

基于 UDEC 节理岩体抗压强度的数值研究

鲁皓琰^{1,2}, 栗东平^{1,2*}, 钟江城³, 李冲¹

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北工程大学 计算力学与工程应用研究中心, 河北 邯郸 056038;
3. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 通过对江西某矿区岩样进行岩石力学试验, 得到岩石试件的力学参数, 利用 Hoek-Brown 法估算岩体力学参数。基于分形理论, 结合 Monte Carlo 方法生成节理岩体平面网络图, 以岩体网络图中心为基点, 选取节理岩体模拟试件, 采用离散元软件 UDEC 开展节理岩体抗压强度的数值实验。结果表明: 选取角度、围压相同时, 随着岩体尺寸的增大, 节理岩体各向异性减弱, 抗压强度呈非线性减小趋势, 并趋向于某一定值, 可拟合为负指数变化关系; 围压、尺寸相同时, 随着选取角度的增大, 节理岩体抗压强度呈微幅波动趋势, 这应与节理分布的分形特性有关。取样角度(所截取的岩体试件与水平方向的夹角)为 60° 时, 抗压强度值略高, 节理岩体尺寸效应与围压效应也较为明显; 选取角度、尺寸相同时, 随着围压的增大, 岩体各向异性减弱, 抗压强度呈线性增大趋势。

关键词: UDEC; 数值模拟; 围压; 尺寸效应; 取样角度

中图分类号: TU45

文献标识码: A

Numerical Study of Joint Rock Mass Compressive Strength Based on UDEC

LU Haoyan^{1,2}, LI Dongping^{1,2*}, ZHONG Jiangcheng³, LI Chong¹

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China; 2. The Center for Computational Mechanics and Engineering Applications, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;
3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: This thesis obtained the mechanical parameters of rock specimens through rock mechanics tests on a rock sample in a mining area in Jiangxi and applied the Hoek-Brown Criterion to estimate the rock mass mechanical parameters. Combining the fractal theory and the Monte Carlo method, a jointed rock mass network was generated, and jointed rock mass simulation specimens were taken by using the center of the jointed rock mass network as the base point. The discrete element software UDEC was used to stimulate the numerical experiment of the jointed rock mass compressive strength. The results show that controlling for the sampling angle and confining pressure, the increase in rock mass size correlates with the weakening of the anisotropy of the jointed rock mass. The compressive strength of the jointed rock mass shows a non-linear decrease trend and tends to a certain value, which can be fitted into a negative exponential change relationship; controlling for the confining pressure and size, the increase in the sampling angle will result in a slight fluctuation of the compressive strength of the jointed rock mass, which can be explained by the fractal characteristics of the joint distribution. The size effect and confining pressure effect of the jointed rock mass are more obvious when the sampling angle is at 60°, where the compressive strength value is slightly higher; when sampling angle and size are controlled for, as the confining pressure increases, the anisotropy of the rock mass weakens, demonstrating a linear increase in compressive strength.

Key words: UDEC; numerical simulation; confining pressure; size effect; sampling point

收稿日期: 2020-05-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51904309); 河北省教育厅青年基金资助项目(QN2016115)

作者简介: 鲁皓琰(1995-), 男, 河北定州人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程、岩石力学等领域的研究。

* 通讯作者: 栗东平(1981-), 男, 山西屯留人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程、岩石力学等领域的教学与科研工作。

岩体失稳、煤矿塌方、瓦斯突出等事故均受岩体节理面特征的影响^[1]。确定节理岩体的表征单元体,研究其各向异性一直是岩石力学领域研究的重点问题^[2]。节理岩体强度原位试验具有难度大、周期长、费用高、结果离散性大等特点。近年来,国内外学者从理论分析、实验研究、数值模拟等方面对岩体的各向异性进行了研究^[3-22]。在节理岩体网络反演、岩体力学参数的尺寸效应、节理对岩体力学参数的影响等多个方面取得了一定的成果。目前,通过现场实测还难以生成岩体节理网络,只能通过量测岩体表面节理网络统计得到其平面或三维的节理网络,即使统计生成的等效三维节理网络也不能完全反映实际的节理岩体,又鉴于节理分布的复杂性和节理岩体三维网络图反演的不确定性、节理网络提取的复杂性及实验手段的局限性等诸多因素,因此本文采用节理岩体平面裂隙网络图开展研究。研究表明节理分布、长度、间距等几何参数均符合分形特征,可基于分形理论反演岩体的节理网络,即通过可测的、小范围的岩体节理去推求不可测的、更大范围各向异性节理岩体网络。本文基于分形理论,结合 Monte Carlo 方法生成节理岩体网络图,以网络图中心为基点,选取节理岩体模拟试件,通过岩石力学试验和 Hoek-Brown 准则获取岩体的力学参数。在此基础上,利用 UDEC 开展不同围压、不同尺寸、不同取样角度节理岩体的抗压强度数值实验,研究节理岩体的各向异性。

1 试验过程

1.1 试件制备

试验岩石试样取自江西某矿区,根据《工程岩体试验方法规程》要求,先采用 ZS-100 型岩石钻机进行岩石的钻心取样,再加工成尺寸为 50 mm×100 mm 的标准圆柱体试件,如图 1 所示。



图 1 岩石试件

Fig. 1 Rock samples

1.2 试验操作

利用 TAW-2000 型微机控制电液伺服岩石三轴试验机进行试验,获取岩石试件的单轴抗压强度、轴向压缩应变、径向压缩应变及其三轴抗压强度。根据《工程岩体试验方法规程》整理试验数据,得到岩石试件的物理力学参数,包括天然密度、单轴抗压强度,围压为 5、10、15、20 MPa 时的抗压强度等。

1.3 试验结果

1.3.1 密度试验结果

岩石密度采用量积法,试验结果如表 1 所示。

1.3.2 岩石单轴压缩试验结果

计算岩石的弹性模量与泊松比^[23]。弹性模量 E 计算如式(1)所示。

$$E = \sigma_{e(50)} / \varepsilon_{h(50)} \quad (1)$$

式中, $\sigma_{e(50)}$ 为试件单轴抗压强度的 50% (MPa); $\varepsilon_{h(50)}$ 为 $\sigma_{e(50)}$ 处对应的轴向压缩应变; E 为试件弹性模量 (GPa)。

泊松比 μ 计算如式(2)所示。

$$\mu = \varepsilon_{d(50)} / \varepsilon_{h(50)} \quad (2)$$

式中, $\varepsilon_{d(50)}$ 为 $\sigma_{e(50)}$ 处对应的径向压缩应变; $\varepsilon_{h(50)}$ 为 $\sigma_{e(50)}$ 处对应的轴向压缩应变; μ 为泊松比。

弹性模量 E 及泊松比 μ 计算结果如表 2 所示。

1.3.3 岩石三轴压缩变形试验结果

试验初始阶段,以 0.05 MPa/s 速率同时将围

表 1 岩石天然密度试验

Tab. 1 Natural density test of rock

试件 编号	试件尺寸			质量 m_0/g	天然密度 $\rho_0/(g \cdot cm^{-3})$	密度均值 $\bar{\rho}/(g \cdot cm^{-3})$
	直径 D/mm	高度 h/mm	体积 V/mm^3			
1-1	49.60	25.48	49 232.70	140.30	2.85	2.86
1-2	49.62	27.10	52 405.12	148.30	2.83	
1-3	49.64	27.16	52 563.49	149.10	2.84	
1-4	49.64	28.72	55 582.60	158.70	2.86	
1-5	49.64	27.00	52 253.84	148.90	2.85	
1-6	49.60	27.98	54 063.23	158.30	2.93	

表 2 岩石单轴压缩变形

Tab. 2 Uniaxial compression deformation of rock

破坏荷载	直径	峰值强度	$\sigma_{c(50)}$	$\varepsilon_{h(50)}$	$\varepsilon_{d(50)}$	弹性模量	泊松比
P/kN	D/mm	σ_c/MPa				E/GPa	μ
191.67	49.52	99.62	49.81	0.162%	0.039%	30.7	0.24

压和轴向荷载增加至预定值,将此时试件的轴向压缩变形值作为初始值,稳定后将轴向荷载速率提升至 0.08 MPa/s,直至试件破坏。利用莫尔-库伦强度准则计算抗剪强度参数(内摩擦角 φ 、粘聚力 c)。结果如表 3 所示。

表 3 岩石三轴试验结果

Tab. 3 Rock triaxial test results

破坏荷载	直径	$\sigma_1/$	$\sigma_3/$	内摩擦角	粘聚力
P/kN	D/mm	MPa	MPa	$\varphi/(^\circ)$	c/MPa
287.43	49.60	5	148.76		
290.69	49.56	10	150.69		
345.98	49.50	15	179.79	46.97	19
392.42	49.53	20	203.67		
347.13	49.56	25	179.94		

2 Hoek-Brown 法确定岩体力学参数

上世纪末 Hoek 和 Brown 等修正了地质强度指标 GSI,并对大量的岩体现场实验结果进行研究,总结出狭义 Hoek-Brown 强度准则。之后, Hoek 等^[3-4]引入岩体扰动系数 D (根据扰动程度取值范围为 0~1),并通过对三轴试验数据以及岩体内部构造的综合分析,提出了广义 Hoek-Brown 强度准则。

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (3)$$

$$m_b = m_i e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D} \right)} \quad (4)$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D} \right)} \quad (5)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right) \quad (6)$$

式中, σ_1' —岩石破坏时最大有效主应力(MPa); σ_3' —岩石破坏时最小有效主应力(MPa); σ_{ci} —岩石单轴抗压强度(MPa); m_b, s, a —Hoek-Brown 常数。 m_i 为岩石材料常数,可以通过三轴实验获得。令 $X = \sigma_3, Y = (\sigma_1 - \sigma_3)^2, m_i$ 计算公式如式(7)所示。

$$m_i = \frac{1}{\sigma_{ci}} \left[\frac{\sum XY - \frac{1}{n} \sum X \sum Y}{\sum X^2 - \frac{1}{n} (\sum X)^2} \right] \quad (7)$$

岩体的摩擦角 φ 、等效粘聚力 c 值可通过式(8)、式(9)求出。

$$\varphi = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}} \right] \quad (8)$$

$$c = \frac{\sigma_c [(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma_{3n}](s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \frac{6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)}}} \quad (9)$$

式中, $\sigma_{3n} = \frac{\sigma_{3\max}}{\sigma_{ci}}, \sigma_{3\max}$ 为岩体最小主应力上限。

岩体变形模量 E_m 采用式(10)计算。式中, E_i 为实验室完整岩块弹性模量(GPa)。

$$E_m = E_i \left[0.02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\left(\frac{60+15D-GSI}{11} \right)}} \right] \quad (10)$$

由式(11)、(12)可计算得到用于数值模拟的岩体剪切模量 G 与体积模量 K 。

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (11)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \quad (12)$$

3 数值模型的建立

基于分形理论,采用 C++Builder 语言编写岩体节理网络程序,输入节理中点聚集维数 D_c 、节理长度维数 D_L 、节理平均长度、最大节理数、最长节理数、节理倾角及变化幅值、分盒次数等参数,生成节理岩体网络图。以生成的节理岩体中心为基点选取数值实验试件,高宽之比为 2,试件尺寸由大到小依次取:4.8 m×9.6 m、2.4 m×4.8 m、1.2 m×2.4 m、0.6 m×1.2 m、0.3 m×0.6 m,取样角度为 30°、60°、90°、120°、150°。取样角度为 30°时,各尺寸数值实验试件选取如图 2 所示。

在数值模拟之前,需对数值实验试件进行一定程度的调整,以保证软件的运算速度。如:若节理大部分与岩体边界接近,则将其移至边界;若节理长度过小,则将其删除;若两条节理十分接近且

图2 数值实验试件选取(取样角度为 30°)

Fig. 2 Selection of numerical test specimen
(the sampling angle is 30°)

长度、方向大体一致,则将其合为一条。

离散元软件 UDEC 要求不连续结构面必须贯通岩体上下或左右边界,否则将自动删除结构面。而删除大量的非贯通节理面无疑会降低模拟结果的准确度。因此,常采用人为搭接的方式,使这些结构面得以贯通,搭接的原则是尽可能的精简。人为搭接部分称为虚拟节理面,虚拟节理面参数的选取应尽量与岩体自身力学参数近似,具体选取方法参考文献[2]。

4 数值试验

4.1 参数选取

基于室内岩石力学试验结果,根据公式(3)——(12),利用 Hoek-Brown 准则估算岩体力学参数,结果如表4所示,数值实验岩体力学参数设置时采用该估算值。选取节理面力学参数^[24],如表5所示。

4.2 数值实验

通过 UDEC 离散元程序,建立不同取样角度、不同尺寸的25个数值计算模型,岩体力学参数和节理面力学参数如表4、表5所示。围压 σ_3 分别取0、2、4、6、8 MPa,采用速率加载方式实现荷载施加,得到各个试块的抗压强度值。图3为典型的抗压强度曲线及应力云图。

表5 节理计算参数

Tab. 5 Joint calculation parameters

材料	切向刚度 $K_s/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	法向刚度 $K_n/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	粘聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
节理	25	50	0.5	20
虚拟节理	223	565	2	45

5 数值试验结果分析

根据数值实验得到不同尺寸、不同围压、不同取样角度下岩体的抗压强度值,如表6所示。

表6 节理岩体强度的数值模拟结果

Tab. 6 Numerical simulation results of joint
rock mass strength

尺寸 $L/\text{m} \times \text{m}$	围压 σ_3/MPa	取样角度				
		30°	60°	90°	120°	150°
0.3×0.6	0	9.68	9.92	9.92	9.71	8.73
	2	28.30	38.50	25.00	15.90	14.20
	4	43.10	45.90	36.00	22.50	28.00
	6	55.60	58.60	51.00	30.60	39.74
	8	66.70	71.40	66.00	38.20	48.76
0.6×1.2	0	1.67	2.99	1.66	2.48	2.54
	2	8.87	9.19	7.03	9.28	9.79
	4	14.70	15.30	12.10	13.00	15.40
	6	20.40	21.30	17.10	18.50	19.30
	8	25.80	27.50	22.40	24.00	25.70
1.2×2.4	0	1.60	2.63	1.56	2.03	1.71
	2	7.86	7.93	6.81	7.59	7.85
	4	12.30	12.80	11.80	12.60	13.4
	6	16.97	17.40	16.20	17.70	16.40
	8	21.94	22.30	21.00	22.60	20.10
2.4×4.8	0	1.59	1.66	1.48	1.59	2.10
	2	6.53	6.77	5.90	6.32	7.93
	4	11.30	12.00	10.50	10.80	11.10
	6	16.00	17.20	15.50	15.30	16.40
	8	18.40	19.30	18.80	18.70	19.2
4.8×9.6	0	1.44	1.89	1.62	1.13	1.85
	2	5.82	6.10	5.70	5.33	5.90
	4	10.10	11.40	9.90	9.39	9.72
	6	14.50	15.90	14.00	13.70	13.76
	8	17.90	19.00	17.80	17.70	18.90

表4 岩体力学参数估算结果

Tab. 4 Estimation results of rock mass mechanical parameters

单轴抗压强度 σ_{ci}/MPa	地质强度 指标 GSI	m_i	D	m_b	S	a	变形模量 E_m/GPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	粘聚力 c/MPa	体积模量 K/GPa	剪切模量 G/GPa
99.62	65	4.11	0.2	1.023	0.016	0.502	15.06	44.3	2.46	9.65	6.07

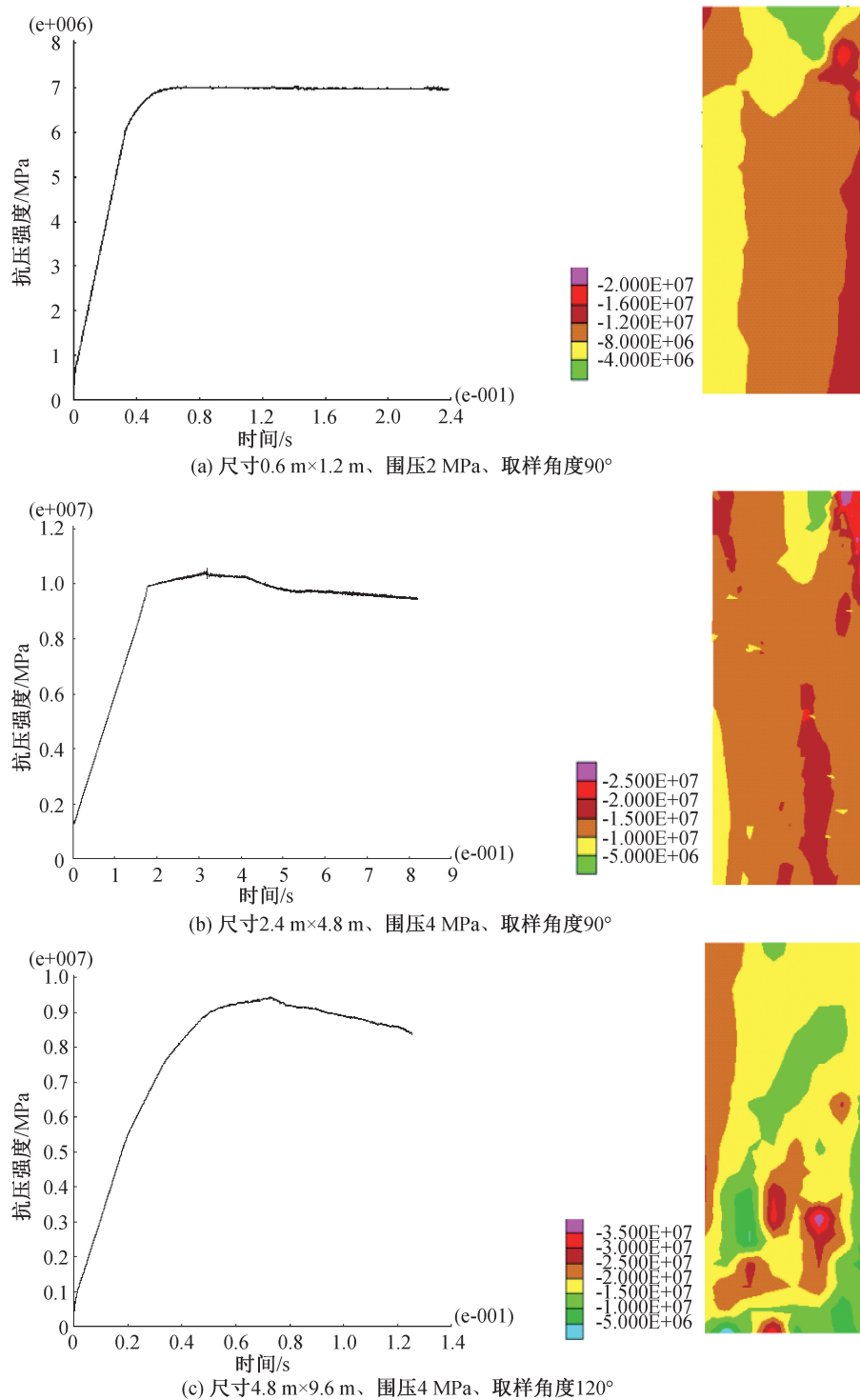


图3 典型的抗压强度曲线及应力云图

Fig. 3 Typical compressive strength curves and stress clouds

5.1 取样角度对岩体抗压强度的影响

岩体抗压强度随取样角度变化关系如图4所示。由表6、图4(a)不难看出,尺寸为0.3 m×0.6 m的试件当取样角度介于30°到150°时,岩体的抗压强度呈现较为明显的波动,其波动规律为先上升后下降最后再上升,在取样角度为60°左右时抗压强度达到峰值,在60°~120°段有一个明显的下降

过程,并且在120°之后会有进一步的提高。其规律不同于单组节理的“U”趋势,这也说明节理分布是引起抗压强度各向异性的重要原因。

其他几组尺寸的节理岩体抗压强度随取样角度的变化规律基本一致,随着尺寸的增大,试件的抗压强度趋近于岩体的抗压强度,当取样角度介于30°到150°时,岩体的抗压强度呈现较为微弱的

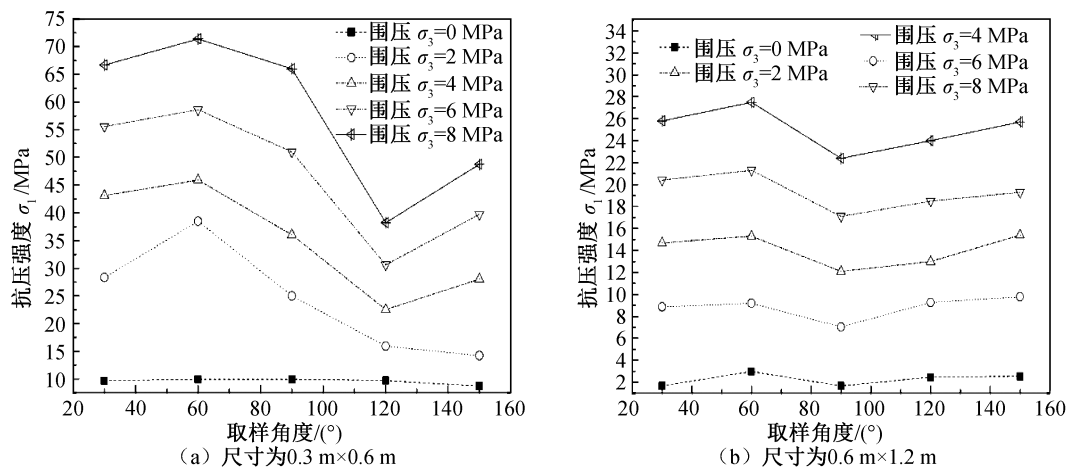
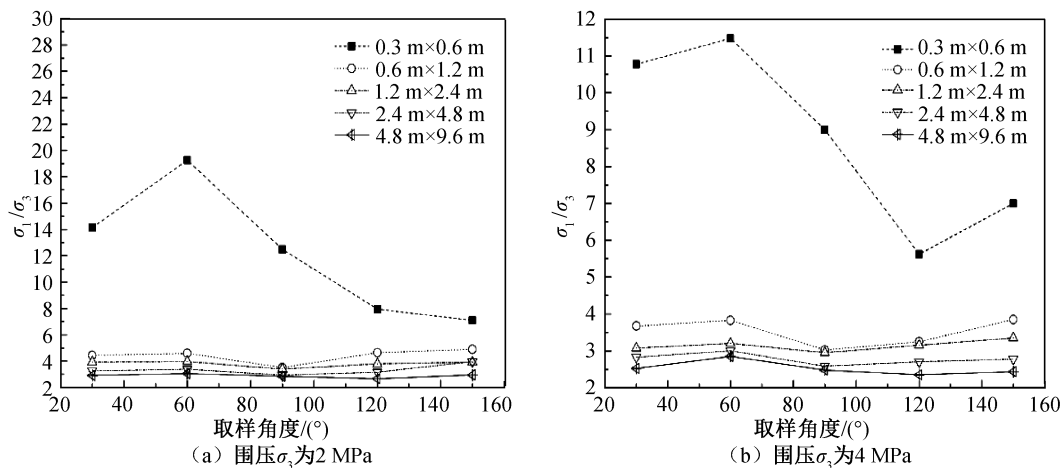


图4 岩体抗压强度随取样角度的变化关系

Fig. 4 The relationship between compressive strength of rock mass and sampling angle

图5 不同围压下各尺寸岩体 σ_1/σ_3 随岩体取样角度的变化曲线Fig. 5 Variation curves of rock mass σ_1/σ_3 with rock mass sampling angle under different confining pressures

波动,波动规律为先上升后下降最后再上升。同样,当取样角度位于 60° 左右时岩体的抗压强度达到最高值,与尺寸为 $0.3\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ 的小体积岩体类似,与文献[22]岩体各向异性数值试验结论大体一致。这是由于随着尺寸的增大,节理数目、节理倾角和长度等分形特征愈加明显,造成了抗压强度随取样角度变化规律的波动性减缓。抗压强度随取样角度的典型变化关系如图4(b)所示。

图5为2、4 MPa 围压下,不同尺寸岩体峰值应力 σ_1 与第三主应力 σ_3 比值随岩体取样角度变化规律。可以看出在岩体尺寸为 $0.3\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ 时,岩体抗压强度较大,曲线波动变化明显, σ_1/σ_3 值随节理岩体取样角度增大,呈先增大、后减小、最后趋于平缓的趋势,在接近于 60° 时达到最高。随着岩体尺寸的增大, σ_1/σ_3 值逐级减小,且 σ_1/σ_3 值随取样角度变化的波动幅度趋于平缓,各向

异性趋于不明显。其余围压下不同尺寸岩体 σ_1/σ_3 值随岩体取样角度变化走势与图5类似。再次验证了图4得到的岩体抗压强度随取样角度的变化规律。

5.2 节理岩体抗压强度随围压的变化规律

由表6可观察到,随着围压的增大,节理岩体抗压强度也随之增大。图6是典型的岩体抗压强度随围压变化拟合曲线。显然,随着围压的增大,岩体抗压强度呈线性增长,且线性关系明显,如式(13)所示。

$$\sigma_1 = a + b\sigma_3 \quad (13)$$

式中, σ_1 为抗压强度,单位为 MPa; σ_3 为围压,单位为 MPa; a 、 b 为拟合系数。

当试件尺寸为 $0.3\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ 时,抗压强度随围压线性变化斜率较高,各取样角度岩体斜率在5.0以上,并且随着选取角度的增大,节理岩体抗

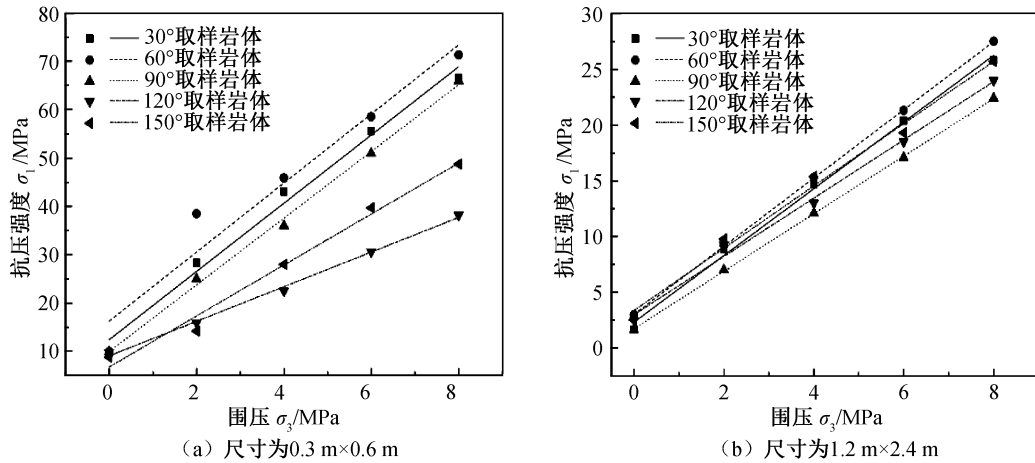
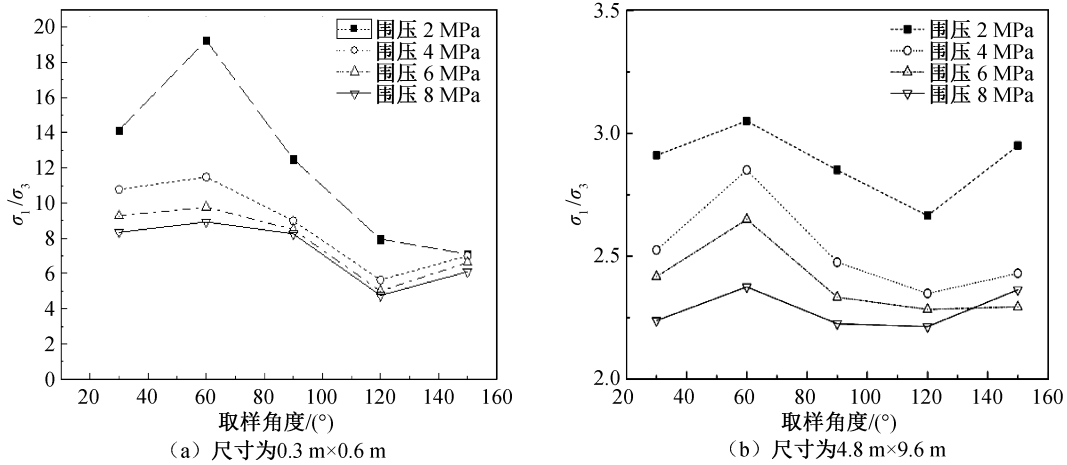


图6 岩体抗压强度随围压的变化关系

Fig. 6 The relationship between compressive strength of rock mass and confining pressure

图7 各尺寸岩体不同围压下 σ_1/σ_3 随岩体取样角度的变化曲线Fig. 7 Variation curve of σ_1/σ_3 under different confining pressures for rock mass of different sizes with rock mass sampling angle

抗压强度随围压增大的增幅呈明显减小趋势;当试件尺寸较大时,抗压强度随围压线性变化斜率较低,各尺寸各取样角度岩体斜率在 2.0~3.0 之间,并且随着选取角度的增大,节理岩体抗压强度随围压增大的增幅呈波动变化,但波动幅度不大,这与试件尺寸较大时,节理分布分形特征明显有关。各尺寸岩体抗压强度随围压拟合式在 60° 取样时斜率最大,围压效应最为明显。选取角度一定,随着节理岩体尺寸的增大,岩体抗压强度随围压增大的增幅减小,这也说明随着岩体尺寸的增大,围压效应减弱,节理岩体的各向异性趋于不明显。

图7为不同围压下峰值应力 σ_1 与第三主应力 σ_3 随取样角度的典型变化关系。显然,节理岩体尺寸为 0.3 m × 0.6 m 且围压一定时, σ_1/σ_3 的值在 30°~60° 段呈现明显的上升,在 60°~90° 段呈明显的下降,90°~150° 段呈波动趋势。不同围压下,取

样角度为 60° 时 σ_1/σ_3 的值最大,且随着围压的增大, σ_1/σ_3 值逐渐减小,说明围压的增大使得岩体的各向异性趋于不明显。随着岩体尺寸的增大,当围压一定时, σ_1/σ_3 的值随节理岩体取样角度的波动趋势与图7基本一致,但由于岩体尺寸的增加,抗压强度值变小,波动趋势趋于平缓。

5.3 节理岩体抗压强度随尺寸的变化规律

相同选取角度、相同围压下,随着岩体尺度的增大,试件的抗压强度逐渐减小,当试件长度增大至 1.2 m 时抗压强度下降幅度最大,之后逐渐趋于稳定。图8为典型的岩体抗压强度随尺寸变化的拟合关系,负指数关系明显,如式(14)所示。

$$\sigma_1 = \sigma_0 + \alpha e^{-\beta(L-\gamma)} \quad (14)$$

式中, σ_1 为节理岩体抗压强度,单位为 MPa; L 为试件尺寸,单位为 m; σ_0 、 α 、 β 、 γ 为拟合系数。 γ 代

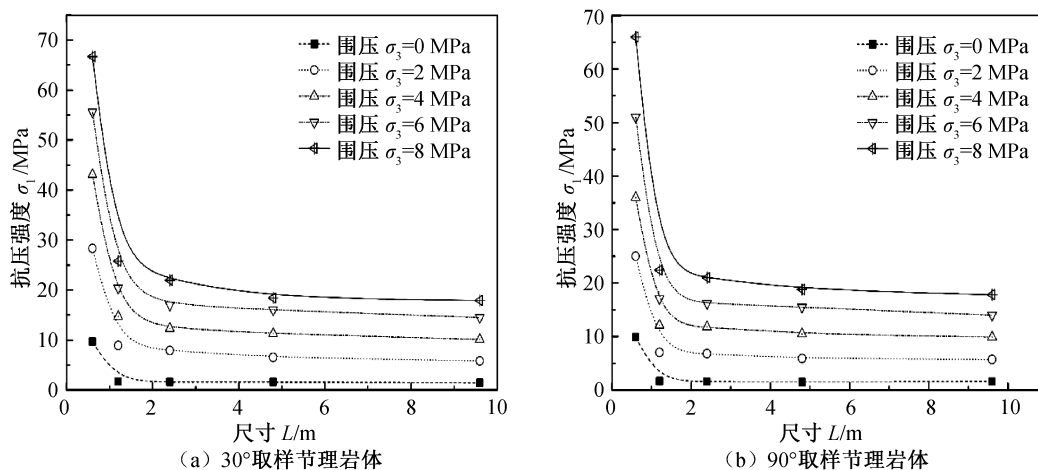


图 8 不同取样角度岩体抗压强度随岩体尺寸的变化关系

Fig. 8 The relationship between the compressive strength of rock mass at different sampling angles and its size

表 7 岩体抗压强度尺寸效应的拟合系数

Tab. 7 Fitting coefficient of size effect of rock mass compressive strength

取样角 度/(°)	围压 σ_3/MPa	σ_0	α	β	γ	r	取样角 度/(°)	围压 σ_3/MPa	σ_0	α	β	γ	r
30	0	1.57	9.95	3.51	0.59	0.998	120	0	1.57	9.59	3.57	0.56	0.970
	2	6.72	27.20	3.82	0.54	0.972		2	6.15	12.28	1.69	0.46	0.900
	4	11.20	42.22	3.68	0.52	0.997		4	12.28	15.45	2.65	0.49	0.810
	6	15.80	52.43	3.58	0.52	0.990		6	15.45	20.65	2.49	0.48	0.830
	8	19.60	58.51	3.37	0.54	0.983		8	20.65	24.86	2.25	0.47	0.830
60	0	2.05	10.06	3.49	0.53	0.958	150	0	1.89	6.96	3.93	0.60	0.991
	2	6.92	34.55	4.38	0.58	0.991		2	7.52	12.50	2.55	0.54	0.972
	4	12.05	35.97	3.90	0.58	0.995		4	11.57	18.72	2.30	0.54	0.931
	6	16.81	42.62	3.71	0.60	0.996		6	16.17	28.21	3.36	0.55	0.998
	8	20.10	63.89	3.20	0.53	0.988		8	16.30	41.58	1.91	0.47	0.908
90	0	1.55	8.83	7.27	0.59	0.999							
	2	6.13	21.11	5.12	0.58	0.990							
	4	10.73	37.50	5.00	0.52	0.985							
	6	15.23	41.58	4.91	0.57	0.990							
	8	19.52	67.90	4.63	0.52	0.988							

表岩石表征尺度,对比各个取样角度的岩体不难发现,岩体的表征单元体受取样角度影响不大,各个方向的表征单元体尺度基本上都趋于某个定值,随着尺度的增大,可忽略其对岩体强度的影响。 α 代表岩石抗压强度与岩体抗压强度差值,随围压的增大而增大,这也充分说明了岩石强度不可等价于岩体强度。 β 可以看作是抗压强度的一个重要影响因子,为无量纲力学变量,与施加的围压、节理分布等要素有关。不同取样角度的岩体尺寸效应拟合系数如表 7 所示。

6 结论

1) 围压、尺寸相同时,随着选取角度的增大,节理岩体抗压强度呈微幅波动变化趋势,波动规律为先上升后下降最后再上升,取样角度为 60° 时强度值略高,且抗压强度的尺寸效应与围压效应较为明显,这应与节理分布的分形特性有关。

2) 选取角度、尺寸相同时,随着围压的增大,节理岩体抗压强度呈线性增大趋势,随着岩体尺寸的增大,各选取角度间的 σ_1/σ_3 波动幅度会降低,围压对其抗压强度的影响减弱,节理岩体的各

向异性也趋于不明显。

3)选取角度、围压相同时,随着岩体尺寸的增大,节理岩体抗压强度呈非线性减小趋势,并趋向于某一定值,可拟合为负指数变化关系,揭示了节理岩体的各向异性。

参考文献:

- [1] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京:科学出版社,1988.
- [2] 栗东平,李 军,孙荣荣. 基于 UDEC 岩体抗压强度尺寸效应的数值研究[J]. 地下空间与工程学报,2019(4): 1098-1105.
- [3] HOEK E, BROWN E T. Empirical Strength Criterion for Rock Masses[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1980, 106(15715): 1013-1035.
- [4] 邢 军,郭镇邦,李钰洁,等. 基于模糊聚类和 Hoek-Brown 准则的裂隙岩体力学参数计算[J]. 中国矿业, 2019, 28(05): 143-148.
- [5] 杨 帆,侯克鹏,谢永利. 岩质高边坡岩体力学参数确定及稳定性研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2011, 043(006): 845-853.
- [6] 周创兵,於三大. 论岩体表征单元体体积 REV——岩体力学参数取值的一个基本问题[J]. 工程地质学报, 1999, 7(4): 332-336.
- [7] 周创兵,熊文林. 论岩体的渗透特性[J]. 工程地质学报, 1996(2): 69-74.
- [8] 周创兵,熊文林. 双场耦合条件下裂隙央体中的渗透张量[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 015(004): 338-344.
- [9] 向文飞,周创兵. 裂缝岩体表征单元体研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 024(A02): 5687-5692.
- [10] 刘宝琛,张家生. 岩石抗压强度的尺寸效应[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 017(006): 611-614.
- [11] 王晓明,郑银河. 裂隙岩体表征单元体及尺寸效应研究进展[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 118-126.
- [12] 陈 新,孙靖亚,杨 盼,等. 节理间距和倾角对岩体单轴压缩破碎规律的影响[J]. 采矿与安全工程学报, 2017(3): 608-614.
- [13] 闫月龙,徐 涛,任思玉,等. 节理产状对岩石单轴抗压强度的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016(4): 897-903.
- [14] 马芹永,苏晴晴,马东东,等. 含不同节理倾角深部巷道砂岩 SHPB 动态力学破坏特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(X): 1104-1116.
- [15] 大久保诚介,汤 杨,许 江,等. 可视化三轴压缩伺服控制试验系统的改进和应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2017(S1): 238-245.
- [16] GRENON M, HADJIGEORGIOU J. Applications of Fracture System Models(FSM) in Mining and Civil Rock Engineering Design[J]. International Journal of Mining Reclamation and Environment, 2012, 26(1): 55-73.
- [17] MAS IVARS D, PIERCE M E, DARCEL C, et al. The Synthetic Rock Mass Approach for Jointed Rock Mass Modelling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(2): 219-244.
- [18] SAINSBURY B, PIERCE M, MASIVARS D. Analysis of Caving Behaviour Using a Synthetic Rock Mass-Ubiquitous Joint Rock Mass Modelling Technique [A]. In Y Potvin, J Carter, A Dyskin, R Jeffrey (eds.). Proceedings of the First Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium [C]//Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2008: 243-253.
- [19] 明华军,刘草原,王银秀. 岩石结构面尺寸效应的数值仿真研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(02): 105-109.
- [20] 左双英,叶明亮,唐晓玲,等. 层状岩体地下洞室破坏模式数值模型及验证[J]. 岩土力学, 2013, 34(S1): 458-465.
- [21] 倪海江,徐卫亚,石安池,等. 基于离散元的柱状节理岩体等效弹性模量尺寸效应研究[J]. 工程力学, 2015, 32(3): 90-96.
- [22] 王培涛. 基于离散元方法的节理岩体各向异性力学参数表征及应用[D]. 沈阳:东北大学, 2015.
- [23] DI BENEDETTO H, DOANH T, GEOFFROY H, et al. Deformation Characteristics of Geomaterials / Comportement Des Sols Et Des Roches Tendres [M]. Lyon: Deformation Characteristics of Geomaterials, 2003.
- [24] 张婷婷. 地下水封洞库岩体力学参数 REV 的各向异性研究[D]. 武汉:中国地质大学, 2013.

(责任编辑 王利君)