

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201700063

二长岩节理抗剪强度三轴试验研究

樊立敏¹, 符文熹^{1*}, 魏玉峰^{1,2}, 周洪福³

(1.四川大学 水力学与山区河流保护国家重点实验室 水利水电学院, 四川 成都 610065;

2.成都理工大学 地质灾害与环境保护国家重点实验室 环境与土木学院, 四川 成都 610059;

3.中国地质调查局 成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘 要:为确定岩石节理的剪切强度,在MTS815型程控伺服岩石刚性试验机上对含不规则、无充填岩石节理试件进行三轴试验。利用伺服控制系统连续获得同一试件在不同围压条件下对应的最大轴压,并根据弹性力学理论求得不同围压下节理面的正应力和剪应力。对每一试件的试验结果按线性Mohr-Coulomb准则拟合获得摩擦角和内聚力,利用MATLAB软件的曲线拟合工具对所有试件的正应力和剪应力分别进行线性Mohr-Coulomb准则拟合、幂函数拟合和非线性Barton公式拟合,对比其拟合效果可知:1)线性Mohr-Coulomb准则拟合明显比幂函数拟合和Barton公式拟合要差,尤其是在低正应力条件下线性Mohr-Coulomb准则拟合高估了岩石节理的剪切强度;2)幂函数和Barton公式拟合的曲线几乎重合,且总体反映了岩石节理剪切强度的非线性特征;3)在较高正应力下,线性Mohr-Coulomb准则、幂函数和非线性Barton公式对应的剪切强度均偏高。同时,为估计拟合公式基本参数的合理性,根据试验成果对Barton公式基本参数进行了比较可靠的区间估计。

关键词:岩石节理;三轴试验;剪切强度;非线性拟合;参数区间估计;Barton公式

中图分类号:TU45

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)01-0094-07

Determination of the Shear Strength Through the Triaxial Test Using MTS

FAN Limin¹, FU Wenxi^{1*}, WEI Yufeng^{1,2}, ZHOU Hongfu³

(1.State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., College of Water Resource & Hydropower, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;

2.State Key Lab. of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, College of Environment and Civil Eng.,

Chengdu Univ. of Technol., Chengdu 610059, China;

3.Chengdu Geological Survey Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China)

Abstract: In order to determine the shear strength of rock joint, the triaxial tests for specimens with irregular and unfilled rock joints were conducted using the rock mechanics test system (MTS815). A series of maximum axial failure stresses under different confining pressures applied to the same specimen was continuously acquired on MTS and the normal and shear stresses of joint surface under different confining pressures were obtained through the theory of elastic mechanics combined with the maximum axial failure stresses. In addition to deriving the cohesive force and friction angle with the test results of each specimen by linear Mohr-Coulomb criterion fitting, the curve-fitting tool in MATLAB was employed to treat the linear Mohr-Coulomb criterion fitting, the power fitting, and the nonlinear Barton criterion fitting. The comparison of the three fitting methods showed that when it comes to determine the shear strength of rock joints, the fitting of linear Mohr-Coulomb criterion is obviously worse than the power function fitting and Barton formula fitting, especially under the low normal stress conditions. Linear Mohr-Coulomb criterion fitting will overestimate the shear strength of rock joints. The curves of Power function fitting and Barton formula fitting are nearly overlap, as well as both of them can reflect the nonlinear characteristics of shear strength of rock joints. Under the high normal stress, the fitting results of the shear strength of rock joints will higher when using Mohr-Coulomb criterion, power function and nonlinear Barton formula to fit. In addition, the reliable

收稿日期:2017-01-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41772321);国家重点基础研究发展计划资助项目(2015CB057903);中国博士后科学基金资助项目(2016M590890);四川省科技计划专项资助项目(2014SS027);中国地质调查局基础地质调查项目资助(DD20160272)

作者简介:樊立敏(1990—),男,硕士生。研究方向:岩石力学与工程。E-mail: 879656135@qq.com

* 通信联系人 E-mail: wxf_lee@scu.edu.cn

interval is estimated for the basic parameters of Barton formula fitting getting from the triaxial testing results.

Key words: rock joint; triaxial testing; shear strength; nonlinear fitting; interval estimation of parameter; Barton formula

不规则、无充填岩石节理是岩体中一种常见的不连续面^[1-2]。许多学者对此类岩石节理的剪切强度进行了研究, 提出评估岩石节理剪切强度的经验公式, 取得了较为一致的认识: 节理面的粗糙度和硬度对剪切强度有重要影响, 且节理面的剪切强度具有非线性特征^[3-5]。

目前, 对不规则、无充填岩石节理进行剪切试验多采用直剪法^[6-7]。直剪试验是在保持节理面正应力不变的情况下, 逐渐增加剪应力, 一旦达到峰值强度后, 位移将持续增加而剪应力明显降低(反映残余强度)。在不同正应力条件下进行多组剪切试验, 可获得各试件的峰值和残余剪切强度, 然后绘制正应力和剪应力关系以估计岩石节理的剪切强度特征。由于实际中要获得多个相同岩石节理的试件十分困难, 且难以保证各试件节理面的粗糙度和硬度等具有相同特征, 所以在进行直剪试验时常对同一岩石节理试件进行多级试验, 即单试件直剪试验^[8-9]。然而, 正如Barton所报道的, 单试件直剪试验只有在低正应力条件下所获得的峰值剪切强度才比较可靠^[10]。尽管同一试件重复进行直剪会使得余下的试验结果落在峰值和残余强度之间, 但为尽可能获得岩石节理的剪切强度特征, 目前单试件直剪试验法仍被广泛采用^[11]。

在MTS815型程控伺服岩石刚性试验机上可对含不规则、无充填岩石节理试件进行三轴试验。与常规岩石三轴试验一样, 保持试件在围压不变条件下逐渐增加轴向压力直至最大轴向压力, 则此加载过程中作用在节理面的正应力和剪应力均在增加。先利用伺服系统控制围压和轴向加载速率, 对同一试件可连续获得不同围压下的最大轴向压力; 再根据弹性力学理论可求得同一试件不同围压下节理面的正应力和剪应力。本文对13个含岩石节理的钻孔岩芯试件进行三轴试验, 除对每一试件的试验结果按线性Mohr-Coulomb准则^[12]拟合获得摩擦角和内聚力外, 着重分析了所有试件的正应力和剪应力关系, 并利用MATLAB软件的曲线拟合工具分别进行线性拟合、幂函数拟合和非线性拟合。非线性拟合采用文献^[13]提出的Barton公式, 文中对比不同形式拟合的效果, 分析不规则、无充填岩石节理的非线性强度特征, 并根据试验结果对Barton公式基本参数进行比较可靠的区间估计。另外, 还对少数单试件三轴试验成果按线性Mohr-Coulomb准则拟合时出现内聚力为负值的原因进行分析。

1 试验仪器和方法

试验仪器采用MTS815型程控伺服岩石刚性试验机(图1)。该试验设备主要由试验主机、液压源系统和数字控制系统3部分组成。岩石节理试件三轴试验采用常规三轴试验法, 即在围压不变($\sigma_2=\sigma_3$)的情况下逐渐进行轴向加载直至获得最大轴压 σ_1 。利用伺服控制系统可实现同一试件连续施加多级围压, 从而获得不同围压下的最大轴压。轴向加载时应变速率为0.01 mm/s。含岩石节理试件为黄河上游玛尔挡水电站前期勘察钻孔岩芯样, 共13个岩芯试件; 岩性为二长岩, 天然岩石节理面已完全分离, 起伏粗糙, 无充填、无胶结, 试样如图2所示。



图 1 MTS815岩石试验机
Fig.1 MTS815 rock testing machine

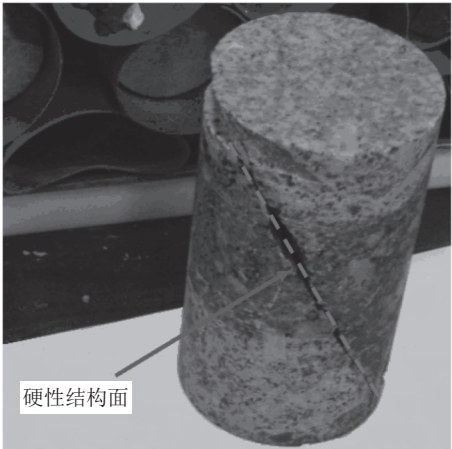


图 2 典型岩石节理试件
Fig.2 Typical rock joints specimen

与试验有关的注意事项说明如下:

1) 含岩石节理的试件高度不超过100 mm。节理面上、下端位置用金刚石锯切割预留10~20 mm的最大滑移空间, 以保证在不同围压下轴向加载过程节理面上、下块体能自由滑动(图3)。当节理面上、下块体滑动位移达到10~20 mm的预留滑移空间时, 试验终止。

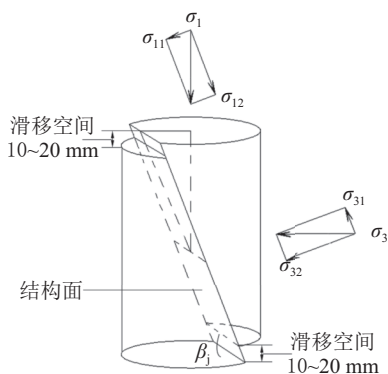


图 3 制备试样示意图

Fig.3 Diagrammatic sketch of prepared sample

在获得围压对应的最大轴压后,根据弹性力学理论,可按式(1)~(2)计算节理面的正应力和剪应力:

$$\sigma_{nj} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(2\beta_j) \quad (1)$$

$$\tau_j = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin(2\beta_j) \quad (2)$$

式中: σ_{nj} 为节理面的正应力, MPa; τ_j 为节理面的剪应力, MPa; σ_1 为轴压, 即最大主应力, MPa; σ_3 为围压, 即最小主应力, MPa, 且 $\sigma_2 = \sigma_3$; β_j 为节理面的倾角, 即最大主应力作用面与节理面的夹角, (°)。

2) 三轴试验中试件的围压是通过增加三轴压力室内的油压实现的。若含岩石节理的试件直接置于液压油中, 液压油将进入不连续面而无法对试件施加围压。为防止液压油进入不连续面, 在试件外部套上热缩薄膜, 套膜过程尽可能地让节理面上、下块体完全接触。然后对其两端的热缩薄膜进行加热, 使之收缩紧贴试件两端的钢垫块周围。

试验岩芯样均为天然节理面试样, 为在三轴试验时尽量保持试样节理面的天然贴合状态, 减少反复从头加压对试样的影响, 用以下方法进行试验: 首先, 按常规方法把试样装入MTS三轴压力室中, 准备好后施加第1级围压; 然后, 保持第1级围压不变, 施加第1级轴压至MTS数据采集系统中的应力-应变曲线出现峰值为止。在完成第1级加载后, 保持第1级轴压不变, 施加第2级围压, 再保持第2级围压不变, 继续施加第2级轴压至试样应力-应变曲线再次出现峰值为止。如此反复对试样进行多级加载。单个试样加载过程如图4所示。

2 试验结果分析

2.1 试验结果

13个钻孔岩芯岩石节理试件三轴试验获得的不同围压对应的最大轴向压力结果如表1所示。按式

(1)和(2)计算获得的正应力和剪应力及根据各试件正应力和剪应力关系获得的摩擦角和黏聚力也列于表1中。

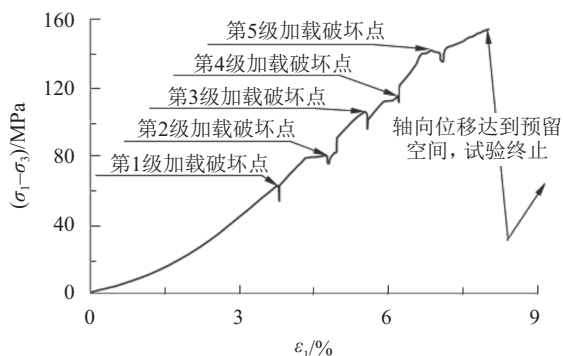


图 4 单个试样加载过程

Fig.4 Loading process of single specimen

尽管表1中的岩芯样在直径大小上存在一定差异, 但是试验时试样主要是沿节理面发生破坏, 故直径大小对试验结果的影响相对较小。另外, 少数试件的三轴试验结果按线性Mohr-Coulomb准则拟合时出现内聚力为负值, 原因可能在于这些岩芯试样均匀性较差, 导致节理面剪切部分大小不一、分布不均匀, 从而造成应力集中和受力不均匀现象, 引起内聚力出现负值, 如图5所示。

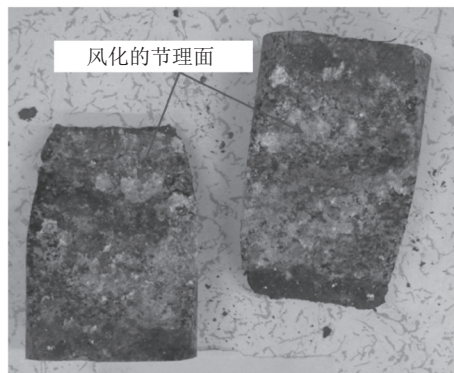


图 5 节理面的剪切压碎特征

Fig.5 Shear and crush characteristics of joint surface

2.2 拟合分析与讨论

2.2.1 拟合方法

为合理评估岩石节理的正应力和剪应力关系, 利用MATLAB软件的曲线拟合工具分别进行Mohr-Coulomb准则线性拟合、幂函数拟合和Barton公式非线性拟合, 表达式为:

Mohr-Coulomb准则线性拟合公式:

$$\tau_j = \sigma_{nj} \tan \phi_j + c_j \quad (3)$$

式中: ϕ_j 为节理面的摩擦角, (°); c_j 为节理面的黏聚力, MPa。

幂函数拟合公式:

表 1 岩石节理三轴试验成果

Tab.1 Triaxial testing results of rock joints

试样 编号	直径/ mm	β_j / (°)	σ_3 / MPa	σ_1 / MPa	σ_{nj} / MPa	τ_j / MPa	ϕ_j / (°)	c_j / MPa	试样 编号	直径/ mm	β_j / (°)	σ_3 / MPa	σ_1 / MPa	σ_{nj} / MPa	τ_j / MPa	ϕ_j / (°)	c_j / MPa
1	70.61	49	0.50	5.20	2.52	2.33	40.82	0.123	7	67.53	60	0.52	3.12	1.17	1.13	42.62	-0.260
			1.10	9.35	4.65	4.08						1.50	6.76	2.82	2.28		
			1.54	12.99	6.47	5.67						2.14	9.87	4.07	3.35		
			2.00	17.15	8.52	7.50						2.56	11.95	4.91	4.07		
			2.53	21.31	10.61	9.30						3.20	16.11	6.43	5.59		
			3.00	25.98	12.89	11.38						3.50	17.67	7.04	6.14		
			3.55	29.08	14.54	12.64						4.00	20.79	8.20	7.27		
			4.00	33.26	16.59	14.49						4.50	24.95	9.61	8.86		
			4.50	36.38	18.22	15.78											
2	67.99	68	0.55	5.19	1.20	1.61	46.88	0.212	8	67.91	70	0.55	4.16	0.97	1.16	46.89	0.069
			1.00	7.28	1.88	2.18						1.00	6.76	1.67	1.85		
			1.50	10.39	2.75	3.09						1.50	9.35	2.42	2.52		
			2.00	13.51	3.62	4.00						2.00	12.99	3.29	3.53		
			2.50	17.15	4.56	5.09						2.50	17.15	4.21	4.71		
			3.00	20.27	5.42	6.00						3.00	20.27	5.02	5.55		
			3.00	20.27	5.42	6.00						3.50	22.35	5.71	6.06		
			3.60	24.43	6.52	7.23						4.00	25.98	6.57	7.06		
3	72.09	57	0.50	5.20	1.89	2.15	42.79	0.290	9	56.70	55	0.58	7.58	2.88	3.29	48.26	0.115
			1.30	9.35	3.69	3.68						1.00	14.31	5.38	6.25		
			1.50	10.39	4.14	4.06						1.50	19.36	7.38	8.39		
			2.00	13.51	5.41	5.26						2.00	24.41	9.37	10.53		
			2.50	16.63	6.69	6.45						2.60	32.83	12.55	14.20		
			3.10	20.27	8.19	7.84											
			3.50	23.39	9.40	9.09											
4	56.59	60	0.60	10.94	1.69	1.88	47.99	0.094	10	70.83	51	0.52	5.20	2.37	2.29	40.34	0.205
			1.00	10.10	3.28	3.94						1.00	8.32	3.90	3.58		
			1.50	12.63	4.28	4.82						1.50	10.91	5.23	4.60		
			2.00	15.99	5.50	6.06						2.00	13.49	6.55	5.62		
			2.68	22.73	7.69	8.68						2.50	17.67	8.51	7.42		
												3.00	20.79	10.05	8.70		
												3.50	24.95	12.00	10.49		
5	71.91	56	0.50	5.20	1.97	2.18	43.86	0.165	11	67.09	75	0.55	3.12	0.72	0.64	55.38	-0.865
			1.15	8.83	3.55	3.56						1.00	6.24	1.35	1.31		
			1.50	11.43	4.61	4.60						1.50	9.35	2.03	1.96		
			2.00	14.55	5.92	5.82						2.00	12.47	2.70	2.62		
			2.56	18.19	7.45	7.25						2.50	17.15	3.48	3.66		
			3.08	21.83	8.94	8.69						3.50	29.10	5.21	6.40		
			3.50	24.43	10.04	9.70						3.80	38.46	6.12	8.67		
			4.00	29.10	11.85	11.64											
			4.75	34.30	13.99	13.70											
6	56.79	71	0.54	4.21	0.93	1.13	47.76	-0.040	12	56.95	41	0.58	8.42	5.05	3.88	37.65	0.150
			1.00	6.73	1.61	1.76						1.00	21.05	12.42	9.93		
			1.50	9.26	2.32	2.39						1.50	26.10	15.51	12.18		
			2.00	12.63	3.13	3.27						2.00	32.83	19.56	15.26		
			2.55	16.84	4.06	4.40						2.80	42.09	25.18	19.45		
			3.00	20.20	4.82	5.29						0.54	9.26	6.10	4.19		
			3.30	22.73	5.36	5.98						1.00	21.05	13.79	9.64		
			1.00	14.31	5.38	6.25			13	74.09	37	1.50	33.67	22.02	15.46	34.77	0.034
			1.50	19.36	7.38	8.39						2.00	38.72	25.42	17.65		
			2.00	24.41	9.37	10.53						2.50	49.67	32.59	22.67		
			2.60	32.83	12.55	14.20						3.00	57.24	37.60	26.07		

$$\tau_j = a\sigma_{nj}^b \quad (4)$$

式中, a 和 b 为幂函数的系数(即拟合参数)。

Barton非线性拟合公式:

$$\tau_j = \sigma_{nj} \tan \left[\phi_b + JRC \lg \left(\frac{JCS}{\sigma_{nj}} \right) \right] \quad (5)$$

式中: ϕ_b 为节理面的基本摩擦角, ($^\circ$); JRC 为节理面的粗糙系数; JCS 为节理面壁的抗压强度。

式(1)中的系数 a 和 b 没有明确的物理意义, 本文进行幂函数拟合旨在对比幂函数与Mohr-Coulomb准则和Barton公式的拟合效果, 分析其适用性。在幂函数拟合时, 先对正应力和剪应力取自然对数, 将式(4)变为式(6)的线性表达形式:

$$\ln \tau_j = b \ln \sigma_{nj} + \ln a \quad (6)$$

式(3)和(6)可直接用最小二乘法^[14]求得未知系数 a 和 b 。式(5)则用MATLAB软件的曲线拟合工具中提供的General Equation模块通过迭代求得未知系数。General Equation模块中用户可输入任意形式的公式。迭代求解Barton公式基本参数时, 先对各基本参数设置一个起始迭代值, 并给定各基本参数可能的上限和下限。各基本参数起始迭代值及可能的上限和下限需满足Barton公式的物理意义。拟合所获得的关系曲线绘制于图6中。

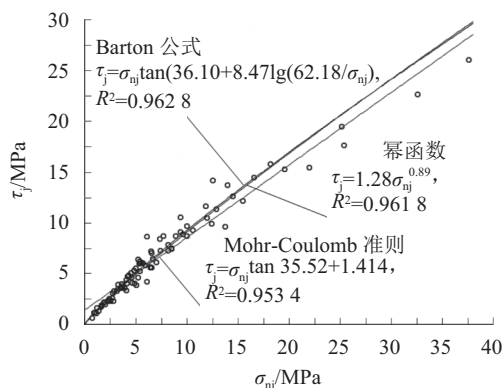


图6 岩石节理正应力和剪应力关系及不同形式拟合曲线
Fig.6 Relationship between normal and shear stresses and different types of fitting curves of rock joints

2.2.2 分析与讨论

3种拟合关系的结果表明:

1) 线性Mohr-Coulomb准则拟合明显比幂函数拟合和Barton公式拟合要差, 尤其是在低正应力条件下拟合的线性Mohr-Coulomb准则将高估岩石节理的剪切强度。

2) 幂函数拟合和Barton公式拟合的曲线几乎重合, 总体反映了岩石节理剪切强度的非线性特征。

3) 在较高正应力下, 线性Mohr-Coulomb准则、幂函数和Barton公式对应的剪切强度均偏高。以Bar-

ton公式拟合的结果为例说明, 分别将试验获得的 σ_{nj} 和 τ_j 除以拟合的 JCS 值, 绘制 σ_{nj}/JCS 和 τ_j/JCS 关系于图7中。图7的结果与文献[15]报道一致: 当 $0.01 < \sigma_{nj}/JCS < 0.3$ 时, Barton公式估计的岩石节理剪切强度比较可靠; 当 $\sigma_{nj}/JCS > 0.3$ 时, Barton公式所估计的岩石节理剪切强度偏高。

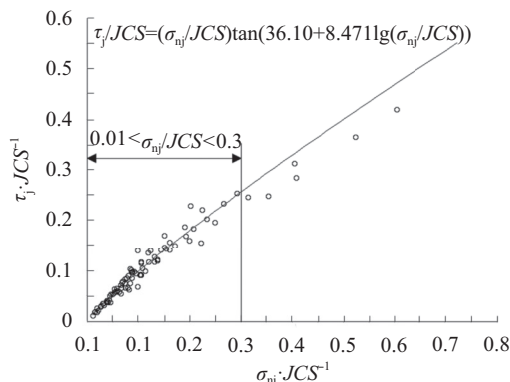


图7 Barton公式估计岩石节理剪切强度可靠范围

Fig.7 Reliable range of rock joint shear strengths estimated by the Barton formula

出现这一问题的主要原因是: 在低应力条件下用Barton公式估计岩石节理剪切强度才比较可靠^[16]; 高应力时对同一试件进行重复剪切会使所获得的剪切强度落在峰值和残余强度之间。尽管本文介绍的岩石节理三轴试验是在连续施加多级围压下进行的, 但在前面几级围压下节理面上、下滑动必然会使节理壁局部凸起部位剪切破碎, 从而使得后面几级围压下对应的剪切强度偏低。

2.3 Barton公式基本参数区间估计

由上述拟合分析可知, 幂函数和Barton公式均能较好地反映岩石节理剪切强度的非线性特征。基于此, 可根据幂函数进行转换, 以合理评估Barton公式各基本参数在某一置信水平的上、下边界。具体评估方法为:

- 1) 利用MATLAB软件的曲线拟合工具, 首先根据式(6)确定系数 a 和 b 在某一置信水平的上、下边界, 取系数 a 和 b 在置信水平99.73%的上、下边界, 并由该上、下边界获得幂函数相应的上限和下限曲线(图8)。
- 2) 利用Barton公式拟合上述幂函数的上限和下限曲线, 同样可利用MATLAB软件的曲线拟合工具求得Barton公式的基本参数。拟合时正应力范围不超过三轴试验时的最大值37.60 MPa。多次试算使得给定正应力范围拟合时幂函数曲线的上、下面积相等为止。
- 3) 假定拟合获得的Barton公式上限和下限方程对应的参数区间也在置信水平99.73%的上、下边界, 且Barton公式各基本参数服从正态分布。根据概率论, 参数在置信水平99.73%的上、下边界的差即为6倍标准差, 而在置信水平99.73%的区间中值为均值。

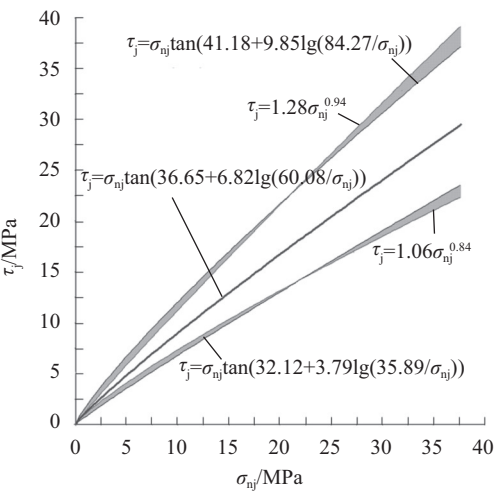


图 8 用幂函数拟合确定Barton公式基本参数在置信水平 99.73%的曲线

Fig.8 Curves of Barton formula with basic parameters determined by the power function fitting on the confidence level of 99.73%

表 2 不同方法确定Barton公式基本参数对比

	根据试验值确定			根据幂函数转换确定		
	$\phi_b/(^{\circ})$	JRC	JCS	$\phi_b/(^{\circ})$	JRC	JCS
均值	36.10	8.47	62.18	36.65	6.82	60.08
99.73%置信水平的区间	$[-1.16\times10^7, 1.16\times10^7]$	[3.09, 13.85]	$[-1.95\times10^8, 1.95\times10^8]$	[32.12, 41.18]	[3.79, 9.85]	[35.89, 84.27]
标准差	3.87×10^6	1.79	6.50×10^7	1.51	1.01	8.06

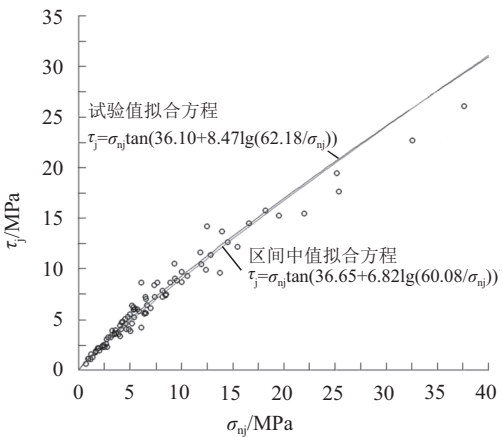


图 9 试验值和区间中值获得的Barton公式曲线对比

Fig.9 Comparison of the curves between the test values and the interval values obtained from the Barton formula

3 结 论

在MTS试验机上对13个节理岩芯样进行三轴试验,得出试件在不同围压条件下的最大轴压,结合弹性力学理论公式给出试件节理面的正应力和剪应

为了探讨幂函数转换方法评估Barton公式基本参数的合理性,本文同时对所有试件的试验值进行基本参数拟合确定,两种方法拟合的Barton公式基本参数的结果如表2所示。将试验值直接拟合和按幂函数转换方法拟合所获得的区间中值对应的Barton公式曲线均绘于图9中。总体而言,根据试验值拟合曲线和按区间中值获得的Barton公式曲线基本重合。但结合表2的结果可知,由试验值直接估计的参数区间中节理面基本摩擦角 ϕ_b 与节理面壁抗压强度JCS区间下限均出现负值,且两区间的范围都非常大,是不合理的。故直接由试验结果获得Barton公式基本参数的区间估计不符合实际物理意义,是错误的;而按上述幂函数转换方法对Barton公式基本参数进行的区间估计则是合理的。造成 ϕ_b 和JCS区间下限均出现负值,且两区间的范围都非常大的原因可能是,虽然Barton公式在低应力时的拟合效果很好,但高应力时拟合结果偏高,直接由试验结果获得Barton公式基本参数可能存在较大误差。

力,并得到试件的内摩擦角和黏聚力。为合理评估岩石节理的正应力和剪应力关系,采用MATLAB的曲线拟合工具分别进行Mohr-Coulomb准则线性拟合、幂函数拟合和Barton公式拟合,结果如下: 1)相比幂函数和Barton公式拟合,线性Mohr-Coulomb准则拟合效果较差,幂函数拟合和Barton公式拟合的曲线几乎重合,且总体反映了岩石节理剪切强度的非线性特征; 2)低正应力条件下线性Mohr-Coulomb准则将高估岩石节理的剪切强度,高应力条件下3种拟合方式评估出的岩石节理剪切强度均偏高。

同时,为估计拟合公式基本参数的合理性,根据试验成果对Barton公式基本参数进行了比较可靠的区间估计。结果表明: Barton公式直接拟合试验结果得出的基本参数区间范围较大,且节理面基本摩擦角 ϕ_b 与壁抗压强度JCS区间下限出现负值,证明所得的区间估计是不合理的;而通过幂函数进行对数转换后确定出参数的上、下边界后,再用Barton公式拟合幂函数的上、下限曲线所得的基本参数的区间估计则是合理的。

参考文献:

[1] Liu Jun,Kong Xianjing.Numerical simulation of behavior of

- jointed rock masses during tunneling and lining of tunnels[J]. Rock & Soil Mechanics, 2007, 28(2): 321–326. [刘君, 孔宪京. 节理岩体中隧道开挖与支护的数值模拟[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 321–326.]
- [2] Yang Chunhe, Mei Tao, Wang Guibin, et al. Study on rock-mass joint characteristics of Jiji quarry in Beishan, Gansu Province[J]. Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2007, 26(Supp 2): 3849–3854. [杨春和, 梅涛, 王贵宾, 等. 甘肃北山茱茱采石场岩体节理特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 2): 3849–3854.]
- [3] Zhou Wen, Zhu Ziqiang, Liu Qunyi, et al. Numerical analysis for shear strength and deformation characteristic of joint plane with complicated surface[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2009, 40(6): 1700–1704. [周文, 朱自强, 柳群义, 等. 复杂节理面剪切强度和变形特征的数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(6): 1700–1704.]
- [4] Wu Qihong, Xu Qing, Yong Jun, et al. Numerical embedding in FLAC3D of JRC-JCS model of joint plane[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2013, 44(9): 3829–3833. [吴启红, 徐青, 雍军, 等. 节理面 JRC-JCS 非线性准则的数值计算方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(9): 3829–3833.]
- [5] Tang Zhicheng, Xia Caichu, Song Yinglong, et al. Discussion about Grasselli's peak shear strength criterion for rock joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2012, 31(2): 356–364. [唐志成, 夏才初, 宋英龙, 等. Grasselli 节理峰值抗剪强度公式再探[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 356–364.]
- [6] Yang Jie, Rong Guan, Cheng Long, et al. Experimental study of peak shear strength of rock joints[J]. Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2015, 34(5): 884–894. [杨洁, 荣冠, 程龙, 等. 节理峰值抗剪强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(5): 884–894.]
- [7] Liu Yuanming, Xia Caichu. Advances in research of rock masses containing discontinuous joints in direct shear test[J]. Rock & Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1719–1724. [刘远明, 夏才初. 非贯通节理岩体直剪试验研究进展[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1719–1724.]
- [8] Li Hongzhe, Xia Caichu, Wang Xiaodong, et al. Experimental study on deformation and strength properties of jointed marble specimens[J]. Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2008, 27(10): 2118–2123. [李宏哲, 夏才初, 王晓东, 等. 含节理大理岩变形和强度特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2118–2123.]
- [9] Wang Dong, Liu Changwu, Wang Ding, et al. Research on the constitutive relation of Benxi limestone based on failure types[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2013, 45(2): 62–67. [王东, 刘长武, 王丁, 等. 基于破坏类型的本溪灰岩本构关系研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(2): 62–67.]
- [10] Barton N. Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: Problems and some solutions[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, 5(4): 249–261.
- [11] Wines D R, Lilly P A. Estimates of rock joint shear strength in part of the Fimiston open pit operation in Western Australia[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(6): 929–937.
- [12] Fu Wenxi, Hu Jing, Liao Yi, et al. Reliability analysis of rock mass stability based on Hoek-Brown empirical formulas[J]. Rock & Soil Mechanics, 2009, 30(Supp2): 214–218. [符文熹, 胡静, 廖异, 等. 基于 Hoek-Brown 经验公式的岩体稳定性可靠度分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊2): 214–218.]
- [13] Barton N. Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill, interfaces and rock masses[M]//Constitutive Modeling of Geomaterials. Berlin: Springer, 2013: 1–12.
- [14] Zhu Yanhua. Solving analysis of fitting parameters using by the least square method[J]. Time Education(Education and Teaching), 2012(19): 151. [朱艳华. 最小二乘法拟合参数的求解分析[J]. 时代教育(教育教学版), 2012(19): 151.]
- [15] Hoek E, Bray J D. Rock Slope Engineering[M]. 3rd ed. London: Institute of Mining and Metallurgy, 1981.
- [16] Barton N, Choubey V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock Mechanics, 1977, 10(1/2): 1–54.

(编辑 李轶楠)

引用格式: Fan Limin, Fu Wenxi, Wei Yufeng. Determination of the shear strength through the triaxial test using MTS[J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(1): 94–100. [樊立敏, 符文熹, 魏玉峰. 二长岩节理抗剪强度三轴试验研究[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(1): 94–100.]