

基于颗粒流法的岩石断裂韧度确定

李启月, 孙丽

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 岩石断裂韧度是岩石断裂力学中最为重要的参数和指标, 它表征岩石材料抵抗裂纹扩展的能力或产生新裂纹表面所需克服的阻力。本文运用离散元法对含预置裂隙的岩石模型破碎过程进行数值模拟, 并从能量平衡角度全面模拟巴西圆盘实验加载过程中岩石模型的各种宏观力学响应和裂隙扩展等情况, 进而计算岩石的断裂韧度, 得到模拟岩样的平均断裂韧度为 $1.428\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 依据试验数据计算得到岩样的平均断裂韧度为 $1.405\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。计算结果与实验值能够很好地吻合, 从而证明了本文方法的有效性和实用性。

关键词 岩石断裂韧度; 临界应变能; PFC^{2D}; 能量平衡方法; 预置裂纹; 巴西圆盘试件

中图分类号 TP274

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.22.007

Determination of Rock Fracture Toughness Based on Particle Flow Method

LI Qiyue, SUN Li

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract The fracture toughness is the most important indicator in the rock fracture mechanics, which represents the ability to resist the crack propagation or the resistance needed to overcome new formations of crack surfaces. In this paper, based on the particle flow theory, the Particle Flow Code (PFC) model of rock with a pre-existing joint is constructed by using the parallel-bond model and the joint model. The failure process and the crack propagation path during the Brazilian disc (CSTBD) test are numerically simulated by using the particle flow code in two dimensions (PFC^{2D}), and the fracture toughness of the rock model is measured based on the simulated test data and the energy balance. Comparisons between numerical and experimental results show a good agreement, which indicates the validity and practicality of this method.

Keywords fracture toughness of rock; critical strain energy; granular discrete element PFC^{2D}; energy balance approach; preset crack; Brazilian disc sample

0 引言

岩石是一种典型的含有原生裂隙和孔隙等缺陷的脆性材料。在荷载作用下, 裂纹尖端易产生应力集中, 当裂纹尖端的应力强度因子达到岩石的断裂韧度时, 裂纹就发生扩展。然而裂纹的扩展并不代表岩石强度的完全失效, 只有当裂隙相互贯通并达到临界状态时, 才可认定岩石已破坏, 因此裂纹的产生、扩张和贯通只是岩石破坏的一个过程^[1]。

由于岩石的主要破坏方式之一是拉伸破坏, 因此拉伸强度和 I 型断裂韧度 (张开型) 是岩石的主要特征力学参数^[2]。岩石断裂韧度是用来表示岩石抵抗裂纹起裂和扩展能力的参

数, 它是岩石材料的一种固有属性, 但同时也与所采用的试样形状和加载方式相关^[2-4]。岩石断裂韧度在判断含有裂缝的岩石或工程岩体受载时是否发生破坏方面已得到广泛应用^[2-5]。从 20 世纪 80 年代开始, 测定岩石断裂韧度就已经成为一项国际性研究课题^[6]。

由于岩石材料是一种天然的准脆性材料且成熟的金属断裂韧度测试规范不适合在岩石中直接应用, 探寻适用于岩石试件断裂韧度的测试方法对于规范测定岩石断裂韧度具有重要意义, 这将为工程实际应用提供设计及预测指标^[2,7]。

通常用于测定岩石断裂韧度的试验方法有以下几类: 短

收稿日期: 2012-01-16; 修回日期: 2012-06-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50934006)

作者简介: 李启月, 副教授, 研究方向为岩体工程爆破及岩石力学, 电子信箱: 1286423204@qq.com

圆棒试件、扭转试验、梁的弯曲试验和圆盘试验,其中梁的三点弯曲试验常被采用。具体来讲,曾被用来测试岩石 I 型断裂韧度的方法及试样类型有:中心直裂纹试样(CSCBD)、单边切槽裂纹试样(SECBD)、不预制裂纹的巴西圆盘测试(BDT)、修正的圆盘测试(MRT)、压痕试验(IT)、径向裂纹环状试验(RCRT)、修正环状试验(MRT)、单边切槽半圆盘三点弯试样(HDB)、环形盘紧凑拉伸试样、轴向切槽圆棒压缩开裂试验(ACRBC)、单边切槽圆棒弯曲试验(SENRBB)、环向切槽圆棒弯曲试验(CNRBB)、环向切槽圆棒离心加载试验(NRBEL)、环向切槽圆棒拉伸试验(CNRBT)、预制裂纹空心筒内压测试或爆破测试、单边直裂纹三点弯曲梁测试(SC3PB)、单边直裂纹 4 点弯曲梁测试(SC4PB)、双扭测试(DT)、双悬臂梁撕裂试验(DCB)、紧凑拉伸试验(CT)、边切槽圆盘劈裂试验(END)、厚壁圆筒试验(TWC)、点荷载试验等^[8-11]。

目前,岩石断裂韧度主要通过试验确定,运用数值模拟方法确定岩石断裂韧度的研究还很少。本文基于离散元法的二维颗粒流对含预置裂隙的巴西圆盘试件模型破碎过程进行数值模拟,并根据能量平衡原理计算岩石的断裂韧度。具体步骤为:首先运用颗粒元程序 PFC^{2D} 建立一个含预置裂隙的岩石试件模型,然后通过程序中自带的 Fish 语言执行巴西圆盘加载试验模拟并将试验数据记录下来,再对试验结果进行分析,采用一种基于能量平衡的新方法计算岩石的断裂韧度,最后将计算得到的岩石断裂韧度值与室内断裂韧度测试值做对比,结果表明运用此方法能得到与试验相近的结果。

1 计算模型建立及模拟结果

基于离散元法的二维颗粒流程序 PFC^{2D} (Particle Flow Code in Two Dimensions) 主要用来模拟圆形颗粒介质的运动及其相互作用^[12-13],它既可直接模拟圆形颗粒的运动与相互作用问题,也可以通过两个或多个颗粒与其直接相邻的颗粒连接形成任意形状的组合体模拟块体结构问题^[14-15]。颗粒之间相互作用的本构模型有 3 种:接触刚度模型、滑动模型和连接模型^[16]。接触刚度模型的接触力和相应的变形之间呈线弹性关系,主要用来模拟松散颗粒体材料,用两个基本参数 k_n, k_s 量度接触情况, k_n 为两颗粒间的法向刚度, k_s 为切向刚度;滑动模型不能承受法向拉力,但允许颗粒在受剪的情况下重叠、滑移,能模拟材料间的摩擦行为,用摩擦因数 k_f 表征两颗粒间滑动摩擦状况;连接模型使颗粒集合体表现出高强材料的性质,能够提供抗拉、抗弯等力学响应。

在 PFC^{2D} 中, k_n, k_s, k_f 等细观力学参量表征的是颗粒间的力学行为,通过对这些细观力学参量不断调整组合,最终可以使得颗粒集合体的宏观力学参数与所需模拟岩性相近,达到较好的模拟效果。通过程序中自带的 Fish 语言, PFC^{2D} 程序在细观方面可以监测试验过程中试样内部各点的接触力、应力-应变及微裂隙数量等物理量的变化,宏观方面可以观察到试样表面裂隙的发育情况、试样整体的位移及试样宏观的应力-应变关系等。如果参数调整合理,其细观方面的功能能

够弥补模型试验中的缺陷,最大限度地还原某种力学行为的本源现象^[17]。

本文中数值试验在颗粒装配产生初始应力时采用接触刚度模型;加载过程中采用滑动模型和平行连接模型,以模拟岩石材料;设定节理面范围内颗粒间的平行连接参数为 0,以模拟预置裂纹的力学行为。

1.1 基本模型生成

采用 PFC^{2D} 程序,首先生成两道墙体,围成一个直径 $\phi=50\text{mm}$ 的巴西圆盘,然后在该区域内生成颗粒,粒径范围为 0.2—0.33mm,共生成 18894 个颗粒,控制孔隙率为 0.08,形成压实的颗粒集合,颗粒刚度取法向刚度 $k_n=1.25\times 10^8\text{N/m}$,切向刚度 $k_s=5\times 10^8\text{N/m}$,两侧垂直墙体作用于颗粒的法向刚度 $k_n=5\times 10^7\text{N/m}$,为颗粒法向刚度的 1/10,以模拟柔性约束。最终建立的颗粒集合模型如图 1(a)所示。

通过 Fish 函数对上下墙体垂直方向的速度进行控制,运用伺服控制的方式对试样进行加载。

1.2 颗粒参数确定

连接模型使颗粒集合体表现出高强材料的性质,能够展现出抗拉、抗弯等力学响应。为了模拟岩石材料,细观力学参数选择为:颗粒间平行连接强度 $p_{n,\text{bond}}=40\text{MPa}$,标准差强度 10MPa;颗粒间平行连接切向强度 $p_{s,\text{bond}}=40\text{MPa}$,标准差强度 10MPa;颗粒摩擦系数 $k_f=0.7$ 。

表 1 表明模拟岩样的宏观力学参量与实际加工圆盘试件的力学参数极为接近,这说明模拟岩样相关参数的选择是可行有效的。

表 1 模型主要细观与宏观力学参量
Table 1 Microscopic and macroscopic properties used in the model

细观力学参数		宏观力学参数		
名称	数值	名称	模拟岩样	实际圆盘试件
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	3100	抗压强度 σ_c/MPa	74.38	74.64
最小半径	0.09	抗拉强度 σ_t/MPa	9.384	8.92
R_{min}/mm		弹性模量 E/GPa	20	18.6
$R_{\text{max}}/R_{\text{min}}$	1.66	泊松比 ν	0.21	0.24
k_n/k_s	0.25			
k_f	0.7			

1.3 预置裂隙生成

当某一集合内颗粒的平行连接力学参数(即 $p_{n,\text{bond}}, p_{s,\text{bond}}, k_n, k_s$)设为 0,集合的上、下接触面将表现出裂隙面的摩擦力学特性。本文通过 PFC^{2D} 中的 Jest 命令,以坐标原点作为起点,形成一个沿水平方向的预置裂纹,其长度为 $2a$,如图 1(b)黑色部分所示。本次模拟预置了长度分别为 5, 8, 10, 12 和 15mm 的水平裂隙。在此设 $L=a/D$,其中 a 为内置裂隙的半长度, D 为巴西圆盘的直径,然后对实验进行分析。

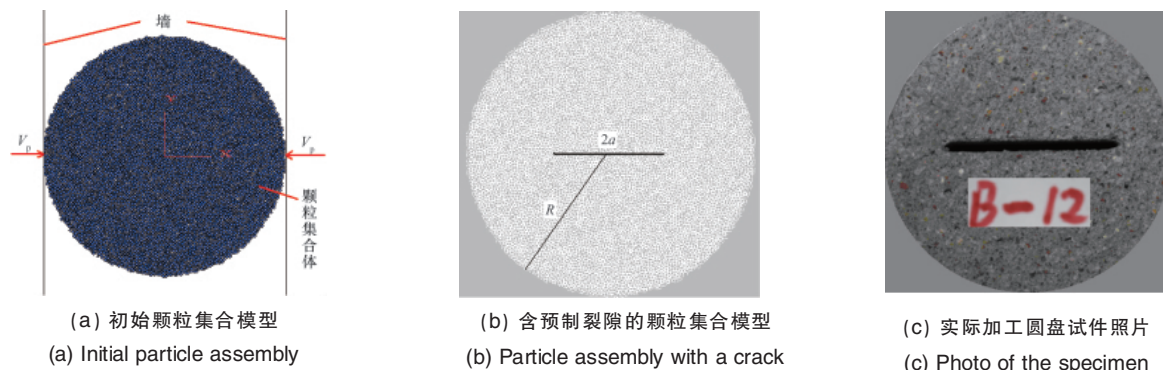


图 1 颗粒集合模型
Fig. 1 Particle assembly for compression test

1.4 试验模拟结果分析

颗粒试样形成后,便通过 Fish 函数对顶部和底部墙体的加载速度 p_{vel} 、循环次数 p_{cyc} 以及加载阶段 p_{stages} 进行设定,实现对试样的加载。

在整个加载过程中,可以利用 history 命令记录试样的水平应变 ϵ_x 和竖向应变 ϵ_y 以及 σ_x 和 σ_y 。应变按下式计算

$$\epsilon_x = \Delta b / b \quad \epsilon_y = \Delta h / h \quad (1)$$

图 2 为峰值应力后试样的位移场矢量图和内力场图。由图可知,图 2(a)试样变形过程中有沿预置裂隙方向的剪切带形成;图 2(b)颗粒间内力以压力为主,沿预置裂隙方向出现不同程度的应力集中现象,导致试样沿该方向破裂。

图 3 显示了整个试验过程中裂隙扩展变化的全过程。在加载过程中,首先在预置裂隙附近产生许多垂直于初始裂纹面的小裂纹,应力增加,裂纹数量也增多,尤其是接近初始裂纹尖端的垂直断裂纹继续延伸扩展,扩展方向逐渐平行于最

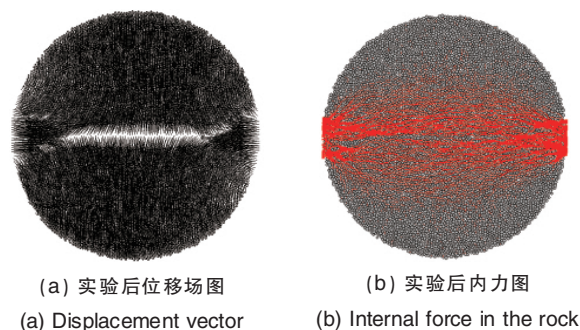


图 2 实验结果图
Fig. 2 Experimental results

大主应力方向,这个阶段就是裂纹稳定扩展阶段。当应力进一步增加,除主裂纹继续扩展外,在其他部位也会出现次生裂纹,继而出现分支裂纹。伴随着次生裂纹和分支裂纹的出现,岩石失去承载能力并最终发生破裂。

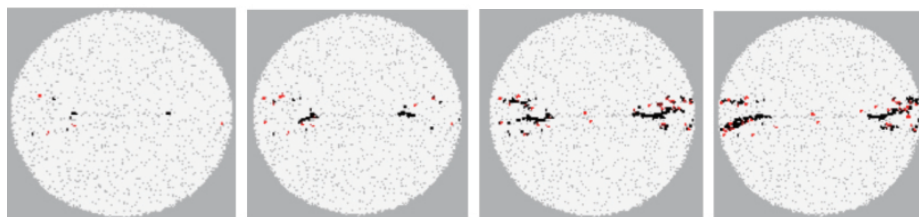


图 3 裂隙扩展变化过程
Fig. 3 Processes of crack propagation

2 基于能量平衡法的断裂韧度

本文所述能量平衡即系统内部产生的能量与外部边界对模型所做的功相等^[9]。内部能量主要包括试验过程中模型内部颗粒间相互作用产生的应变能、摩擦能和动能,而外部能量主要是外部边界力对模型所做功的总和。

根据 Griffith 理论可知,当岩石中裂纹尖端的理论强度达到极值时,裂纹将开始扩展。本文基于 Griffith 理论,运用能量平衡方法研究岩石中裂纹的断裂韧度。促使裂纹扩展的能量主要来源于裂纹扩展过程中的应变能,I 型裂纹的临界应变能 G_d 为

$$\frac{dU_c}{dA_c} = \frac{d(U_T - U_s)}{dA_c} = G_d \quad (2)$$

裂隙能量 U_c 为

$$U_c = U_T - U_s \quad (3)$$

$$A_c = N_c \bar{D} L \quad (4)$$

其中, A_c 为裂隙面积; U_T 为移动墙对颗粒集合所作的功; U_s 为基于集合中颗粒间连接相互作用积累的应变能; N_c 为集合中所有连接被破坏颗粒的数量; \bar{D} 为集合体中颗粒的平均直径,这里假设裂纹长度是近似相等的; L 为单位宽度,此处是 1m。

另一方面,阻止裂隙扩展的阻抗能 R 可以表示为

$$R = \frac{dW}{dA_c} = \frac{d(U_T + U_k)}{dA_c} \quad (5)$$

其中, W 为裂隙形成所需能量; U_T 为摩擦滑动形成的耗散能;

U_k 为动能,它是通过颗粒平移与旋转过程中所作的功计算而得的。在 PFC 模拟过程中, U_k 被无黏性弹性系统所耗散,当 $G=R$ 时,裂纹开始扩展。

由图 4 可以看出, U_s 单调递增至 A 点时达到最大值,然

后急剧下降;然而 U_f 在 A 点急剧上升; U_k 在 A 点也有所上升,但是不明显。当模型中裂纹开始扩展时, U_s 即开始释放,释放的 U_s 能量通过各种形式转化为 U_f 、 U_k 和 U_c 。这一过程中,主裂纹逐渐开始形成。

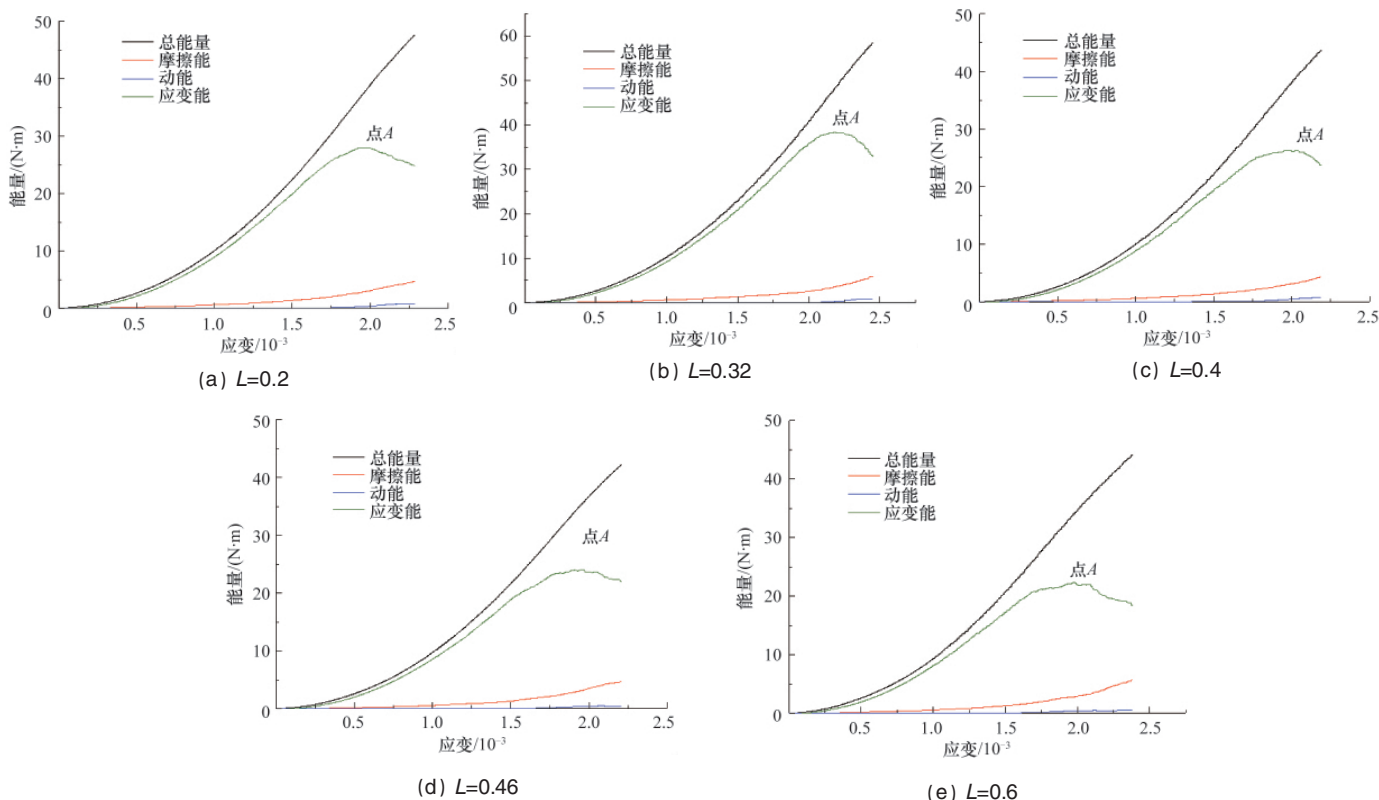


图 4 巴西实验能量

Fig. 4 The energies during uniaxial test

根据前述理论可知, I 型裂纹的临界应变能 G_{cI} 是在极值点 A 附近由裂隙能量 U_c 对裂隙面积 A_c 求导数而得到的。在这里 $L=0.46$ 为例对试验模拟结果进行分析,图 5 显示的是裂隙能量 U_c 与裂隙面积 A_c 的关系,图中运用线性回归方法在极值点 A 附近对曲线分别做三次拟合,最终取它们的平均值来确定 G_{cI} 的值。表 2 列出了三次线性回归拟合得到的 G_{cI}

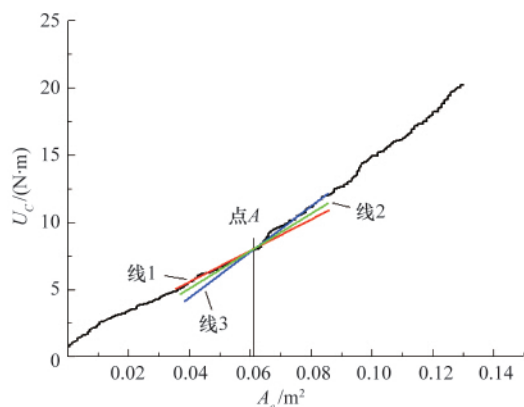


图 5 裂隙能量 U_c 与裂隙面积 A_c 的关系

Fig. 5 Relation between crack energy and crack area

值,它们的平均值为 $102.3\text{N}\cdot\text{m}/\text{m}^2$ 。根据线弹性断裂力学理论知识可知, I 型裂纹的临界应变能 G_{cI} 与断裂韧性 K_{cI} 的关系式为

$$K_{cI} = \sqrt{EG_{cI}} \quad (6)$$

因此,可以计算断裂韧性 K_{cI} 的值为

$$K_{cI} = \sqrt{102.3 \times 20 \times 10^9} = 1.428 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \quad (7)$$

表 2 三次线性回归拟合表

Table 2 Fitting table of model similar materials

拟合线号	应变能释放率 $G_{cI}/(\text{Nm}\cdot\text{m}^{-2})$	相关系数 $R^2/\%$
1	98.6	99.25
2	103.1	97.63
3	105.2	98.57

3 实验验证

根据数值模拟原型,制作一组预置水平中心裂隙分别为 5,8,10,12 和 15mm 的巴西圆盘试件,然后对其进行 I 型断裂试验断裂韧性测试。试验在电液伺服材料试验机上进行,

为了获得合理的 K_{Ic} , 以 0.1mm/min 的恒定位移速率对试件进行加载, 最终测得试件的破坏荷载为 P_c , 然后利用以下公式计算岩石的断裂韧度 $K_{Ic}^{[20]}$

$$K_{Ic} = \frac{P_{max}}{B\sqrt{D}} \sqrt{L} \left(1 + \frac{3}{2}L^2 + \frac{3}{4}L^6 + \frac{3}{64}L^8 \right)$$

其中, $L=a/D$, a 为内置裂隙的半长度, D 为巴西圆盘的直径; P_{max} 为实验最大载荷; B 为巴西圆盘试件厚度。

图 6 是实验计算值和运用 PFC^{2D} 模拟结果值的对比图。基于实验数据计算得出的岩石 I 型断裂韧度 K_{Ic} 的平均值为 1.405MPa·m^{1/2}, 比基于颗粒流法运用能量平衡原理计算得到的岩石断裂韧度值稍小, 这说明用数值模拟手段计算确定岩石断裂韧度是可行的。

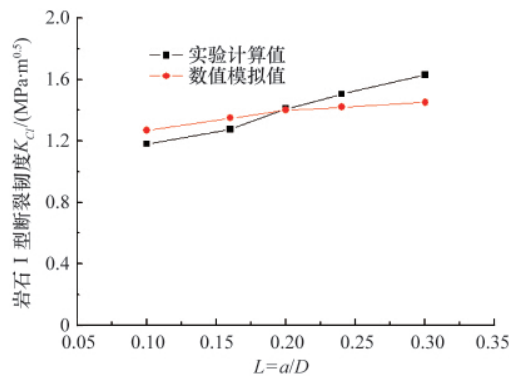


图 6 计算结果对比

Fig. 6 Comparison of test results

4 结论

借助数值模拟手段计算了模拟岩样的 I 型断裂韧度, 并通过实验验证了数值模拟结果的可靠性。主要结论如下。

(1) 采用 PFC 程序对含预制裂隙岩石模型进行仿真模拟。选取适当的细观力学参数可以全面模拟巴西圆盘实验加载过程中岩石模型的各种宏观力学响应和裂隙扩展等情况。

(2) 运用颗粒流方法从能量平衡的角度确定了岩石的临界应变能 G_{Ic} , 进而得到其 I 型断裂韧度 K_{Ic} 为 1.428 MPa·m^{1/2}, 与室内岩样断裂韧度的测试值 1.405 MPa·m^{1/2} 对比, 两值非常相近。这证明了本文方法的有效性和实用性。

参考文献 (References)

[1] Zhou Q, Gong S, Chen Z, et al. Compression shear fracture mechanism for marble [C]/Int Conf on Fracture of Concrete and Rock, SEN-RILEM International Conference. Bethel, CT, USA: Soc for Experimental Mechanics Inc, 1987.

[2] 谢和平, 陈忠辉. 岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2004. Xie Heping, Chen Zhonghui. Rock and soil Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2004.

[3] 中华人民共和国建设部. 工程岩体试验方法标准 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999. The Ministry of Construction of the People's Republic. Test method criterion of rock engineering[S]. Beijing: Press of China Plans, 1999.

[4] 李贺, 尹光志, 许江, 等. 岩石断裂力学 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1987. Li He, Yin Guangzhi, Xu Jiang, et al. Rock fracture mechanics [M].

Chongqing: Chongqing University Press, 1987.

[5] 刘杰, 李建林, 周济芳, 等. D-P 准则与岩石断裂韧度 K_{Ic} , K_{IIc} 关系的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(S1): 4300-4302. Liu Jie, Li Jianlin, Zhou Jifang, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(S1): 4300-4302.

[6] 徐纪成, 刘大安, 孙宗顺. 岩石断裂韧度的国际联合试验研究[J]. 中南工业大学学报, 1995, 26(3): 310-313. Xu Jicheng, Liu Da'an, Sun Zongqi. Journal of Central South University, 1995, 26(3): 310-313.

[7] 张盛, 李小军, 李大伟. 岩石 I 型断裂韧度测试技术和理论研究综述 [J]. 河南理工大学学报, 2009, 28(1): 33-38. Zhang Sheng, Li Xiaojun, Li Dawei. Journal of Henan Polytechnic University, 2009, 28(1): 33-38.

[8] Bearman R A. The use of the point load test for the rapid estimation of Mode I fracture toughness [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36: 257-263.

[9] 崔振东, 刘大安, 安光明, 等. 岩石 I 型断裂韧度测试方法研究进展[J]. 测试技术学报, 2009, 23(3): 186-196. Cui Zhendong, Liu Da'an, An Guangming, et al. Journal of Test and Measurement Technology, 2009, 23(3): 186-196.

[10] 尹祥础, 颜玉定, 李红, 等. 不同方法测定岩石断裂韧度 K_{Ic} 的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1990, 9(4): 328-333. Yin Xiangchu, Yan Yuding, Li Hong, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1990, 9 (4): 328-333.

[11] 王启智, 鲜学福. 岩石三点弯曲圆梁断裂韧度 K_{Ic} 的测试研究 [J]. 重庆大学学报, 1992, 15(5): 101-106. Wang Qizhi, Xian Xuefu. Journal of Chongqing University, 1992, 15 (5): 101-106.

[12] Cundall P A, Strack O D L. Particle flow code in 2 Dimensions[R]. Minnesota, USA: Itasca Consulting Group Inc, 1999.

[13] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47-65

[14] 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. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(3): 271-274.

[15] 周健, 池毓蔚, 池永, 等. 砂土双轴试验的颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 701-704. Zhou Jian, Chi Yuwei, Chi Yong, et al. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(6): 701-704.

[16] Itasca Consulting Group Inc. PFC^{2D} (particle flow code in 2 dimensions) theory and background [R]. Minnesota, USA: Itasca Consulting Group Inc, 2002.

[17] 刘顺桂, 刘海宁, 王思敬, 等. 断续节理直剪试验与 PFC^{2D} 数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1828-1836. Liu Shungui, Liu Haining, Wang Sijing, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1828-1836.

[18] Tsuyoshi Ishida, Hiroyuki Shimizu, Sumihiko Murata. Importance of inhomogeneity in rock fracturing deduced from distinct element simulation and in-situ direct shear test [C]/Controlling Seismic Hazard and Sustainable Development of Deep Mines (Volume 1), Rock Mechanics and Engineering Society in China. Beijing: Rinton Press, 2009: 3-16.

[19] Moon T, Nakagawa M, Berger J. Measurement of fracture toughness using the distinct element method [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2007, 44: 449-456.

[20] Yarema S Y, Krestin G S. Determination of the modulus of cohesion of brittle materials by compressive tests on disc specimens containing cracks[J]. Sov Mater Sci, 1966: 2(1): 7-10.

(责任编辑 马宇红, 代丽)