

# 节理岩体剪切强度的计算方法及其应用

徐亮, 林从谋, 张在晨, 葛冰洋

(华侨大学 岩土工程研究所, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 根据 36 组直剪试验结果,对基于起伏度和粗糙度等剪切强度公式进行对比,给出其建议适用性范围. 研究表明:在只考虑起伏度时,Ladanyi-Archambault 公式的计算结果更接近实际值;而只考虑粗糙度时,采用 JRC-JMC 模型和 Grasselli 改进公式进行预测更加合理;节理岩体的峰值剪切强度与法向应力有关,当法向应力较小时,节理面起伏度是节理岩体峰值强度的主要影响因素,而随着法向应力的增大,采用粗糙度计算结果与实际值相吻合.

**关键词:** 岩体力学;节理岩体;峰值剪切强度;粗糙度;起伏度

**中图分类号:** U 451

**文献标志码:** A

工程岩体中含有大量节理裂隙,而节理岩体的稳定性主要受节理面的剪切强度控制. 节理峰值剪切强度是岩体工程设计中十分重要的力学参数,国内外学者对其进行了大量的研究<sup>[1-7]</sup>. 节理剪切强度与其表面形态有关,起伏度与粗糙度是其最常见的两种表现形式. 已有节理峰值剪切强度公式主要分为考虑起伏度或考虑粗糙度等 3 种情况. 张林洪等<sup>[8]</sup>对现有节理峰值剪切强度公式的优缺点进行简单评述并提出新的预测方法,但没有对公式之间的差异性进行对比研究. 夏才初等<sup>[9]</sup>对现有公式进行综述,并对各种影响因素进行了深入的探讨,但忽略了公式的使用范围. Amadei 等<sup>[10]</sup>利用现有理论模型对不同边界条件的天然节理强度进行探讨,指出其不足并提出了新公式,但由于岩石的滑动受到了抑制,节理强度值会偏高. 本文采用文献[11-13]试验结果对 3 种剪切强度公式进行对比,并运用到天马山隧道中,探讨塌方治理方案.

## 1 峰值抗剪强度公式的对比

### 1.1 基于起伏度的节理岩体剪切强度公式

自然状态节理表面是随机起伏的,文献[14-16]按照起伏体尺寸大小将其称为起伏度和粗糙度. 节理剪切强度随着起伏度的增大而增大<sup>[15]</sup>. 室内粗糙节理的剪切试验,用库伦摩尔直线公式来计算其强度,发现峰值剪切强度包线是弯曲的.

基于规则锯齿状模型,F. D. Patton<sup>[17]</sup>将起伏度引入库伦摩尔公式,提出的强度公式为

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

式(1)中: $\sigma_n$  为岩体破坏面上的法向应力; $\tau_p$  为节理峰值抗剪强度; $\varphi_b$  为岩体的基本内摩擦角; $i$  为节理面的起伏角.

Patton 提出的公式只在法向应力较低时才可使用,当法向应力达到一定程度,起伏体基本被剪断,此时节理强度服从摩尔库伦公式. 为此,Jaeger 对 Patton 的直线方程进行光滑<sup>[18]</sup>,提出的强度公式为

$$\tau_p = c(1 - \exp(-b\sigma_n)) + \sigma_n \tan \varphi_r. \quad (2)$$

式(1)中: $c$  为岩体的粘聚力; $\varphi_r$  为残余摩擦角; $b = \frac{\tan i \sec^2 \varphi_r}{c(1 - \tan \varphi_r \tan i)}$ .

收稿日期: 2013-01-22

通信作者: 林从谋(1957-),男,教授,主要从事岩石与隧道工程的研究. E-mail:cmclin@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278208);福建省交通科技发展基金资助项目(200910)

Ladanyi 等<sup>[19]</sup>综合摩擦力、剪胀性和粘结性对峰值剪切强度的影响,提出的强度公式为

$$\tau_p = [\sigma_n(1 - \alpha_s)(V + \tan \varphi_b) + \alpha_s \tau_r] / [1 - (1 - \alpha_s)V \tan \varphi_b]. \quad (3)$$

式(3)中: $\alpha_s$  为被剪断凸起体的面积占节理总面积的比率; $\tau_r$  为岩壁的剪切强度; $V$  为峰值剪切应力作用的剪胀率。

在进行大量人工粗糙节理面的剪切试验的基础上,Ladanyi 提出的强度公式为

$$\left. \begin{aligned} \alpha_s &= 1 - (1 - \sigma_n / \sigma_J)^L, & 0 \leq \alpha_s \leq 1, \\ V &= (1 - \sigma_n / \sigma_J)^K \tan i_p, \\ \tau_r &= \frac{\sqrt{1+n}-1}{n} (1 + n(\sigma_n / \sigma_J))^{0.5}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(4)中:对于粗糙节理面, $K=4, L=1.5$ ;  $\sigma_J$  为岩壁的单轴抗压强度,对于新鲜节理可取完整岩石的单轴抗压强度; $n$  为岩壁单轴抗压与抗拉强度的比值,对于大多数坚硬岩石,Hoek 建议  $n$  取值  $10^{[20]}$ 。

Patton 公式将起伏角引入库伦摩尔公式,使人们对剪胀效应有了初步的认识,但是对剪胀角与起伏角和起伏角与法向应力之间的关系的认识有所偏差<sup>[21]</sup>,使得计算结果与实际值不符. Jaeger 公式计算结果与 Patton 公式计算结果比较接近,两者之间没有本质上的区别. 由于剪胀角与法向应力之间呈负指数关系<sup>[22]</sup>, Ladanyi 提出节理的线性模型忽略了这一点,使得计算结果偏小。

## 1.2 基于粗糙度的剪切强度公式

随着法向应力增大,较大的起伏体几乎被剪断,此时大小不一的凸点分布控制着节理的剪切强度,被称为粗糙度<sup>[9]</sup>. Barton 认为节理剪切强度的主要影响因素是粗糙度,并采用粗糙度系数(joint roughness coefficient, JRC)来评价粗糙度<sup>[23]</sup>,提出的强度公式为

$$\tau_p = \sigma_n \tan [C_{JR} \lg(C_{JR} / \sigma_n) + \varphi_b]. \quad (5)$$

式(5)中: $C_{JR}$  为节理面粗糙度系数<sup>[22]</sup>,  $C_{JR} = \left[ \frac{4A_0 \theta_{\max}^*}{C+1} \left[ 1 + \exp\left(-\frac{1}{9A_0} \frac{\theta_{\max}^* \sigma_n}{C+1 \sigma_t} \right) \right] \right] / \lg\left(\frac{\sigma_{JR}}{\sigma_n}\right)$ ;  $\sigma_{JR}$  为节理面的抗压强度. 式(5)是建立在 200 多个人造节理材料的基础上,当用到实际工程中,发现对于吻合性较差的节理,计算值会偏大。

赵坚对新加坡武吉知马花岗岩各种节理进行一系列剪切试验,提出新的 JRC-JMC 模型<sup>[24]</sup>,即

$$\tau_p = \sigma_n \tan [C_{JR} C_{JM} \lg(\sigma_{JR} / \sigma_n) + \varphi_b]. \quad (6)$$

式(6)中: $C_{JM}$  为节理吻合度系数,对于人工模型, $C_{JM}=1$ ;  $\varphi_r$  为残余摩擦角。

现有节理强度公式大部分是基于结构面剪切方向上的一条剖面线进行剪切强度计算的<sup>[1-10]</sup>. 而在实际工程中,节理面是一个各向异性三维体,因此节理强度与节理面的三维接触和接触面分布有关. G. Grasselli<sup>[11]</sup>通过大量节理岩体的拉断直剪试验和光学测量,提出的强度公式为

$$\tau_p = \left[ 1 + \exp\left(-\frac{1}{9A_0} \frac{\theta_{\max}^* \sigma_n}{C \sigma_t} \right) \right] \sigma_n \tan \varphi_r. \quad (7)$$

式(7)中: $\sigma_t$  岩石的抗拉强度; $\varphi_r = \varphi_b + \left(\frac{\theta_{\max}^*}{C}\right)^{1.18 \cos \beta}$ ,  $\beta$  为片理面与节理所在平面的法平面之间的夹角; $\theta_{\max}^*$  为节理面微元有效剪切倾角; $C$  为粗糙度参数; $A_0$  为面向剪切方向的微元面积和粗糙表面实际面积之比,其取值为 0.4~0.6。

由于公式(7)参数物理意义不明确,唐志成等<sup>[22]</sup>对其进行改进,提出了考虑剪胀效应符合摩尔库伦定律形式的强度方程,即

$$\tau_p = \sigma_n \tan(\varphi_b + \frac{4A_0 \theta_{\max}^*}{C+1} \left[ 1 + \exp\left(-\frac{1}{9A_0} \frac{\theta_{\max}^* \sigma_n}{C+1 \sigma_t} \right) \right]). \quad (8)$$

Barton 公式形式简单和物理意义明确,得到了广泛的应用,但是由于 JRC 的测定方法人为因素很大,并且忽略了节理面上黏结强度,使得计算结果偏大. 赵坚提出节理吻合度系数在一定程度上弥补了式(5)的不足,计算结果与实际更加接近,但其节理吻合度系数值无法量化. G. Grasselli 基于节理的表面形貌参数建立起的三维模型为节理剪切强度的研究开展一个新方向,不过由于其中参数的获得依赖于精密的仪器,模型实际应用条件还不成熟. 唐志成对公式(7)进行改进,剪胀角以三维形貌参数定量表示,使其形式变得简单和物理意义明确,但合理性需要进一步验证。

1.3 其他剪切强度公式

节理面强度的影响因素有很多,其中最重要的是有效应力,常用摩尔库伦的线性方程表示<sup>[25]</sup>,即

$$\tau_p = \sigma_n \tan \varphi_b.$$

(9)

Amadei-Saeb 利用分段线性函数来解释节理剪切变形全过程,提出的剪切强度公式为

$$\tau_p = \sigma_n \tan(\varphi_u + i_p)(1 - \alpha_s) + \alpha_s S_r.$$

(10)

式(10)中: $\varphi_u$  为岩体摩擦角; $S_r$  为完整岩石的剪切强度,岩石的抗剪强度一般为抗压强度的  $1/8$ <sup>[25]</sup>.  
式(9)常用来预测光滑无充填物的节理面强度,而自然界中的节理通常都是粗糙的,这使得计算结果偏小.式(10)无法对峰值前后的非线性行为进行描述<sup>[26]</sup>,所以计算结果与实际有所偏差.

2 直剪试验结果分析

天然节理同时含有起伏度和粗糙度,两者对剪切强度的影响是不同的,目前仍无法考虑两者共同作用影响.基于 G. Grasselli 等<sup>[11-13]</sup>直剪试验结果,如表 1 所示.将表 1 中的相关参数代入上述公式中,基于起伏度和起伏度峰值剪切强度,分别如图 1,2 所示.为了比较两者影响程度,选取式(1)和(5)计算结果进行比较,结果如图 3 所示.起伏角取值范围  $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ <sup>[9]</sup>,取其平均值  $45^{\circ}$ ;节理吻合度系数  $C_{JM}$  的取值范围为  $0.3 \sim 1.0$ ,取其平均值  $0.7$ <sup>[24]</sup>.由于法向应力达到一定值时,起伏体几乎被剪断,所以在采用基于起伏度的公式进行计算时,参考文献[15]采用的法向应力,取其平均值  $0.13 \text{ MPa}$ .

表 1 直剪试验结果  
Tab.1 Results of direct shear tests

试件 编号	岩石 种类	试件尺寸/ mm×mm	$\beta/(^{\circ})$	$A_0$	$C$	$\theta_{\max}^{*}/(^{\circ})$	$\sigma_n/\text{MPa}$	$\sigma_n/\sigma_t$	$\varphi_b/(^{\circ})$	$\varphi_r/(^{\circ})$	$\tau_p/\text{MPa}$
C1	石灰岩	140×140	—	0.491	7.03	80.0	1.070	0.45	36	60	2.200
C2	石灰岩	140×140	—	0.462	5.64	80.0	1.070	0.45	36	56	2.100
C3	石灰岩	140×140	—	0.460	4.60	57.0	3.720	1.55	36	51	5.500
C4	石灰岩	140×140	—	0.508	4.74	65.0	2.450	1.02	36	53	4.600
C5	石灰岩	140×140	—	0.495	5.26	74.0	3.110	1.30	36	53	5.000
C6	石灰岩	140×140	—	0.546	5.19	68.0	1.020	0.43	36	59	2.100
C8	石灰岩	140×140	—	0.555	5.71	74.0	3.110	1.30	36	53	4.900
G1	花岗岩	140×140	—	0.493	7.17	90.0	2.300	0.26	34	51	5.700
G2	花岗岩	140×140	—	0.498	5.60	80.0	2.300	0.26	34	53	5.600
G4	花岗岩	140×140	—	0.498	5.48	65.0	2.190	0.25	34	52	4.800
G5	花岗岩	140×140	—	0.460	5.33	57.0	1.120	0.13	34	54	2.400
G6	花岗岩	140×140	—	0.477	7.39	84.0	1.120	0.13	34	57	2.900
G7	花岗岩	140×140	—	0.470	7.15	81.0	1.120	0.13	34	57	2.800
G9	花岗岩	140×140	—	0.508	5.85	75.0	1.120	0.13	34	57	3.000
M1	大理石	140×140	—	0.513	9.64	76.0	0.870	0.09	37	54	1.700
M2	大理石	140×140	—	0.492	5.60	39.0	1.730	0.19	37	46	2.300
M3	大理石	140×140	—	0.471	10.50	65.0	0.870	0.09	37	52	1.200
M4	大理石	140×140	—	0.513	8.12	61.0	3.780	0.41	37	47	5.800
M5	大理石	140×140	—	0.533	8.92	59.0	2.600	0.28	37	49	4.400
M6	大理石	140×140	—	0.450	10.18	68.0	2.600	0.28	37	48	4.300
M7	大理石	140×140	—	0.502	13.33	86.0	3.780	0.41	37	46	5.600
M8	大理石	140×140	—	0.459	10.52	72.0	3.830	0.42	37	48	6.400
M9	大理石	140×140	—	0.494	10.36	59.0	2.600	0.28	37	47	4.500
M10	大理石	140×140	—	0.515	10.79	67.0	0.870	0.09	37	57	1.500
ML1	大理石	140×140	—	0.573	7.25	66.0	1.020	1.46	37	51	1.400
ML2	大理石	140×140	—	0.505	5.44	45.0	4.130	5.90	37	43	4.500
ML3	大理石	140×140	—	0.523	7.81	66.0	2.090	2.99	37	45	2.300
Gn3	片麻岩	140×140	90	0.492	8.11	65.0	2.650	0.28	36	38	2.400
Gn9	片麻岩	140×140	90	0.488	8.12	63.0	3.520	0.37	36	37	4.000

续表 1

Continue table 1

试件 编号	岩石 种类	试件尺寸/ mm×mm	$\beta/(^{\circ})$	$A_0$	$C$	$\theta_{\max}^{*}/(^{\circ})$	$\sigma_n/\text{MPa}$	$\sigma_n/\sigma_n$	$\varphi_b/(^{\circ})$	$\varphi_r/(^{\circ})$	$\tau_p/\text{MPa}$
Gn6	片麻岩	140×140	0	0.522	4.91	63.0	1.900	0.54	36	46	3.400
Gn10	片麻岩	140×140	90	0.500	8.18	70.0	3.570	0.38	36	40	3.900
Gn11	片麻岩	140×140	90	0.432	10.28	74.0	3.520	0.37	36	37	4.300
Gn12	片麻岩	140×140	90	0.506	11.12	85.0	4.080	0.43	36	35	3.300
Gn13	片麻岩	140×140	90	0.503	9.17	74.0	2.600	0.27	36	36	3.500
S1	蛇纹岩	140×140	0	0.504	4.80	79.0	1.940	0.32	39	53	4.300
S2	蛇纹岩	140×140	0	0.466	4.44	75.0	0.970	0.16	39	61	3.400

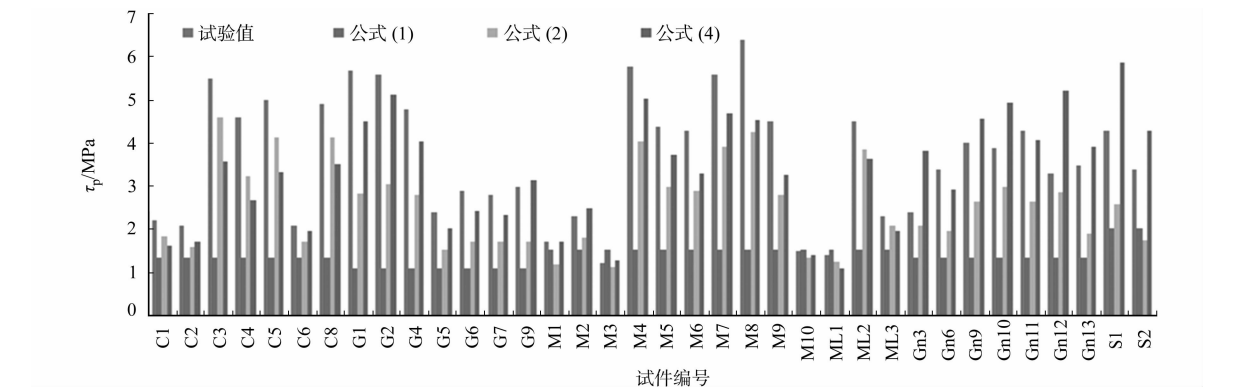


图 1 基于起伏度的计算值与试验值的比较

Fig. 1 Comparison between calculation values based on waviness and experimental values

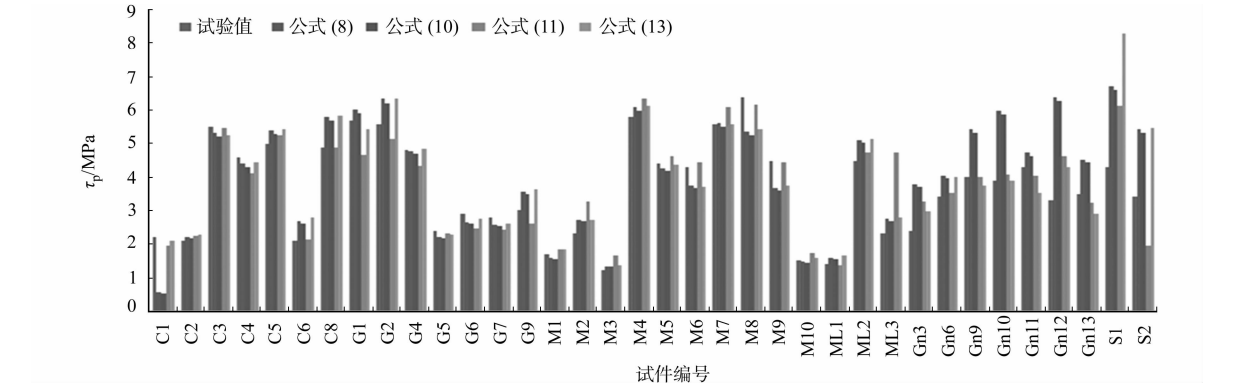


图 2 基于粗糙度的计算值与试验值的比较

Fig. 2 Comparison between calculation values based on roughness and experimental values

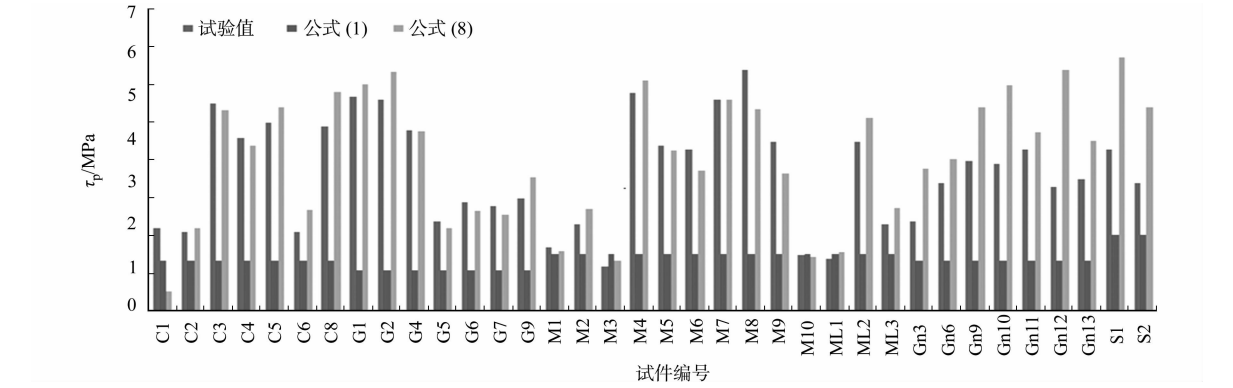


图 3 式(1)与(8)的计算结果比较

Fig. 3 Comparison between calculation values by equations (1) and (8)

从图 1 可知:式(3)的计算结果与试验值比较接近,式(1)偏小,与以上分析结果相同.从图 2 可知:JRC-JMC 模型比 JRC-JCS 模型预测结果更接近试验值,与文献[27]研究结果相同,改进后的 Grasselli 公式计算结果更接近试验值,这与文献[22]的结论相符.综合以上分析,只考虑起伏度对剪切强度的影响时,式(3)对节理强度预测值更符合实际;式(6),(8)在只考虑粗糙度系数时计算结果误差较小.从图 3 可以看出:在法向应力比较大时,式(9)的计算结果与试验值比较接近;而当法向应力较小时,式(1)的计算结果与试验值比较吻合,说明节理剪切强度与法向应力大小有关.

3 工程实例应用

以福建省莆田到永定高速公路的天马山隧道工程为例.该隧道隧址区属构造剥蚀低山丘陵地貌,地形起伏大,局部地段地形较陡,进口段坡度较大,约 30°~35°.洞口段为强风化花岗岩,节理裂隙发育,岩体破碎.隧道开挖半径为 9 m,采用上下台阶开挖,洞口段岩体单轴抗拉强度为 45.6 MPa,设计为Ⅳ级围岩.通过围岩变形分析、现场数据采集和采样实验室试验得到公式所需的围岩参数,如表 2 所示.表 2 中: $\sigma_n, \varphi_b, \varphi_r$  均在实验室获得.

表 2 节理岩体强度预测所需参数  
Tab. 2 Parameters required to predict the strength of jointed rock mass

参数	$\beta/(^{\circ})$	$A_0$	$C$	$\theta_{\max}^{*}/(^{\circ})$	$\sigma_n$	$\sigma_n/\sigma_t$	$\varphi_b/(^{\circ})$	$\varphi_r/(^{\circ})$
试验值	—	0.36	2.05	25	1.07	0.35	15	23

通过式(3),(6),(8)来计算天马山洞口段岩体节理峰值剪切强度,结果分别为 0.66,0.74,0.58 MPa,三者的平均值为 0.66 MPa.由文献[25]可知:岩体设计抗剪强度为单轴抗压强度的 1/8,约 5.7 MPa,比估算强度大 8.7 倍.由于洞口段施工,经常下雨,围岩质量很差,设计Ⅳ级围岩支护强度不够.因此,建议根据Ⅴ级围岩进行设计,采用双侧壁导坑法施工,防止开挖过程中出现塌方.实践证明,塌方治理效果明显,地表沉降和洞口收敛减小了几倍,也说明式(3),(6),(8)计算节理强度的可靠性.

4 结论

- 1) 起伏度与粗糙度是影响节理岩体剪切强度的主要因素.在只考虑起伏度时,式(3)计算结果更接近实际;在只考虑粗糙度时,采用式(6)和(8)更加合理.至于两者共同作用的影响,还需进一步研究.
- 2) 节理剪切强度与法向应力有关.当法向应力较小时,节理面起伏较大,这时采用起伏度计算节理剪切强度与实际比较接近;随着法向应力的增大,起伏体几乎被剪断,影响节理剪切强度是大小不一的凸点分布状况,采用粗糙度计算结果与实际值相吻合.
- 3) 将研究结果运用到天马山隧道中,计算结果表明,基于起伏度或粗糙度的剪切强度式(3),(6)和(8)计算结果吻合度很高.因此,基于起伏度或粗糙度对节理岩体强度进行评价是合理的.

参考文献:

[1] 李肖音,李建军,巫建军,等.粗糙岩石节理剪切强度的修正公式[J].河北理工学院学报,2005,27(1):4-8.  
[2] 杜时贵,胡晓飞,郭霄,等.JRC-JCS 模型与直剪实验对比研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(1):2747-2753.  
[3] 汤海生,张鹏程,汪洋.水作用下岩体断裂强度的探讨[J].岩石力学与工程学报,2004,23(19):3337-3341.  
[4] 肖卫国,兑关锁,朱玉萍,等.充填节理岩体本构模型研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(2):3463-3468.  
[5] 徐磊,任青文.不同充填度岩石分形节理抗剪强度的数值模拟[J].煤田地质与勘察,2007,35(3):52-54.  
[6] 陈记.岩石节理面剪切流变的实验研究[J].河海工学院报,2004,13(4):74-77.  
[7] BANDIS S,SC B,SC M. Experimrntal studies of scale effects of shear strength, and deformation of rock joints[D]. Leeds:University of leeds,1980:32-33.  
[8] 张林洪,朱云兰.现有结构面抗剪强度确定方法的评述及新方法的提出[J].昆明理工大学学报,2000,25(3):50-53.  
[9] 夏才初,孙宗硕.工程岩体节理力学[M].上海:同济大学出版社,2002:94-119.  
[10] AMADEI B,WIBOWO J,STURE S, et al. Applicability of existing model to predict the behavior of replicas of natural fractures of welded tuff under different boundary conditions[J]. Geotechnical and Geological Engineering,

1998,16(2):79-128.

[11] GRASSELLI G. Shear strength of rock joints based on quantified surface description[D]. Switzerland;Swiss Federal Institute of Technology,2001:295-314.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 朱小明,李海波,刘博,等. 含二阶起伏体的模拟岩体节理试样剪切特性试验研究[J]. 岩土力学,2012,33(2):354-360.

[15] 朱小明,李海波,刘博,等. 含一阶和二阶起伏体节理剪切强度的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(9):1810-1818.

[16] 易成,郝彬,朱红光,等. 裂隙岩体的一体两介质模型抗剪性能研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(6):1207-1215.

[17] PATTON F D. Multiple modes of shear failure in rock[C]//Proceedings of the First Congress of International Society of Rock Mechanics. Lisbon:[s. n. ],1996:509-513.

[18] 吕则欣,陈华兴. 岩石强度理论研究[J]. 西部探矿工程,2009,1(1):5-8.

[19] LADANYI B,ARCHAMBAULT G. Simulation of the shear behavior of a jointed rock mass[C]//Proceedings of the 11th US Symposium on Rock Mechanics and Rock Engineering. Berkeley:[s. n. ],1977,10(1/2):1-54.

[20] HOEK E,BRAY J W. 岩石边坡工程[M]. 北京:冶金工业出版社,1983:92-108.

[21] 唐志成,夏才初,宋英龙,等. 人工模拟节理缝制剪胀模型及峰值抗剪强度分析[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(1):3038-3044.

[22] 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.

[23] International Society for Rock Mechnics. Suggestedmethods for the quantiative description of discontinuities in rock masses[J]. International Journal of Rock Mechnics and Mining Science and Geomechanics Abstracts,1978,15(2):319-368.

[24] 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.

[25] 宋建波,张卓元,于远忠,等. 岩体经验强度准则及其在地质工程中的应用[M]. 北京:地质出版社,2002:78-92.

[26] 唐志成,夏才初,黄继辉,等. 节理峰值后归一位移软化模型[J]. 岩石力学与工程学报,2011,32(7):2013-2024.

[27] 杜时贵,胡晓飞,郭霄,等. JRC-JCS 模型和 JRC-JMC 模型与直剪试验对比研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(增刊 1):2747-2753.

## Discussion on the Calculation Method of Shear Strength of Jointed Rock Mass

XU Liang, LIN Cong-mou, ZHANG Zai-chen, GEI Bing-yang

(Institute of Geotechnical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** According to 36 direct shear test results, the various shear strength equations based on waviness or roughness were investigated, and their adaptability was suggested. The results show that the calculation result of Ladanyi-Archambault is close to experimental value when considering only waviness, and the calculation results of JRC-JMC model and Grasselli formula are more reasonable than others when considering only surface roughness. The peak shear strength of joint rock mass is related to normal stress, for small normal stress, the waviness is the main influencing factor; with increasing normal stress, the calculation results considering roughness conform well to the experimental values.

**Keywords:** rock mechanics; jointed rock mass; peak shear strength; roughness; waviness

(责任编辑: 黄晓楠      英文审校: 方德平)