

DOI: 10.11779/CJGE201712021

不同接触状态岩石节理的剪切力学性质试验研究

唐志成¹, 王晓川²

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉大学水射流理论与新技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 除粗糙度外, 节理上、下面壁的接触状态是影响其剪切力学性质的重要因素。采用水泥砂浆制备若干不同形貌的节理, 对其上、下面壁沿剪切方向错开不同的位移量、形成不同的接触状态以模拟不同偶合度的节理, 在常法向应力条件下进行试验研究。试验结果表明: 峰值剪切强度随错开位移量的增加而呈非线性减少, 但错开位移对峰值剪切强度的影响随法向应力的增加而减弱; 峰值剪切位移随错开位移量的增加逐步变大; 剪切刚度随错开位移量的增加逐步减少直至某一恒定值, 且在高法向应力下错开位移量对剪切刚度的影响更为明显。采用几种不同的简单函数分析峰值剪切强度与错开位移量之间的关系, 在偶合节理峰值剪切强度准则的基础上提出不同接触状态节理的峰值剪切强度准则。与已有的准则相比, 新准则采用的描述节理接触状态的参数易于确定且更为客观。

关键词: 岩石力学; 节理; 直剪试验; 剪切力学性质; 峰值剪切强度准则

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)12-2312-08

作者简介: 唐志成(1983-), 男, 教授, 主要从事岩石力学方面的教学科研工作。E-mail: zctang@cug.edu.cn。

Experimental studies on mechanical behaviour of rock joints with varying matching degrees

TANG Zhi-cheng¹, WANG Xiao-chuan²

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Hubei Key Laboratory of Waterjet Theory & New Technology, Wuhan University, Wuhan 430071, China)

Abstract: Besides surface roughness, the matching degree between the joint upper and lower blocks is another important factor affecting the shear behavior of a rough rock joint. A simplified way, by imposing varying magnitudes of horizontal dislocation along the shear direction between the joint upper and lower blocks, is used to model the different matching degrees of a joint that is made by cement. A large number of direct shear tests are then performed under constant normal stress condition to investigate the shear behavior of rock joints under the varying matching degrees. The experimental observations indicate that with the increase of dislocation, the peak shear strength decreases and has a larger reduction rate under the lower normal stress level. With the increasing dislocation, the peak shear displacement increases, and the shear stiffness decreases and gradually approaches a constant. The influence of dislocation on the shear stiffness is more prominent under a higher applied normal stress. Several simple combinations of roughness parameters and normalized dislocation are used to perform regression analysis, and a new empirical peak shear strength criterion is put forward to capture the peak shear strength degradation of rock joints under different matching degrees. A preliminary comparison between the proposed criterion and the existing criteria is also provided. The new parameters for the proposed criterion can be easily determined in the laboratory.

Key words: rock mechanics; joint; direct shear test; shear behavior; peak shear strength criterion

0 引言

在表面岩石工程实践中, 岩体的力学性质主要是受包含于其中的节理控制。自 1960 年起, 岩石节理的剪切力学性质引起了全世界范围内广大学者的兴趣。对非充填新鲜岩石节理而言, 影响节理剪切力学性质的因素主要包括^[1]: 岩石材料的力学性质(如节理面壁强度、材料的抗拉强度、基本摩擦角等)和节理面的性质(如粗糙度、偶合度)。过去 40 年, 学者集中

关注偶合节理在常法向应力条件下的剪切力学性质并提出了多个峰值剪切强度准则^[1-8]。

然而, 受外部因素影响(如工程爆破、地震等),

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41672302, 41731284, 11672360, 41402247, 51504166); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20130141120051)

收稿日期: 2016-10-09

***通讯作者**(E-mail: XCW001@whu.edu.cn)

原生的偶合岩石节理的两个面壁往往产生张开或相对位移, 导致工程实践中碰到的多是非偶合节理。Zhao^[9-10]认为节理两个面壁接触面积的减少是引起非偶合节理剪切强度降低的原因, 采用节理吻合系数 (joint matching coefficient, JMC) 描述非偶合节理的接触性质, 并基于大量非偶合节理的直剪试验结果对 Barton 峰值剪切强度公式^[1]进行了修正, 提出新的准则 (即考虑了节理上、下面壁偶合度的影响); Oh 等^[11]对齿状节理的上、下面壁错开不同的位移量、形成不同高度的空腔, 分析了空腔对节理力学性质的影响并对 Barton 峰值剪切强度公式^[1]进行了修正。上述研究有助于理解非偶合节理的剪切力学性质, 但未能克服用节理粗糙度系数 (joint roughness coefficient, JRC) 评价节理粗糙度存在的局限^[12-13], 且确定 JMC 或不规则非偶合节理的空腔高度是非常困难的。

为进一步研究非偶合节理的剪切力学性质, 采用水泥砂浆制备若干不规则状的节理, 对其上、下面壁沿剪切方向分别错开不同的位移量形成不同的接触状态、模拟具有不同偶合度的节理并进行直剪试验。该方法虽然不能全面体现非偶合节理的接触特征, 但采用的描述节理非偶合特征的参量是很容易确定的 (即节理上、下面壁的错开位移量), 通过室内直剪试验获得的规律有助于理解非偶合节理的剪切力学性质。

1 直剪试验

1.1 试件制备

为研究接触状态对岩石节理剪切力学性质的影响, 需要若干形貌相同的节理试件, 由于采集具有相同形貌的天然岩石节理非常困难, 因此在本次试验中

采用类岩石材料制备试验所需的节理试件。采用巴西劈裂法获得若干具有不同表面形貌的岩石节理, 选用其中 5 个具有明显形貌差异的岩石节理作为制备模拟岩石节理的模板, 分别命名为 J-I、J-II、J-III、J-IV 和 J-V。先用硅胶复制岩石节理的形貌, 然后分别采用 3 种不同的模拟材料浇注于硅胶之上制备成节理。模拟材料的配比、养护条件、力学参数和岩石节理的形貌参数列于表 1。采用国际岩石力学学会建议的方法获得模拟材料的单轴压缩强度、抗拉强度、弹性模量和泊松比等; 采用平直节理在低法向应力下的直剪试验获得模拟材料节理的基本摩擦角。

A 组节理的上、下面壁沿剪切方向的错开位移量分别为 0, 5, 10, 15 mm; B、C 组节理的上、下面壁沿剪切方向的错开位移量分别为 0, 2, 4, 8 mm。具体的操作方法如下^[14-15]:

- (1) 将节理的上、下试块处于紧贴的偶合状态, 此时节理上、下面壁的错开位量为 0 mm。
- (2) 在节理面所在平面画间距为 1 mm 的等间距直线。
- (3) 固定下半个节理试块, 将上半个节理试块沿剪切方向移动, 如 5, 10, 15 mm 等, 得到不同接触状态的节理试件。在移动过程中, 将节理的上半个试块抬高几厘米以避免试件接触, 造成微凸体的破损。

1.2 形貌描述方法

Grasselli 等^[16]的试验观测表明: 剪切时的有效接触面积与剪切方向密切相关, 只有面向剪切方向的接触部分才能够对剪切提供抵抗力, 而背向剪切方向的区域产生分离; 剪切过程中的磨损/破坏区域先从有效倾角较大的区域开始。Grasselli 等^[16]采用接触面积比 A_0 、沿剪切方向的最大有效倾角 q_{\max}^* 和体现有效倾角

表 1 模拟材料岩石节理的主要特征参数
Table 1 Main features of three groups of model material joints

分组	水泥:砂:水 (质量比)	节理	长×宽 (mm×mm)	单轴压缩强 度 s_c /MPa	抗拉强度 s_t /MPa	基本摩擦角 $j_b/(^\circ)$	弹性模量 E /GPa	泊松比 μ	材料的密度 $\rho/(kg\cdot m^{-3})$
A	3:2:1	J-I	300×150	27.5	1.54	35.0	6.1	0.16	2200
		J-II							
		J-III							
B	3:3:2	J-IV ^{+,B}	200×100	16.1	1.37	31	4.3	—	2010
		J-IV ^{-,B}							
		J-V ^{+,B}							
C	1:0:1	J-V ^{-,B}	200×100	4.7	0.64	24.8	1.9	—	1750
		J-IV ^{+,C}							
		J-V ^{+,C}							

注: +为正向剪切, -为反向剪切, ^B为 B 组材料的节理, ^C为 C 组材料的节理。养护条件为温度为 25℃, 湿度为 90%, 天数为 28 d。

分布的粗糙度参数 C 描述节理的三维形貌特征。Tatone 等^[17]进一步发展了上述方法,认为参量 $2A_0q_{\max}^*/(C+1)$ 能够体现出节理的三维粗糙程度(即节理的三维粗糙度指标)。本文采用三维形貌扫描仪测试节理的形貌(扫描云点的分辨率为 0.02 mm),重构节理表面时,节点间距为 0.3 mm ,根据文献[16]建议的方法计算得到的形貌参数值列于表 2。

表 2 节理的形貌参数

Table 2 Morphological parameters of test joints			
形貌	A_0	$q_{\max}^*/(^{\circ})$	C
J-I	0.499	59.0	10.5
J-II	0.504	69.3	8.01
J-III	0.688	68.7	7.48
J-IV ⁺	0.513	44.7	9.27
J-IV ⁻	0.501	43.9	9.82
J-V ⁺	0.534	78.4	9.05
J-V ⁻	0.506	75.6	9.38

注: *为正方向, -为反方向。

1.3 试验方法

直剪试验在常法向应力条件下进行,试件不重复使用。A 组试件,每一接触状态的节理施加的法向应力分别为 $0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0\text{ MPa}$; B 组试件,每一接触状态的节理施加的法向应力分别为 $0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0\text{ MPa}$; C 组试件,每一接触状态的节理施加的法向应力分别为 $0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0\text{ MPa}$ 。先按荷载控制方式施加法向荷载直至设定值,再按变形控制方式施加剪切荷载,剪切速率为 0.5 mm/min ,出现稳定的剪切强度时停止试验。试验过程中,计算机自动记录所有的试验数据(包括法向荷载、剪切荷载、剪切位移和法向变形)。法向位移传感器的精

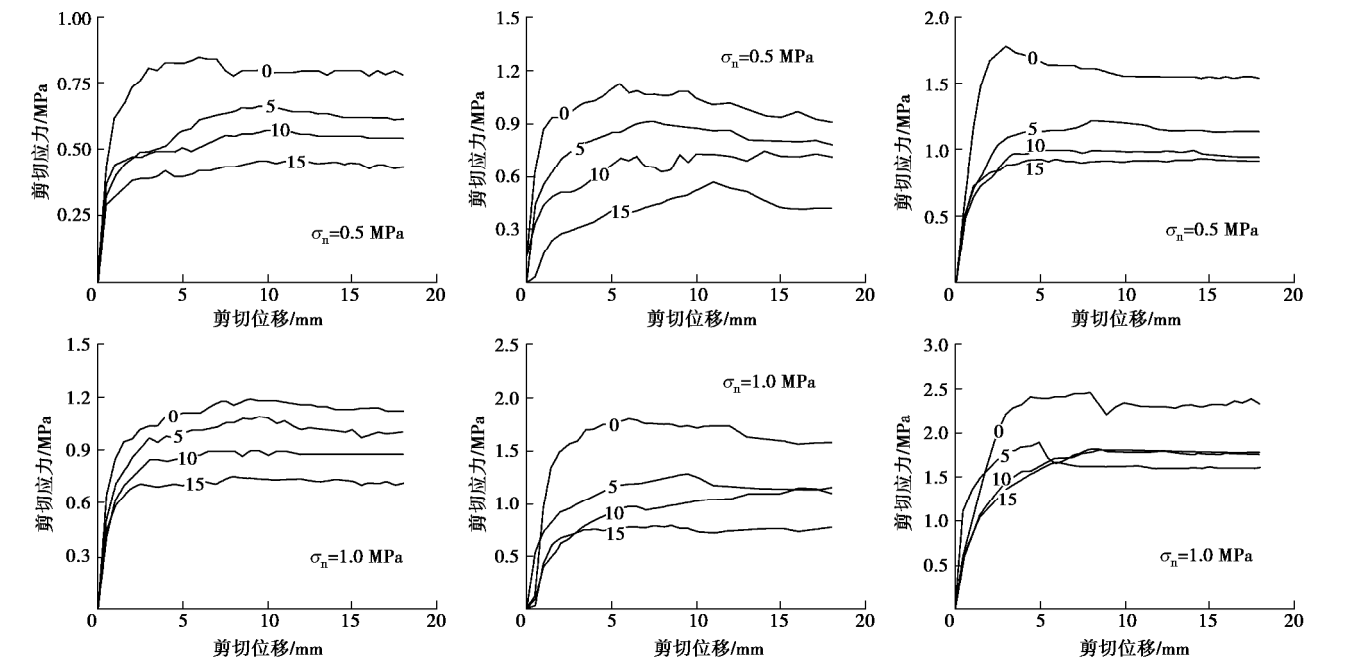
度为 0.001 mm ,切向位移传感器的精度为 0.1 mm ,每秒记录 100 个数据。具体的试验过程可参见文献[14]。

总体而言,对偶合节理的上、下面壁错开一定的位移时,受不规则形貌的影响,上半块试件会出现一定程度的小角度转动。为消除该转动对试验的影响,采用一对平衡装置固定上半个节理试块,法向荷载施加完毕后松开该平衡装置。

为保证试验结果的可靠性,除 A 组材料中的偶合节理重复试验 3 次之外,其它每一接触状态的节理均随机选择 3 组进行重复试验(3 次),其中:偶合节理峰值剪切强度的最大偏差为 2.84% 、非偶合节理峰值剪切强度的最大偏差为 4.32% 。重复试验结果表明所采用的节理具有很好的一致性,得到的规律性结果具有相当高的可信度(表 3~5)。

2 试验结果与分析

以 A 组节理为例,不同接触状态节理的剪切应力-位移曲线见图 1。根据试验结果可知:在相同的法向应力下,峰值剪切强度随错开位移量的增加而减少;峰值剪切位移总体上随错开位移量的增加而增加;偶合节理一般存在峰后软化现象,而非偶合节理一般不存在这一现象(但节理单个面的形貌是一样的)。图 2 为 J-I 节理在不同接触状态下的磨损/破坏区域(法向应力为 3.0 MPa),可以明显的看出随错开位移量的增加,剪切/破坏区域逐步减少(从侧面说明随错开位移量的增加,节理接触区域减少)。



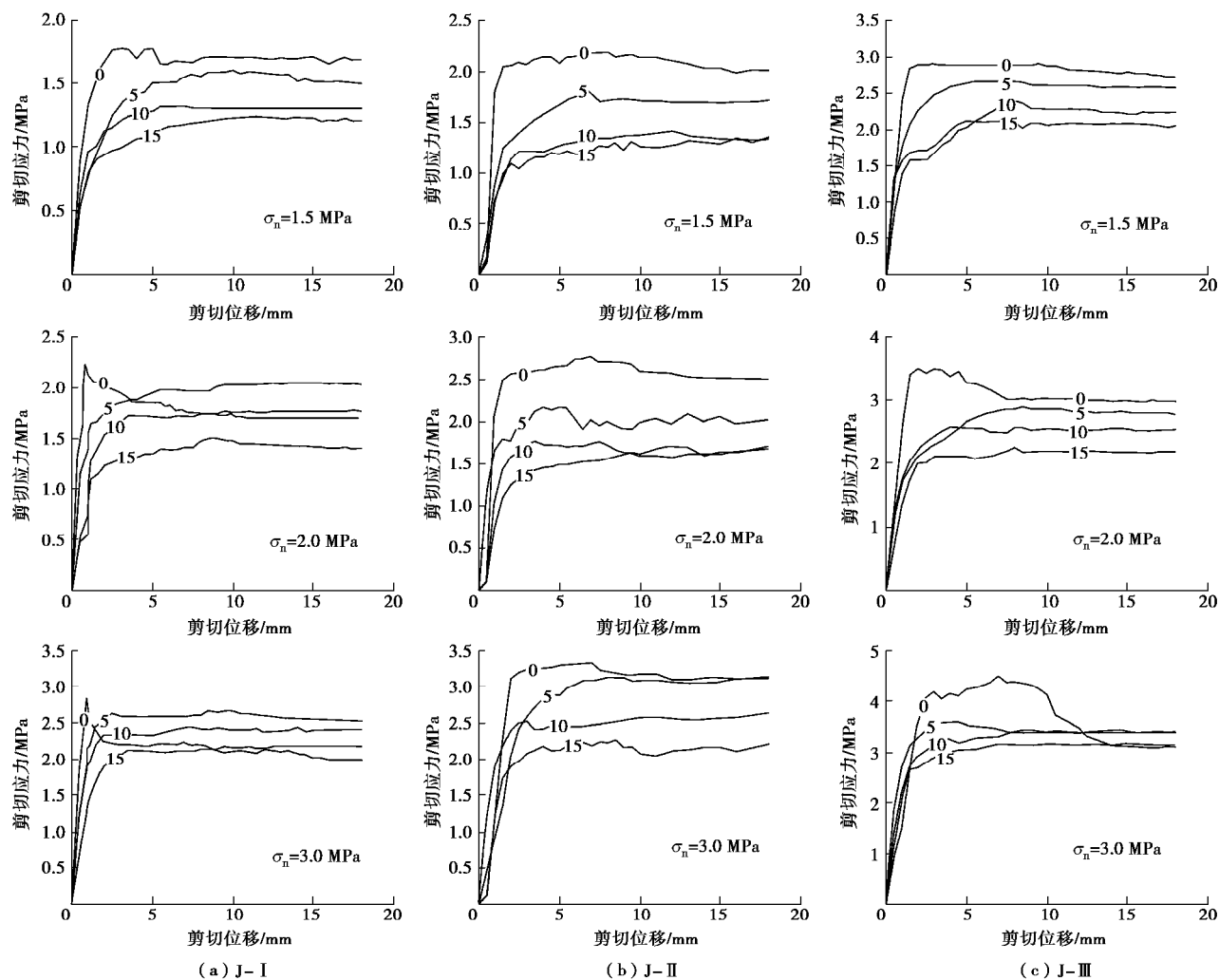


图 1 不同接触状态下节理的剪切变形曲线 (以 A 组为例)

Fig. 1 Shear stress versus shear displacement for three groups of joints under varying dislocations (Group A)

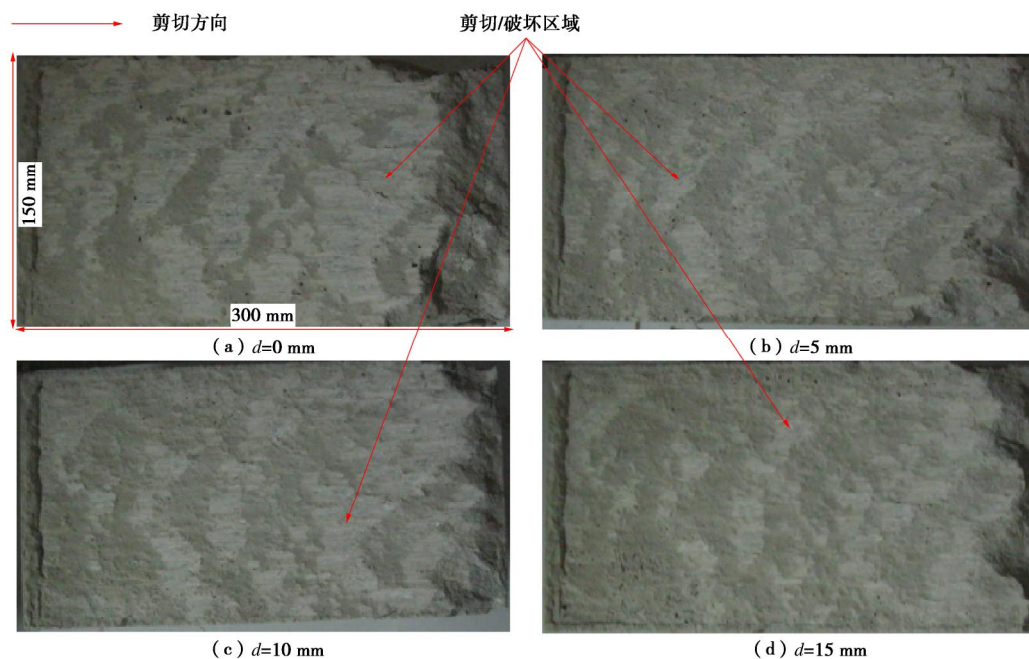


图 2 不同接触状态下节理形貌的剪切/破坏图 (以 J-I 为例)

Fig. 2 Post-test joint surfaces under different contact states (J-I)

表 3 A 组节理的峰值剪切强度及其剪切位移

Table 3 Peak shear strengths and corresponding peak shear displacements for Group A

节理	法向应 力/MPa	不同错开位移量下的峰值剪切强度/MPa				对应的峰值剪切位移/MPa				平直节理的剪切 强度/MPa
		0 mm	5 mm	10 mm	15 mm	0 mm	5 mm	10 mm	15 mm	
J-I	0.5	0.85	0.67	0.55	0.43	4.87	3.43	3.01	4.15	0.35
	1.0	1.19	1.03	0.88	0.71	3.54	4.08	3.39	3.87	0.70
	1.5	1.77	1.51	1.32	1.19	2.88	2.59	3.14	3.22	1.05
	2.0	2.24	2.00	1.74	1.52	1.08	2.00	3.26	2.99	1.40
	3.0	2.84	2.52	2.33	2.12	0.97	2.32	2.14	3.31	2.10
J-II	0.5	1.13	0.93	0.73	0.50	3.35	3.07	3.99	4.72	0.35
	1.0	1.75	1.25	1.00	0.75	2.46	2.88	3.02	3.64	0.70
	1.5	2.20	1.70	1.24	1.23	2.89	3.11	3.87	3.51	1.05
	2.0	2.78	2.11	1.78	1.55	2.07	3.08	4.32	3.74	1.40
	3.0	3.34	2.70	2.50	2.20	1.49	3.08	2.69	3.66	2.10
J-III	0.5	1.78	1.18	1.01	0.88	3.67	3.44	2.91	3.33	0.35
	1.0	2.42	1.89	1.80	1.67	2.51	3.05	3.74	4.36	0.70
	1.5	2.89	2.66	2.39	2.12	3.08	3.27	3.29	4.01	1.05
	2.0	3.51	2.91	2.68	2.27	3.24	2.66	3.88	4.29	1.40
	3.0	4.20	3.61	3.38	3.15	2.91	2.53	3.94	3.55	2.10

表 4 B 组节理的峰值剪切强度及其剪切位移

Table 4 Peak shear strengths and corresponding peak shear displacements for Group B

节理	法向应 力/MPa	不同错开位移量下的峰值剪切强度/MPa				对应的峰值剪切位移/MPa				平直节理的剪切 强度/MPa
		0 mm	2 mm	4 mm	8 mm	0 mm	2 mm	4 mm	8 mm	
J-IV ^{+,B}	0.40	0.418	0.326	0.289	0.268	3.87	3.08	4.25	4.00	0.240
	0.80	0.793	0.708	0.655	0.503	4.02	5.06	3.88	3.89	0.481
	1.20	1.106	0.967	0.912	0.827	2.69	3.07	4.41	4.50	0.721
	1.60	1.442	1.257	1.033	0.970	2.78	3.33	4.29	4.05	0.961
	2.00	1.709	1.554	1.387	1.241	1.84	1.97	2.26	3.87	1.202
J-IV ⁻	0.40	0.391	0.328	0.267	0.248	3.54	4.11	4.08	5.27	0.240
	0.80	0.726	0.637	0.557	0.511	3.29	3.03	3.88	4.67	0.481
	1.20	1.117	0.903	0.842	0.764	2.83	3.25	3.67	4.08	0.721
	1.60	1.406	1.207	1.006	0.965	3.44	3.07	3.57	3.87	0.961
	2.00	1.669	1.449	1.362	1.229	2.71	2.84	4.07	4.11	1.202
J-V ^{+,B}	0.40	0.601	0.441	0.325	0.276	4.37	3.89	4.24	4.17	0.240
	0.80	0.984	0.771	0.634	0.506	4.08	4.85	4.56	5.07	0.481
	1.20	1.483	1.187	0.864	0.801	3.88	4.22	4.67	4.43	0.721
	1.60	1.857	1.445	1.285	1.156	3.97	4.02	4.14	4.69	0.961
	2.00	2.230	1.893	1.653	1.435	3.61	3.54	3.99	4.27	1.202
J-V ⁻	0.40	0.552	0.467	0.421	0.394	4.13	3.74	4.36	4.57	0.240
	0.80	0.934	0.726	0.653	0.600	4.07	4.33	4.29	4.91	0.481
	1.20	1.367	1.007	0.896	0.825	3.57	4.01	4.24	5.07	0.721
	1.60	1.706	1.442	1.139	1.004	3.66	3.84	4.06	4.67	0.961
	2.00	2.008	1.773	1.525	1.366	3.19	3.77	4.29	4.58	1.202

表 5 C 组节理的峰值剪切强度及其剪切位移

Table 5 Peak shear strengths and corresponding peak shear displacements for Group C

节理	法向应力/MPa	不同错开位移量下的峰值剪切强度/MPa				对应的峰值剪切位移/MPa				平直节理的剪切强度/MPa
		0 mm	2 mm	4 mm	8 mm	0 mm	2 mm	4 mm	8 mm	
J-IV ^{+,C}	0.20	0.154	0.123	0.101	0.093	4.10	4.38	4.91	5.55	0.089
	0.40	0.288	0.226	0.193	0.185	3.48	4.07	4.21	5.08	0.179
	0.60	0.442	0.374	0.322	0.284	2.94	4.33	4.67	5.08	0.268
	0.80	0.568	0.483	0.422	0.374	3.07	3.77	3.64	4.02	0.358
	1.00	0.703	0.588	0.526	0.497	3.01	3.35	4.2	4.07	0.477
J-V ^{+,C}	0.20	0.215	0.187	0.143	0.122	3.94	4.66	4.91	5.67	0.089
	0.40	0.400	0.324	0.287	0.223	3.65	3.94	4.67	4.93	0.179
	0.60	0.562	0.487	0.433	0.400	3.27	4.06	4.22	4.68	0.268
	0.80	0.687	0.537	0.467	0.443	3.66	3.72	4.08	4.29	0.358
	1.00	0.843	0.728	0.653	0.627	4.12	3.46	3.86	4.77	0.477

注: ⁺ forward direction; ^C Group C

图 3 为 J-I 节理在不同法向应力下的剪切刚度随错开位移量的变化图 (d 为错开位移量, L 为节理试件沿剪切方向长度)。随错开位移量的增加, 同一法向应力下剪切刚度逐渐降低且趋于某个常值 (说明错开位移量对剪切刚度的影响逐步减弱); 在高法向应力下, 错开位移量对节理剪切刚度变化的影响更大。

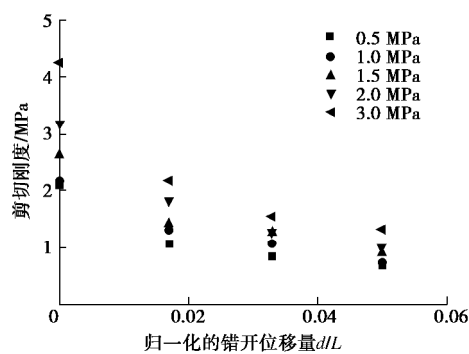


图 3 不同法向应力下剪切刚度随错开位移量的变化趋势图 (以 J-I 为例)

Fig. 3 Variation of shear stiffness with normalized dislocation under different levels of normal stresses (J-I)

图 4 为不同接触状态下节理的峰值剪切强度 (以 J-IV^{+,C} 为例), 可以看出: 随错开位移量的增加, 其对峰值剪切强度的影响逐步减弱; 低法向应力下, 错开位移对峰值剪切强度的影响更为明显。采用多种简单函数 (如线性函数、双曲线函数、对数函数和指数函数等) 拟合峰值剪切强度与归一化错开位移量的关系, 发现双曲线函数的拟合效果最好。

3 峰值剪切强度准则

3.1 新准则

由试验结果分析可知: 偶合节理的峰值剪切强度

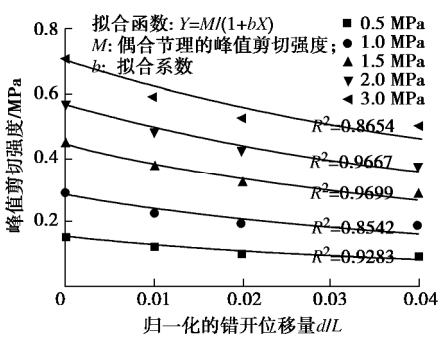


图 4 不同接触状态节理的峰值剪切强度 (J-IV^{+,C})

Fig. 4 Variation of peak shear strength for rock joints with varying dislocation (J-IV^{+,C})

是不同接触状态节理峰值剪切强度的最大值, 且随错开位移量的增加, 峰值剪切强度呈非线性降低且逐步趋于稳定; 法向应力、错开位移量等均影响节理的峰值剪切强度。另一方面, 笔者及其合作者提出过描述偶合节理峰值剪切强度的准则^[6], 并得到了大量岩石节理峰值剪切强度试验值的验证。图 4 揭示了不同接触状态节理峰值剪切强度的演化规律, 在偶合节理峰值剪切强度准则的基础上 (参见文献[6]) 并坚持拟合系数个数最少化的原则, 可将不同接触状态节理的峰值剪切强度准则写为 (为量纲对称, 采用 s_n/s_t , 而非 s_n)

$$t_p = \frac{1}{1+B(s_n/s_t)k} \cdot s_n \tan \left\{ j_b + \frac{4A_0 q_{\max}^*}{C+1} \left[1 + \exp \left(-\frac{1}{9A_0} \cdot \frac{q_{\max}^*}{C+1} \cdot \frac{s_n}{s_t} \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

式中, t_p 为峰值剪切强度, B 为待定系数, k 为归一化的错开位移量, $k=d/L$ 。

对上述 180 组试验结果进行多元回归分析确定待

定系数 B (以计算偏差平方和最小的原则确定该系数), 并尝试将回归结果与节理的三维粗糙度指标相关联, 最终得到的不同接触状态节理峰值剪切强度准则见式 (2)。当 $k=0$ 时, 式 (2) 即为偶合节理的峰值剪切强度计算公式。图 5 所示为式 (2) 计算值与试验值的比较, 计算偏差平方和为 7.27。

$$t_p = \frac{1}{1 + [2A_0 q_{\max}^* / (C+1)] \cdot \frac{s_n}{s_t} \cdot k} \cdot s_n \tan \left\{ j_b + \frac{4A_0 q_{\max}^*}{C+1} \left[1 + \exp \left(-\frac{1}{9A_0} \cdot \frac{q_{\max}^*}{C+1} \cdot \frac{s_n}{s_t} \right) \right] \right\} \quad (2)$$

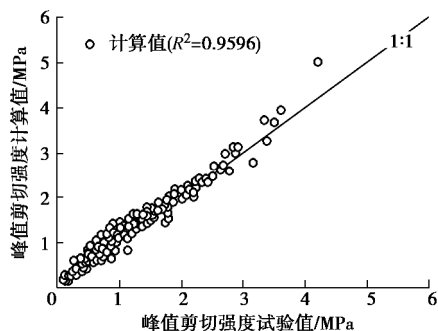


图 5 计算值与试验值的比较

Fig. 5 Comparison between calculated values by criteria and experimental ones

3.2 讨 论

目前, 文献中报道的用于估算非偶合节理峰值剪切强度的准则主要有 JRC-JMC 准则^[10]、Oh 准则^[11], 分别见式 (3)、(4)。除了评价节理粗糙度的 JRC 法本身存在一定的局限^[12,13]之外, 这两个准则还各有缺陷: 不易确定 JMC 的准确值 (文献[10]建议通过观测节理上、下面壁的接触确定 JMC, 这是非常困难的, 而且极其不客观); 对不规则节理, 很难确定空腔的高度和凸起体的高度 (表明该准则不适用于非规则节理)。而新准则采用的是三维形貌参数, 能够较为全面的体现节理形貌对其剪切力学性质的影响, 且是通过客观计算得到的; 此外, 新准则中采用的描述节理接触状态的参数 \square 是可以定量确定的。

$$t_p = s_n \tan \left[j_r + JMC \cdot JRC \lg \left(\frac{JCS}{s_n} \right) \right] \quad (3)$$

$$t_p = s_n \tan \left\{ j_r + JRC \lg \left[\frac{JCS}{s_n} \left(1 - \frac{d_n}{2A_{mp}} \right) \right] \right\} \quad (4)$$

式中, j_r 为残余摩擦角, JCS 为节理面壁强度, d_n 为空腔高度, A_{mp} 为齿状节理凸起体高度。

4 结 论

对偶合节理的上、下面壁错开不同的位移量、形

成不同的接触状态以模拟不同偶合度的节理, 系统研究接触状态对节理剪切力学性质的影响。常法向应力条件下的直剪试验表明: ①随错开位移量的增加, 节理的峰值剪切强度呈非线性下降 (双曲线), 且对应的峰值剪切位移也增加; 随法向应力的增加, 错开位移对峰值剪切强度的影响逐步减弱; ②剪切刚度随错开位移量的增加而逐步减少且逐步趋于某一常值, 剪切刚度的降低速率逐步下降 (即错开位移对剪切刚度的影响逐步减弱); ③相同法向应力作用下, 节理面的磨损/剪切面积随错开位移量的增加而逐步减少。

通过多元回归分析 180 组直剪试验数据, 在偶合节理峰值剪切强度准则的基础上提出不同接触状态节理的峰值剪切强度准则。新准则采用归一化的错开位移量 (d/L) 表征节理的接触特征, 与确定 JMC、 d_n 或 A_{mp} 相比更容易确定, 且更为客观。考虑到提出的准则是基于试验结果的经验公式, 且采用的材料类型有限, 建议在后续的研究中逐步完善相关的研究。

参考文献:

- [1] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joint in theory and practice[J]. Rock Mechanics, 1977, **10**(1): 1 - 54.
- [2] PATTON F D. Multiple modes of shear failure in rock[C]// Proceedings of the 1st Congress of International Society for Rock Mechanics. Lisbon, 1966.
- [3] LADANYI B, ARCHAMBAULT G. Simulation of the shear behavior of a jointed rock mass[C]// Proceedings of the 11th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). Berkeley, 1969: 105 - 125.
- [4] KULATILAKE P H S W, SHOU G, HUANG T H, et al. New peak shear strength criteria for anisotropic rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 1995, **32**(7): 673 - 697.
- [5] GRASSELLI G, EGGER P. Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2003, **40**(1): 25 - 40.
- [6] XIA C C, TANG Z C, XIAO W M, et al. New peak shear strength criterion of rock joints based on quantified surface description[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, **47**(2): 387 - 400.
- [7] 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. (TANG Zhi-cheng, XIA Cai-chu, SONG Ying-long, et al. Discussion about Grasselli's peak shear strength criterion for rock joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

- Engineering, 2012, **31**(2): 356 - 364. (in Chinese))
- [8] 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. (YANG Jie, RONG Guan, CHENG Long, et al. Experimental study of peak shear strength of rock joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(5): 884 - 894. (in Chinese))
- [9] ZHAO J. Joint surface matching and shear strength part A: Joint matching coefficient (JMC) [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1997, **34**(2): 173 - 178.
- [10] ZHAO J. Joint surface matching and shear strength part B: JRC-JMC shear strength criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1997, **34**(2): 179 - 185.
- [11] OH J, KIM GW. Effect of opening on the shear behavior of a rock joint[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2010, **69**(3): 389 - 395.
- [12] BEER A J, STEAD D, COGGAN J S. Estimation of the joint roughness coefficient (JRC) by visual[J]. Rock Mech Rock Eng, 2002, **35**(1): 65 - 74.
- [13] HONG E S, LEE J S, LEE I M. Underestimation of roughness in rough rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 2008, **32**(11): 1385 - 1403.
- [14] TANG Z C. Mechanical behaviors of rock joint under different contact state and columnar jointed rock mass[D]. Shanghai: Tongji University, 2013.
- [15] TANG Z C, LIU Q S, XIA C C, et al. Mechanical model for predicting closure behavior of rock joints under normal stress[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, **47**(6): 2287 - 2298.
- [16] GRASSELLI G, WIRTH J, EGGER P. Quantitative three-dimensional description of a rough surface and parameter evolution with shearing[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, **39**(6): 789 - 800.
- [17] TATONE B S A, GRASSELLI G. A method to evaluate the three-dimensional roughness of fracture surfaces in brittle geomaterials[J]. Review Scientific Instrument, 2009, **80**(12): 125110.

岩土工程西湖论坛(2018): 岩土工程变形控制设计理论与实践 (2018年10月26~28日 杭州) 一号通知

随着我国基本建设工程的进一步推进,岩土工程的难点问题日益突出,传统按承载力设计方法逐渐过渡为考虑变形控制设计,而相关理论也日益成熟,工程实践则更为丰富。为顺应国家和社会需求,拟定于2018年10月26~28日在杭州召开“岩土工程西湖论坛(2018): 岩土工程变形控制设计理论与实践”学术讨论会,将对近年来在岩土工程变形控制设计理论与实践领域中取得的相关进展进行广泛讨论,以期为全国从事相关技术研究和工程实践的学者和工程师提供交流平台,并邀请各有关单位、学者和工程技术人员踊跃参加。

会议主题: 岩土工程变形控制设计理论与实践

出版专著: 本次会议拟围绕主题“岩土工程变形控制设计

理论与实践”出版专著一部(暂定中国建工出版社出版),由龚晓南院士担任主编,现征集国内同行参编章节,内容涉及建筑工程、基坑工程、隧道工程、道路工程、边坡工程等,每章节字数2万~3万字,可根据需要适当增减。如有兴趣,请在2018年1月31日前与组委会联系并提交内容提要及节目安排。

提交全文时间: 2018年5月31日

出版发行时间: 2018年9月

岩土工程西湖论坛组委会联系人: 陆水琴(0571-88208775, lusq87@163.com), 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心网址: <http://www.zjdxyt.com>。

(大会组委会 供稿)