

罗山金矿节理岩体强度的 PFC^{3D} 模拟及其应用

赵国彦, 戴兵, 董陇军

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 采用 PFC^{3D} 数值模拟方法模拟在抗拉、抗压试验下不同倾角层理面的岩体的破坏过程, 从颗粒的位移和速度分布等方面出发, 阐述了节理岩体的破坏机理, 并与实验室条件下获得的节理岩体强度和变形特性进行比较和分析。结果表明, 单轴抗压强度在 0—60° 范围内随倾角 α 的增加而减小, 在 60°—90° 范围内随倾角的增大而增大; 单轴抗拉强度在 0—90° 范围内随倾角 α 的增加而减小。数值模拟得到的数据与实验测试得到的数据较吻合, 为实际工程中节理岩体力学参数的确定提供了一种新的渠道。

关键词 PFC^{3D}; 节理岩体; 力学参数; 节理面倾角

中图分类号 TD315

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.33.005

PFC^{3D} Simulation of the Strength Parameters for Jointed Rock Mass in Gold Ore of Luoshan and Its Applications

ZHAO Guoyan, DAI Bing, DONG Longjun

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

Abstract The failure process of rock mass with different angle beddings in compression and tensile tests was simulated by using PFC^{3D} numerical simulation. According to the displacement and speed distribution of the particles, the failure mechanism of rock joints is put forward, and the strength and deformation characteristics of jointed rock masses are compared with that under the laboratory conditions. The results show that the uniaxial compressive strength first decreases with the increase of angle beddings in the range of 0—60° and then increases with the increase of angle beddings in the range of 60°—90°; the tensile strength decreases with the increase of angle beddings in the range of 0—90°. The results of the PFC^{3D} numerical simulation are in perfect agreement with the test results, and provide a new way for the determination of the strength parameters of jointed rock masses in practical engineering.

Keywords PFC^{3D}; jointed rock masses; mechanical parameters; angle beddings of different dip angles

0 引言

岩体是一种地质材料, 在漫长的地质历史过程中它经历了多次造山和造陆运动的作用和改造, 使原本完整的岩体变成不同程度损伤的地质体, 即节理岩体。由于节理的存在, 岩体力学性质呈现出复杂的不连续性、非均质性和各向异性^[1]。由于引起垂直层理面和平行层理面变形的机制不同, 使节理岩体的这种各向异性差异较明显^[2]。岩体的强度变形特性主要受岩体内弱面(节理、裂隙等)的影响, 它们在荷载作用下发生破坏, 直接影响岩体的力学特性。节理岩体强度和变形特性

的研究对岩体稳定性分析具有很重要的指导作用, 对岩石工程的设计及安全使用有重要意义^[3-4]。如何较准确地模拟、分析并确定节理岩体的力学参数, 对于岩体工程的设计和施工具有重要的意义。

现今已开展大量有关节理岩体力学性质方面的研究, 然而单纯依靠现场试验方法, 不仅无法获得足够的数量且缺乏代表性, 而且费时、费力, 因此并不能较准确地反映工程的实际情况^[5-10]。所以将现场试验和数值模拟结合将是非常有效的方法。

收稿日期: 2011-09-19; 修回日期: 2011-10-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2007CB209402); 国家重点实验室开放基金项目(SKLG2006)

作者简介: 赵国彦, 教授, 研究方向为采矿工程、矿山安全和岩石力学与工程, 电子邮箱: 312929122@qq.com

目前主要采用 2 种数值模拟方法:等效连续介质法和离散元法。等效连续介质法对连续介质较为适用,但不太适用大变形问题,而离散元法则适用于非连续介质,可以模拟岩土体介质的滑动、转动及垮落等^[1]。由于节理岩体是不连续体,如果采用有限元进行数值模拟,模拟结果不会很准确,因此采用离散元法对节理岩体进行数值模拟。

本文根据结构面的倾角变化情况,应用离散元分析软件 PFC^{3D} 对不同结构面倾角下的节理岩体进行数值模拟,得出了节理岩体力学参数的一般规律。同时,还在对河南罗山金矿进行矿区山坡稳定性研究过程中,重点开展岩石弱面与各向异性岩体的力学性质实验研究,获得了较可靠的力学参数^[2],证实了 PFC^{3D} 数值模拟结果,为岩体稳定性分析研究提供了计算依据,为具体的岩体工程设计提供了具有一定指导性的计算参数。

1 数值模拟及结果分析

1.1 PFC^{3D} 基本原理

PFC^{3D} 是属于不连续介质力学的一种方法,通过离散单元法模拟圆形颗粒的运动及其相互作用,以解决大变形下的实际问题。它也可以与相邻一个或几个颗粒连接形成的组合体来模拟块体结构问题等。这里的“颗粒”并不直接与介质中是否存在颗粒状物质有关,只是用来描述介质特性的一种方式。比如,颗粒可以代表材料中的个别颗粒,例如砂粒;也可以代表黏结在一起的固体材料,例如混凝土或岩石^[13-16]。

颗粒流模型主要体现了颗粒簇的力学行为。在其模型内,离散的粒子被认为是刚性的,粒子之间的接触方式和力学特征可以不同,但符合基本的牛顿运动定律。通过对模型的颗粒的接触模型、边界条件及在外在应力条件下的设计与分析,再通过时间步迭加,使数值模拟试样的力学参数特性与实际的力学参数特性较符合,以达到数值求解的目的。其中,接触模型可以分为线性接触模型、接触黏结模型和平行黏结模型 3 种类型。线性接触模型假定两个接触刚体的刚度是串联的,以此来计算联合刚度;接触黏结模型采用两个作用在接触点上具有法向和切向刚度的弹簧表示;平行黏结模型采用一组作用在接触面上具有法向和切向刚度的弹簧表示。

模型试验的加载过程采用 PFC^{3D} 墙体位移实现。基于伺服机制原理^[17],通过 PFC^{3D} 内置的 Fish 语言编制加载程序,控制墙体的相对运动来施加荷载。

1.2 数值模型的建立

利用 PFC^{3D} 离散单元方法建立数值模拟,本模型采用接触黏结模型进行分析。模型分别取底面直径为 50mm、高为 100mm,直径为 50mm、高为 50mm 的圆柱体岩体试样(图 1、图 2)进行抗压和抗拉试验研究,层理面处于岩体中央,分别建立包含一定的 α 方向的单一层理面的岩体模型。 α 取值分别为 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° 和 90°;岩体的内摩擦角 $\varphi=35^\circ$;

泊松比 $\mu=0.25$;黏聚力 $C=0.6\text{MPa}$ 。首先定义 3 道墙体,其尺寸大小与室内试验试样保持一致,给定半径的颗粒在区域内随机生成。为提高颗粒的生成速度以及计算效率,先生成小直径颗粒,再把半径复原,然后通过循环来消除试样内部非均匀应力。最后约束模型底端的自由度,对其上端施加均布线荷载,采用分级加载的增量计算模型模拟其实际加载路径。

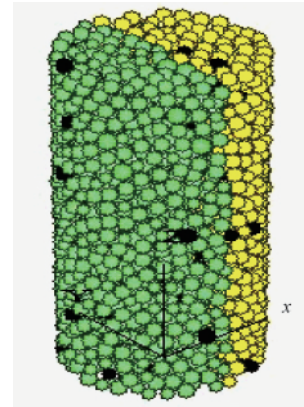


图 1 抗压强度模型

Fig. 1 Model for uniaxial compression

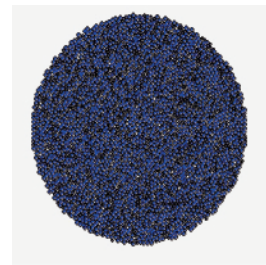


图 2 抗拉强度模型

Fig. 2 Model for uniaxial tensile

1.3 数值模拟微观参数的选取

PFC^{3D} 数值模拟微观参数主要包括颗粒的黏结刚度、摩擦系数、颗粒半径、颗粒弹性模量等方面的选取。这些微观参数首先主要由以下公式确定其大致的范围,再结合实践经验,一步一步地微调以获得合理的微观参数(这一过程需要反复调试,才能获得合理的参数,非常耗时)。

$$R = \frac{R^A + R^B}{2} \quad (1)$$

$$k_n = \frac{AE_c}{L} \quad (2)$$

$$k_s = \frac{12IE_c}{L^3} \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_c}{\tau_{h,m}} = 2.11 + 0.38 \ln \mu - 0.63 \ln \frac{\tau_{b,m}}{\sigma_{b,m}} - 0.22 \frac{\tau_{b,m}}{\sigma_{b,m}} \ln \mu \quad (4)$$

$$\frac{E}{E_c} = 0.78 + 0.14 \ln \frac{L}{R} - 0.34 \ln \frac{k_n}{k_s} \quad (5)$$

其中, I 为颗粒的转动惯量, m^4 ; R 为颗粒的平均半径, m ; A 为

表 1 节理岩体的微观参数

Table 1 Microparameters of jointed rock mass

微观参数	摩擦系数	颗粒法向刚度/(MN·m ⁻¹)	颗粒切向刚度/(MN·m ⁻¹)	颗粒黏结法向刚度/MPa	颗粒黏结切向刚度/MPa	颗粒密度/(kg·m ⁻³)
颗粒	0.7	180	130	12.7	12.7	3000
节理	0.5	—	—	0.001	0.001	—
墙体	1.0	10	10	—	—	—

颗粒的接触面积, m^2 ; μ 为颗粒的摩擦系数; k_n 为颗粒的法向刚度, N/m ; k_s 为颗粒的切向刚度, N/m ; E_c 为颗粒的弹性模量, Pa ; E 为岩石模型的杨氏模量, Pa ; $\tau_{b,m}$ 为颗粒黏结切向刚度, Pa ; $\sigma_{b,m}$ 为颗粒黏结法向刚度, Pa 。

1.4 数值模拟结果分析

根据岩石在单轴压拉条件下的力学特性可知,在受力达到极限强度以前,岩石应力与应变呈线性变化。当超过极限强度后,岩体发生宏观破坏,由弹性阶段转变为塑性阶段,此时所受应力逐渐减小,但应变仍呈增大趋势。图 3 所示为含层理面倾角为 90° 的模型在受均布线荷载时颗粒运动的位移分布情况。图 4 所示为含层理面倾角为 90° 的模型在受均布线荷载时颗粒运动的速度分布情况。从图 5 可以知道单轴抗压条件下节理岩体的极限荷载,并可以通过计算得到弹性模量。

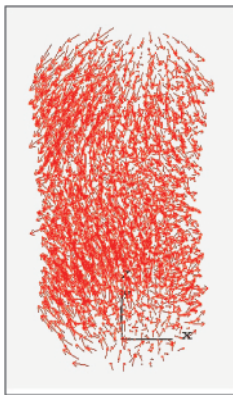


图 3 抗压条件下模型颗粒位移分布
Fig. 3 Distribution of particles displacement under uniaxial compression



图 4 抗压条件下模型颗粒速度分布
Fig. 4 Distribution of particles velocity under uniaxial compression

在实际试验中,直接拉伸试验很难实现,一般采用间接拉伸试验(如劈裂法等)来测定岩石的抗拉强度,所以 PFC^{3D} 数值模拟采用巴西圆盘模型来模拟节理岩体的抗拉强度。图 6、图 7 分别为在抗拉条件下模型颗粒的位移和速度分布情

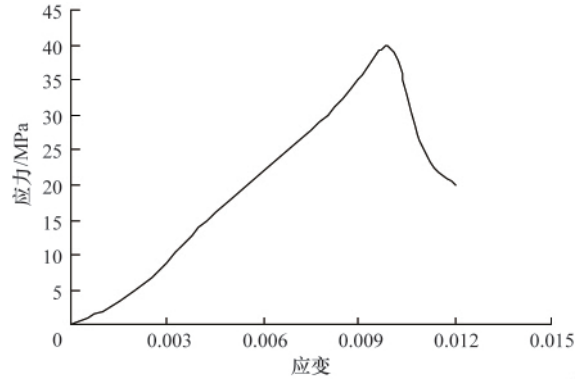


图 5 抗压条件下的应力应变曲线
Fig. 5 Axial stress versus axial strain under uniaxial compression

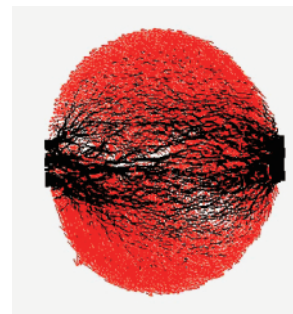


图 6 抗拉条件下模型颗粒位移分布
Fig. 6 Distribution of particles displacement under uniaxial tensile

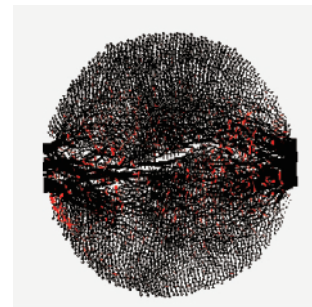


图 7 抗拉条件下模型颗粒速度分布
Fig. 7 Distribution of particles velocity under uniaxial tensile

况。从图 8 同样可以得到节理岩体倾角为 90° 时的极限荷载和弹性模量。

数值模拟的实验结果见表 2。(1) 由表 2 数据可以得到节理岩体抗压强度和变形特性随倾角 α 变化的一般规律:当 $\alpha=0^\circ$ 时,单轴抗压强度出现最大值(56.3MPa),当 $\alpha=60^\circ$ 时,单轴抗压强度出现最小值(22.5MPa);单轴抗压强度在 $0^\circ-60^\circ$ 范围内随倾角 α 的增加而减小,在 $60^\circ-90^\circ$ 范围内随倾角的增大而增大;节理岩体的弹性模量随着倾角 α 的增大而增

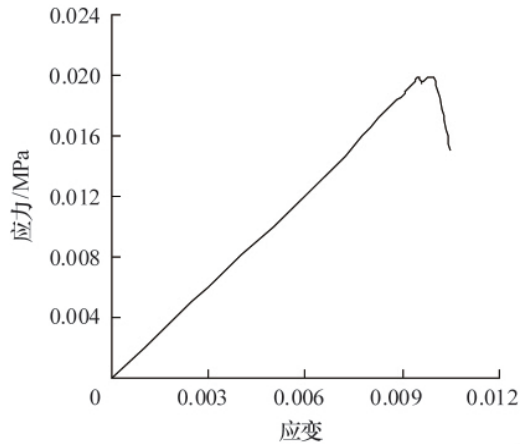


图 8 抗拉条件下的应力应变曲线
Fig. 8 Axial stress versus axial strain under uniaxial tensile

表 2 数值模拟结果

Table 2 Results of numerical simulation

角度 $\alpha/^\circ$	弹性模量/MPa	单轴抗压强度/MPa	单轴抗拉强度/MPa
0	1605	55.6	9.07
15	1690	49	8.4
30	1775	43.2	7.26
45	1860	30.4	6.10
60	1915	24.9	5.44
75	1975	33	3.8
90	2030	39.4	1.98

大。(2) 单轴抗拉强度随倾角 α 变化的一般规律为: 单轴抗拉强度在 $0^\circ-90^\circ$ 范围内随倾角 α 的增加而减小; 当 $\alpha=0^\circ$ 时其抗拉强度最大 (9.07MPa), 当 $\alpha=90^\circ$ 时其抗拉强度最小 (1.98MPa)。

2 实验验证及工程应用

2.1 实验方法

罗山金矿为黄金生产基地小秦岭金矿内的一座金矿。由于长期过度开采致使矿区地质环境恶化, 近几年来, 矿区发生过多起采空区滑坡、塌陷等地质灾害。而矿区的滑坡体对选厂、设备、建筑、公路及人民财产构成了严重的威胁。滑坡区域内的主要岩石为糜棱岩, 节理发育较明显, 主要分布在断裂带两侧, 对断裂带上部的滑坡体的稳定性存在着较大的影响。因此, 从不同倾角的角度来测定糜棱岩的强度和变形特性, 对准确预测滑坡体移动变形规律具有十分重要的意义^[18]。

为了研究糜棱岩的不同倾角的强度和变形特性, 采集了一定数量层理构造分明的糜棱岩, 对每块岩石, 按一定的 α

方向取样 (α 为节理面与试件端面间的夹角)。 α 角取值分别为 0° 、 58° 和 90° (图 9)。将岩石分别加工成直径为 50mm、高为 100mm 的抗压试样和直径为 50mm、高为 50mm 的抗拉试样, 根据倾角 α 的不同分别取抗压试样 3 组和抗拉试样 3 组。采用微机控制电液伺服万能试验机对试样进行单轴抗压强度试验和抗拉强度试验, 加载过程中采用力控 (200N/s)。

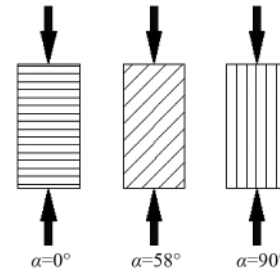


图 9 糜棱岩取样及单轴抗压试验示意
Fig. 9 Mylonite samples with different bedding angles for uniaxial compression tests

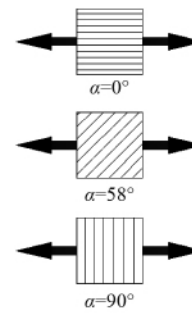


图 10 糜棱岩抗拉试验示意
Fig. 10 Mylonite samples with different bedding angles for uniaxial tensile tests

2.2 结果分析

(1) 单轴抗压试验结果分析。

试样的单轴抗压强度等于试样破坏时的最大荷载 P 除以垂直于加载方向的截面积 A :

$$\sigma_c = P/A \quad (6)$$

同时由试验仪器可直接得到应力与应变曲线, 而后按下式计算岩石的平均弹性模量:

$$E_w = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \quad (7)$$

其中, E_w 为岩石平均弹性模量, MPa; σ_a 为应力与纵向应变关系曲线上直线段始点的应力值量, MPa; σ_b 为应力与纵向应变关系曲线上直线段终点的应力值量, MPa; ε_a 为应力为 σ_a 时的纵向应变值; ε_b 为应力为 σ_b 时的纵向应变值。

试验结果见表 3。由表 3 数据可以得到糜棱岩抗压强度和变形特性随倾角 α 变化的一般规律。当 $\alpha=0^\circ$ 时, 单轴抗压强度最大 (55.8MPa); 随着倾角 α 的增大, 单轴抗压强度呈先

表 3 单轴压缩变形试验结果

Table 3 Results of uniaxial compression deformation tests

角度 $\alpha/^\circ$	试件个数	弹性模量/MPa	抗压强度/MPa
0	3	1616	55.8
58	3	1934	24.45
90	3	1996	39.8

减小、后增大的变化规律。

(2) 抗拉试验结果分析。

采用劈裂拉伸试验法对试件进行抗拉强度试验时,其抗拉强度可通过以下公式进行计算:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi Dh} \quad (8)$$

其中, P 为试验加载最大荷载,N; D 为试样的直径,mm; h 为试样的高度,mm。

试验结果见表 4。由表 4 数据可以得到糜棱岩的抗拉强度随 α 角的变化的一般规律。当 $\alpha=0^\circ$ 时其抗拉强度最大(9.30MPa),当 $\alpha=90^\circ$ 时其抗拉强度最小(1.85MPa);单轴抗拉强度随着倾角 α 的增大而减小。

表 4 抗拉试验结果

Table 4 Results of uniaxial tensile tests

角度 $\alpha/^\circ$	试件个数	抗拉强度/MPa
0	3	9.30
58	3	5.64
90	3	1.85

2.3 破坏模式分析

整个试验过程记录了糜棱岩随倾角 α 变化时的破坏特征,其中最常有的破坏类型如图 11。采用数值模拟得到的破坏类型与此相似。当倾角 α 取值较小时横穿层理面发生破

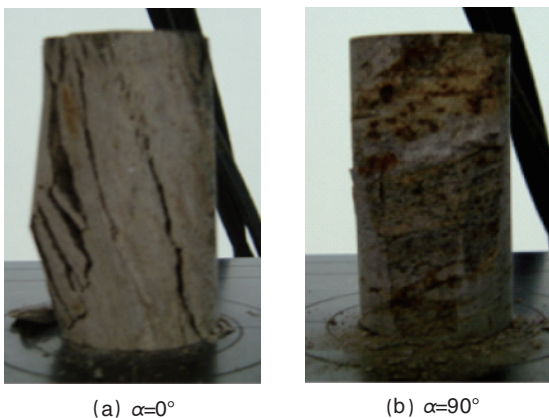


图 11 抗压试验中 $\alpha=0^\circ$ 和 $\alpha=90^\circ$ 时的破坏模式
Fig. 11 Mylonite failure model with $\alpha=0^\circ$ and $\alpha=90^\circ$ in compression test

坏,当 α 取值较大时沿层理面发生破坏。

3 结果分析

为便于比较,将实测值和 PFC 模拟结果分别绘在图 12、图 13。

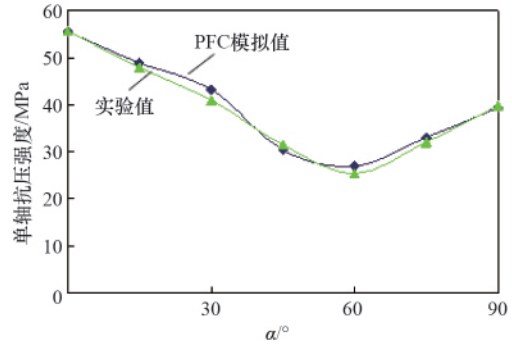


图 12 单轴抗压强度随 α 角的变化趋势

Fig. 12 Correlation between uniaxial compressive strength and different bedding angles

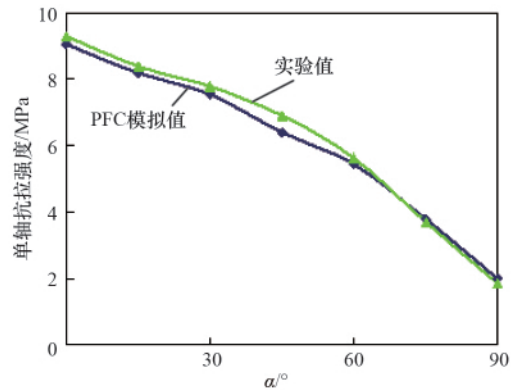


图 13 单轴抗拉强度随 α 角的变化趋势

Fig. 13 Correlation between uniaxial tensile strength and bedding angles

(1) 根据实验获得的数据和数值模拟 PFC 得到的数值得出了图 12 所示的在不同层理面倾角 α 的抗压强度变化规律的对比曲线。由图 12 可知,数值模拟结果和试验结果吻合较好;当 $\alpha=0^\circ$ 时,单轴抗压强度为最大值;随着倾角 α 的增大,单轴抗压强度呈先减小后增大的一般规律,倾角 α 在 $45^\circ-60^\circ$ 范围内抗压强度达到最低值,在 $0^\circ-60^\circ$ 范围内单轴抗压强度减小的速率随着倾角 α 的增大,有逐渐加快的趋势。由于每个倾角实验只有 3 个取值,与数值模拟有些不同。因此对两者进行相关性分析:

$$\sigma_c = 58.38 - 0.98\alpha + 8.50 \times 10^{-3} \alpha^2 \quad (9)$$

$$\sigma_c = 55.80 - 1.20\alpha + 1.15 \times 10^{-2} \alpha^2 \quad (10)$$

由以上 2 个函数可求得两者的相关系数为 0.860,两者相

关性较高,较好地证实了数值模拟抗压强度的结果。

(2) 根据实验获得的数据和数值模拟 PFC 得到的数值得出了图 13 所示的在不同层理面倾角 α 的抗拉强度变化规律的对比曲线。由图 13 可知,当 $\alpha=0^\circ$ 时单轴抗拉强度达到最大值,当 $\alpha=90^\circ$ 时单轴抗拉强度最小;单轴抗拉强度随着倾角 α 的增大呈减小的变化规律。对其进行相关性分析:

$$\sigma_t = -8.0 \times 10^{-2} \alpha + 9.72 \quad (11)$$

$$\sigma_t = -8.1 \times 10^{-2} \alpha + 9.60 \quad (12)$$

同样可以得到两者的相关系数为 0.965, 两者相关性较高,较好地证实了数值模拟抗拉强度的结果。

将本文得到的结论进一步推广应用于某金矿进行采矿引起的矿区山坡稳定性研究过程中,分析出节理发育岩体的移动规律,可以解决矿山采空区顶板垮落、滑坡等问题。

4 结论

利用 PFC^{3D} 建立岩体模型,对含不同倾角层理的岩体进行了离散元模拟分析。并通过对层理分布明显的糜棱岩进行实验室力学试验,对其各向异性力学特性进行了测试与分析研究。

(1) 在单轴压缩状态下,岩体抗压强度在节理面倾角为 0° 时达到最大值;倾角在 $45^\circ-60^\circ$ 之间时岩体抗压强度达到最低值,倾角在 $60^\circ-90^\circ$ 之间时抗压强度呈先降低后增大的变化规律。这说明在压应力条件下,压应力作用方向与节理面成 $45^\circ-60^\circ$ 时为最不利受力状态。

(2) 在单向拉应力状态下,随倾角 α 的增大,抗拉强度呈递减变化规律。当节理面倾角为 0° 时,抗拉强度达到最大值;当节理面倾角为 90° 时,抗拉强度达到最小值。这说明在拉应力条件下,拉应力作用方向与节理面垂直时为最不利受力状态。

(3) PFC^{3D} 数值模拟方法能较正确地模拟节理岩体力学分析的结论,为实际工程中节理岩体力学参数的合理确定提供了一条新的渠道。

本文研究的只是在较低应力状态下的岩体结构的稳定性分析。在今后的研究中,应进一步研究在高应力状态下岩体强度与变形特性的稳定性机理。

参考文献(References)

- [1] Harrison J P, Hudson J A. Engineering rock mechanics. Part 2: Illustrative workable examples[M]. Oxford: Pergamon, 2000.
- [2] 席道瑛, 陈林. 岩石各向异性参数研究 [J]. 物探化探计算技术, 1994, 16(1): 16-21.
Xi Daoying, Chen Lin. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 1994, 16(1): 16-21.
- [3] 李同录, 罗世毅, 何剑, 等. 节理岩体力学参数的选取与应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2182-2186.
Li Tonglu, Luo Shiyi, He Jian, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2182-2186.
- [4] 刘刚, 赵坚. 节理分布对岩体破坏影响的模拟研究 [J]. 中国矿业大学

- 学报, 2007, 36(1): 17-23.
Liu Gang, Zhao Jian. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(1): 17-23.
- [5] 张志刚, 乔春生. 单节理岩体强度试验研究 [J]. 中国铁道科学, 2007, 28(4): 34-40.
Zhang Zhigang, Qiao Chunsheng. China Railway Science, 2007, 28(4): 34-40.
- [6] 陈运平, 王思敬, 王恩志. 循环荷载下层理岩石的弹性和衰减各向异性[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2233-2238.
Chen Yunping, Wang Sijing, Wang Enzhi. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2233-2238.
- [7] 王春秋. 正交各向异性对岩体洞室破坏影响的模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(S2): 2492-2495.
Wang Chunqiu. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(S2): 2492-2495.
- [8] 杨林德, 闫小波, 刘成学. 软岩渗透性, 应变及层理关系的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 473-477.
Yang Linde, Yan Xiaobo, Liu Chengxue. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 473-477.
- [9] 李宁, 张志强, 张平, 等. 裂隙岩体力学特性细观数值试验方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S1): 2848-2854.
Li Ning, Zhang Zhiqiang, Zhang Ping, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 2848-2854.
- [10] Yin Y Q, Zhong H. Joint element in finite analysis for rock engineering [J]. Mechanics and Practice, 1981, 3(2): 52-53.
- [11] 李杭州, 廖红建. 复杂应力状态下岩体强度的各向异性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1397-1404.
Li Hangzhou, Liao Hongjian. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(7): 1397-1404.
- [12] 刘爱华, 黄敏. 岩石弱面与岩体各向异性的力学试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 152-156.
Liu Aihua, Huang Min. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 152-156.
- [13] 刘顺桂, 刘海宁, 王思敬, 等. 断续节理直剪试验与 PFC^{3D} 数值模拟分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1828-1837.
Liu Shungui, Liu Haining, Wang Sijing, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1828-1837.
- [14] 李新坡, 何思明. 节理岩质边坡破坏过程的 PFC^{3D} 数值模拟分析[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(S1): 70-76.
Li Xinpo, He Siming. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(S1): 70-76.
- [15] 柴贺军, 孟云伟, 贾学明. 柔性石笼挡土墙压力的 PFC^{3D} 数值模拟[J]. 公路交通科技, 2007, 24(5): 48-52.
Chai Hejun, Meng Yunwei, Jia Xueming. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(5): 48-52.
- [16] 任磊, 肖昭然, 胡霞光. 级配碎石直剪试验的细观分析[J]. 公路, 2008, 5(5): 350-354.
Ren Lei, Xiao Zhaoran, Hu Xianguang. Highway, 2008, 5(5): 350-354.
- [17] 朱焕春. PFC 及其在矿山崩落开采研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1927-1932.
Zhu Huanchun. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1927-1932.
- [18] 刘爱华, 董蕾, 董隲军. 岩体各向异性的数值模拟及试验验证 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(1): 177-184.
Liu Aihua, Dong Lei, Dong Longjun. Journal of Central South University: Science and Technology Edition, 2011, 42(1): 177-184.

(责任编辑 马宇红, 代丽)