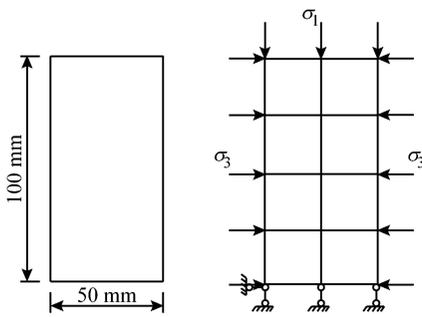


图2 岩样尺寸及边界条件

Fig. 2 Rock sample dimension and boundary conditions

模型采用平面 3 节点常应变单元, 节点总数为 496, 单元总数为 900. 数值模拟假设为平面应力状态. 数值模拟过程中采用位移控制方法, 每一位移加载步为 0.03 mm. 由于材料的宏观力学行为取决于微观虚内键的演化, 本文假定虚内键的密度演化方程为<sup>10</sup>

$$k = k_0 \exp \left[ -c_1 \frac{\epsilon_b}{\epsilon_b} \frac{l}{1 + c_2 \frac{\sigma_2}{\sigma_b}} \left( 1 + 2.0 \frac{\sigma_2}{\sigma_b} \right) \right]^{4.0} \quad (5)$$

式中:  $k_0$  为虚内键初始刚度, 可根据式(2)~(4)确定;  $l$  为虚内键的变形量, 且  $l = |\xi_i \epsilon_{ij}^d \xi_j|$ ,  $\epsilon_{ij}^d$  为偏应变张量;  $\epsilon_b$  为材料单轴抗压应变强度, 由岩石试样压缩试验确定;  $\sigma_2$  为主应力;  $c_1$ 、 $c_2$  为模型参数, 它们分别决定着材料的不同宏观响应特征.

### 2.1 应力应变关系特征

不同围压下的全应力-应变关系如图 3 所示. 由图 3 可见, 不同围压下的轴向应力-应变全过程曲线形状是相似的, 可以划分为 3 个阶段: 弹性变形阶

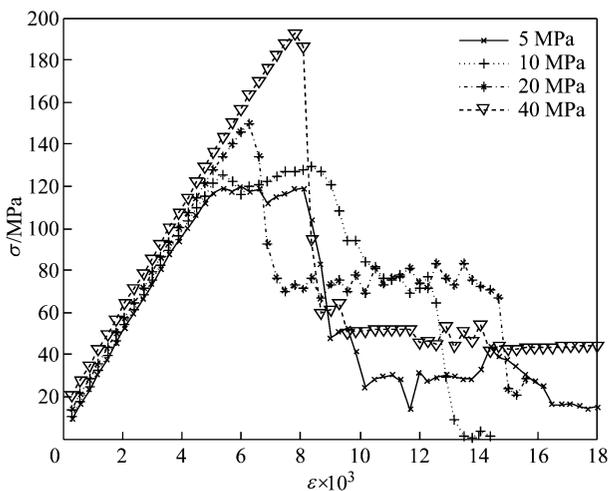


图3 不同围压下岩样的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves under various confining pressures

段、塑性变形阶段和破坏阶段. 与岩石物理试验得到的全过程曲线相比, 缺少开始的压密阶段, 这主要是由于模型不具备被压密以及孔隙闭合, 但是其它 3 个阶段的基本特征与物理模型吻合较好.

### 2.2 峰值应力与围压的关系

由图 3 可以看出, 不同围压下的强度特征表现为: 随着围压的增大, 抗压强度提高. 两者之间的关系, 通过描点法, 发现应力峰值与围压之间大致呈线性关系, 于是拟采用线性拟合峰值应力与围压之间的关系. 经过最小二乘法回归分析, 得到岩石的轴向破坏应力(强度)  $\sigma_1$  与围压  $\sigma_3$  之间的关系如图 4 所示, 图中的拟合函数采用如下形式:

$$\sigma_1 = \sigma_c + k \sigma_3 \quad (6)$$

式中:  $\sigma_1$  为轴向峰值应力 (MPa);  $\sigma_3$  为侧向应力 (MPa);  $\sigma_c$  为岩石单轴抗压强度 (MPa);  $k$  为岩石强度影响系数.

根据回归分析, 得到的表达式为

$$\sigma_1 = 108.471 + 2.101 \sigma_3 \quad (7)$$

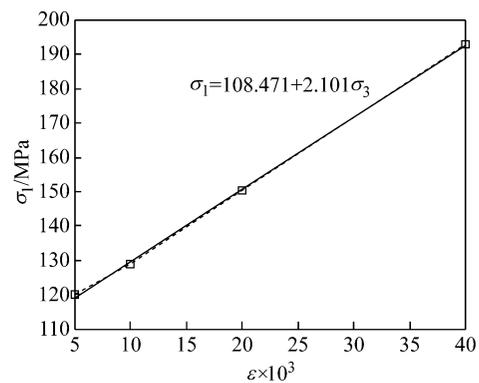


图4 不同围压与峰值应力关系

Fig. 4 Axis peak stress at various confining pressures

### 2.3 岩石的强度特征分析

不同围压下岩样的最终破坏模式如图 5 所示. 总的来说, 在围压作用下, 岩样的破坏形态呈剪切破坏特征. 这与岩样物理实验所得到的结论基本一致. 随着围压的增大, 剪切破坏形式越加明显, 剪切面更加整齐, 只是剪切面与轴向压力之间的夹角随围压变化的规律不是很明显.

## 3 结论

(1) Monte-Carlo 方法和统计描述相结合对虚内键模型的微元强度进行赋值, 并假定微元强度服从 Weibull 分布, 可以较好地描述岩石材料的非均质性及天然缺陷和孔隙, 从而实现了岩石破坏的数值模拟.

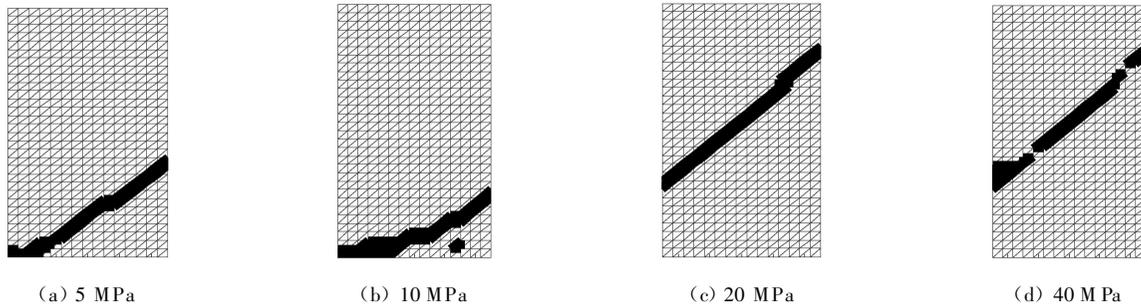


图 5 不同围压下岩样破坏状态

Fig. 5 Fracture of simulated rock specimens under various confining pressures

(2) 不同围压下, 岩石的变形分为弹性变形、塑性变形和破坏 3 个阶段. 岩石的峰值强度随围压的增加而增加, 岩石的峰值强度与围压之间呈线性关系, 通过最小二乘法拟合, 得出了峰值强度与围压之间的关系曲线.

(3) 围压下岩石的最终破坏形态呈剪切形. 随着围压的增大, 剪切破坏形式越明显, 剪切面更加整齐. 但是剪切面与轴向压力之间夹角随围压变化的规律并不是很明显, 这也是本文提出的模型值得改进和以后努力的方向.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 陶振宇, 朱焕春. 岩石力学的地质与物理基础[ M ]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996.
- [ 2 ] 葛修润, 任建喜. 岩土损伤力学宏观观试验研究[ M ]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [ 3 ] 李先炜. 岩块力学性质[ M ]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983.
- [ 4 ] 唐春安, 王述红, 傅宇方. 岩石破裂过程数值试验[ M ]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [ 5 ] GAO H J, KLEIN P. Numerical simulation of crack growth in an isotropic solid with randomized internal cohesive bond[ J ]. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids** 1998, 46(2): 187-218.
- [ 6 ] KLEIN P, GAO H. Crack nucleation and growth as strain localization in a virtual-bond continuum[ J ]. **Engineering Fracture Mechanics** 1998, 61: 21-48.
- [ 7 ] ZHANG Z N, GE X R. A new quasi-continuum constitutive model for crack growth in an isotropic solid[ J ]. **European Journal of Mechanics A/ Solids** 2005, 24: 243-252.
- [ 8 ] 柯长仁, 葛修润. 基于虚内键模型的岩石单轴压缩全过程曲线模拟[ J ]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1509-1514.  
KE Changren, GE Xiurun. Complete curve simulation of rock under uniaxial compression based on virtual internal bond model[ J ]. **Rock and Soil Mechanics** 2009, 30(5): 1509-1514.
- [ 9 ] KE Changren, GE Xiurun. Numerical simulation of rock fracturing under uniaxial compression using virtual internal bond model[ J ]. **Journal of Shanghai Jiaotong University (Sci)**, 2009, 14(4): 423-428.
- [ 10 ] 柯长仁, 葛修润. 基于虚内键模型的非均质岩石破坏数值模拟[ J ]. 上海交通大学学报(审稿中).  
KE Changren, GE Xiurun. Numerical simulation of heterogeneous rock dynamic fracture based on virtual internal bond (VIB) model(in review)(in Chinese)