

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20231008001

文章编号: 1672-9331(2025)01-0082-09

引用格式: 吴俊哲, 史振宁, 魏笑. 考虑方向性与应力状态的粉砂质泥岩节理面粗糙度系数研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2025, 22(1): 82-90.

Citation: WU Junzhe, SHI Zhenning, WEI Xiao. Investigation on roughness coefficient of silty mudstone joint surfaces considering direction and stress state [J]. J. Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2025, 22(1): 82-90.

考虑方向性与应力状态的粉砂质泥岩节理面 粗糙度系数研究

吴俊哲¹, 史振宁^{1,2}, 魏笑^{1,3}

(1. 长沙理工大学 交通学院, 长沙 410114; 2. 长沙理工大学 公路养护技术国家工程研究中心, 长沙 410114;
3. 中国交通建设股份有限公司轨道分公司, 北京 101317)

摘要:【目的】深入探究粉砂质泥岩节理面在不同剪切方向与应力状态条件下的粗糙度系数取值方法。【方法】利用粉砂质泥岩相似材料与3D打印技术制作节理面, 并开展不同应力状态下的节理面直剪试验, 同时基于Grasselli提出的节理面形貌参数考虑剪切方向性, 对粉砂质泥岩节理面抗剪强度特性进行研究。【结果】受节理面起伏程度、剪切方向以及法向应力的影响, 粉砂质泥岩节理面在剪切过程中的破坏类型有所不同, 且通过试验结果反算得到的节理面粗糙度系数 J_{RC} 较Barton等提出的 J_{RC} 经验值偏大。本文提出了考虑方向性与应力状态的粉砂质泥岩节理面粗糙度系数 J_{RC} 取值方法, 该方法的预测值与反算值误差小于10%。【结论】节理面粗糙度系数与剪切方向的起伏形态有显著关系; 随着法向应力的增加, J_{RC} 也增加但增加的速率逐渐下降; 考虑节理面剪切方向以及法向应力的 J_{RC} 取值方法可有效预测不同剪切方向与法向应力条件下的粉砂质泥岩节理面的抗剪强度。

关键词: 粉砂质泥岩节理面; 粗糙度系数; 抗剪强度; 直剪试验; 强度特性

中图分类号: U414; TU45

文献标志码: A

Investigation on roughness coefficient of silty mudstone joint surfaces considering direction and stress state

WU Junzhe¹, SHI Zhenning^{1,2}, WEI Xiao^{1,3}

(1. College of Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. National Engineering Research Center for Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Rail Transit Branch of China Communications Construction Co., Ltd., Beijing 101317, China)

Abstract: [Purposes] This paper aims to deeply investigate the method for determining the roughness coefficient of silty mudstone joint surfaces (J_{RC}) under different shear directions and stress states. [Methods] Materials similar to silty mudstone and 3D printing technology were used to fabricate joint surfaces. Direct shear tests were conducted on the joint surfaces under different stress states. Furthermore, based on the morphological parameters of joint surfaces proposed by Grasselli, the shear direction was considered to investigate the shear strength of silty mudstone

收稿日期: 2023-10-08; 修回日期: 2023-11-05; 接受日期: 2023-11-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51838001); 湖南省自然科学基金资助项目(2022JJ40491); 湖南省教育厅青年基金资助项目(22B0295)

通信作者: 史振宁(1990—)(ORCID: 0000-0001-8580-0098), 男, 副教授, 主要从事边坡稳定性方面的研究。

E-mail: shizhenning@126.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

joint surfaces. [**Findings**] The failure types of silty mudstone joint surfaces are different due to the fluctuation degree of joint surfaces, shear direction, and normal stress, and the J_{RC} value obtained by inversion of test results is larger than the empirical J_{RC} value proposed by Barton et al. In addition, a method of calculating J_{RC} value of silty mudstone joint surfaces considering direction and stress state was proposed. The error between the predicted value and the calculated value is less than 10%. [**Conclusions**] The roughness coefficient of joint surfaces has a significant relationship with the undulation pattern of shear direction. With the increase in normal stress, the J_{RC} value increases, but the rate of increase decreases. The J_{RC} value calculation method considering the shear direction and normal stress of the joint surfaces can effectively predict the shear strength of silty mudstone joint surfaces under different shear direction and normal stress conditions.

Key words: silty mudstone rock joints; roughness coefficient; shear strength; direct shear test; strength characteristics

Foundation items: Project (51838001) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2022JJ40491) supported by Natural Science Foundation of Hunan Province; Project (22B0295) supported by Youth Foundation of Hunan Provincial Department of Education

Corresponding author: SHI Zhenning (1990—)(ORCID: 0000-0001-8580-0098), male, associate professor, research interest: slope stability. E-mail: shizhenning@126.com

0 引言

粉砂质泥岩内部微裂隙发育,由其形成的路堑边坡在开挖卸荷后容易产生次生节理面,进而导致边坡岩体强度下降^[1-2],并易沿节理面发生滑动。现有研究已经证实,岩质边坡稳定性主要取决于其节理面的抗剪强度^[3-4]。因此,对粉砂质泥岩节理面的抗剪强度特性研究具有重要意义。

目前,岩石力学界针对节理面抗剪强度理论已经开展了大量研究。其中,BARTON等^[5-6]于1977年将节理面粗糙度引入抗剪强度分析中,建立了JRC-JCS模型。该模型应用广泛,得到了学术界与工程界的认可。目前,国内外许多学者针对节理面粗糙度系数 J_{RC} 的取值方法、节理面形貌提取以及三维形貌分析等开展了深入研究,该研究是当前岩体力学的研究热点之一。

目前,用于表征 J_{RC} 的参数主要包括轮廓线中线均值 C_{LA} 、轮廓线均方根 R_{MS} 、轮廓线一阶导数均方根 Z_2 、自相关函数 S_F 、Grasselli可表征方向的形貌参数 $\theta_{max}/(C+1)$ 等^[7-8]。这些参数易于获取,且具有明显的物理意义,可以较好地表征节理面粗糙度。除此之外,部分学者利用分形理论^[9],以及序列平稳性分析等开展研究。FICKER等^[10]建立了

节理面粗糙度系数 J_{RC} 与分维数的经验公式。在此基础上,BAN等^[11]、KULATILAKE等^[12]利用分维理论分析了轮廓线粗糙度,提出可采用分维数和比例常数 K_v 来表征节理面粗糙度,并表明该方法可以准确反映节理面粗糙度的各向异性。由于岩石节理面为三维形态,单纯使用二维轮廓线表征粗糙度精度存在不足,因此GRASSELLI等^[13-14]率先通过三维形貌扫描,建立了节理面微元有效剪切倾角与接触面积的统计函数关系,构建了反映岩石形貌的抗剪强度公式。陈曦等^[15]考虑不同倾角的数量权重,提出一个新的初始剪胀角公式。根据上述研究可以发现,目前三维节理面粗糙度的主要研究方法为基于多条二维轮廓线的统计分析^[16]。因此,对二维轮廓线的形貌分析仍是确定三维节理面粗糙度的基础工作与研究热点。

在试验研究方面,部分学者针对岩石节理面抗剪强度进行了深入探究。周玉鹿等^[17]结合三维激光扫描和3D打印技术,制作了人工节理试样,并依据室内试验结果与理论分析指出,影响剪胀角的因素与节理面的粗糙度系数、沿剪切方向接触面积有效系数有关。程坦等^[18]开展了不同法向应力下的岩石节理直剪试验,用形貌参数轮廓面积比表征初始剪胀角大小,并结合峰值剪胀角与法向应力、凸起抗变形能力的关系,构造了岩石节

理抗剪强度经验公式。金磊磊等^[19]通过室内试验以及模型对比,建立了含有三维形貌参数和抗拉强度参数的抗剪强度模型,并指出节理剪切是以张拉为主导的破坏模式,且随着法向应力的增大,峰值剪胀角不断减小。RAM等^[20]根据石英岩的直剪试验结果对Barton提出的原始公式进行了修正,提出了采用幂函数表示 J_{RC} 的修正公式,并指出采用该方法预测石英岩节理面抗剪强度更为准确。WU等^[21]研究了岩石节理剪切刚度在剪切过程中的演化规律,其研究表明,随着剪切位移的增大,剪切刚度逐渐减小。

综上所述,在研究岩体强度时,必须考虑节理粗糙度系数 J_{RC} 的影响。虽然当前研究主要针对三维节理面,但研究过程中仍然是提取不同滑动方向的二维轮廓线。因此,明确二维模型的粗糙度系数是表征三维粗糙度的基础。此外,相同节理在不同应力状态及不同剪切方向条件下的抗剪强度变化规律是亟待解决的关键问题之一。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

本文研究对象为湖南省洞阳镇蕉溪乡地区粉砂质泥岩,该泥岩主要成分为伊利石、石英和绿泥石。由于原岩节理面具有唯一性,难以开展重复试验,为确保试验结果可重复,当前常用的一种研究手段是人工制作节理面。研究人员多采用水泥基材料来模拟高强度硬岩节理面,但对于粉砂质泥岩而言,在不同应力状态下,节理面在滑动过程中易发生磨损、剪断等不同类型的破坏形式,因此本课题组研制了粉砂质泥岩相似材料。该材料由重晶石粉、石膏、蒙脱石粉、伊利石粉、绿泥石粉及去离子水组成,各成分质量分数见表1。本课题组前期研究^[22]已验证,该相似材料力学性质与原岩基本一致(表2),可以替代粉砂质泥岩原岩试样。

表1 粉砂质泥岩相似材料组成成分及质量分数

Table 1 Composition and mass fractions of materials similar to silty mudstone %

w (石膏)	w (重晶石)	w (蒙脱石)	w (伊利石)	w (绿泥石)	w (水)
51.14	27.46	0.68	2.05	0.68	17.99

表2 粉砂质泥岩相似材料力学性能与原岩对比

Table 2 Comparison of mechanical properties between materials similar to silty mudstone and original rock

粉砂质泥岩	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	单轴抗压 强度/MPa	抗拉强 度/MPa	弹性模 量/GPa	泊松比
原岩	2.04	12.43	2.34	1.44	0.26
相似材料	1.98	12.04	2.68	1.50	0.27

1.2 试验方案

本研究选用Barton提出的标准轮廓线中的2、4、6、8号轮廓线作为人工节理试样的表面轮廓线形貌。这4条标准轮廓线形貌如表3所示。

表3 Barton标准节理面轮廓线^[5]

Table 3 Standard joint surface profiles proposed by Barton^[5]

编号	标准轮廓线	J_{RC}
2		2~4
4		6~8
6		10~12
8		14~16

试样制作过程如下:首先,将所需轮廓线数值化,并根据GRASSELLI^[14]的建议按照0.5 mm间隔提取点坐标;其次,将数值化的轮廓线导入计算机辅助设计(computer aided design, CAD)制图软件,用三维实体模型还原节理形貌;然后,将绘制好的轮廓线转为stl格式文件,并导入Lte600HD型3D打印机,利用树脂材料打印出具有三维实体形貌的3D节理面模型,如图1所示;最后,为确保每个节理面形貌一致,将模型放入钢模具内,浇筑相似材料制作节理面试样。试样尺寸为100 mm×100 mm×100 mm。制作完成后,先将试样置于通风环境中自然养护28 d,然后再开展剪切试验,如图2所示。本文使用DZYTJLZJ-150型岩石直剪试验机进行直剪试验。该装置由微机控制室和加载室组成,如图3所示。

为分析不同应力状态下节理面的强度特性,本研究制作了具有4种不同形貌特征的不规则节理试样共32个,并开展恒定法向刚度下的直剪试验。直剪试验考虑正、反两个剪切方向(正、反剪切方向的定义如图4所示),以及4个不同等级法向应力 σ_n (分别为0.2、0.4、0.6、0.8 MPa)。该试验以恒定法向应力加载方式进行垂直加载,以等应变控制方式进行水平加载,水平加载速率为0.5 mm/min,当应力-应变曲线上出现明显的残余强度段时停

止水平加载。取应力-应变曲线中的峰值应力作为抗剪强度值。

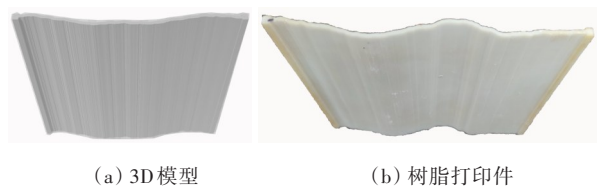


图1 轮廓线模型

Fig. 1 Profile model

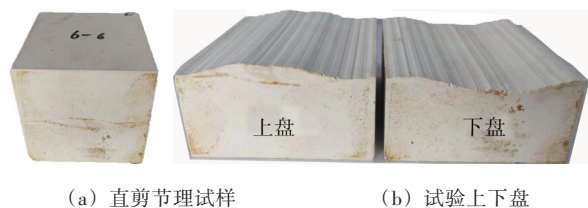


图2 制作完成的节理面试样

Fig. 2 Completed joint surface specimen

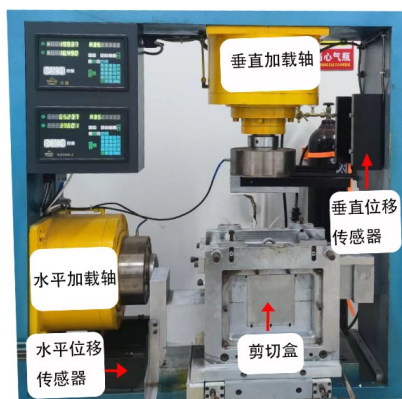


图3 节理面直剪装置

Fig. 3 Direct shear test device of joint surface

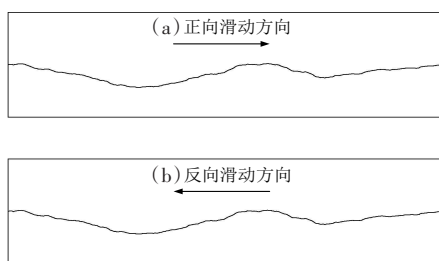


图4 节理面滑动方向

Fig. 4 Sliding direction of joint surface

2 试验结果分析

2.1 节理面抗剪强度

表4为不同剪切试验方案下的抗剪强度。从表4可以看出:在相同法向应力条件下,随着节理

面粗糙度系数 J_{RC} 的增加,抗剪强度也增加;对于相同类型节理面试样而言,随着法向应力的增加,抗剪强度也增加;对比不同方向的剪切试验可以发现,相同节理面在不同方向的剪切过程中,呈现明显的强度差异性。因此,对于岩石节理面而言,必须考虑其粗糙度的方向性,才能准确描述其抗剪强度。

表4 不同剪切方案下的抗剪强度

Table 4 Shear strength for different shear schemes

剪切 方向	法向 应力/ MPa	抗剪强度/MPa			
		2号 $J_{RC}=2\sim4$	4号 $J_{RC}=6\sim8$	6号 $J_{RC}=10\sim12$	8号 $J_{RC}=14\sim16$
正	0.2	0.41	0.50	0.67	1.14
	0.4	0.76	0.92	1.12	1.85
	0.6	1.05	1.25	1.37	2.27
	0.8	1.28	1.59	1.62	2.67
反	0.2	0.34	0.50	0.72	1.13
	0.4	0.64	0.86	1.20	1.76
	0.6	0.87	1.21	1.38	2.17
	0.8	1.13	1.52	1.78	2.61

2.2 J_{RC} 反算结果分析

目前,应用范围最广的节理面抗剪强度理论是Barton等提出的JRC-JCS理论^[5],其理论公式如式(1)所示:

$$\tau = \sigma_n \tan [J_{RC} \log_{10} (J_{CS}/\sigma_n) + \varphi_r] \quad (1)$$

式中: τ 为抗剪强度; σ_n 为节理面上的法向应力; J_{RC} 为节理面粗糙度系数; J_{CS} 为节理面单轴抗压强度; φ_r 为基本摩擦角。

本研究根据从粉砂质泥岩直剪试验中获得的抗剪强度反算 J_{RC} ,同时将 J_{RC} 反算值与Barton提出的 J_{RC} 经验值进行对比(表5)。由于自制相似材料节理面没有出现风化现象,故认为节理面强度与材料自身单轴抗压强度一致。因此,粉砂质泥岩节理面单轴抗压强度 J_{CS} 取值为12.04 MPa。 φ_r 根据平滑节理面剪切试验取值为 31.5° 。

由表5可知,根据本试验得到的 J_{RC} 反算值与Barton提出的 J_{RC} 经验值有明显差异。在不同试验条件下,不同节理面粗糙度系数 J_{RC} 的反算值均远超对应经验值。虽然Barton的强度公式中给出了 J_{CS} 指标,考虑了岩石强度对节理面的影响,但对于如粉砂质泥岩一类的较软岩,该公式不完全适用。根据大量已有研究成果发现,JRC-JCS理论大多应用于硬岩节理面分析,且试验对象多为大理岩、石

灰岩,花岗岩等。由此可见,对于粉砂质泥岩大量分布地区,如果采用传统理论分析路堑开挖卸荷所形成的岩体节理面抗剪强度,会导致 J_{RC} 预测值小于实际值。因此,有必要根据粉砂质泥岩节理面的直剪试验结果,对 J_{RC} 的取值方法进行优化。

表5 不同剪切试验方案得到的 J_{RC} 反算值

Table 5 J_{RC} values obtained from different shear schemes by inversion

轮廓线	法向应力/ MPa	J_{RC} 反算值		Barton提出的 J_{RC} 经验值
		正向	反向	
2号	0.2	18.6	16.1	2~4
	0.4	21.1	18.4	
	0.6	22.5	18.7	
	0.8	23.0	20.2	
4号	0.2	20.9	20.8	6~8
	0.4	24.0	23.1	
	0.6	25.7	25.1	
	0.8	27.4	26.5	
6号	0.2	23.8	24.5	10~12
	0.4	26.6	27.4	
	0.6	27.1	27.3	
	0.8	27.8	29.6	
8号	0.2	27.8	27.6	14~16
	0.4	31.7	31.3	
	0.6	34.0	33.5	
	0.8	36.0	35.7	

根据表5中的 J_{RC} 反算值并对比轮廓线可以看出:随着轮廓线起伏幅度的增加, J_{RC} 也在逐渐增加;对于相同的节理面轮廓而言,正向与反向的 J_{RC} 反算值存在一定的差异,即对于相同轮廓线而言,节理面粗糙度存在显著的方向性,单一的 J_{RC} 无法准确表现轮廓粗糙度的方向性。这主要是因为节理面在不同剪切方向的倾角分布状态并不相同,而在剪切过程中倾角的大小又是控制抗剪强度的重要因素之一。该结论在ZHANG等^[23]、GRASSELLI等^[13]的成果中也有表述,并且他们提出可以引用剪切方向的倾角标准差 $Z_{2\sigma}$ 或方向参数 η 来表征节理面粗糙度的方向性。本研究采用 η 参数来表征 J_{RC} 的方向性,如式(2)所示。

$$\eta = \theta_{\max}^* / (C + 1) \quad (2)$$

式中: η 为方向参数; $\theta_{\max}^*$ 为滑动方向最大角; C 为形状参数,可通过式(3)拟合得到。

$$L_{\theta^*} = L_0 \left(\frac{\theta_{\max}^* - \theta^*}{\theta_{\max}^*} \right)^C \quad (3)$$

式中: θ^* 为剪切方向上的角度阈值; L_{θ^*} 为滑动方向小于指定度数的倾角投影的累计长度; L_0 为剪切方向上 θ^* 为 0° 时的节理面归一化长度。

L_{θ^*} 考虑了剪切方向的倾角分布,故通过式(3)可拟合得到形状参数 C 。将参数 C 带入式(1),计算得到参数 η ,以表征节理面粗糙度的方向性。各参数的具体取值方式如图5所示,基于上述各项参数并利用最小二乘法拟合得到 C 值。标准节理面轮廓线参数值见表6。

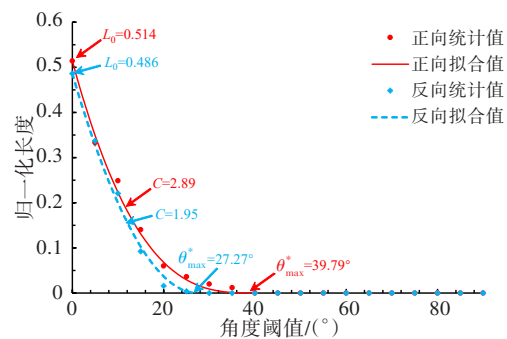


图5 C值拟合方法

Fig. 5 Fitting methods for C-values

表6 标准节理面轮廓线参数值

Table 6 Parameters of standard joint surface profiles

轮廓线	方向	L_0	$\theta_{\max}^* / (^\circ)$	C	η
2号	正	0.514	39.79	2.89	10.23
	反	0.486	27.27	1.95	9.24
4号	正	0.471	47.10	2.51	13.42
	反	0.529	35.58	1.85	12.48
6号	正	0.458	41.16	1.99	13.77
	反	0.542	34.04	1.39	14.20
8号	正	0.534	41.32	1.72	15.79
	反	0.466	39.06	1.69	14.52

图6为方向参数 η 与节理粗糙度系数 J_{RC} 反算值的拟合曲线。从图6可以看出,随着方向参数 η 的增加, J_{RC} 反算值也不断增加,二者有着较好的线性拟合关系,如线性公式(4)所示。因此,通过计算节理面不同方向上的 η 可以估测不同方向的 J_{RC} 。

$$J_{RC} = 1.890 1 \eta + 0.836 9 \quad (4)$$

图7为试样剪切后的剪切面破坏形态。图8为不同法向应力下的 J_{RC} 反算值。由图8可以看出,随着法向应力的增加, J_{RC} 呈增大趋势,但变化

幅度较小。通过观察试样剪切后的节理面状态可知,产生上述现象的主要原因是,当法向应力不断增加时,节理面在剪切过程中存在局部凸起磨损与剪断等破坏形式。因此,对于强度较低的粉砂质泥岩而言,其节理面剪切破坏过程主要包括滑移、磨损、剪断三种情况。而对于硬岩而言,仅存在低法向应力下的滑移及高法向应力下的局部剪断两种情况。因此,粉砂质泥岩节理面在剪切过程中的破坏机理非常复杂,这导致 J_{RC} 存在显著的应力相关性。

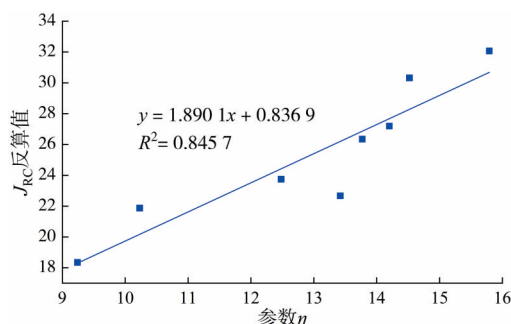


图6 参数 η 与 J_{RC} 反算值拟合关系

Fig. 6 Fitted relationship between parameter η and J_{RC} value by inversion

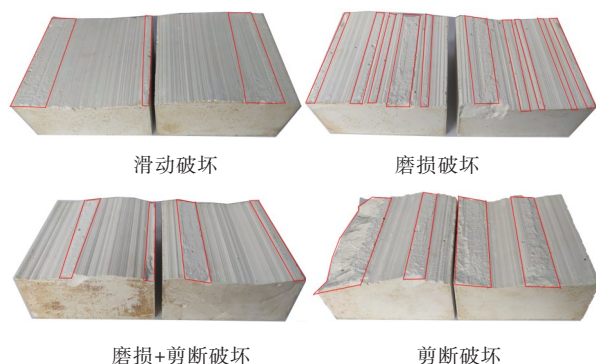


图7 剪切面破坏形态

Fig. 7 Damage pattern of shear surface

为分析不同法向应力条件下粉砂质泥岩 J_{RC} 与法向应力的相关性,本文给出了两者之间的关系图(图8),并在表7中采用对数函数对节理面轮廓线的 J_{RC} 反算值进行拟合。从图8可以看出,对于相同节理面轮廓线而言, J_{RC} 反算值随法向应力的增加呈增大趋势,但增加幅度逐渐减小。这是因为较低法向应力对剪切过程中的约束较小,节理面破坏模式为沿节理面起伏滑动,而高应力状态对剪切约束较大,当法向应力达到一定程度后,较大的起伏也会发生剪坏,所以剪胀角降低, J_{RC} 增

长幅度逐渐减小。此外,对比不同节理面轮廓线可知,随着轮廓线起伏程度的增加, J_{RC} 反算值随着法向应力的增加呈增长趋势,且增长幅度逐渐增加。其主要原因为对于较平滑节理面而言,在不同应力状态剪切过程中破坏模式存在转变,但并不明显,而对于较粗糙节理面,从低法向应力的滑动破坏模式到高法向应力的剪断破坏模式转变较大,因此造成了 J_{RC} 反算值的增加幅度较大。

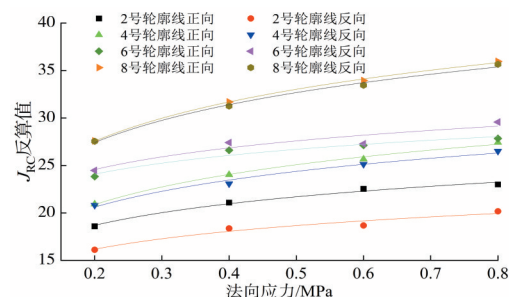


图8 不同法向应力条件下的 J_{RC} 反算值

Fig. 8 J_{RC} value under different normal stress conditions by inversion

表7 法向应力 σ_n 与 J_{RC} 的函数关系

Table 7 Relationship between normal stress σ_n and J_{RC}

轮廓线	方向	函数关系($A \ln \sigma_n + B$)	R^2
2号	正	$J_{RC} = 3.2796 \ln \sigma_n + 23.976$	0.99
	反	$J_{RC} = 2.7215 \ln \sigma_n + 20.555$	0.95
4号	正	$J_{RC} = 4.5851 \ln \sigma_n + 28.258$	0.99
	反	$J_{RC} = 4.1069 \ln \sigma_n + 27.224$	0.98
6号	正	$J_{RC} = 2.8536 \ln \sigma_n + 28.681$	0.95
	反	$J_{RC} = 3.2934 \ln \sigma_n + 29.873$	0.89
8号	正	$J_{RC} = 5.9708 \ln \sigma_n + 37.166$	0.99
	反	$J_{RC} = 5.7347 \ln \sigma_n + 36.656$	0.99

2.3 考虑应力状态和方向的 J_{RC} 拟合式

为分析方向与应力状态对 J_{RC} 的共同影响,将表7中的对数函数系数 A 、 B 与方向参数 η 建立联系,如图9所示。从图9可以看出,随着方向参数 η 的增加,对数函数系数 A 、 B 均呈线性增加趋势,因此可以将表7中对数函数系数 A 、 B 采用 η 表示,如式(5)所示。

$$J_{RC} = (0.48\eta - 1.7) \ln \sigma_n + 2.34\eta - 1.3 \quad (5)$$

图10为依据式(5)计算得到的考虑应力状态与方向的 J_{RC} 预估结果。从图10可以看出,根据拟合公式(5)预估的 J_{RC} 随应力的变化趋势与试验反算值的基本一致,即随着法向应力的增加, J_{RC} 呈逐步增加趋势,但增加的幅度不断减小,最终

趋于平缓。此外,随着 η 的增加,法向应力变化对 J_{RC} 的影响也愈加明显。对图10进一步分析可知:当 η 较小时,节理面起伏程度较小,增加法向应力对凸起的剪断作用可以忽略不计;而当 η 继

续增加时,节理面起伏程度也增加,此时低应力条件下的剪切使节理面发生滑动或磨损;当法向应力增大到一定程度后,一些较大凸起会在剪切过程中断裂,此时黏聚力对 J_{RC} 的增加起到了促进作用;当所有凸起均被剪坏时, J_{RC} 不再随法向应力的增加而显著增加。事实上,式(5)的提出主要基于粉砂质泥岩材料的试验结果,其中各系数的意义与岩石类型等因素相关联。因此,后续将继续对其他类型的岩石开展研究,从而扩展该预估模型的适用范围。

2.4 试验结果验证

由于工程中某些位置岩体易产生张拉节理面,因此本文以粉砂质泥岩劈裂试验后所得的节理面为例,对提出的节理面强度估算方法进行验证。首先,利用粉砂质泥岩相似材料制作圆柱形试样,并采用WDW-20劈裂试验机对试样进行劈裂试验(图11),得到典型的劈裂截面;其次,利用巨影 SencePlus 手持式3D扫描设备对试样进行全景扫描(图12),得到试样表面的三维网格图(图13);然后,将该网格数据导入数值提取软件,提取典型轮廓特征,得到二维截面;最后,利用提取到的二维截面制作3D打印模具,完成剪切试样的制作。

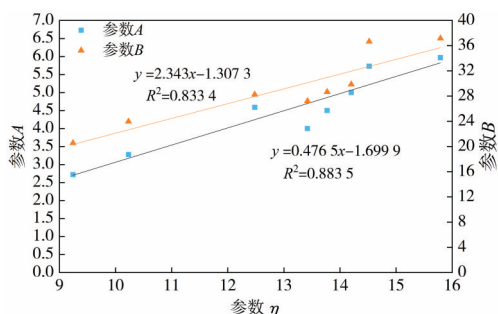


图9 预估模型参数拟合

Fig. 9 Parameter fitting of prediction model

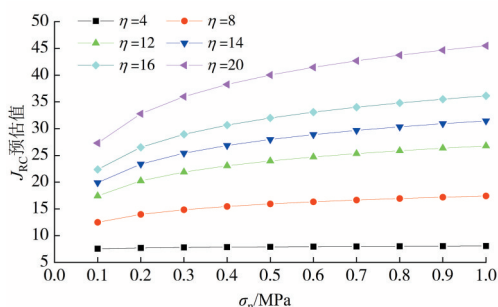


图10 考虑应力状态与方向的 J_{RC} 预估结果

Fig. 10 J_{RC} prediction results considering stress state and direction



图11 粉砂质泥岩劈裂试验装置

Fig. 11 Splitting test of silty sandy mudstone



图12 表面形貌3D扫描过程

Fig. 12 3D scanning process of surface morphology

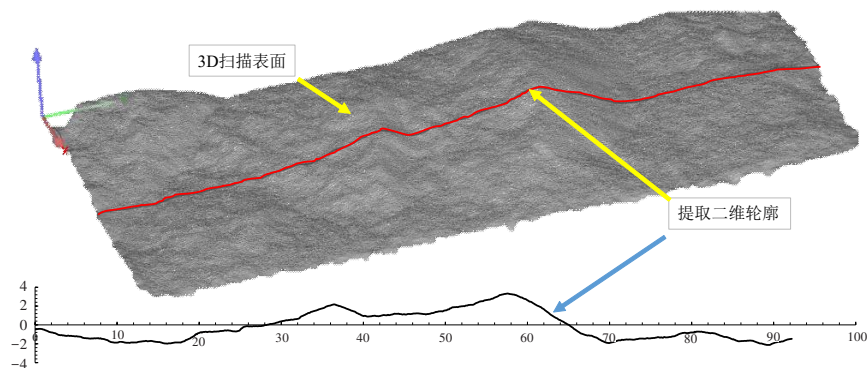


图13 劈裂后试样表面形貌与二维轮廓取样

Fig. 13 Surface morphology and 2D profile sampling of split specimens

目前,本研究主要聚焦在二维节理面,因此可从节理面上提取任一二维轮廓并用于典型轮廓分析。将从自然劈裂的节理面中提取的轮廓线采用相同的方法进行3D打印,根据前文1.2节所述方案制作直剪试样,并在相同试验方案下开展剪切试验,得到抗剪强度与 J_{RC} 反算值。

J_{RC} 预估值与反算值之间的差值及相对误差见表8。由表8可以看出,粉砂质泥岩自然劈裂后的典型破坏面的粗糙度系数预估值与试验反算值符合较好,误差均小于10%,证明本研究所提理论可以较好地应用于粉砂质泥岩节理面强度预测。

表8 自然劈裂节理面 J_{RC} 值

Table 8 J_{RC} value of naturally split joint surface

η	应力/ MPa	峰值抗剪 强度/MPa	J_{RC}		差值	相对误差/%
			反算值	预估值		
12.47 (正向)	0.2	0.56	22.15	20.98	-1.17	5.3
	0.4	1.13	24.91	23.95	-0.96	3.9
	0.6	1.32	26.62	25.69	-0.93	3.5
	0.8	1.69	28.67	26.92	-1.75	6.1
14.40 (反向)	0.2	0.61	22.99	24.00	1.01	4.4
	0.4	1.03	25.53	27.62	2.09	8.2
	0.6	1.41	27.58	29.73	2.15	7.8
	0.8	1.85	30.26	31.23	0.97	3.2

3 结论

本研究以Barton给出的经典轮廓线为例,基于JRC-JCS理论并利用节理面直剪试验,研究了不同剪切方向、不同法向应力条件下的粉砂质泥岩节理面粗糙度系数 J_{RC} 的取值方法。主要结论如下:

1) 粉砂质泥岩节理面粗糙度系数 J_{RC} 在不同方向上存在差异。由试验结果可知,利用 η 参数可以表征 J_{RC} 的方向性差异。

2) 粉砂质泥岩节理面在不同法向应力条件下会产生不同的破坏形式,在低应力状态下主要呈现滑动、磨损破坏形式,随着法向应力的增加,则逐渐呈现磨损+剪断以及剪断破坏形式。

3) 粉砂质泥岩节理面粗糙度系数 J_{RC} 具有明显的应力相关性,即随着法向应力的增加, J_{RC} 也增加,但增加速率逐渐下降,二者近似呈对数关系。

4) 通过对劈裂试验形成的粉砂质泥岩节理面进行计算,验证了本研究提出的 J_{RC} 取值方法的有

效性。该研究成果在提高含节理面的粉砂质泥岩岩体稳定性分析精度方面具有参考价值。

[参考文献]

- [1] 鲜振兴, 许旭堂, 杨枫, 等. 循环荷载对单裂隙岩体疲劳损伤的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(2): 125-136. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20221116003.
- [2] 张贵金, 宋伟, 何学春, 等. 裂隙岩体边坡开挖渠道脉动灌浆预加固措施论证[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(4): 32-43. DOI: 10.19951/j.cnki.cslgdxxbzkb.2021.04.006.
- [3] 孙朝斌, 陈从新, 郑允, 等. 加锚隐伏顺层岩质边坡滑剪破坏分析方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(10): 2456-2465. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2023.0127.
- [4] 王乐华, 黄天柱, 李建林, 等. 含结构面高陡边坡开挖卸荷应力响应物理模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(8): 1866-1877. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.1067.
- [5] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice [J]. Rock Mechanics, 1977, 10(1): 1-54. DOI: 10.1007/BF01261801.
- [6] BARTON N, WANG C S, YONG R. Advances in joint roughness coefficient (JRC) and its engineering applications [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(12): 3352-3379.

- DOI: 10.1016/j.jrmge.2023.02.002.
- [7] KULATILAKE P H S W, ANKAH M L Y. Rock joint roughness measurement and quantification: a review of the current status[J]. *Geotechnics*, 2023, 3(2): 116-141. DOI: 10.3390/geotechnics3020008.
- [8] ZOU C J, LI J, WU Y, et al. 2D and 3D evaluation of joint roughness exposed by rock cores[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2023, 82(8): 316. DOI: 10.1007/s10064-023-03325-x.
- [9] MARSCH K, FERNANDEZ-STEGER T M. Comparative evaluation of statistical and fractal approaches for JRC calculation based on a large dataset of natural rock traces[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(4): 1897-1917. DOI: 10.1007/s00603-020-02348-0.
- [10] FICKER T. Fractal properties of joint roughness coefficients [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 94: 27-31. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2017.02.014.
- [11] BAN L R, ZHU C, QI C Z, et al. New roughness parameters for 3D roughness of rock joints[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(6): 4505-4517. DOI: 10.1007/s10064-018-1394-3.
- [12] KULATILAKE P H S W, DU S G, ANKAH M L Y, et al. Non-stationarity, heterogeneity, scale effects, and anisotropy investigations on natural rock joint roughness using the variogram method[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(8): 6121-6143. DOI: 10.1007/s10064-021-02321-3.
- [13] 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. DOI: 10.1016/S1365-1609(02)00070-9.
- [14] GRASSELLI G. Manuel rocha medal recipient shear strength of rock joints based on quantified surface description [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2006, 39(4): 295-314. DOI: 10.1007/s00603-006-0100-0.
- [15] 陈曦, 曾亚武, 孙翰卿, 等. 岩石节理峰值抗剪强度新模型[J]. *岩土力学*, 2018, 39(增刊2): 123-130. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1024.
- CHEN Xi, ZENG Yawu, SUN Hanqing, et al. A new peak shear strength model of rock joints[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(Sup. 2): 123-130. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1024.
- [16] GE Y F, LIN Z S, TANG H M, et al. Estimation of the appropriate sampling interval for rock joints roughness using laser scanning [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(5): 3569-3588. DOI: 10.1007/s10064-021-02162-0.
- [17] 周玉鹿, 袁维, 徐江, 等. 基于三维重构的原岩硬性结构面抗剪强度[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(33): 14852-14860. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2022.33.038.
- ZHOU Yulu, YUAN Wei, XU Jiang, et al. Shear strength of hard structural plane of raw rock based on 3D reconstruction [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(33): 14852-14860. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2022.33.038.
- [18] 程坦, 郭保华, 孙杰豪, 等. 非规则岩石节理峰值剪切试验与强度经验公式研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(1): 93-105. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.0364.
- CHENG Tan, GUO Baohua, SUN Jiehao, et al. A strength empirical formula of irregular rock joints based on peak shear test [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(1): 93-105. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.0364.
- [19] 金磊磊, 魏玉峰, 黄鑫, 等. 基于节理面三维形貌的岩石节理抗剪强度计算模型[J]. *岩土力学*, 2020, 41(10): 3355-3364. DOI: 10.16285/j.rsm.2019.2074.
- JIN Leilei, WEI Yufeng, HUANG Xin, et al. Shear strength calculation model of rock joints based on three-dimensional morphology of joint surface [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(10): 3355-3364. DOI: 10.16285/j.rsm.2019.2074.
- [20] RAM B K, BASU A. A modified JRC-JCS model and its applicability to weathered joints of granite and quartzite [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(8): 6089-6099. DOI: 10.1007/s10064-019-01531-0.
- [21] WU X Z, ZHENG H F, JIANG Y J, et al. Effect of cyclic shear loading on shear performance of rock bolt under different joint roughness [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(3): 1969-1980. DOI: 10.1007/s00603-022-03174-2.
- [22] FU H Y, QI S X, SHI Z N, et al. Mixing ratios and cementing mechanism of similar silty mudstone materials for model tests [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021(1): 2426130. DOI: 10.1155/2021/2426130.
- [23] ZHANG X B, JIANG Q H, CHEN N, et al. Laboratory investigation on shear behavior of rock joints and a new peak shear strength criterion [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(9): 3495-3512. DOI: 10.1007/s00603-016-1012-2.

(责任编辑:刘平;校对:彭三军)