

文章编号:1673-9469(2021)01-0040-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.01.007

## 离散裂隙网络对岩体力学特性影响数值模拟研究

阮杰<sup>1,2</sup>,张金龙<sup>3</sup>,张成辉<sup>1,2</sup>,石崇<sup>1,2\*</sup>

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;2. 河海大学 岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098;3. 中国电建集团 中南勘测设计研究院有限公司,湖南 长沙 410014)

**摘要:** 为了研究结构面对破碎岩体力学参数的影响,以溧阳抽水蓄能电站地下厂房工程建设为例,在现场围岩地质条件、岩体结构特征及岩体质量分级等研究的基础上,分别选取主厂房顶拱、上游边墙和下游边墙三处裂隙的密度、迹长和倾角等参数进行统计,基于 Monte-Carlo 法构建离散裂隙网络,最后通过三轴压缩试验离散元模拟研究离散裂隙网络对岩体力学参数的影响。试验结果表明结构面对岩体的力学特性起决定性作用,岩体的单轴抗压强度、弹性模量、粘聚力、内摩擦角等参数及其离散性对结构面的密度、倾角和迹长等变化较为敏感。

**关键词:** 离散裂隙网络;破碎岩体;岩体力学参数;数值模拟

中图分类号:TU45

文献标识码:A

## Numerical Simulation of the Influence of Discrete Fracture Network on the Mechanical Parameters of Rock Mass

RUAN Jie<sup>1,2</sup>,ZHANG Jinlong<sup>3</sup>,ZHANG Chenghui<sup>1,2</sup>,SHI Chong<sup>1,2\*</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

3. Power China Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha, Hunan 410014, China)

**Abstract:** In order to study the influence of the structural plane on the mechanical parameters of the broken rock mass, taking the construction of the underground powerhouse of Liyang pumped storage power station as an example, on the basis of the study of the geological conditions of the surrounding rock, the structural characteristics of the rock mass and the quality classification of the rock mass, the density, trace length and dip angle of the three cracks in the roof arch, the upstream side wall and the downstream side wall of the main power plant were selected for statistics, and the discrete fracture network was constructed based on Monte-Carlo method. Finally, the influence of discrete fracture network on the mechanical parameters of rock mass was studied by triaxial compression test discrete element simulation. The test results show that the structural plane plays a decisive role in the mechanical properties of the rock mass, and the parameters and discreteness of the uniaxial compressive strength, elastic modulus, cohesion, internal friction angle of the rock mass are more sensitive to the changes of the density, dip angle and trace length of the structural plane.

**Key words:** discrete fracture network; broken rock mass; rock mechanics parameters; numerical simulation

大量的岩土工程实例表明岩体的变形和破坏规律取决于岩体的结构特性,岩体工程的稳定状态受岩体自身结构控制。故研究结构面对岩体力

学特性的影响是解决岩土工程稳定性问题的基础和关键。谷德振<sup>[1]</sup>对“岩体结构”作出了明确的定义,将岩体结构划分为层状、块状、网状三类,并对

收稿日期:2020-10-07

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51679071);国家自然科学基金重点项目(41831278)

作者简介:阮杰(1996-),男,安徽合肥人,硕士研究生,主要从事岩石力学与工程方面的研究工作。

\* 通讯作者:石崇(1978-),男,山东沂水人,博士,教授,博导,主要从事岩石力学与工程的教学与研究工作。

层状及块状边坡分别进行了力学稳定分析计算;孙广忠教授<sup>[2]</sup>阐述了“岩体结构控制论”的含义,即:岩体的变形破坏特征是岩块和结构面同时作用的结果,结构面对其起着决定性作用;张淑坤等<sup>[3]</sup>通过试验研究巷道围岩结构面形成的局部弱化区的力学特性,提出巷道围岩局部弱化控制思路;王述红等<sup>[4]</sup>应用块体理论,进行了结构面切割作用下的关键块体研究,识别岩体中危险关键块体;杨天鸿等<sup>[5-8]</sup>应用离散裂隙网络模型开展了大量结构面方面的研究工作;Ni Haijiang 等<sup>[9]</sup>采用数据分析和统计的方法研究了节理尺寸对岩体力学特征的影响,认为节理尺寸对岩体力学性质有很大影响;范文臣等<sup>[10]</sup>运用室内试验和数值模拟试验对不同倾角节理岩石类材料的破坏模式进行了研究,认为倾角对抗剪强度具有一定的弱化效应;李慎举<sup>[11]</sup>基于 Monte-Carlo 模拟方法生成随机结构面网络模型,采用离散元方法研究了结构面的尺寸和规模对围岩应力状态和承载力的影响;胡政等<sup>[12]</sup>利用 Midas GTS 和 FLAC3D 研究了结构面特征对岩体力学性质的响应;Bahaaddini M 等<sup>[13-14]</sup>采用 PFC2D 研究不同长度节理对岩石的剪切力学特征的影响,认为节理长度对岩石的力学性质有很大影响。

从以上关于结构面对岩体力学特性影响的研究中可以看出,绝大部分研究者所选取结构面几何参数及岩体力学参数的种类较为单一,这难免会对试验结果产生局限性。本文通过对厂房区结构面倾角、密度、规模的统计分析,基于 Monte-Carlo 法构建离散裂隙网络,通过三轴压缩试验离散元模拟研究了离散裂隙网络的各个几何参数对岩体的单轴抗压强度、弹性模量、粘聚力、内摩擦角等力学参数的影响。

## 1 离散裂隙网络统计与表征

### 1.1 溧阳抽水蓄能电站工程概况

溧阳抽水蓄能电站地下洞室群垂直埋深在 230~260 m 范围内,整个洞室群由主厂房、主变洞、尾闸室等洞室构成,主厂房开挖尺寸(长×宽×高)为 219.9 m×23.5 m×55.05 m,拱顶开挖高程为-16.05 m,岩锚梁以上开挖跨度为 25.00 m,以下为 23.50 m,开挖总长度为 219.90 m,由主机间部分(开挖尺寸为 161.00 m)、安装间部分(开挖尺寸为 41.95 m)及副厂房部分(开挖尺寸为 16.95 m)组成。

### 1.2 厂房区结构面几何参数统计分析

在岩体露头面上作一个矩形窗口,并采用一定的方法测定位于窗内的结构面迹线条数以及迹线与矩形窗口存在的关系,这种方法称为统计窗法。分别选取位于主厂房顶拱(图 1)、上游边墙和下游边墙处三处地质统计窗,通过软件统计裂隙的密度、迹长和倾角等参数,汇总如表 1 所示。



图 1 主厂房顶拱统计窗

Fig. 1 Statistical window of roof arch of main plant

表 1 统计结果分析

Tab. 1 Analysis of statistical results

统计窗 位置	主厂房 拱顶	主厂房 上游墙	主厂房 下游墙	平均 值
结构面数目/条	1 043	1 246	1 417	1 235
裂隙平均迹长/m	5.06	3.72	4.16	4.31
迹长方差	4.11	2.88	3.46	3.48
裂隙平均倾角/(°)	42.27	55.99	54.77	51.01
倾角方差	30.12	26.82	27.35	28.10
单位面积上的裂隙条数/m <sup>-2</sup>	0.15	0.28	0.26	0.23
单位面积上的裂隙长度/m <sup>-1</sup>	0.75	1.05	1.09	0.96
单位长度上的裂隙数目/m <sup>-1</sup>	0.31	0.87	0.55	0.58
单位体积内裂隙面积/m <sup>-1</sup>	2.40	1.22	1.98	1.87

### 1.3 离散裂隙网络构建及数值模拟方法

假设结构面的形状为平面四边形,然后通过空间解析几何方法、概率分布函数求得结构面的产状、密度、迹长等几何参数,基于 Monte-Carlo 思想实现随机裂隙网络的构建,主要按照如下几个方面来模拟:(1) 选取均质岩体区当作结构面统计窗;(2) 结构面产状模拟;(3) 结构面大小模拟;(4) 结构面密度模拟;(5) 基于 Monte-Carlo 法构建三维裂隙模型;(6) 对裂隙模拟效果进行查验。

借助张贵科博士<sup>[15-16]</sup>2006 年基于 Monte-Carlo 思想开发的随机结构面构建程序来模拟裂隙的产生,该程序总体上由如下模块组成:(1) 结构面几何参数输入模块;(2) 裂隙网络生成模块;(3) 裂隙网络输出模块。通过输入表 1 中的裂隙统计参数及岩体尺寸范围,即可生成当前尺寸下的裂隙网络。

基于构建的离散裂隙网络,从结构面的密度、倾

表2 岩块、结构面、刚性承压板的力学参数

Tab.2 Mechanical parameters of rock block, structural plane and rigid bearing plate

类型	法向刚度/GPa	切向刚度/GPa	密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	粘聚力/MPa	摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	抗拉强度/MPa
岩块			2 500	6.0	4.1	10	60	10
结构面	0.8	0.4				0.06	21	0.1
刚性承压板			7 800	300	250			

角、尺寸3个方面探讨其对岩体力学参数的影响。

鉴于随机裂隙网络的构建是基于概率学、统计学理论,对于一组具有特定几何参数的裂隙结构面,进行多次模拟试验,每次试验得到的结果都是随机不同的,因此所产生的随机裂隙岩体也具有不相同的性质。计算中,在每组结构面几何参数下,均进行10组数值压缩试验,每组试验的围压均设置为0.5和10 MPa三个等级,取每组试验下的10次计算结果的平均值作为该组试验的最终值。

基于块体离散元法,建立不同结构面几何参数下的数值模型,其中试样的尺寸为 $10\text{ m}\times 10\text{ m}\times 20\text{ m}$ ,试样的顶部、底部各加一块尺寸为 $12\text{ m}\times 12\text{ m}$ 的刚性承压板,模型的约束条件为:模型底部为固定约束,顶部通过速度对模型进行轴向加压,侧向施加不同的围压(0.5、10 MPa),模型中岩块、结构面和刚性承压板的力学参数如表2所示。

## 2 计算结果分析

### 2.1 结构面密度对宏观岩体力学参数的影响

为了研究结构面密度对岩体力学特性的影响,控制结构面的倾角、尺寸等几何参数不变,其中,结构面倾角取 $45^{\circ}$ ,倾角方差为0;结构面迹长 $l=5\text{ m}$ ,迹长方差为0;结构面面密度取单位面积上节理中心点的数量,将试样中心横截面上的单位面积节理中心点的数量分别设置为0.01、0.02、0.03、0.04、0.05  $\text{m}^{-2}$ ,生成如下数值模型(图2)。

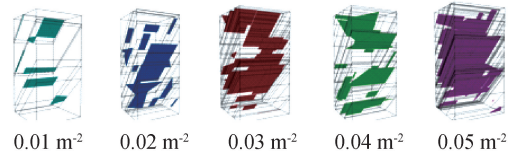
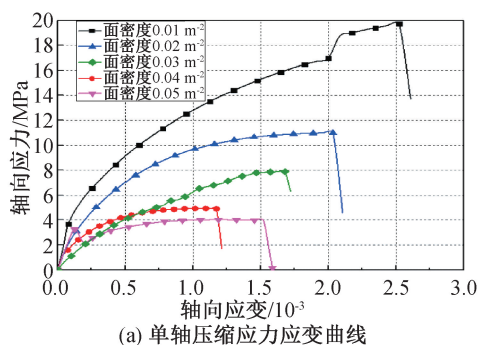


图2 不同结构面密度岩体数值试样

Fig. 2 Numerical samples of rock mass with different structural plane density

单轴抗压强度可由单轴压缩应力应变曲线求得;弹性模量取应力应变曲线在原点处的初始切线模量;内摩擦角、粘聚力参数可根据不同围压下应力应变曲线通过Mohr-Coulomb准则,绘制不同围压下的破坏应力圆和这些应力圆的包络线,将其近似看成一条直线,该线在纵轴上的截距即为粘聚力,该线与水平线的夹角即为内摩擦角。

图中柱状图的结果为10次数值计算结果的平均值,曲线为岩体力学参数随结构面密度的变化曲线,“I”型的长短表明10次数值试验得到的岩体力学参数的离散程度,“I”型越长离散性越大,反之离散性越小。

从图3(a)中可以看出,试样的单轴抗压强度随结构面密度的增大而显著降低;由图3(b)可以看出,施加围压后试样的强度开始显著提高。

从图4可以看出,岩体的力学参数都与结构面密度呈明显的负相关关系。当面密度在 $[0.01\text{ m}^{-2}, 0.05\text{ m}^{-2}]$ 范围内变化时,单轴抗压强度减小了79.1%,弹性模量减少了65.2%,粘聚力减少了

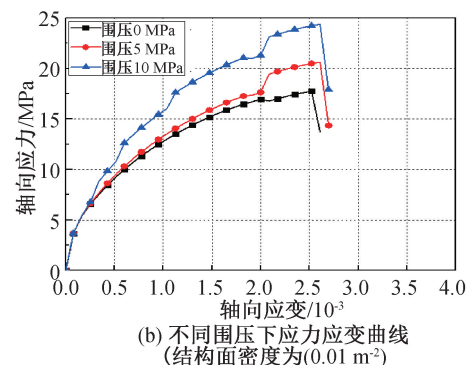


图3 试样应力应变曲线

Fig. 3 Stress strain curve of sample

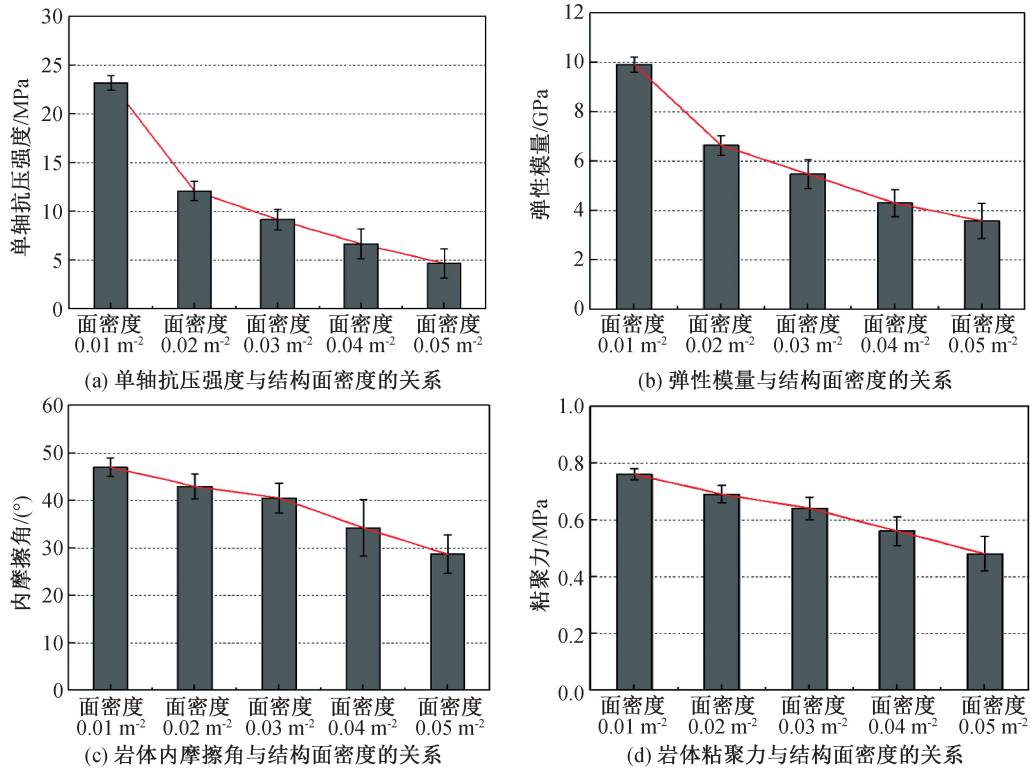


图 4 结构面密度对岩体力学参数的影响

Fig. 4 The influence of the density of structural plane on the mechanical parameters of rock mass

39.2%,内摩擦角减少了37.8%,敏感程度为:单轴抗压强度>弹性模量>粘聚力>内摩擦角。由图4可知结构面密度越大,参数的离散性越大,充分体现了裂隙网络生成过程中的随机性,结构面密度越大,随机性越强。

### 2.2 结构面倾角对宏观岩体力学参数的影响

控制结构面的其他几何参数不变,面密度取0.05 m<sup>-2</sup>;结构面迹长  $l = 5$  m,方差为0;结构面倾角分别为  $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$  (图5)。

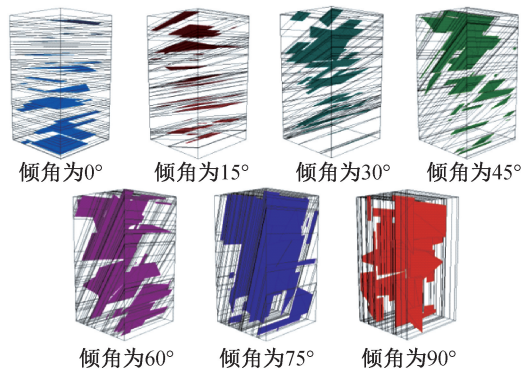
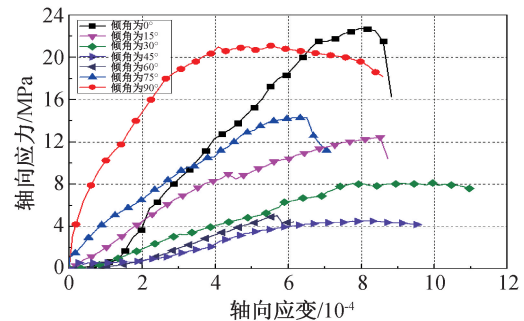


图 5 不同结构面倾角岩体数值试样

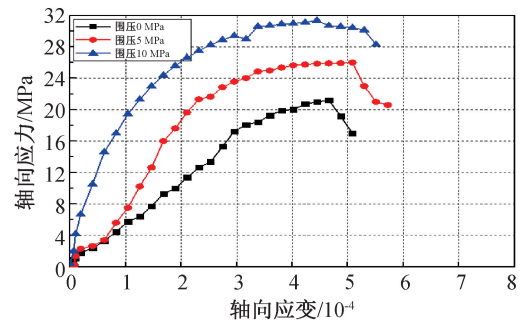
Fig. 5 Numerical rock samples with different dip angles of structural planes

由图 6 可知,结构面倾角对试样的单轴抗压强

度有着重要影响,随着倾角的增大试样的单轴抗压强度先降低后提高,两者呈典型的凹抛物线关系。同样地,围压对试样的强度也有着较为明显的提高作用。



(a) 单轴压缩应力应变曲线



(b) 不同围压下应力应变曲线( $\theta = 0^\circ$ )

图 6 试样应力应变曲线

Fig. 6 Stress strain curve of sample

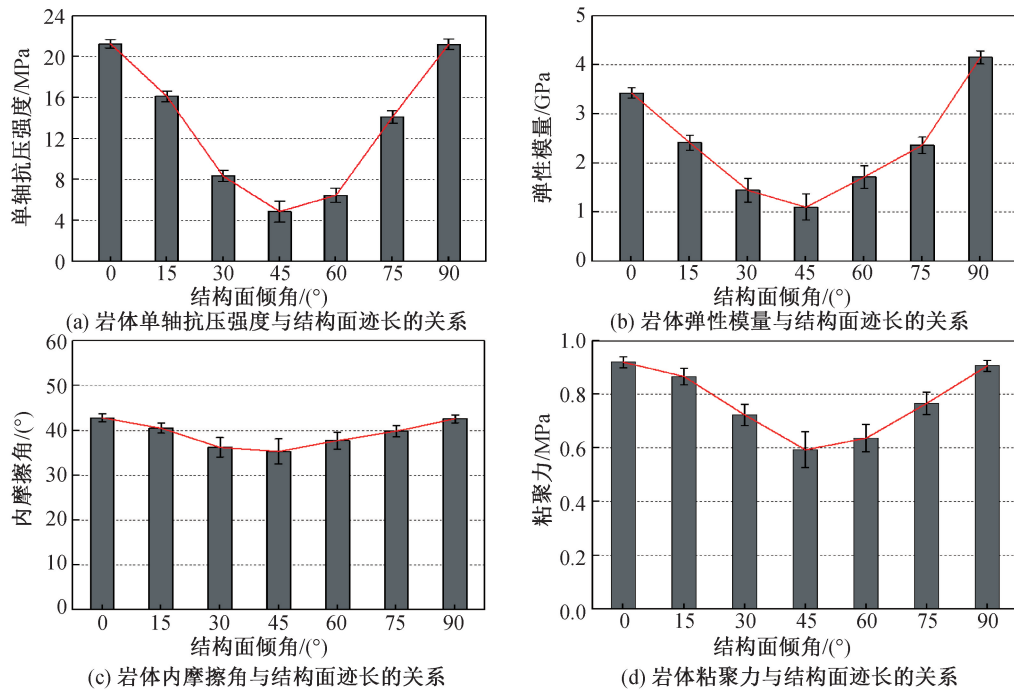


图7 岩体力学参数对结构面倾角的敏感性

Fig. 7 Sensitivity of mechanical parameters of rock mass to dip angle of structural plane

由图7可知,岩体试样的力学参数与结构面倾角均呈现出典型的凹抛物线关系,随着结构面倾角的增大,岩体力学参数先减小后增大,当 $\theta=45^\circ$ 时,试样的力学参数取得最小值。通过图中的“1”型符合可以看出,岩体力学参数的离散性随结构面倾角的增大,先增大后较小,呈典型的凸抛物线关系,当 $\theta=45^\circ$ 时,力学参数的离散性取得最大值。

这里,引入一个参数指标来反映岩体力学参数随结构面倾角 $\theta$ 在区间 $[0^\circ, 90^\circ]$ 变化的敏感性,定义 $\delta$ 为岩体力学参数最大变化率,按下式计算:

$$\delta = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{\sum f/7} \quad (1)$$

式中: $f_{\max}$ 为岩体力学参数最大值; $f_{\min}$ 为岩体力学参数最小值; $\sum f$ 为岩体力学参数在七次不同倾角时值的累加。

当结构面倾角 $\theta$ 在区间 $[0^\circ, 90^\circ]$ 变化时,试样的单轴抗压强度最大变化率 $\delta=1.23$ ,弹性模量最大变化率 $\delta=1.19$ ,内摩擦角最大变化率 $\delta=0.15$ ,粘聚力最大变化率 $\delta=0.39$ ,敏感程度为:单轴抗压强度>弹性模量>粘聚力>内摩擦角。

### 2.3 结构面尺寸对宏观岩体力学参数的影响

控制结构面的其他特征参数不变,面密度取 $0.05 \text{ m}^{-2}$ ;结构面倾角取 $45^\circ$ ;结构面迹长 $l=1、3、$

5、7、9 m,见图8。

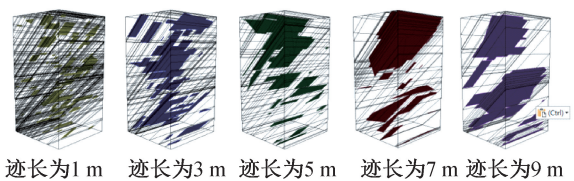


图8 不同结构面迹长岩体数值式样

Fig. 8 Numerical rock samples with different structural planes

由图9可知,试样单轴抗压强度与结构面迹长呈负相关关系,即随着结构面迹长的增加,岩体单轴抗压强度逐渐降低。在围压作用下,试样的强度不断提高。

由图10可知,岩体试样的力学参数与结构面迹长呈非线性负相关关系。当结构面迹长 $l$ 在 $[1 \text{ m}, 9 \text{ m}]$ 范围内变化时,试样的单轴抗压强度减小了69%,弹性模量减小了70.1%,摩擦角减小了45.8%,粘聚力减小了60%,可见具体敏感程度为:弹性模量>单轴抗压强度>粘聚力>内摩擦角。从图中的“1”形状可以看出,对于同一岩体力学参数,随着结构面迹长的增加,其离散性也越来越明显,迹长越大,岩体内部发育的结构面所占的体积越大,当结构面发育到一定程度成为贯穿节理时,这时的结构面对岩体的变形和力学特性起着绝对控制作用。

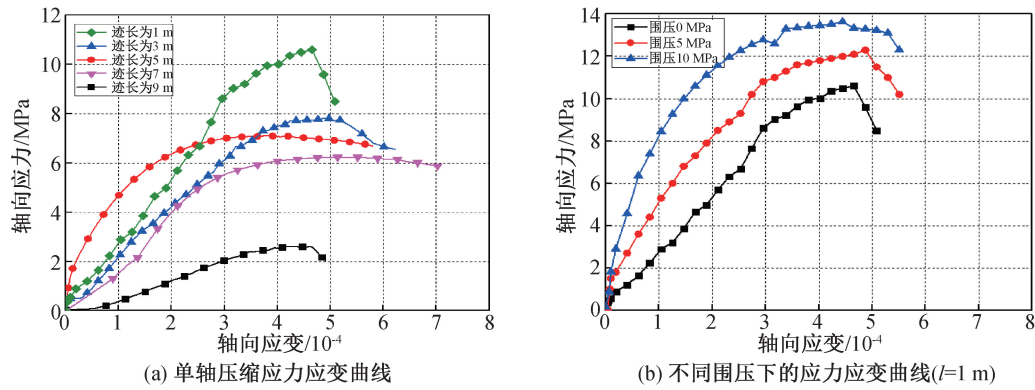


图 9 试样应力应变曲线

Fig. 9 Stress strain curve of sample

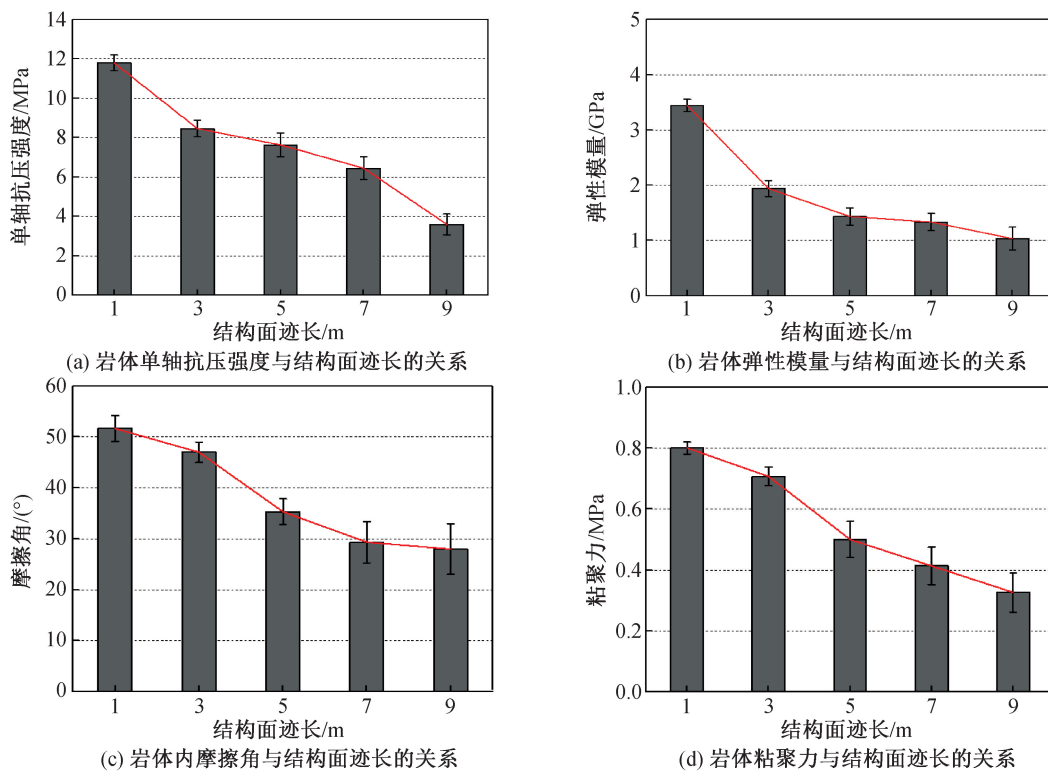


图 10 岩体力学参数对结构面迹长的敏感性

Fig. 10 Sensitivity of mechanical parameters of rock mass to trace length of structural plane

### 3 结论

1) 主厂房范围内裂隙面的平均迹长 4.31 m, 迹长方差为 3.48; 裂隙平均倾角为 51.01°, 倾角方差为 28.10; 结构面面密度 0.23  $\text{m}^{-2}$  单位面积上的裂隙长度为 0.96  $\text{m}^{-1}$ 。

2) 随着结构面密度的增加, 岩体的单轴抗压强度、弹性模量、粘聚力、内摩擦角逐渐减小, 但其离散性逐渐变大。

3) 随着结构面倾角的增加, 岩体的单轴抗压强度、粘聚力、内摩擦角先减小后增大, 在倾角为 45° 时取得最小值; 其离散性先增大后减小, 在倾角为 45° 时取得最大值。

4) 随着结构面尺寸的增加, 岩体的单轴抗压强度、弹性模量、粘聚力、内摩擦角逐渐减小, 但其离散性逐渐增大。

以上结论论证了结构面的不同性状对岩体力学性质的影响, 在进行岩体分类设计与围岩稳定性分析时应适当考虑。

## 参考文献:

- [1] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [2] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [3] 张淑坤, 王树达, 王来贵, 等. 结构面局部弱化影响下巷道围岩稳定性研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(7): 116-121.
- [4] WANG S H, NI P. Application of Block Theory Modeling on Spatial Block Topological Identification to Rock Slope Stability Analysis [J]. International Journal of Computational Methods, 2014, 11(1): 390-344.
- [5] WANG P T, YANG T H, YU Q L, et al. Characterization on Jointed Rock Masses Based on PFC2D[J]. Front Struct Civ Eng, 2013, 7(1): 32-38.
- [6] YANG T H, WANG P T, XU T, et al. Anisotropic Characteristics of Fractured Rock Mass and a Case Study in Shirengou Metal Mine in China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 48(3): 129-139.
- [7] YANG T H, JIA P, SHI W H, et al. Seepage-stress Coupled Analysis on Anisotropic Properties of Fractured Rock Mass Around ROAD-WAYS [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2014, 43(3): 11-19.
- [8] WANG P T, YANG T H, YU Q L, et al. Characterization on Jointed Rock Masses Based on PFC2D [J]. FRONT STRUCT CIV ENG, 2013, 7(1): 32-38.
- [9] NI H J, XU W Y, WANG W, et al. Statistical Analysis of Scale Effect on Equivalent Elastic Modulus of Jointed Rock Masses[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9: 206-218.
- [10] 范文臣, 曹平, 张科. 压剪作用下节理倾角对类岩石材料破坏模式的影[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(4): 1237-1243.
- [11] 李慎举, 王连国, 陆银龙. 破碎岩体巷道变形破坏特征的数值模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1): 39-44.
- [12] 胡政, 刘佑荣, 牛超颖, 等. 基于结构面性状对岩体力学性质响应的模拟研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(5): 902-909.
- [13] BAHAAADDINI M, HAGAN P C, MITRA R, et al. Scale Effect on the Shear Behaviour of Rock Joints Based on a Numerical Study [J]. Engineering Geology, 2014, 181: 212-223.
- [14] BAHAAADDINI M, HAGAN P, MITRA R, et al. Numerical Study of the Mechanical Behavior of Nonpersistent Jointed Rock Masses [J]. International Journal of Geomechanics, 2016, 16(1): 1-10.
- [15] 徐卫亚, 张贵科. 节理岩体正交各向异性等效强度参数研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 32(6): 908-915.
- [16] 张贵科, 徐卫亚. 裂隙网络模拟与 REV 尺度研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1675-1680.

(责任编辑 王利君)