

DOI: 10.11779/CJGE201508006

一种考虑剪切速率的粗糙结构面剪切强度准则

王 刚^{1, 2}, 张学朋¹, 蒋宇静¹, 张永政^{1, 2}

(1. 山东科技大学矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590; 2. 山东省土木工程防灾减灾重点实验室
(山东科技大学), 山东 青岛 266590)

摘要: 动荷载(不同剪切速率)下的节理岩体结构稳定性是目前工程建设亟待解决的问题之一。以黄岛国家石油储备库地下水封石油洞库工程为工程背景, 采用JAW-600岩石剪切流变-渗流耦合试验机对4种粗糙度下的类岩石粗糙结构面进行不同剪切速率下的常规剪切试验, 对结构面的强度特性进行了基础性研究。研究结果表明: 剪切速率和粗糙度对结构面剪切强度都有较为明显的影响; 同一结构面的剪切强度随着剪切速率的增大而减小, 并不受粗糙度系数的影响; 同时结构面剪切强度随粗糙度系数增加呈现出线性增加的趋势, 但不受剪切速率的影响。最后, 基于试验结果与Barton模型, 提出考虑剪切速率的粗糙结构面剪切强度模型。Barton标准粗糙剖面线结构面及粗糙结构面的试验结果与新模型预测值误差保持在20%之内, 平均误差为10.539%, 能够较好的预测粗糙结构面动荷载条件下剪切强度。

关键词: 岩石结构面; 剪切速率; 粗糙度; 剪切强度准则; 直接剪切试验

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)08-1399-06

作者简介: 王 刚(1976-), 男, 山东阳谷人, 博士, 副教授, 主要从事岩石力学与工程方面的科研与教学工作。E-mail: wanggang1110@gmail.com。

New shear strength criterion for rough rock joints considering shear velocity

WANG Gang^{1, 2}, ZHANG Xue-peng¹, JIANG Yu-jing¹, ZHANG Yong-zheng^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: The stability of jointed rock under dynamic loading conditions, which is under different shear velocities, is one of the urgent problems in the current engineering construction. By using JAW-600 coupled shear-flow machine, four groups of rock-like joints with different roughness coefficients are sheared with different shear velocities based on the rock joints from the underground caverns of Huangdao State Oil Reserves. The experimental results show that the shear velocity and joint roughness coefficient obviously affect the shear strength. The shear strength for any rough rock joints decreases with the increasing shear velocity. Meanwhile, the shear strength under any shear velocity shows a linear increase with the joint roughness coefficients. On the basis of the experimental data and Barton's criterion for shear strength, a new shear strength criterion considering shear velocity for rough rock joints is proposed. Then its correctness is verified by the shear strength of rock joints proposed by Barton with an average estimation error of 10.539%.

Key words: rock joint; shear velocity; roughness; peak shear strength criterion; direct shear test

0 引言

能源、交通、矿山、水利和国防建设工程, 如黄岛国家石油储备库地下水封石油洞库工程、金沙江流域洛渡、向家坝、白鹤滩、乌东德水力枢纽工程, 位于雅砻江的锦屏Ⅰ、Ⅱ级水利枢纽工程, 位于大渡河的瀑布沟水利枢纽工程等, 都建设在岩体中, 其工程设计、施工、稳定性评价等都直接依赖于节理岩体的强度、变形、渗透性、破坏特征和加固措施等力学特性。同时, 由于中国位于世界两大地震带—环太平洋

地震带和欧亚大陆地震带之间, 区域地震十分活跃和频繁。从荷载特性上来看, 地震既是动荷载又是循环荷载。一般情况下, 节理岩体在循环荷载和动荷载(不同剪切速率)作用下的力学特性往往与静荷载作用下有较大的区别。因此, 循环荷载和动荷载作用下这些

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279097, 51479108, 51379117);
山东科技大学研究生创新基金项目(YC140357)

收稿日期: 2014-09-18

大型工程的地下岩体结构稳定性成为当前工程建设亟待解决的难点问题之一。

20世纪70年代, Dowing等^[1]、Owen等^[2]指出地震荷载作用下地下洞室安全稳定性问题。此后多位学者针对节理岩体在循环荷载及动荷载条件下的稳定性展开了一定的研究,如Jaeger^[3]、Jing等^[4]、Kana等^[5]、Lee等^[6]、Jafari等^[7]、李海波等^[8]。

本构模型是进行理论计算和数值模拟的重要基础。岩石结构面的本构模型自Patton提出了齿形节理的双线性模型后^[9],又有许多剪切强度准则相继提出,如Ladanyi等^[10]、Barton等^[11]等,而上述模型是准静态条件下所建立的。对于循环荷载和动荷载条件,多位学者基于试验结果及弹塑性理论分析,各种剪切强度本构模型相继提出,如Jing L^[4]的循环剪切本构模型、Kana等^[5]的互锁-摩擦模型、Lee等^[6]的考虑“二阶粗糙度”的弹塑性本构模型、Qiu等^[7]的弹塑性本构模型、Souley等^[12]的基于Saeb-Amadei模型的节理循环加载模型等等。但上述模型存在着一些缺陷,如Souley的节理循环加载模型由于未考虑节理磨损,模型曲线与试验曲线有较大差异, Huang等^[13]、尹显俊等^[14-15]做过类似的工作; Qiu的弹塑性本构模型中由于模型参数较多且无法表征节理的峰值剪切强度,不能准确描述循环剪切的应力-位移曲线变化过程。

从总体上来看,目前循环荷载作用下岩石节理力学特性的研究工作不多,有限的工作大都集中在力学特性随剪切循环次数变化的趋势性分析方面,而动荷载(剪切速率)的变化对节理力学特性的研究尚处在初始阶段,缺乏针对不同剪切速率及粗糙节理面粗糙度等影响的研究,涉及法向应力影响的研究也只是初步的分析工作。

本文以黄岛国家石油储备库地下水封石油洞库工程为工程背景,选取4种不同的粗糙度的岩石结构面,通过类岩石材料的方法进行试样制作,进行了不同剪切速率下的常规剪切试验,对粗糙结构面的强度特性进行了基础性研究。分析了结构面剪切强度与剪切速率及粗糙度系数的关系,并基于试验结果和Barton模型,提出考虑剪切速率的粗糙结构面剪切强度模型。

1 试验设备及试样制备

1.1 试验设备

剪切试验是在山东科技大学研制的JAW-600岩石剪切流变-渗流耦合试验系统上进行的。试验机关键技术指标主要体现在垂直加载单元、水平加载单元及其伺服控制部分,渗流加载单元及其伺服稳压系统。垂直和水平方向的最大荷载可达600 kN,荷载加载速

率最小最大分别达0.01 kN/s和100 kN/s,位移加载速度(位移控制)最小最大分别达0.01 mm/min和100 mm/min,位移控制稳定时间为10 d,其测量控制精度达到示值的±1%;最大剪切量程可达25 mm。

1.2 试样制备

岩体结构的复杂性使得采用真实岩体材料开展试验时,对试验结果的解释往往变得非常复杂。为了克服这个困难,在试验中采用类岩石材料。岩样取自在建的黄岛国家石油储备库地下水封石油洞库工程,试件尺寸为20 cm×10 cm×10 cm,通过劈裂形成粗糙结构面,并采用Revscan岩石结构表面三维形貌激光扫描仪获取结构面形貌,计算结构面平均JRC^[16],以此来选取四组结构面作为研究对象,平均JRC分别为3.61, 8.16, 10.61, 19.05, 标号为S1, S2, S3, S4。模型材料选用32.5R水泥、细砂、水以及减水剂,采用正交设计试验确定质量配合比为水泥:细砂:水:减水剂=1:1:0.3:0.005。制备方法及试样如图1所示,为保证模型试件的质量,模型成型后24 h拆模,在标准养护条件下养护28 d后进行试验。

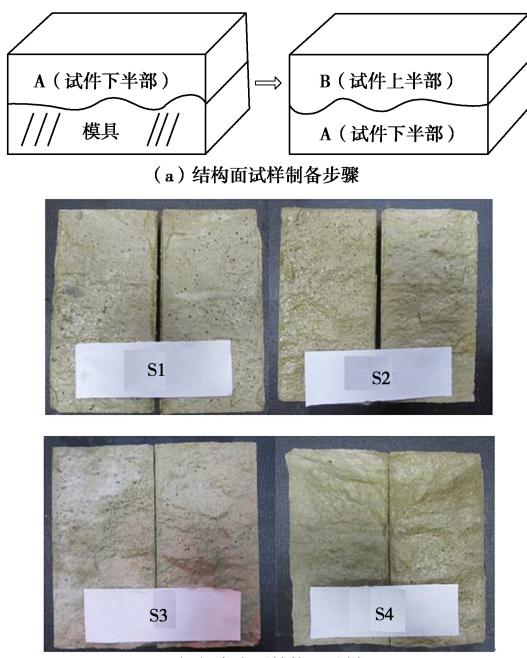


图1 试样制备步骤及类岩石材料结构面

Fig. 1 Moulding method for rock joints and four types of rock-like joints

1.3 试验方法

为研究粗糙结构面在不同剪切速率下的力学特性,本试验选用具有不同粗糙度系数的粗糙结构面在不同的剪切速率下进行常规剪切试验,在进行剪切试验之前,需要首先确定施加荷载的大小及材料的基本力学参数。因此首先必须制备圆柱试样,进行单轴压缩试验,获取类岩石材料的单轴抗压强度;此外,在后续的理论模型研究中,节理面的基本摩擦角是一重

要研究要素, 因此需制备平滑节理面, 通过不同法向应力下的剪切试验获取类岩石材料结构面的基本摩擦角。

用于剪切试验的试件分为 3.61, 8.16, 10.61, 19.05 粗糙度系数的结构面 4 种类型, 每种类型的试件分别进行 5 种剪切速率下的常规剪切试验。Jing 指出结构面的剪切强度与作用在结构面上的法向应力呈现出线性关系^[4], 因此, 剪切速率和粗糙度是本文中的两个主要考虑因素。孙广忠^[17]指出粗糙干净节理的静态加载速率极限值为 0.01 mm/s, 同时考虑到试验机的稳定性问题。因此, 本文中剪切速率选取 0.6 mm/min (0.01 mm/s), 1.2 mm/min, 6 mm/min, 12 mm/min 和 24 mm/min。由于本文重点考虑剪切速率和粗糙度系数的影响, 为减小法向应力对试验结果的影响, 法向应力选取为 0.05 倍的单轴抗压强度。

2 结构面强度分析

通过对 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 类岩石圆柱试样进行单轴压缩试验, 得到其单轴抗压强度为 41.80 MPa。通过平滑节理面的直接剪切试验得到材料的基本摩擦角为 36.05° , 如图 2 所示。按照 1.3 节所述加载方式, 本文进行了一系列不同剪切速率下的结构面常规剪切试验, 剪切强度值如表 1 所示。

表 1 不同剪切速率下粗糙结构面剪切强度

Table 1 Shear strengths of rock-like joints under different shear velocities

剪切速率 $/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	试件 编号	剪切强 度/MPa	剪切速率 $/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	试件 编号	剪切强 度/MPa
0.6	S1-1	2.679	1.2	S1-2	2.525
	S2-1	3.280		S2-2	3.087
	S3-1	3.582		S3-2	3.257
	S4-1	5.053		S4-2	4.975
6.0	S1-3	2.458	12.0	S1-4	2.283
	S2-3	3.041		S2-4	2.736
	S3-3	3.210		S3-4	2.839
	S4-3	4.514		S4-4	4.212
24.0	S1-5	2.244		S1-6	2.150
	S2-5	2.597		S2-6	2.480
	S3-5	2.642		S3-6	2.550
	S4-5	4.101		S4-6	3.950

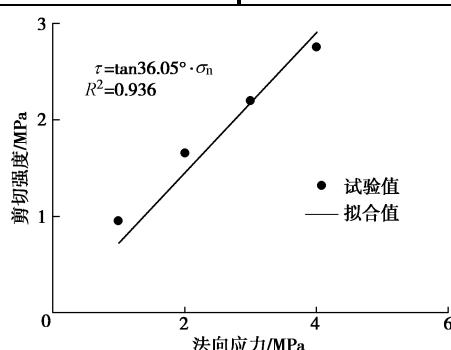


图 2 平滑节理面基本摩擦角

Fig. 2 Basic friction angle of smooth rock-like joint

2.1 剪切速率对剪切强度的影响

对于齿形结构面, 李海波等^[8]研究表明试样峰值剪切强度随着剪切速率的增加有明显的减小趋势。图 3 为 4 组粗糙结构面剪切强度随剪切速率的变化趋势。

图 3 可以看出, 同一结构面的剪切强度随着剪切速率的增大而减小, 当剪切速率从 0.6 mm/min 增加到 24 mm/min, 剪切强度下降分别为 16.237% (S1)、20.823% (S2), 26.242% (S3), 18.405% (S4), 这一变化趋势并不受粗糙度系数的影响, 且这一降低率要高于齿形结构面剪切强度的降低量 10%^[8], 这是由于粗糙结构面上二级粗糙凸体更易受到剪切速率的影响造成的; 并且相邻剪切速率下剪切强度的下降率随剪切速率增加而有所降低。

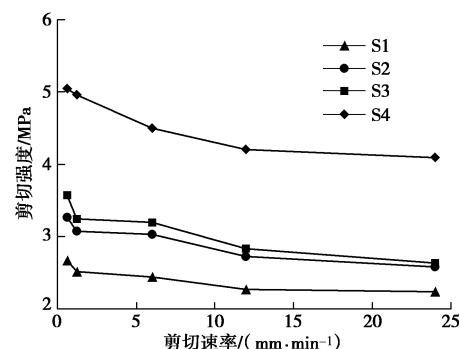


图 3 剪切强度随剪切速率的变化关系

Fig. 3 Relation between shear strength of rock-like joints and shear velocity

2.2 粗糙度对剪切强度的影响

图 4 所示为各剪切速率条件下结构面剪切强度随粗糙度系数的变化趋势。由图 4 可知, 结构面剪切强度随着结构面粗糙度的增大出现明显的增加趋势, 当粗糙度系数从 3.61 增加到 19.05 时, 结构面剪切强度分别增加了 88.615% (0.6 mm/min), 97.030% (1.2 mm/min), 83.645% (6.0 mm/min), 84.494% (12 mm/min), 82.754% (24 mm/min); 并且这一增加趋势呈现出明显的线性关系, 其基本拟合结果如图 4 所示, 这一线性关系并不受剪切速率的影响。

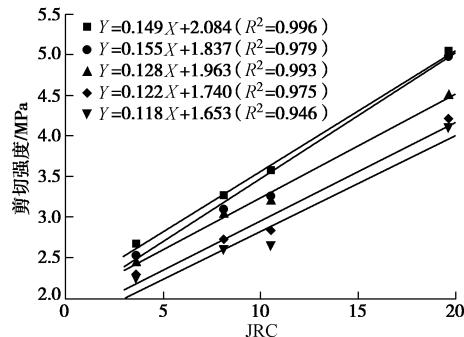


图 4 剪切强度随粗糙度的变化关系

Fig. 4 Relation between shear strength of rock-like joints and joint roughness coefficients (JRC)

3 考虑剪切速率的剪切强度准则及验证

3.1 剪切强度准则

1977 年 Barton 根据大量的试验, 在统计分析的基础上提出了 CNL 边界条件下的经验公式, 同时考虑了正应力和不规则结构面表面特征对剪切强度的影响, 是目前应用最为广泛的强度公式^[11]。Barton 结构面剪切强度 τ 的经验公式如下:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\phi_b + JRC_0 \lg \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right], \quad (1)$$

式中, σ_n 为施加在结构面上的法向应力 (MPa), JRC_0 为结构面初始粗糙度系数, ϕ_b 为平滑结构面基本摩擦角 (°), JCS 为节理面壁抗压强度 (MPa)。 JCS 与节理面的风化程度有关, 未风化节理面的抗压强度可选为完整岩石的单轴抗压强度^[18]。

由于法向应力与结构面剪切强度值之间存在线性的关系^[4, 8], 并根据试验结果, 考虑到粗糙度和剪切速率的影响, 同时假设基本摩擦角保持不变, 现将式 (1) 改进如下形式:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\phi_b + g(JRC_0) \lg \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right] f(v), \quad (2)$$

式中, $g(\cdot)$ 为剪切速率影响下的结构面粗糙度函数, $f(v)$ 为关于剪切速率的函数, v 为剪切速率。

式 (2) 中考虑粗糙度系数和剪切速率两种因素, 因此对试验结果采用单因素分析法进行拟合, 得到式

(2) 的准确形式。首先对 $f(v)$ 进行校核。为了消除粗糙度系数的影响, 第一步需要将强度值进行归一化处理。其基本计算过程为

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \tau_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \tau_{33} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \tau' &= \begin{bmatrix} \tau'_{11} & \tau'_{12} & \tau'_{13} \\ \tau'_{21} & \tau'_{22} & \tau'_{23} \\ \tau'_{31} & \tau'_{32} & \tau'_{33} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \tau_{11} / \tau_{11} & \tau_{12} / \tau_{11} & \tau_{13} / \tau_{11} \\ \tau_{21} / \tau_{11} & \tau_{22} / \tau_{11} & \tau_{23} / \tau_{11} \\ \tau_{31} / \tau_{11} & \tau_{32} / \tau_{11} & \tau_{33} / \tau_{11} \end{bmatrix}, \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau'' &= \begin{bmatrix} \tau''_{11} & \tau''_{12} & \tau''_{13} \\ \tau''_{21} & \tau''_{22} & \tau''_{23} \\ \tau''_{31} & \tau''_{32} & \tau''_{33} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \tau'_{11} / \tau'_{11} & \tau'_{12} / \tau'_{11} & \tau'_{13} / \tau'_{11} \\ \tau'_{21} / \tau'_{21} & \tau'_{22} / \tau'_{21} & \tau'_{23} / \tau'_{21} \\ \tau'_{31} / \tau'_{31} & \tau'_{32} / \tau'_{31} & \tau'_{33} / \tau'_{31} \end{bmatrix}. \quad (5) \end{aligned}$$

归一化结果如表 2 所示。在校核 $f(v)$ 函数时, 将式 (2) 简化为

$$\tau = G(\sigma_n, JRC_0) f(v), \quad (6)$$

式中, $G(\sigma_n, JRC_0) = \sigma_n \tan[\phi_b + g(JRC_0) \lg(JCS / \sigma_n)]$ 。

对归一化结果采用最小二乘法进行拟合 (图 5), 得到归一化剪切强度与剪切速率存在明显的指数衰减关系, 并且拟合系数高达 0.97, 其表达式为

$$f(v) = 0.982 v^{-0.06}. \quad (7)$$

表 2 结构面归一化的剪切强度值

Table 2 Normalized shear strength of rock-like joints

试样 编号	剪切速度/(mm·min ⁻¹)				
	0.6	1.2	6.0	12.0	24.0
S1	1.000	0.943	0.918	0.852	0.838
S2	1.000	0.941	0.927	0.834	0.792
S3	1.000	0.909	0.896	0.792	0.738
S4	1.000	0.985	0.893	0.834	0.812

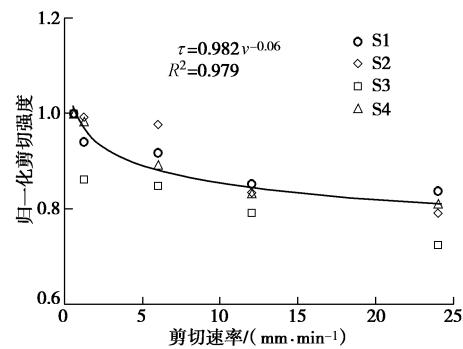


图 5 归一化剪切强度随剪切速率的变化关系

Fig. 5 Relation between normalized shear strength of rock-like joints and shear velocity

确定好 $f(v)$ 关系式之后, 进一步对剪切速率对结构面粗糙度的影响 $g(JRC_0)$ 进行分析校核, 将式 (7) 代入式 (2) 中, 并对式 (2) 进行形式转化得到如下表达式:

$$T = g(JRC_0) = \frac{\arctan \frac{\tau}{0.982 \cdot \sigma_n \cdot v^{-0.06}} - \phi_b}{\lg \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right)}. \quad (8)$$

并根据 T 与粗糙度系数的关系来求解 $g(JRC_0)$ 的表达式, 由于 T 本身已经消除了剪切速率的影响, 因此不需要对结果再进行归一化处理。表 3 列出了不同粗糙度系数下的 T 值, 并且根据最小二乘法原理得到 T 值与 JRC 之间同样存在明显的指数关系 (拟合系数同样高达 0.97), 如图 6 所示。则 T 的表达式为

$$T = 4.970 (JRC_0)^{0.475}. \quad (9)$$

表3 不同JRC下的T值

Table 3 Values of T under different joint roughness coefficients (JRC)

试样 编号	剪切速度/(mm·min ⁻¹)				
	0.6	1.2	6.0	12.0	24.0
S1	12.883	11.632	11.059	9.463	9.095
S2	16.997	15.801	16.500	13.324	12.227
S3	18.681	16.859	16.573	14.094	12.593
S4	24.508	24.273	22.739	21.585	21.216

将式(7)、(9)代入式(2)中, 得到一种考虑剪切速率的粗糙结构面剪切强度关系式, 其表达式为

$$\tau = 0.982\sigma_n \tan \left[\phi_b + 4.970(JRC_0)^{0.475} \lg \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right] \cdot v^{-0.06} \quad (10)$$

3.2 模型验证

为了验证新准则的有效性, 采用 Barton 提出的标准粗糙度剖面对其进行验证。验证试样选取粗糙度系数为 2~4, 10~12 以及 14~16 三组剖面线, 标号为 B1, B2 和 B3。通过标准粗糙度剖面数据制作钢模并进行类岩石结构面制作, 同时通过激光扫描仪对类岩石材料结构面形貌信息进行反扫描, 计算得到更为准确的结构面粗糙度系数, 其计算结果列于表 4 中。

同时表 4 中还列出了各剪切速率下不同结构面的剪切强度试验值及 Barton 模型和新强度准则的预测值, Barton 模型预测值与剪切速率 0.6 mm/min (极限静载剪切速率) 的剪切强度试验值进行对比。此外,

表4 不同剪切速率下结构面剪切强度试验值与模型预测值

Table 4 Experimental results and criterion estimations by Barton's model and new criterion of rock-like joints under different shear velocities

试样 编号	JRC 理论值	JRC 计算值	剪切速率 (mm·min ⁻¹)	剪切强度/MPa				误差/%
				试验值	JRC-JCS 模型	新强度 准则	JRC-JCS 模型	
B1	2-4	3.67	0.6	2.547	1.727	2.257	32.162	11.378
			1.2	2.380		2.165		9.027
			6.0	2.174		1.966		9.592
			12.0	2.041		1.886		7.594
			24.0	1.653		1.809		9.453
B2	10-12	11.05	0.6	3.352	2.427	3.050	27.607	10.407
			1.2	2.864		2.925		12.128
			6.0	2.632		2.656		15.197
			12.0	2.507		2.547		16.641
			24.0	2.184		2.444		5.461
B3	14-16	15.10	0.6	3.864		3.462		9.046
			1.2	3.779		3.321		2.114
			6.0	3.555	2.945	3.015	17.163	0.891
			12.0	3.469		2.892		1.623
			24.0	2.935		2.774		11.897
S1	3.61		0.6	2.679	1.723	2.249	35.684	16.047
			1.2	2.525		2.157		14.564
			6.0	2.458		1.959		20.321
			12.0	2.283		1.879		17.695
			24.0	2.244		1.802		19.701
平均值							28.154	10.539

表4 还给出了新旧强度模型预测值与试验值的误差。

表 4 中还列出校核公式所用的粗糙结构面 S1 组的试验强度值。从表 4 中可以明显的看出, 虽然新强度准则的预测值要低于试验值, 但其误差保持在 20% 之内, 平均误差为 10.539%, 明显低于 Barton 模型对静态剪切下预测值的误差值。因此, 式(10)能够较好预测地粗糙结构面动荷载条件下的剪切强度值。

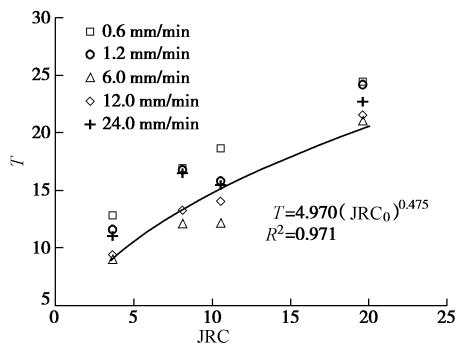


图 6 T 值随结构面粗糙度系数变化关系

Fig. 6 Relation between T and joint roughness coefficients of rock-like joints

4 结语

本文以黄岛国家石油储备库地下水封石油洞库工程为工程背景, 选取 4 种不同的粗糙度的岩石结构面, 通过类岩石材料的方法进行试样制作, 进行了不同剪切速率下的常规剪切试验, 对结构面的强度特性进行

了基础性研究。

试验结果表明: 同一结构面的剪切强度随着剪切速率的增大而减小, 这一变化趋势并不受粗糙度系数的影响, 且相邻剪切速率下剪切强度的下降率随剪切速率增加而有所降低; 同时结构面剪切强度随粗糙度系数增加呈现出线性增加的趋势。

在 Barton 模型和试验结果基础上, 提出了考虑剪切速率的粗糙结构面的剪切强度公式。同时利用 Barton 提出的标准粗糙剖面试件及粗糙结构面的剪切试验结果对新强度公式进行了验证, 模型对不同剪切速率下的结构面预测值偏低, 但是误差保持在 20% 之内, 平均误差为 10.539%, 能够较好预测地粗糙结构面动荷载条件下的剪切强度值。

参考文献:

- [1] DOWDING C H, ROZEN A. Damage to rock tunnels from earthquake loading[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE, 1978, **104** (GT2): 175 – 191.
- [2] OWEN G N, SCHOLL R E. Earthquake engineering of large underground structures[J]. John A Blume San Francisco, 1981.
- [3] JAEGER J C. Friction of rocks and stability of rocks slopes[J]. Geotechnique, 1971, **21**(2): 97 – 134.
- [4] JING L, STEPHANSSON O, NORDLUND E. Study of rock joints under cyclic loading conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1993, **26**(3): 215 – 232.
- [5] KANA D D, FOX D J, HSIUNG S M. Interlock/friction model for dynamic shear response in natural jointed rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1996, **33**(4): 371 – 386.
- [6] LEE H S, PARK Y J, CHO T F, et al. Influence of asperity degradation on the mechanical behavior of rough rock joints under cyclic shear loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, **38**(7): 967 – 980.
- [7] QIU X, PLESHAI M E, HUANG X. An investigation of the mechanics of rock joints-part II: Analytical investigation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1993, **30**(3): 271 – 287.
- [8] 李海波, 冯海鹏, 刘博. 不同剪切速率下岩石节理的强度特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(12): 2436 – 2440. (LI Hai-bo, FENG Hai-peng, LIU Bo. Study on strength behavior of rock joints under different shearing deformation velocity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(12): 2436 – 2440. (in Chinese))
- [9] PATTON F D. Multiple modes of shear failure in rock[C]// Proceedings of the 1st international congress on rock mechanic. Lisbon, 1966.
- [10] LADANY B, ARCHAMBAULT G. Simulation of shear behavior of a jointed rock mass[C]// Proceedings of 11th US symposium on rock mechanics. Berkeley, 1970.
- [11] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock Mechanics, 1977, **10**: 1 – 54.
- [12] SOULEY M, HOMAND F, AMADEI B. An extension to the Saeb and Amadei constitutive model for rock joints to include cyclic loading paths[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1995, **32**(2): 101 – 109.
- [13] HUANG X A, Laboratory study of the mechanical behavior of rock joints with particular interest to dilatancy and asperity surface damage mechanism[D]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 1990.
- [14] 尹显俊, 王光纶, 张楚汉. 岩体结构面切向循环加载本构关系研究[J]. 工程力学, 2005, **22**(6): 98 – 103. (YIN Xian-jun, WANG Guang-lun, ZHANG Chu-han. Study of constitutive model for rock interfaces and joints under cyclic shear loading [J]. Engineering Mechanics, 2005, **22**(6): 98 – 103. (in Chinese))
- [15] 尹显俊, 王光纶. 岩体结构面法向循环加载本构关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(7): 1158 – 1163. (YIN Xian-jun, WANG Guang-lun. Study of constitutive model for rock interfaces and joints under normal cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(7): 1158 – 1163. (in Chinese))
- [16] XIA C C, TANG Z C, XIAO W M. New peak shear strength criterion of rock joints based on quantified surface description[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, **47**: 387 – 400.
- [17] 孙广忠. 岩体力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1983. (SUN Guang-zhong. Foundation of rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1983. (in Chinese))
- [18] 赵坚. 岩石节理剪切强度的 JRC-JMC 新模型[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, **17**(4): 349 – 357. (ZHAO Jian. A new JRC-JMC shear strength criterion for rock joint[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, **17**(4): 349 – 357. (in Chinese))