

基于颗粒流方法自然崩落法数值模拟研究

王 涛^{1,2}, 盛 谦², 熊 将³

(1. 武汉大学 水资源与水电工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 北京国电水利电力工程有限公司, 北京 100024)

摘要:采用颗粒流方法对矿岩的自然崩落规律进行数值模拟计算, 提出在颗粒模型中确定细观接触力学参数及模拟初始地应力的方法。在此基础上以某矿区为例, 计算矿岩在崩落过程中的裂纹扩展及接触力分布情况, 其计算结果对于崩落放矿过程中的力学机制分析、放矿方案选择、矿岩崩落速度预测等方面具有一定的指导意义。对于采用颗粒流方法研究矿岩崩落规律机制提供了思路与方法。

关键词:采矿工程; 颗粒流; 崩落; 细观力学

中图分类号: TD 31

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2007)增 2-4202-06

RESEARCH ON NUMERICAL SIMULATION OF NATURAL CAVING METHOD BASED ON PARTICLE FLOW METHOD

WANG Tao^{1,2}, SHENG Qian², XIONG Jiang³

(1. State key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academic of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 3. Beijing Guodian Water Resources and Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100024, China)

Abstract: Numerical simulation of natural caving is conducted from meso-mechanics view through particle on the basis of method(PFM). A method is proposed to calibrate the parameters for the meso-mechanical model from meso-mechanics. The technique for initial stress field is also recommended. The proposed scheme has been applied to study the rupture evolution and contact force distribution after caving process at a mine in China. It will be helpful for research on caving in view of micro-mechanics.

Key words: mining engineering; particle flow method(PFM); caving; meso-mechanics

1 引言

自然崩落法也称矿块崩落法, 是在拉底空间上, 依靠矿体自身的软弱结构面, 在自重应力、次生构造应力的作用下, 使其进一步发展失稳崩落, 通过底部的放矿使上部的矿岩逐渐崩落, 直至上一个阶段或崩透地表的过程。由于该方法省略了钻孔、爆破等工序, 因此具有工艺简单、成本低廉等优点, 在

条件适宜的金属矿山普遍受到欢迎。该方法于 19 世纪末首先在美国使用, 而后在世界范围内逐渐得到应用^[1]。

2 自然崩落法在国内外的研究进展

早期人们用自然平衡拱理论来解释拉底后岩石的自然崩落, 之后运用弹塑性理论等解释岩体的崩落是在拉应力和(或)剪(压)应力的作用下破坏。数值

收稿日期: 2007-02-08; **修回日期:** 2007-05-15

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目(90715042)

作者简介: 王 涛(1974-), 男, 2005 年于武汉大学获博士学位, 现主要从事岩石力学及工程地质方向的教学与研究工作。E-mail: wangtao6@public.wh.hb.cn

力学分析方法的发展,为岩体崩落性研究提供了有力的手段。20 世纪 70 年代 M. A. Mahtab 运用平面弹性有限元分析了不同倾角裂隙对矿体拉底割帮后剪应力和拉应力分布的影响,结论是缓倾斜裂隙对剪切带分布的影响是敏感的,水平裂隙的剪切带最大。G. Krstulovic 运用三维弹性有限元研究了水平构造应力对崩落过程的影响,在单向水平构造应力(其数值为重力的一半)作用下,崩落矿石的体积比只有重力时减少 50% 以上^[2]。

王家臣等^[1]曾经采用有限差分程序对金川镍矿二矿区矿石进行过自然崩落规律研究。采用的是连续介质力学方法,研究矿石自然崩落以前,拉底对矿体的力学作用,即形成的破坏区域的大小。

张世雄等^[2]对铜矿峪矿 5 号矿体和程潮铁矿矿体进行了三维有限元计算。东北大学王泳嘉和邢纪波^[3]采用二维离散元法对崩落规律进行了研究。

加拿大的 Kidd Mine 中,曾采用有限差分方法对崩落进行过近似的数值模拟,其主要思路是利用连续性方法来模拟矿体在崩塌过程中的非连续介质力学问题。其中每一个块体表示一个单元,如果这个单元符合一定的准则,就会崩塌下来。在这个研究中,4 个方面的判断准则被用到:单元的应变;单元的垂直位移;单元的最小主应力;是否有可以滑落的途径。

自然崩落采矿是依靠岩体内部自然力的变化来破坏各种结构面和结构面的岩桥,形成与岩体分离的脱离体,并在重力作用下自然落矿。在这一动力学过程中,原岩应力及各种采矿工程(拉底、割帮等)所产生的次生应力场的大小及作用方式是矿体发生破坏的先决条件,而矿体中不连续面的存在,特别是它们的数量、分布规律、空间结合的特点,是确定矿体崩落难易程度、崩落块度大小和形状的决定性影响因素。显然基于连续介质力学方法进行的数值计算是无法准确模拟矿体崩落的特征。

自然崩落法是在拉底空间形成后,借助重力和构造应力场的作用,在矿体中诱发应力重新分布而引起自身破裂崩落。由此可见,基于非连续介质力学理论,模拟在崩落过程中矿岩的应力变化及裂纹扩展是分析崩落机制、选择较为切合实际的拉底削弱工程方案的基础。矿岩中存在大量的裂隙面,这些裂隙面的规模、方位等也是千变万化,因此可以将碎裂矿岩考虑成散体介质,如果完全精确地模拟每一条裂隙是不可能的,即使采用块体离散元方法,仅仅其切割岩块过程所需要的时间也是惊人的,更谈不上采用常规的模拟节理面的方法来描述崩落过

程的力学行为。颗粒流方法可以采用各种接触方式来模拟岩块间的接触行为,颗粒间可以滑动(见图 1)、拉裂、张裂,也可以考虑流变、应变软化等复杂的节理面力学行为^[4]。P. Cundall 2002 年曾采用颗粒流方法完成了国际崩落方法研究项目(international caving study project sponsors)。

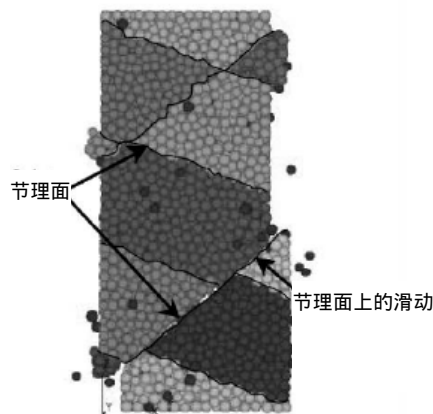


图 1 节理面切割颗粒模型产生的滑动破坏现象^[4]

Fig.1 Sliding failure along particle including joints^[4]

3 颗粒离散元方法

离散元把离散体看作有限个离散单元的组合,根据其组合特征分为颗粒和块体两大系统。PFC(particle flow code)通过 DEM(distinct element method)模拟颗粒的运动以及颗粒与颗粒之间应力的交互作用,DEM 最初是为了分析岩石力学行为,后来又被应用到土体的研究中,可以模拟大位移,离散块体的旋转,包括完全的分离以及对新接触的自动识别。

在颗粒离散元中,颗粒之间的交互作用是一种动态平衡的发展过程,无论何时其内部力处于一种平衡状态。通过跟踪单个颗粒的运动轨迹可以得到颗粒集合体中的接触力和位移。外部施加的力和体力通过墙以及颗粒的行为产生作用,使运动在颗粒系统中进行传播。这是一个动态的过程,传播的速度与离散系统的物理属性有关。

颗粒离散元的计算在应用颗粒体的牛顿第二定律和接触力与位移关系的交替中进行。牛顿第二定律用来决定每一个颗粒的运动和旋转行为,这些行为产生于接触力,及外力与体力的作用。而力与位移的关系是用来更新由每一对接触产生的接触力。因此颗粒流方法在计算循环中,交替应用牛顿第二定律与力-位移定律^[5-13],其计算循环过程如图 2 所示。

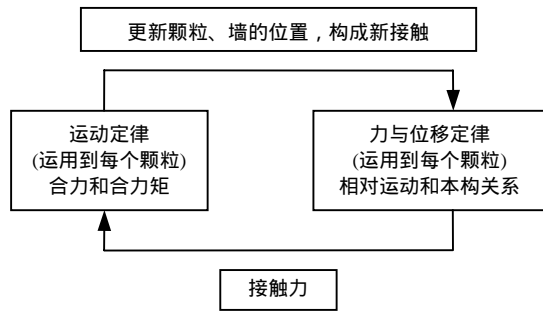


图2 PFC 的计算循环过程

Fig.2 Calculation cycle process of PFC

4 力学参数及初始应力场的确定

图3是一个典型的崩落计算过程流程图，确定颗粒接触力学参数以及模拟初始应力场是进行模拟的基础。进行颗粒流模拟时，3个基本的条件必须指明：颗粒集合体；接触类型和颗粒的力学性质；边界和初始条件。PFC模型是球形颗粒的集合体，具有规定的尺寸、摩擦因数、剪切和法向接触刚度。

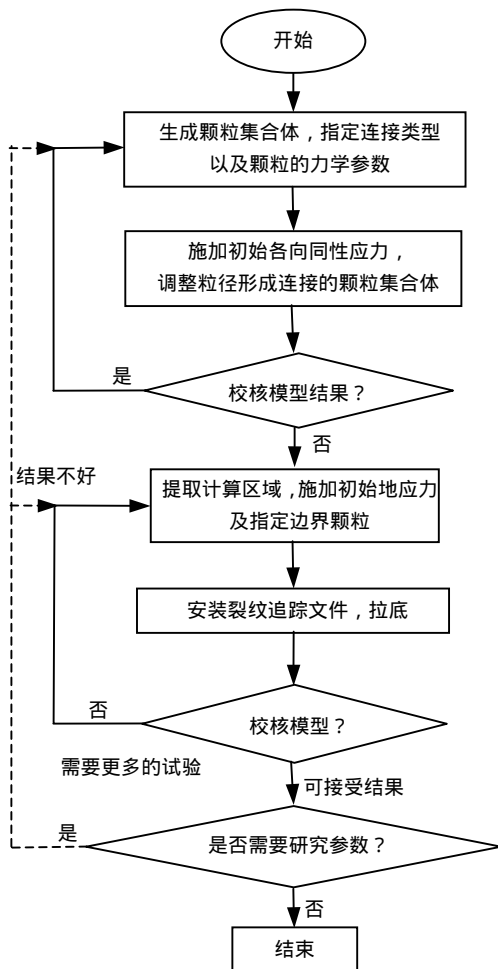


图3 崩落计算模拟过程

Fig.3 Solution procedure of caving procedure

为了得到合适的半径、法向和切向刚度值、颗粒接触处摩擦因数，模拟过程中引入了一个反复校准过程(见图3)。

颗粒的连接方式主要有以下3种：(1) 接触连接；(2) 平行连接；(3) 非接触连接。其中平行连接可以传递颗粒间的力和力矩，接触连接只能传递作用在接触点的力。平行连接可以想象为一排弹簧规则地分布在接触面上，形成一个矩形，矩形的中心为接触点。当两个颗粒之间发生重叠时，这些平行分布的弹簧将发挥作用^[11]。

平行连接接触发生相对运动，将引起轴向和剪切方向力，以及力矩(见图4)。连接材料引起的最大的法向和剪切应力可以为

$$\bar{\sigma} = \frac{T}{A} + \frac{|M|\bar{R}}{I} \tag{1}$$

$$\bar{\tau} = \frac{|V|}{A} \tag{2}$$

式中： A 为面积，即平行连接体的横截面； I 为惯性矩， T 的正值为张力。当超过其强度时，连接将破裂，就是微裂纹的产生。对于模拟碎裂岩体，平行连接是一种较好的选择。

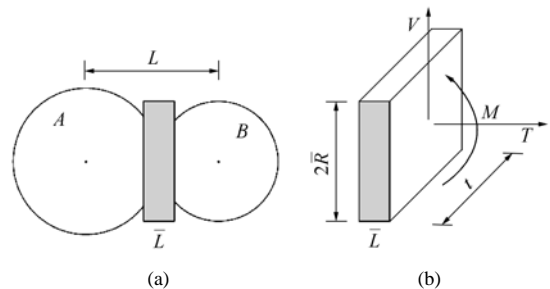


图4 平行连接模型及连接材料的力与力矩分布
Fig.4 Parallel-bond idealization, and forces carried in the bond material

材料的试验数据和宏观力学参数反应了其连续特征，颗粒接触属性和连接特征参数，在本文中被作为细观力学参数。通过各种比较模拟，从宏观力学参数来得到合适的细观力学参数是一个反复试验的过程(如图5所示)。

PFC提供下列方程可以从宏观力学参数来初步估计颗粒的刚度和连接强度。对于单位厚度的圆形颗粒(粒径相等)的阵列，按无约束方式进行得出杨氏模量的测试，轴向力的增量 ΔF_α ，与轴向应力的增量 $\Delta\sigma_\alpha$ 有如下的关系：

$$\Delta\sigma_\alpha = \Delta F_\alpha / 2R \tag{3}$$

式中： R 为颗粒半径。应变增量 $\Delta\epsilon_\alpha$ 与相邻2个颗粒的法向位移 Δu 间的关系为

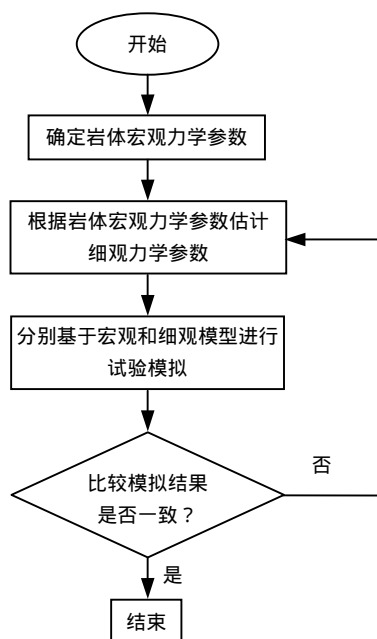


图 5 颗粒细观力学参数的确定过程

Fig.5 Procedure of particle meso-mechanical parameters

$$\Delta \varepsilon_\alpha = \Delta u / 2R \tag{4}$$

位移将使法向应力增加, 整体的法向刚度 k_n 应该是两个颗粒的法向刚度 k_n 组合:

$$\Delta F_\alpha = \frac{1}{2} k_n \Delta u = \frac{1}{2} k_n 2R \Delta \varepsilon_\alpha = k_n R \Delta \varepsilon_\alpha \tag{5}$$

将式(5)代入式(3):

$$\frac{\Delta \sigma_\alpha}{\Delta \varepsilon_\alpha} = \bar{E} = \frac{k_n}{2} \tag{6}$$

式(6)给出了粒径相等的材料杨氏模量 \bar{E} 的求解方法, 但对于粒径不等的材料, 也可以作为参考。由抗拉强度 σ_{tensile} 与连接的法向强度 S_n , 可得

$$\sigma_{\text{tensile}} = \frac{S_n}{2R} \tag{7}$$

由岩体试件的单轴压缩试验, 可以得到其单轴抗压强度(UCS), 试验得到的应力应变关系曲线能反应岩体力学本质的强度特征。在研究岩块分类以及确定破坏判据和莫尔包络线时, 常常都要用到它。单轴抗压强度与抗拉强度和抗剪强度之间有着一定的比例关系, 如抗拉强度为抗压强度 3% ~ 30%, 抗剪强度为抗压强度 7% ~ 15%, 从而可借助于它大致估算抗拉强度和抗剪强度。单轴压缩试验是研究岩石力学性质的一种重要手段^[14-17], 因此这里采用从宏观力学得到的参数单轴抗压强度(UCS)为基准, 对细观力学参数进行校核。通过不断地调整, 直到符合在两种环境下模拟的单轴压缩强度一致, 在此基础上可进行劈裂试验对比模拟进行验证。这时得到的细观力学参数即是所需要的, 这个过程对经验

的依赖性比较强, 整个试验的过程如图 4 所示。因为将岩体考虑成碎裂散体, 因此采用强度准则作为控制标准是可行的, 这是一种反复尝试的过程, 目前该方法在实际应用中取得了很好的效果^[4]。

为了达到要求的初始地应力, 需要反复的迭代来调整初始应力, 在每一次迭代中, 边界颗粒的位移被计算出来, 通过应变增量, 与应力增量呈线性关系, 可以求出颗粒集体中的应力, 计算会不停地迭代直到颗粒集体内的应力达到要求。迭代计算中的收敛准则为

$$\left| \frac{\sigma_{ij}^t - \sigma_{ij}}{\sigma_{ij}^t} \right| \leq \varepsilon \tag{8}$$

式中: σ_{ij}^t 为最终要达到的应力值, σ_{ij} 为当前颗粒集体中的应力, ε 为允许误差。

5 分析实例

某矿区最大主应力轴接近水平, 表明矿区的地应力以水平应力为主导。应力值随深度增加而增大, 在 200 ~ 500 m 深度最大主应力值为 20 ~ 30 MPa, 最高可达 50 MPa。

矿区矿石类型复杂, 在本次的计算过程中, 为了简化将岩体及混合岩考虑为一种岩体, 现场工程地质调查表明: 试验区域内节理裂隙发育方向多, 几乎全方位均有不同程度的发育; 节理裂隙发育密度大, 节理面平直光滑、延伸长且张开小, 以剪性节理为主。

首先在连续介质力学方法和颗粒流方法环境下进行单轴压缩试验, 试件选取的尺寸是 10 cm × 25 cm, 经过反复调试, 最终得到两种环境下单轴压缩强度一致, 如图 6 所示。颗粒细观力学参数以及颗粒集体的宏观力学参数如表 1 所示。

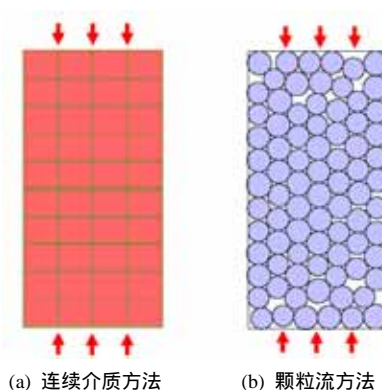


图 6 单轴压缩试验模型

Fig.6 Uniaxial compressive test model

表 1 物理力学指标值

Table 1 Physico-mechanical property values

有限差分计算采用或得到的宏观力学参数					颗粒细观力学参数						颗粒集合体宏观力学参数						
岩体单轴抗压强度 /MPa	杨氏模量 /GPa	摩擦因数	抗拉强度 /MPa	黏聚力 /MPa	颗粒半径 /m	颗粒法向刚度与切向刚度比	颗粒之间的接触模量/GPa	接触连接刚度法向与切向比	平行连接模量 /GPa	颗粒的摩擦因数	平行连接法向强度均值/Pa	平行连接法向强度标准差 /MPa	平行连接切向强度均值/Pa	平行连接切向强度标准差 /MPa	岩体单轴抗压强度 /MPa	杨氏模量 /GPa	摩擦因数
60	31	0.57	0.25	9.5	0.52	1.0	2.0	1.0	0.05	0.25	5×10^5	15	5×10^5	15	60	31	0.56

图 7 所示为建立的矿体二维颗粒流力学模型，计算范围是水平方向取 50 m，竖直方向取 50 m，设定边界颗粒来模拟边界条件。



图 7 颗粒流计算模型

Fig.7 Calculation model of particle flow

计算中模拟初始地应力场为：水平方向 40 MPa，竖直方向 20 MPa，拉底后，上部矿体中的裂纹逐渐增加，图 8 显示了在计算步为 47 348 时裂纹的分布，图中浅色表示拉裂裂纹，深色表示张裂裂纹，其破坏准则按照式(1)和(2)。裂纹用线状物表示，垂直于两个相邻颗粒的连线，长度等于两个相邻颗粒半径的均值。计算结果表明，裂纹主要分布在拉底部分正上方一段范围内，向上部延伸。图 9 所示

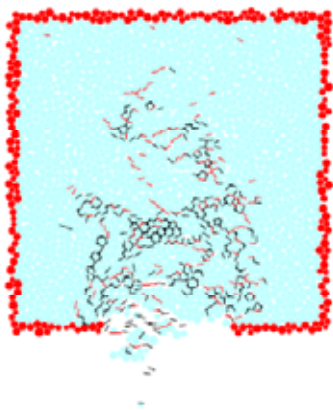


图 8 拉底计算后的裂纹扩展情况

Fig.8 Crack spread after undercut

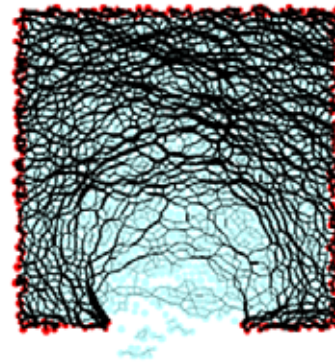


图 9 拉底计算后的颗粒间接触力分布情况

Fig.9 Distribution of contact force between particle after undercut

为拉底计算后的颗粒间接触力分布情况。接触力按照一定的方向排列，基本形成平衡拱。

6 结 论

崩落过程实质是碎裂矿岩中应力不断发展和变化过程，同时是裂纹的扩展与贯穿过程。颗粒流方法在模拟碎裂矿岩的力学行为具有独特的优势性，其计算结果对于崩落放矿过程中的力学机制分析、放矿方案选择、矿岩崩落速度预测等方面具有一定的指导意义。在以后的研究中，将增加直剪试验、劈裂试验、三轴试验结果作为细观参数校核标准，并进一步完善其理论。

参考文献(References)：

[1] 王家臣, 陈忠辉, 熊道慧, 等. 金川镍矿二矿区矿石自然崩落规律研究的数值模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(6): 596-600.(WANG Jiachen, CHEN Zhonghui, XIONG Daohui, et al. Research on natural caving regularity of ore in No. 2 mining area in Jinchuan Nickel Mine[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2000, 29(6): 596-600.(in Chinese))

[2] 张世雄, 连岳泉, 徐腊明. 岩体崩落机制的数值模拟研究[J]. 金属

- 矿山, 1997, (9) : 13–18.(ZHANG Shixiong, LIAN Yuequan, XU laming. Numerical simulation study of rock mass caving mechanism[J]. Metal Mine, 1997, (9) : 13–18.(in Chinese))
- [3] 王泳嘉, 邢纪波. 离散单元法及其在岩土力学中的应用[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1991.(WANG Yongjia, XING Jibo. Discrete element method and its application to rock and soil mechanics[M]. Shenyang :Northeast Institute of Technology Press ,1991.(in Chinese))
- [4] KULATILAKE P H S W, MALAMA B, WANG J. Physical and particle flow modeling of jointed rock block behavior under uniaxial loading[J]. Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 2001, 38(3) : 641–657.
- [5] 方心秋, 万德钧, 王 庆, 等. 离散元法在分析综放采场矿压中德作用[J]. 湘潭矿业学院学报, 2003, 18(4) : 11–14.(FANG Xinqiu, WAN Dejun, WANG Qing, et al. UDEC and its application on analysis underground pressure in fully-mechanized top coal caving face[J]. Journal of Xiangtan Mining Institute, 2003, 18(4) : 11–14.(in Chinese))
- [6] 杨 卫. 宏微观断裂力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.(YANG Wei. Macroscale and microscale fracture mechanics[M]. Beijing : National Defense Industry Press, 1995.(in Chinese))
- [7] CUNDALL P A. A Computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems[C]// Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics. Nancy, France : International Society of Rock mechanics, 1971 : 2–8.
- [8] CUNDALL P A. Formulation of a three-dimensional distinct element model—part I(a scheme to detect and represent contacts in system composed of many polyhedral blocks[J]. Int. J. Rock Mech. and Min. Sci. and Geomech. Abstr., 1988, 25(3) : 107–116.
- [9] 徐 泳, 孙其诚, 张 凌, 等. 颗粒离散元法研究进展[J]. 力学进展, 2003, 33(2) : 251–260.(XU Yong, SUN Qicheng, ZHANG Ling, et al. Advances in discrete element methods for particulate materials[J]. Advances in Mechanics, 2003, 33(2) : 251–260.(in Chinese))
- [10] 周 健, 池 永, 池毓蔚, 等. 颗粒流方法及 PFC^{2D} 程序[J]. 岩土力学, 2000, 21(3) : 271–274.(ZHOU Jian, CHI Yong, CHI Yuwei, et al. The method of particle flow and PFC^{2D} code[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(3) : 271–274.(in Chinese))
- [11] Itasca Consulting Group, Inc.. PFC^{2D}(partial flow code in 2 dimension) Version 3.1[R]. Minneapolis, Minnesota : Itasca Consulting Group, Inc., 2001.
- [12] 邢纪波, 俞良群, 王泳嘉. 三维梁颗粒模型与岩石材料细观力学行为模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6) : 627–630.(XING Jibo, YU Liangqun, WANG Yongjia. 3D beam-particle model for simulation meso-mechanical behavior of rock material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(6) : 627–630.(in Chinese))
- [13] 张德海, 邢纪波, 朱浮声, 等. 三维梁-颗粒模型在岩石材料破坏模拟中的应用[J]. 岩土力学, 2002, 30(2) : 93–96.(ZHANG Dehai, XING Jibo, ZHU Fusheng, et al. Study on rock strength characteristics based on uniaxial compression tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 30(2) : 93–96.(in Chinese))
- [14] 郭中华, 朱珍德, 杨志祥, 等. 岩石强度特性的单轴压缩试验研究[J]. 河海大学学报, 2002, 30(2) : 93–96.(GUO Zhonghua, ZHU Zhende, YANG Zhixiang, et al. Study on rock strength characteristics based on uniaxial compression tests[J]. Journal of Hohai University, 2002, 30(2) : 93–96.(in Chinese))
- [15] 吴德伦, 赵明阶. 岩石细观力学参数的反演研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(增) : 433–439.(WU Delun, ZHAO Mingjie. An inverse study of micromechanical parameters of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(Supp.) : 433–439.(in Chinese))
- [16] 郭中华, 朱珍德, 杨志祥, 等. 灰岩强度特性的单轴压缩试验研究[J]. 地下空间, 2001, 21(4) : 93–96.(GUO Zhonghua, ZHU Zhende, YANG Zhixiang, et al. Experimental analysis and mathematical simulation on the strength characteristics of limestone[J]. Underground Space, 2001, 21(4) : 93–96.(in Chinese))
- [17] 潘别桐. 岩体力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1990.(PAN Beitong. Rock mass mechanics[M]. Wuhan : China University of Geosciences Press, 1990.(in Chinese))