

文章编号: 1000-7598 (2014) 02-0551-05

确定岩石节理 Maksimovic 峰值抗剪强度 准则中“粗糙度角 $\Delta\phi$ ”的新方法

唐志成^{1,2}, 刘泉声¹, 夏才初², 吴月秀¹, 黄继辉², 王春波²

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

摘 要: 岩石节理的非线性 Maksimovic 峰值抗剪强度准则, 采用双曲线函数描述不同法向应力作用下剪胀角的变化, 参数物理含义明确、适用的法向应力范围广泛且形式简洁。采用的参量“粗糙度角 $\Delta\phi$ ”反映节理的粗糙程度, 但由至少 3 组直剪试验数据回归分析确定, 因此, 不能采用该准则估算节理的峰值抗剪强度。通过等价关系, 由已有的峰值抗剪强度准则得到用三维形貌参数表示的“粗糙度角 $\Delta\phi$ ”, 提出含三维形貌参数的 Maksimovic 峰值抗剪强度准则。采用不同形貌节理的直剪试验数据对准则进行了验证, 结果表明, 计算值与试验值吻合较好, 验证了公式的正确性; 同时, 亦与经典的 Barton 准则进行了对比。可用该准则预估节理的峰值抗剪强度。

关 键 词: 岩石节理; 峰值抗剪强度; 粗糙度; 三维形貌参数; 粗糙度角

中图分类号: TU 44

文献标识码: A

A new method for calculating roughness angle $\Delta\phi$ in Maksimovic peak shear strength criterion of rock joints

TANG Zhi-cheng^{1,2}, LIU Quan-sheng¹, XIA Cai-chu², WU Yue-xiu¹, HUANG Ji-hui², WANG Chun-bo²

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A nonlinear peak shear strength criterion, proposed by Maksimovic, uses a simple hyperbolic function to describe the peak dilatancy angle under different normal stresses. The model has significant advantages, such as parameters have physical meaning, law is valid from zero to infinity, and it is simpler from the view of mathematical point. The roughness of joint surface is expressed by the parameter of “roughness angle, $\Delta\phi$ ”, obtained by using the least square fit method on basis of at least three sets of measured data. It is not easy to use the Maksimovic criterion to predict the peak shear strength of rock joints. In this paper, the roughness angle is determined by a rational method with a quantitative three dimensional morphology parameters of joint surface. Then, a modified Maksimovic peak shear strength criterion is proposed. Several experimental results are used for verification of the proposed relations. It is shown that the calculated values are in good agreement with the measured data. It also presents the comparison between the new criterion with the famous Barton’s criterion. We can use the proposed criterion as a useful tool to predict the peak shear strength for rock joints.

Key words: rock joints; peak shear strength; roughness; three-dimensional morphology parameters; roughness angle

1 引 言

在低法向应力作用下, 剪切过程中的节理面沿主要的微凸体剪切滑移, 表现为剪胀, 易得到较大的峰值摩擦角; 而在高法向应力作用下, 节理力

学行为较为复杂, 微凸体被剪断、接触处产生微裂纹等。节理的峰值摩擦角随法向应力的增加而逐渐变小, 若施加足够大的法向应力, 则节理的剪胀消失^[1]。岩石节理峰值抗剪强度准则多采用对数函数^[2-3]、指数函数^[4]描述节理峰值摩擦角与法向应力

收稿日期: 2013-07-04

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (No. 41130742); 国家重点基础研究发展计划(973 项目) (No. 2014CB046904); 湖北省自然科学基金重点项目 (创新群体) (No. 2011CDA119); 国家自然科学基金资助项目 (No. 40972178)。

第一作者简介: 唐志成, 男, 1983 年生, 博士, 主要从事岩石节理的力学性质、高地应力下软弱围岩“锚注”机制等方面的研究工作。

E-mail: tangzhichengok@126.com

的关系。其中 Barton 提出的 JRC-JCS 准则是目前最为常用的峰值抗剪强度准则。但采用对比法确定参量 JRC 时具有一定的主观性^[5], 且当节理较为粗糙时易得到偏低的 JRC 值^[6]。

上述基于直剪试验得到的经验型抗剪强度准则往往只适用于一定的法向应力范围, 且缺乏明确的物理含义^[1]。Maksimovic 采用双曲线函数描述节理的峰值摩擦角与法向应力的关系, 提出适用于全应力范围的峰值抗剪强度公式^[1]。在 Maksimovic 峰值抗剪强度公式中, 表征节理粗糙程度的参量“粗糙度角 $\Delta\varphi$ ”为零法向应力时的剪胀角, 采用最小二乘法拟合直剪试验数据确定该参数^[1], 因此, 不便于使用该准则估算节理的峰值抗剪强度。

事实上, 节理的峰值抗剪强度受其表面三维形貌的影响, 根据形貌特征估算峰值抗剪强度是节理剪切力学行为研究的重点。Grasselli 等^[7]通过节理直剪试验的概化模型提出了定量描述节理三维形貌特征的方法, 采用最大可能接触面积比 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, 是目前最合适的描述节理三维形貌特征的方法^[8]。

通过等价分析, 在已有的峰值抗剪强度公式基础上确定 Maksimovic 峰值抗剪强度公式中的“粗糙度角 $\Delta\varphi$ ”, 得到含三维形貌参数的 Maksimovic 峰值抗剪强度公式, 由直剪试验对该公式进行了验证, 并与经典的 Barton 公式进行了比较。

2 Maksimovic 峰值抗剪强度公式

Maksimovic 峰值抗剪强度公式为^[1]

$$\tau_p = \sigma_n \tan \left(\varphi_b + \frac{\Delta\varphi}{1 + \sigma_n/p_N} \right) \quad (1)$$

式中: τ_p 为峰值抗剪强度; σ_n 为法向应力; φ_b 为基本摩擦角; $\Delta\varphi$ 为粗糙度角, 对应于 $\sigma_n = 0$ 时的剪胀角; p_N 为中值角压力, 剪胀角为 $0.5\Delta\varphi$ 时的对应法向应力。各参数的定义如图 1 所示。

Maksimovic 认为, 该公式具有 3 个优点: 形式简洁、参数的物理含义明确, 与已有的经验峰值抗剪强度准则相比适用的法向应力范围广, $\sigma_n \in (0, \infty)$ 。根据式 (1), 当法向应力持续增大, 由节理形貌引起的摩擦角逐步减少至 0, 节理的抗剪强度由基本摩擦角控制。

Maksimovic 采用最小二乘法由试验结果确定参量 $\Delta\varphi$, 因此限制了式 (1) 的应用。

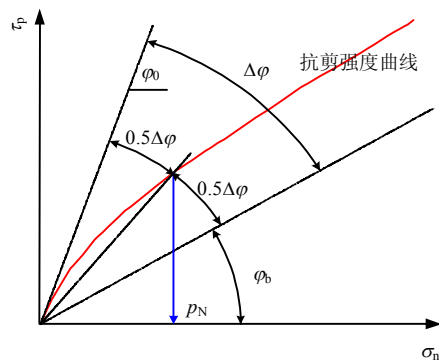


图 1 Maksimovic 峰值抗剪强度准则的参数定义^[1]
Fig.1 Definition of parameters of the Maksimovic peak shear strength criterion^[1]

3 改进的 Maksimovic 公式

Xia 等^[4]提出含节理三维形貌参数的峰值抗剪强度公式为

$$\tau_p = \sigma_n \tan \left\{ \varphi_b + 4 \frac{A_0 \theta_{\max}^*}{C+1} \left[1 + \exp \left(-\frac{1}{9A_0} \frac{\theta_{\max}^*}{C+1} \frac{\sigma_n}{\sigma_t} \right) \right] \right\} \quad (2)$$

式中: σ_t 为材料的抗拉强度。

当 $\sigma_n \rightarrow 0$ 时, 由式 (2) 确定的初始峰值剪胀角 φ_0 为

$$\varphi_0 = 8 \frac{A_0 \theta_{\max}^*}{C+1} \quad (3)$$

粗糙度角 $\Delta\varphi$ 反映的是零法向应力下节理的剪胀角, 即初始剪胀角。对一个确定的节理, 初始剪胀角仅取决于表面的三维形貌特征。因此, 可等价

$$\Delta\varphi = \varphi_0 = 8 \frac{A_0 \theta_{\max}^*}{C+1} \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (1), 得到用三维形貌参数表示的 Maksimovic 峰值抗剪强度公式:

$$\tau_p = \sigma_n \tan \left[\varphi_b + 8 \left(\frac{A_0 \theta_{\max}^*}{C+1} \right) \frac{1}{(1 + \sigma_n/p_N)} \right] \quad (5)$$

一般地, 可取 $p_N = 0.1$ ^[9], 则式 (5) 为

$$\tau_p = \sigma_n \tan \left[\varphi_b + 8 \left(\frac{A_0 \theta_{\max}^*}{C+1} \right) \cdot \frac{1}{(1 + 10\sigma_n/JCS)} \right] \quad (6)$$

若考虑网格间距的影响, 则有

$$\tau_p = \sigma_n \tan \left[\varphi_b + 2m \left(\frac{A_0 \theta_{\max}^*}{C+1} \right) \cdot \frac{1}{(1 + 10\sigma_n/JCS)} \right] \quad (7)$$

式中: $m = 4.5l^{0.1}$, l 为网格点间距。

4 试验验证

由于采集天然偶合节理试件相对比较困难，且难以获得表面形貌完全一致的试件，因此，采用模拟材料节理试件进行直剪试验。模拟材料选用海螺 32.5R 水泥、标准砂和水，质量配比：水：水泥：砂 = 1:2:3。养护（温度： $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ，相对湿度：90%）28 d 后进行试验。共制作 3 组具有不同形貌的节理，组号分别为 J-I，J-II，J-III，每组节理共含 5 个形貌一样的试件。采用 TJXW-3D 型便携式岩石三维表面形貌仪^[10]获取节理的三维离散点坐标；采用 Grasselli 等^[7]提出的描述节理形貌特征的方法得到的节理试件的形貌特征参数曲线（网格点间距为 0.3 mm），见图 2。

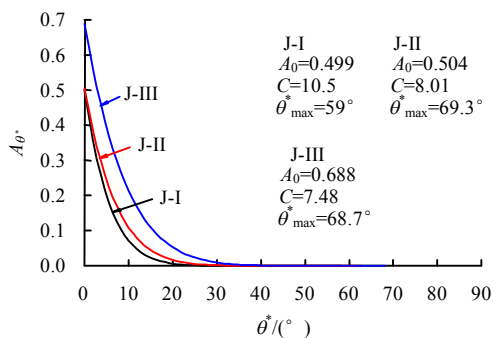


图2 J-I、J-II、J-III 的形貌参数
Fig.2 Morphology parameters of J-I, J-II, J-III

基本力学参数通过单轴压缩试验、劈裂试验、平直节理的直剪试验确定：节理材料的单轴抗压强度为 28 MPa、抗拉强度为 1.54 MPa、节理面的基本摩擦角为 35° 。

直剪试验在同济大学岩土及地下工程教育部重点试验室的 CSS-342 岩体剪切试验机上完成。每组节理的 5 个试件分别在 0.5、1.0、1.5、2.0、3.0 MPa 下进行直剪试验，剪切速率为 0.5 mm/min，直剪试验结果见表 1。根据图 2 的形貌参数采用式 (6) 计算得到的剪切强度曲线如图 3 所示，可以看出，计算值与试验值相当吻合。表明本文提出的剪切强度准则能够较好地估算粗糙节理的峰值剪切强度。

表1 J-I、J-II、J-III 的直剪试验结果

Table 1 Experimental results of J-I, J-II, J-III

法向应力 / MPa	峰值抗剪强度 / MPa		
	J-I	J-II	J-III
0.5	0.85	1.13	1.78
1.0	1.19	1.75	2.42
1.5	1.77	2.20	2.89
2.0	2.24	2.78	3.51
3.0	2.84	3.34	4.20

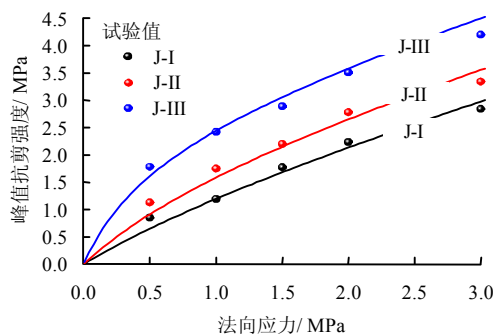


图3 节理峰值抗剪强度试验值与式 (6) 的计算值比较
Fig.3 Comparisons between the measured values and it calculated by Eq. (6)

Cottrell^[11]采用 6 组具有相同表面形貌的水泥砂浆材料节理试件（复制混凝土断面形成）进行直剪试验，节理/材料的力学性质参数见表 2、形貌参数见图 4（网格点间距为 0.5 mm，此时 $m = 4.21$ ），直剪试验结果见表 3。节理试件的制作流程、形貌测试方法及直剪试验步骤等详见参考文献[11]。式 (7) 的计算结果与试验值的比较见图 5，计算值与试验值能较好地吻合。

表2 Cottrell 节理材料的基本力学参数^[11]

Table 2 The mechanical parameters of Cottrell's joints^[11]

单轴 抗压强度 σ_c / MPa	抗拉 强度 σ_t / MPa	水灰比 / %	基本 摩擦角 ϕ_0 / ($^\circ$)	弹性 模量 E / GPa	泊松比 ν / %
19.5±2.6	1.45±0.5	27	32±0.8	4.9±0.9	46

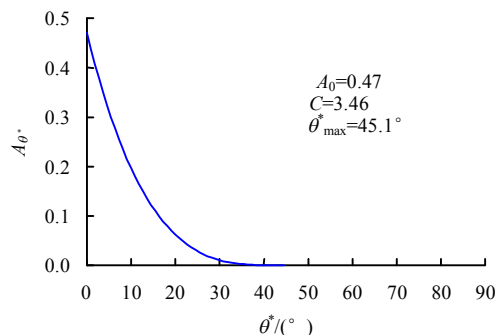


图4 Cottrell 节理的形貌参数^[11]
Fig.4 Morphology parameters of Cottrell's joints

表3 Cottrell 节理直剪试验结果^[11]

Table 3 Experimental results of Cottrell's joints

法向应力 / MPa	峰值抗剪强度 / MPa
0.154	0.389
0.298	0.614
0.475	0.936
0.613	1.166
0.758	1.337
0.936	1.594

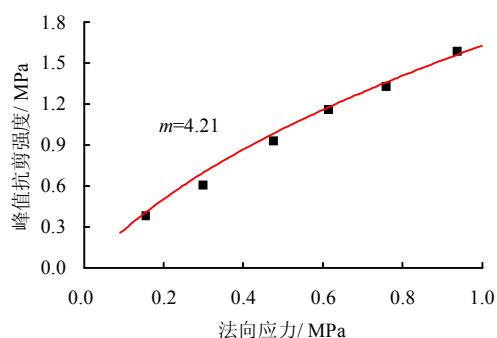


图5 节理峰值抗剪强度试验值与式(7)的计算曲线
Fig.5 Comparison between the measured values and it calculated by Eq. (7)

Yang 等^[8]采用水泥灰浆(水灰比=0.9:1.0)复制天然云母片岩节理的形貌,其中 S10 为原始形貌、H20 为采用自仿射分形法得到的形貌。节理/材料的基本力学性质参数为: $\sigma_t = 1.3$ MPa、 $\sigma_c = 14$ MPa、 $\phi_0 = 31^\circ$ (由 Yang 提供),形貌参数见图 6。直剪试验在常法向荷载下沿 $0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 方向进行,剪切速率为 1 mm/min。为保证试验结果的可靠性,在相同的试验条件下(尺寸、形貌、法向应力均相同)重复 3 次,保证出现基本相同的剪切应力-位移曲线,直剪试验结果见表 4。

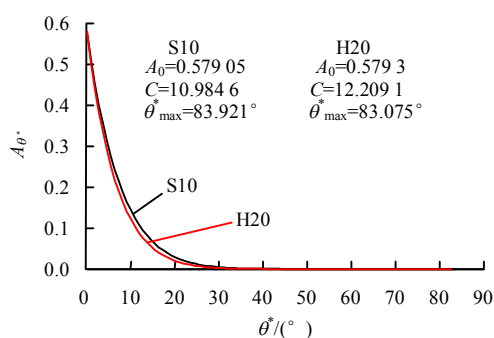


图6 Yang 节理的形貌参数^[8]
Fig.6 Morphology parameters of Yang's joints

表4 峰值抗剪强度试验值^[8]
Table 4 Peak shear strengths from experiment

法向应力 / MPa	峰值抗剪强度/ MPa	
	S10	H20
0.098	0.163	0.164
	0.160	0.160
	0.161	0.159
0.294	0.43	0.32
	0.40	0.34
	0.41	0.30
0.490	0.72	0.53
	0.71	0.50
	0.70	0.52

采用式(7)计算节理的峰值抗剪强度,计算值与试验值的比较如图 7 所示。计算值与 S10 试件的试验值相对较吻合,对 H20 试件,计算值略大于试验值。

就上述 27 组节理而言,计算值与试验值具有较高的一致性,可初步说明本文提出的准则能够估算节理的峰值剪切强度。

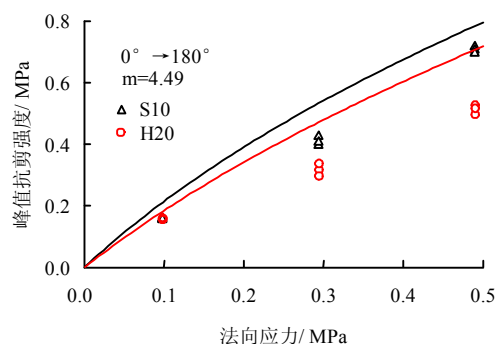


图7 节理峰值抗剪强度试验值与式(7)的计算曲线
Fig.7 Comparisons between the measured values and it calculated by Eq. (7)

5 与 Barton 准则的比较

Barton 等^[2]提出的峰值抗剪强度 JRC-JCS 准则为

$$\tau_p = \sigma_n \tan \left[\phi_r + JRC \cdot \lg \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right] \quad (8)$$

式中: ϕ_r 为残余摩擦角,对新鲜节理取基本摩擦角; JRC 为节理粗糙度系数; JCS 为节理面壁强度,对新鲜节理,取材料的单轴抗压强度。

采用与 10 条标准剖面对比的方法^[2]确定 J-I、J-II、J-III 的 JRC ,然后采用式(8)计算峰值抗剪强度,与试验值以及式(6)的计算值相比较,结果见图 8。由平均偏差公式(式(9))分析新公式计算值与 JRC - JCS 准则计算值偏离试验值的程度,分别为 7.2%、16.8%。

$$\bar{\sigma}_{ave} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\tau_{p,mea} - \tau_{p,cal}}{\tau_{p,mea}} \right| \times 100\% \quad (9)$$

式中: $\bar{\sigma}_{ave}$ 为平均偏差; n 为样本数量; $\tau_{p,mea}$ 、 $\tau_{p,cal}$ 分别为峰值剪切强度试验值、计算值。

新公式采用的形貌参数是根据节理面的三维形貌特征由形貌测试确定的,而非一条或若干条剖面线,避免了对比法确定 JRC 的局限;得到的剪切强度准则可体现形貌测试中采样效应的影响,但由试件尺寸引起的尺度效应并未加以讨论,将在后续

研究中进行分析。

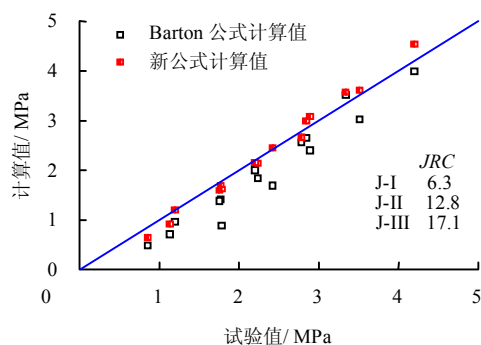


图8 试验值与公式计算值比较

Fig.8 Comparison of the peak shear strength between measured and calculated values

6 结 论

(1) Maksimovic 峰值抗剪强度准则形式简洁, 参数物理含义明确, 但体现节理粗糙程度的特征量“粗糙度角 $\Delta\phi$ ”只能由试验结果反算得出, 因此, 不便于用于预测节理的峰值抗剪强度。

(2) 通过已有的含三维形貌参数的峰值抗剪强度公式确定了零法向应力下节理的剪胀角, 将此剪胀角等价 Maksimovic 峰值抗剪强度准则中的“粗糙度角 $\Delta\phi$ ”, 得到用三维形貌参数表示的 Maksimovic 峰值抗剪强度公式。由 27 组直剪试验数据对新公式进行了验证。采用的三维形貌参数由形貌测试确定, 不含任何平均化的处理, 新峰值抗剪强度公式可用于估算节理的抗剪强度。

致谢: 本文的直剪试验得到宋英龙硕士的协助。

参 考 文 献

- [1] MAKSIMOVIC M. New description of the shear strength for rock joints[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1992, 25(4): 275—284.
- [2] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joint in theory and practice[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1977, 10(1): 1—54.
- [3] ZHAO J. Joint surface matching and shear strength part B: JRC-JMC shear strength criterion[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(2): 179—185.
- [4] 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*, 2014, 47(2): 165—178.
- [5] BEER A J, STEAD D, COGGAN J S. Estimation of the joint roughness coefficient (JRC) by visual[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2002, 35(1): 65—74.
- [6] HONG E S, LEE J S, LEE I M. Underestimation of roughness in rough rock joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 2008, 32(11): 1385—1403.
- [7] GRASSELLI G, WIRTH J, EGGER P. Quantitative 3D description of a rough surface and parameter evolution with shearing[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(6): 789—800.
- [8] 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 Sciences*, 2011, 48(7): 1173—1187.
- [9] MAKSIMOVIC M. The shear strength components of a rough rock joint[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1996, 33(8): 769—783.
- [10] 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): 1502—1512.
- [11] COTTRELL B. Updates to the GG-shear strength criterion[D]. Canada, Toronto: University of Toronto, 2009.