

DOI: 10.11779/CJGE201405009

# 节理的剪切力学性质与含三维形貌参数的剪切强度准则比较研究

唐志成<sup>1,2</sup>, 刘泉声<sup>1</sup>, 刘小燕<sup>1</sup>

(1. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘 要:** 利用水泥砂浆材料浇注 3 组不同表面形貌的节理试件, 由常法向应力下的直剪试验研究节理的剪切力学性质, 并分析法向应力、三维形貌特征对抗剪强度的影响。直剪试验结果表明: 峰值剪胀角与法向应力成反变化关系, 与粗糙程度呈正变化关系; 峰值抗剪强度与法向应力、粗糙程度均呈正变化关系。分析了 JRC-JCS 准则计算值偏低的原因, 根据试验现象建议采用三维形貌参数、抗拉强度描述节理的剪切强度。对比分析了含三维形貌参数的峰值抗剪强度准则, 建议低法向应力水平下采用双曲线形式的峰值剪切强度准则估算岩石节理的峰值抗剪强度。

**关键词:** 节理; 三维形貌参数; 抗拉强度; 抗剪强度准则

中图分类号: TU459.2; O319.56

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2014)05 - 0873 - 07

**作者简介:** 唐志成(1983 - ), 男, 博士, 主要从事岩石节理的力学性质、软弱围岩“锚注”机理等方面的研究与教学工作。E-mail: tangzhichengok@126.com。

## Shear behavior of rock joints and comparative study on shear strength criteria with three-dimensional morphology parameters

TANG Zhi-cheng<sup>1,2</sup>, LIU Quan-sheng<sup>1</sup>, LIU Xiao-yan<sup>1</sup>

(1. School of Civil & Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Department of Geotechnical Engineering,

Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Three groups of rock joints with different morphologies are made from cement mortar materials. The shear behavior is investigated by means of the direct shear tests under constant normal stress condition. The effects of the applied normal stress and morphology on the shear strength are analyzed. According to the experimental results, it can be found that the peak dilatancy angle decreases with the increasing normal stress and increases with the increasing roughness. The shear strength increases with the increasing normal stress and also the roughness of rock joints. The reason of underestimation by JRC-JCS criterion is analyzed, and it is suggested to adopt the three-dimensional morphology parameters and tensile strength to capture the characteristics of the peak shear strength. The hyperbolic criterion is suggested to use as a predictive tool to assess the peak shear strength of rock joints under low normal stress level based on the comparisons among several criteria with three-dimensional morphology parameters.

**Key words:** rock joint; three-dimensional morphology parameter; tensile strength; shear strength criteria

## 0 引 言

节理的剪切力学性质受多种因素影响, 如表面形貌、法向应力、接触状态以及充填物等, 本文主要研究表面形貌和法向应力对峰值抗剪强度的影响。自 Patton<sup>[1]</sup>首次提出考虑节理形貌影响的双线性抗剪强度准则以来, 目前已有数十个峰值抗剪强度准则<sup>[2-17]</sup>, 而其中以 Barton<sup>[3]</sup>、Schneider 等<sup>[4]</sup>、Barton 等<sup>[5]</sup>提出的 JRC-JCS 抗剪强度准则最为常用 (JRC 为节理粗糙度系数, JCS 为节理面壁强度)。

Barton 等<sup>[3, 5]</sup>采用节理的剖面线表征其粗糙程度,

具有一定的局限性<sup>[18-19]</sup>, 有诸多学者对 JRC-JCS 抗剪强度准则进行了改进, 包括 JRC 的定量化取值方法<sup>[20-21]</sup>以及准则的数学表达式<sup>[12-13, 22-23]</sup>两个方面。

考虑到直剪过程中节理的接触是三维的, 而剖面线难以反映节理上、下面的三维接触, 因此节理的三维形貌参数更适合于反映表面形貌对抗剪强度的影

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41130742); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2014CB046904); 国家自然科学基金项目 (40972178); 湖北省自然科学基金创新群体项目 (2011CDA119); 中国博士后科学基金项目  
收稿日期: 2013 - 09 - 16

响。Grasselli<sup>[24]</sup>采用最大接触面积比  $A_0$ 、最大视倾角  $\theta_{\max}^*$ 、视倾角分布参数  $C$  描述节理沿剪切方向的三维形貌特征,并在数十组直剪试验基础上建立了含三维形貌参数的峰值抗剪强度准则<sup>[15-16]</sup>。 $A_0$ 、 $\theta_{\max}^*$ 、 $C$  由形貌测试获得,不含任何平均化的处理,是目前最为合适的描述节理三维形貌特征的参数<sup>[25]</sup>。

本文采用水泥砂浆制备具有不同三维形貌特征的节理试件,通过直剪试验研究节理的三维形貌特征对峰值抗剪强度的影响,并对已有的含三维形貌参数的峰值抗剪强度准则进行比较研究,指出低法向应力水平下采用双曲线形式的峰值抗剪强度准则估算节理的峰值抗剪强度。

## 1 直剪试验

### 1.1 试验材料与试件制备

将完整的岩石切割并加工成与直剪试验剪切盒尺寸相匹配的试件(长、宽、高分别为 300, 150, 300 mm),共计 3 组,采用劈裂法获得具有不同表面形貌的耦合节理。将此作为模板节理,采用质量配比水:水泥:砂=1:2:3 的水泥砂浆复制上述 3 组模板节理,每组 5 个,共计 15 个节理试件,分别记为 J-I, J-II, J-III。采用相同的材料制备若干试件,用于测试材料的基本力学性质参数,包括 4 组单轴压缩试验、6 组巴西劈裂试验、4 组平直节理面的直剪试验。得到的材料/节理面的基本力学性质参数:单轴抗压强度  $\sigma_c$  为 27.5 MPa,抗拉强度  $\sigma_t$  为 1.54 MPa,节理面黏聚力  $c$  为 0 MPa,节理基本摩擦角  $\phi_b=35.0^\circ$ ,弹性模量  $E$  为 6.1 GPa,泊松比  $\nu$  为 0.16。具体的过程可参考文献[26]。

### 1.2 试验设备与试验过程

直剪试验前采用 TJXW-3D 型便携式岩石三维表面形貌仪<sup>[27]</sup>测试节理的表面三维形貌特征,获得节理面的三维坐标点云数据,采用 Matlab 处理点云数据并根据文<sup>[28]</sup>的方法计算三维形貌参数。该测试系统采用立体视觉法、结构光法和双目成像原理,具有测试时间短,操作简单、方便等特点。摄像头的分辨率为  $1.44 \times 106$  pixel,最高分辨率为 0.02 mm。对实验室尺度范围内的节理形貌的测试步骤为:①标定设备,确定形貌仪系统内部参数;②投射栅距不同的一系列平行光栅到节理面,获得节理面的三维坐标点云数据;③网格化节理面(如图 1 所示)并计算三维形貌参数。根据文献[28],J-I、J-II、J-III 的形貌参数见表 1(采样间隔为 0.3 mm),其中 J-III 最为粗糙, J-II 次之。

直剪试验在同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室的 CSS-342 岩体剪切试验机上进行,各组 5 个节理试件分别在 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 MPa 五级法

向应力下进行。先按荷载控制方式施加法向荷载直至预定的法向应力值;再按变形控制方式施加切向荷载,加载速率为 0.5 mm/min;设定的剪切位移均为 18 mm(保证出现残余强度或试件破坏不能继续进行试验)。具体的试验方式和过程可参考文献[26]。

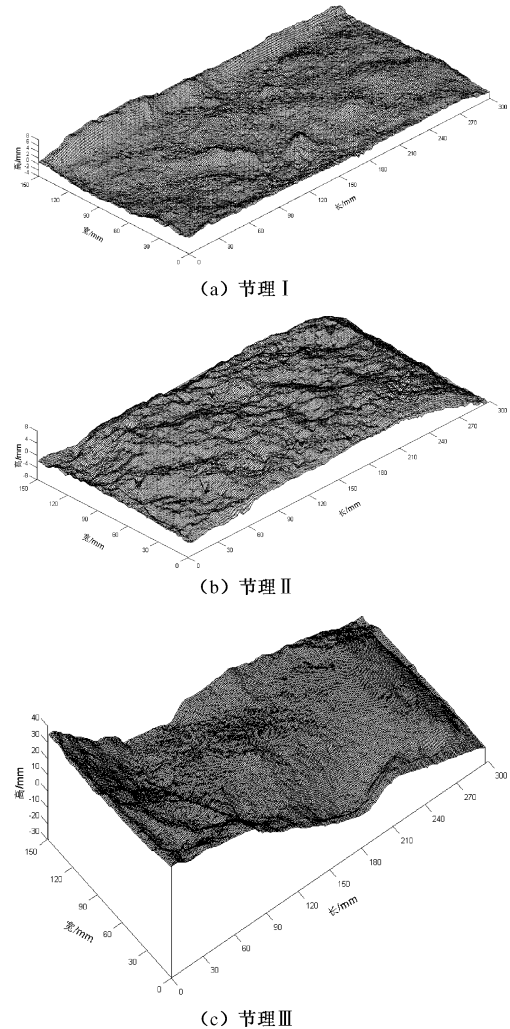


图 1 试验中采用的不同粗糙度的节理试件

Fig. 1 Joints with different roughnesses used in direct tests

表 1 J-I、J-II、J-III 的三维形貌参数

Table 1 Three-dimensional morphology parameters for J-I, J-II and J-III

节理组	三维形貌参数		
	$A_0$	$\theta_{\max}^*/(^\circ)$	$C$
J-I	0.499	59.0	10.1
J-II	0.504	69.3	8.01
J-III	0.688	68.7	7.48

## 2 试验结果与分析

图 2 为典型的直剪试验曲线,表 2 为直剪试验得到 3 组节理的峰值抗剪强度和峰值剪胀角。试验结果反映出典型的粗糙节理的剪切力学性质:①对具有相同表面形貌的节理,峰值抗剪强度随法向应力的增加

而增加, 但剪切应力/法向应力的比值减少, 表明节理的内摩擦角随法向应力的增加而变小, 体现为剪胀角随法向应力的增加而变小, 如图 2 (a) 所示; ②节理的峰值抗剪强度受表面三维形貌的影响, 相同法向应力作用下节理越粗糙得到的峰值抗剪强度越大, 表明节理越粗糙得到的内摩擦角越大, 即剪胀角随表面粗糙程度的增加而增大, 如图 2 (b) 所示。

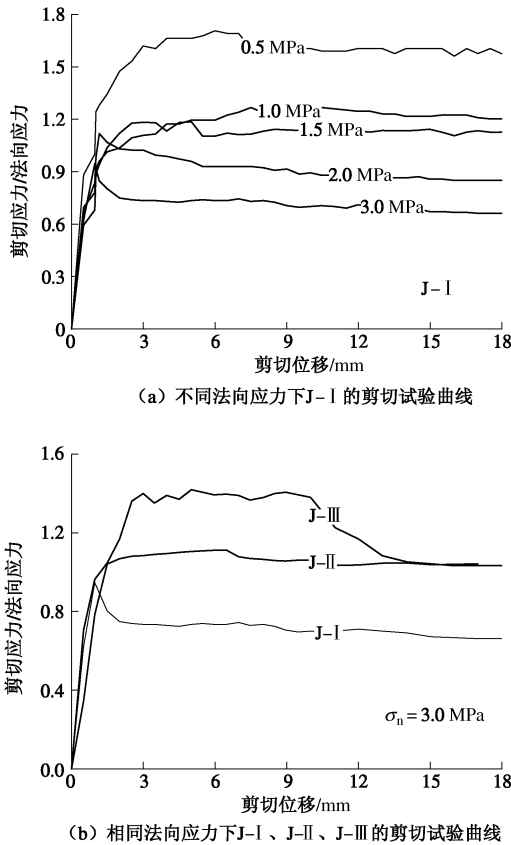


图 2 典型的直剪试验曲线

Fig. 2 Typical curves of direct shear tests

表 2 直剪试验结果表

Table 2 Results of direct shear tests

法向应力/MPa	峰值抗剪强度/MPa			峰值剪胀角/(°)		
	J-I	J-II	J-III	J-I	J-II	J-III
0.5	0.85	1.13	1.78	24.6	31.1	39.3
1.0	1.19	1.75	2.42	15.1	24.3	32.5
1.5	1.77	2.20	2.89	14.8	20.7	27.6
2.0	2.24	2.78	3.51	13.2	19.3	25.3
3.0	2.84	3.34	4.20	8.40	13.1	19.5

### 3 Barton 峰值抗剪强度准则分析

根据 Mohr-Coulomb 摩擦定律, 节理的峰值抗剪强度可表示为

$$\tau_p = \sigma_n \tan(\varphi_b + i_p) \quad (1)$$

式中  $\tau_p$  为峰值抗剪强度;  $\sigma_n$  为法向应力;  $i_p$  为峰值剪胀角, 一般由法向应力、节理的形貌特征、材料的强度决定。

Barton 等<sup>[3,5]</sup>根据百余组天然岩石节理的直剪试验确定了峰值剪胀角与法向应力的对数函数关系, 提出目前岩石工程领域中应用最为广泛的峰值抗剪强度准则 (JRC-JCS 准则):

$$\tau_p = \sigma_n \tan \left[ \varphi_r + \text{JRC} \cdot \lg \left( \frac{\text{JCS}}{\sigma_n} \right) \right] \quad (2)$$

式中  $\varphi_r$  为残余摩擦角, 对新鲜节理取基本摩擦角。

在节理面上采集具有代表性的剖面线, 然后与 Barton 等<sup>[5]</sup>提出的 10 条标准剖面线对比确定参数 JRC 的具体值。本次试验研究中, 在 J-I、J-II、J-III 上沿剪切方向采集 9 条剖面, 位置如图 3 所示<sup>[26]</sup>, 得到的 JRC 值见表 3。根据式 (2) 计算得到的峰值抗剪强度与试验值的比较见图 4, 计算值较之于试验值偏低, 文献[9, 15, 17]亦得到同样的结论。文献[18, 19]分析了 JRC 取值的局限, 从形貌参数的角度阐述了 Barton 峰值抗剪强度公式计算值偏低的原因 (二维剖面线难以全面表征节理的三维形貌特征、采样间隔、起伏度的影响)。

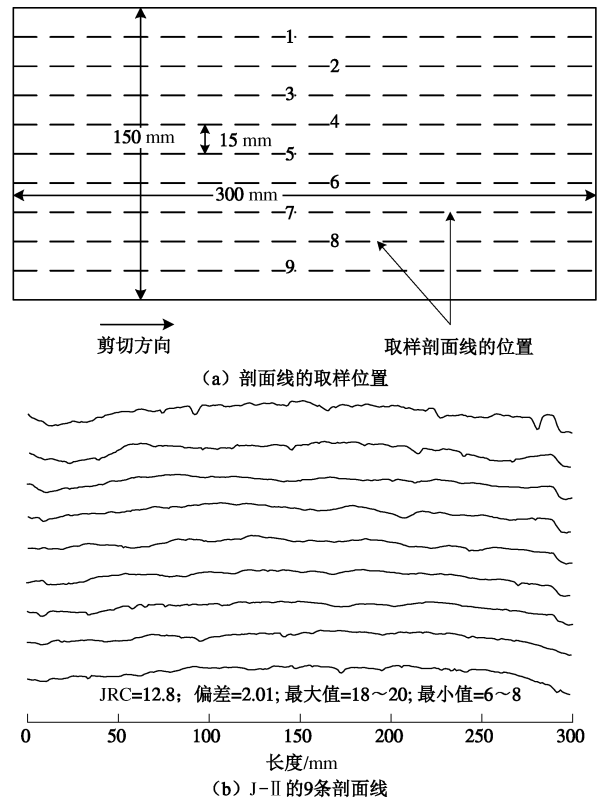


图 3 确定 J-I、J-II、J-III 的 JRC 的方式

Fig. 3 Method to determine JRC for J-I, J-II and J-III

表 3 J-I、J-II、J-III 的 JRC 值

Table 3 Values of JRC for J-I, J-II and J-III

节理组	JRC			
	平均值	偏差	最大值	最小值
J-I	6.3	1.70	12~14	2~4
J-II	12.8	2.01	18~20	6~8
J-III	17.1	1.34	18~20	12~14

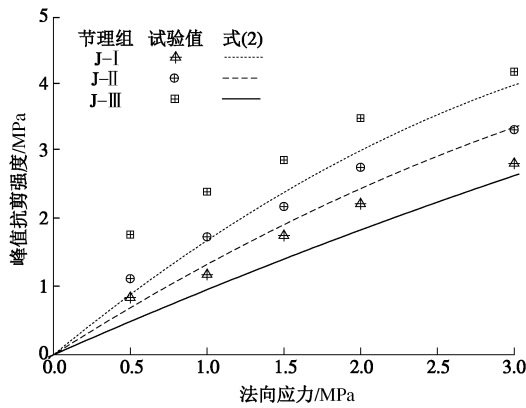


图4 峰值抗剪强度试验值与式(2)计算值比较<sup>[17]</sup>

Fig. 4 Comparison between measured peak shear strengths and curves calculated by Barton's criterion<sup>[17]</sup>

事实上, 根据 Barton 峰值抗剪强度准则, JRC 与 JCS 共同决定了节理峰值剪胀角的大小<sup>[23]</sup>, 计算值偏低的原因还有可能在于采用的力学参数 JCS 不能很好地反映材料的力学属性对节理峰值抗剪强度的影响。此外, Grasselli 等<sup>[15]</sup>由试验观测得到直剪过程中微凸体的破坏以张拉破坏为主, 而非压缩破坏; Park 等<sup>[29]</sup>由数值直剪试验得到剪切过程中拉裂纹数量远远多于剪裂纹数量的结论; 在接近峰值抗剪强度时, 节理面接触部分产生的应力集中使得微凸体产生大量的张拉裂纹<sup>[30]</sup>; 文献[17, 23]也阐述了材料的抗拉强度对节理峰值抗剪强度的影响。因此, 抗拉强度更能体现材料的力学属性对节理峰值抗剪强度的影响。

Barton 峰值抗剪强度准则的另一局限在其数学表达式, 当  $\sigma_n \rightarrow 0$  时,  $\tau_p \rightarrow \infty$ , 失去意义。

根据上述分析, 可从 3 个方面对 Barton 峰值抗剪强度准则进行改进: ①根据三维面而非一条或若干条剖面线描述节理的形貌特征; ②采用的力学参数更能体现剪切过程中节理面的摩擦/破坏机理; ③数学表达式应当是连续的。

#### 4 含三维形貌参数的峰值抗剪强度准则比较研究

文献[23]分析了法向应力对节理剪胀角的影响并提出了剪胀角的限制边界条件:

$$\begin{cases} (\sigma_t / \sigma_n) \rightarrow 0 \Rightarrow i_p = 0 \\ (\sigma_t / \sigma_n) \rightarrow \infty \Rightarrow i_p = i_{p0} \end{cases}, \quad (3)$$

式中,  $i_{p0}$  为初始峰值剪胀角。

进而采用双曲线函数描述峰值剪胀角与法向应力的关系<sup>[23]</sup>:

$$i_p = i_{p0} \frac{(\sigma_t / \sigma_n)}{1 + (\sigma_t / \sigma_n)}. \quad (4)$$

文献[23]采用齿状节理研究剪切力学性质, 得到

的初始峰值剪胀角为

$$i_{p0} = 19.4 + JRC. \quad (5)$$

对平直节理而言,  $JRC=0$ , 此时节理剪切强度的剪胀角应为 0, 因此由式 (5) 确定的初始峰值摩擦角是有缺陷的。此外, JRC 也难以表征节理的三维形貌特征, 计算的峰值剪切强度曲线如图 5 所示。

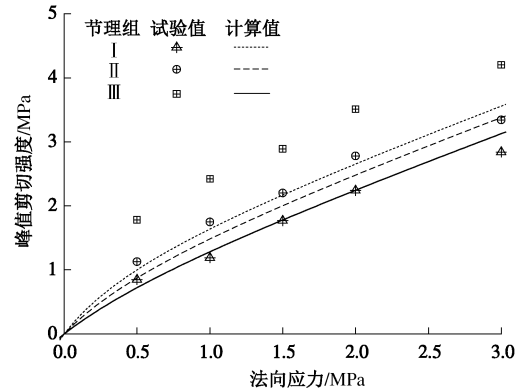


图5 峰值剪切强度计算值与试验值的比较

Fig. 5 Comparison between experimental results and calculated values

采用式 (4) 分析试验数据, 通过最小二乘法得到 J-I、J-II、J-III 的初始峰值剪胀角分别为  $29.2^\circ$ ,  $41.1^\circ$ ,  $54^\circ$ , 与文[27]提出的节理形貌的三维粗糙度参数  $A_0 [\theta_{max}^* / (1+C)]$  的关系如图 6 所示, 二者可近似采用式 (6) 所示的线性函数表示, 图中虚线为实际的拟合直线、实线为近似处理后的直线, 该处理方法源于 Barton<sup>[3, 31]</sup>。

$$i_{p0} = 10A_0 [\theta_{max}^* / (1+C)]. \quad (6)$$

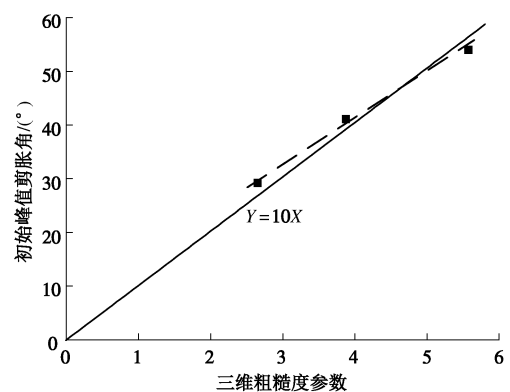


图6 初始峰值剪胀角与三维粗糙度指标的关系

Fig. 6 Correlation of initial dilatancy angle with three-dimensional roughness index

将式 (6) 代入式 (1) 得到由三维形貌参数表示的节理峰值抗剪强度准则:

$$\tau_p = \sigma_n \tan \left[ \varphi_b + 10 \frac{A_0 \theta_{max}^*}{(1+C)} \cdot \frac{(\sigma_t / \sigma_n)}{1 + (\sigma_t / \sigma_n)} \right]. \quad (7)$$

根据式 (7) 计算得到的峰值抗剪强度值与试验值的比较见图 7, 计算结果与试验值具有相当好的相关性。

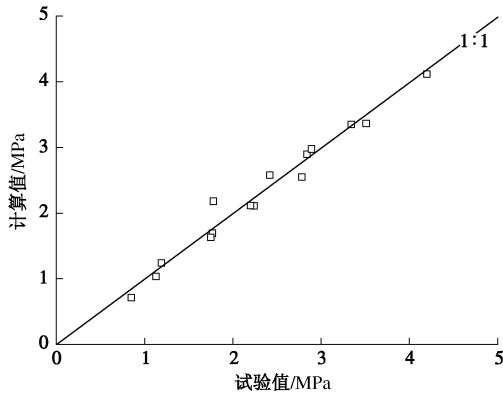


图 7 节理峰值抗剪强度试验值与式 (7) 计算值的比较

Fig. 7 Comparison between experimental results and calculated values by using Eq. (7)

目前, 与式 (7) 采用相同的形貌参数的节理峰值剪切强度准则有 Grasselli 准则<sup>[16]</sup>、Xia 准则<sup>[17]</sup>, 分别为

$$\tau_p = \left[ 1 + \exp \left( -\frac{1}{9A_0} \cdot \frac{\theta_{\max}^*}{C} \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_t} \right) \right] \sigma_n \tan \left[ \varphi_b + \left( \frac{\theta_{\max}^*}{C} \right)^{1.18 \cos \beta} \right], \quad (8)$$

$$\tau_p = \sigma_n \tan \left\{ \varphi_b + \frac{4A_0 \theta_{\max}^*}{C+1} \left[ 1 + \exp \left( -\frac{1}{9A_0} \cdot \frac{\theta_{\max}^*}{C+1} \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_t} \right) \right] \right\}. \quad (9)$$

式中,  $\beta$  为片理面的倾角, 当无片理面时  $\beta=0$ 。

根据 J-I、J-II、J-III 的形貌参数 (表 2) 分别采用式 (7) ~ (9) 计算节理抗剪强度值, 三者的对比如图 8 所示 (J-I-0.5: J-I 表示节理组, 0.5 表示试验时的法向应力水平)。采用式 (10) 分析 J-I、J-II、J-III 计算值的平均偏差, 三者分别为 6.5%, 16.6%, 12.8%。

$$\bar{\sigma}_{ave} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{\tau_{p,m} - \tau_{p,c}}{\tau_{p,m}} \right| \times 100\% \quad , \quad (10)$$

式中  $\bar{\sigma}_{ave}$  为平均偏差;  $m$  为试验样本数;  $\tau_{p,m}$ ,  $\tau_{p,c}$  分别为峰值抗剪强度试验值、计算值。

由上述对比可知, 式 (7) 在一定法向应力水平范围内 ( $0.01 \leq \sigma_n / \sigma_c \leq 0.15$ ) 是有优势的, 可用于估算岩石节理的峰值抗剪强度, 较之于 Grasselli 准则、Xia 准则, 式 (7) 更为简洁。

为进一步对比分析含三维形貌参数的抗剪强度准则, 将文[16]得到的岩石节理的直剪试验结果与公式的计算值进行比较, 相关的参数与计算结果见表 4, 其中基本摩擦角  $\varphi_b=37^\circ$ , 岩石的抗拉强度  $\sigma_t=9.2$  MPa。

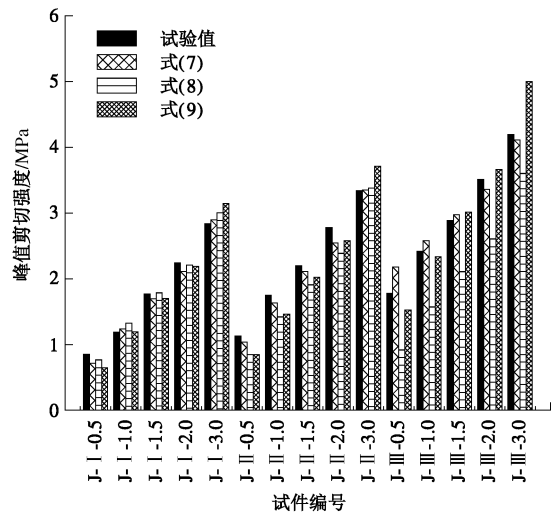


图 8 节理峰值抗剪强度试验值与计算值的比较

Fig. 8 Comparison between experimental results and calculated values

由此可知, 上述含三维形貌参数的峰值抗剪强度准则均可用于估算岩石节理的峰值抗剪强度, 但双曲线形式的准则更为简洁, 且在低法向应力水平下具有优势。

表 4 岩石节理的直剪试验结果与公式计算值的比较

Table 4 Comparison between experimental and predicted peak

shear strengths of natural joints

试件	$A_0$	$\theta_{\max}^*$	$C$	峰值抗剪强度/MPa			
				试验值	式 (7)	式 (8)	式 (9)
M1	0.513	9.64	76	1.7	2.454	1.8	1.8
M2	0.492	5.60	39	2.3	3.182	3.2	2.7
M3	0.471	10.5	65	1.2	1.591	1.7	1.3
M4	0.513	8.12	61	5.8	6.910	6.3	6.1
M5	0.533	8.92	59	4.4	4.832	4.6	4.3
M6	0.450	10.18	68	4.3	4.216	4.4	3.7
M7	0.502	13.33	86	5.6	6.133	6.1	5.6
M8	0.459	10.52	72	6.4	5.956	6.1	5.4
M9	0.494	10.36	59	4.5	4.004	4.4	3.7
M10	0.515	10.79	67	1.5	1.763	1.7	1.5
M12	0.429	7.28	55	3.0	3.210	3.7	2.5

## 5 局限性分析与研究展望

常法向荷载作用下节理的剪切力学性质与岩质边坡、基础工程等的稳定性评价相关。在实验室尺度内描述节理剪切强度的准则有十数个, 工程实践中除 JRC-JCS 准则外<sup>[32-33]</sup>极少被采用, 原因多在于采用的形貌参数在现场难以确定。三维形貌参数更能合理地描述节理的形貌特征, 但需要较为复杂的设备, 特别是对大尺度的节理, 采集三维形貌特征极为困难。因此, 含三维形貌参数的峰值抗剪强度准则是以牺牲简洁为前提来保证计算精度的。

实验室的研究尺度多局限在 100~300 mm, 而实际的节理尺寸以“m”计, 如何合理地将实验室尺度

范围内得到的力学模型推广应用于大尺度的工程现场是必须要考虑的, 本文的研究为此提供研究基础。

工程实践中, 节理面壁间往往有充填物, 包括颗粒物质、正常固结以及超固结黏土等, 对节理的力学性质有着重要影响, 目前对充填物为颗粒物质、超固结黏土等节理的力学性质研究较少, 在后续研究中将对此进行试验研究, 并结合已有的非充填节理的力学模型提出考虑充填物性质的新模型。

## 6 结 论

(1) 节理的剪切力学性质受表面三维形貌的影响, 节理越粗糙, 剪胀现象越显著、得到的峰值抗剪强度也越大。

(2) Barton 峰值抗剪强度公式计算值较之试验值偏低的可能原因在于采用的粗糙度参数以及力学参数, 指出合理的节理峰值抗剪强度采用的参数应为三维形貌参数和材料的抗拉强度。

(3) 对比分析了含三维形貌参数的峰值抗剪强度准则, 在低法向应力水平下 ( $0.01 \leq \sigma_n / \sigma_c \leq 0.15$ ) 建议采用双曲线形式的峰值抗剪强度准则估算岩石节理的峰值抗剪强度。

**致 谢:** 本文的试验是笔者在同济大学攻读博士学位时所做的工作, 得到宋英龙硕士的帮助。

### 参考文献:

- [1] PATTON F D. Multiple modes of shear failure in rock[C]// Proceedings of the First Congress of International Society of Rock Mechanics. Lisbon, 1966: 509 - 513.
- [2] LADANYI B, ARCHAMBAULT G. Simulation of the shear behavior of a jointed rock mass[C]// Proceedings of the 11th US Symposium on Rock Mechanics. Berkeley, 1970: 105 - 125.
- [3] BARTON N. Review of a new shear strength criterion for rock joints[J]. Engineering Geology, 1973, 7(2): 287 - 332.
- [4] SCHNEIDER H J. The friction and deformation behavior of rock joints[J]. Rock Mechanics, 1976, 8(3): 169 - 185.
- [5] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1977, 10(1/2): 1 - 54.
- [6] PLESHA M E. Constitutive models for rock discontinuities with dilatancy and surface degradation[J]. International Journal for Numerical and Analytical Method in Geomechanics, 1987, 11(4): 345 - 362.
- [7] JING L. Numerical modeling of jointed rock masses by distinct element method for two, and three dimensional problems[D]. Lulea: Lulea University of Technology, 1990.
- [8] MAKSIMOVIC M. New description of shear strength for rock joints[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1992, 25(4): 275 - 284.
- [9] KULATILAKE P, 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.
- [10] KULATILAKE P, SHOU G, HUANG TH. Spectral-based peak-shear-strength criterion for rock joints[J]. ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(11): 789 - 796.
- [11] KULATILAKE P, UM J, PANDA B B, et al. Development of new peak shear-strength criterion for anisotropic rock joints[J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 1999, 125(9): 1010 - 1017.
- [12] 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.
- [13] 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 shear strength criterion for rock joint[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(4): 349 - 357. (in Chinese))
- [14] AMADEI B, WIBOWO J, STURE S, et al. Applicability of existing models to predict the behavior of replicas of natural fractures of welded tuff under different boundary conditions[J]. Geotechnical and Geology Engineering, 1998, 16(1): 79 - 128.
- [15] 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 Sciences, 2003, 40(1): 25 - 40.
- [16] 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.
- [17] XIA C C, TANG Z C, XIAO W M, et al. New peak shear strength criterion based on quantified surface description[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering (in press)
- [18] BEER A J, STEAD D, COGGAN J S. Estimation of the joint roughness coefficient (JRC) by visual comparison[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(2): 387 - 400.

- [19] HONG E S, LEE J S, LEE I M. Underestimation of roughness in rough rock joints[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2008, **32**(11): 1385 - 1403.
- [20] TSE R, CRUDEN D M. Estimating joint roughness coefficients[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstract*, 1979, **16**(5): 303 - 307.
- [21] XIE H, PARISEAU WG. Fractal estimation of the joint roughness coefficients[C]// *Proceedings of International Conference on Fractured and Jointed Rock Masses*. Rotterdam, Balkema: 1992: 125 - 131.
- [22] 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.
- [23] GHAZVINIAN A H, AZINFAR M J, GERANMAYEH R. Importance of tensile strength on the shear behavior of discontinuities[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, **45**(3): 349 - 359.
- [24] 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.
- [25] YANG Z Y, TAGHICHIAN A, HUANG G D. On the applicability of self-affinity concept in scale of three-dimensional rock joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2011, **48**(7): 1173 - 1187.
- [26] 唐志成. 考虑扰动影响的节理与柱状节理岩体的力学性质[D]. 上海: 同济大学, 2013. (TANG Zhi-cheng. Mechanical behaviors of rock joint under different contact state and columnar jointed rock mass[D]. Shanghai: Tongji University, 2013. (in Chinese))
- [27] 夏才初, 王伟, 丁增志. TJXW-3D型便携式岩石三维表面形貌仪的研制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, **27**(7): 1505 - 1512. (XIA Cai-chu, WANG Wei, DING Zeng-zhi. Development of three-dimensional TJXW-3D-typed portable rock surface topography[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, **27**(7): 1505 - 1512. (in Chinese)).
- [28] TATONE B S A, GRASSELLI G. A method to evaluate the three-dimensional roughness of fracture surfaces in brittle geomaterials[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2009, **80**(2): paper 125110.
- [29] PARK J W, SONG J J. Numerical simulation of a direct shear test on a rock joint using a bonded-particle model[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2009, **46**(8): 1315 - 1328.
- [30] BAHAAADDINI M, SHARROCK G, HEBBLEWHITE B K. Numerical direct shear tests to model the shear behavior of rock joints[J]. *Computers and Geotechnics*, 2013, **51**(1): 101 - 115.
- [31] BARTON N. Rock mechanics review - The shear strength of rock and rock joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, 1976, **13**(9): 255 - 279.
- [32] KVELDSVIK V, NILSEN B, EINSTEIN H H, et al. Alternative approaches for analyses of a 100,000 m<sup>3</sup> rock slide based on Barton-Bandis shear strength criterion[J]. *Landslides*, 2008, **5**(2): 161 - 176.
- [33] KIM D H, GRATCHEV I, BALASUBRAMANIAM A. Determination of joint roughness coefficient (JRC) for slope stability analysis: A case study from the Gold Coast area, Australia[J]. *Landslides*, 2013, **10**(5): 657 - 664.