

具有规则粗糙度的类岩石节理剪切力学性质试验研究

谢 强¹, 宁 越¹, 王晶晶^{1, 2}, 班宇鑫¹, 傅 翔³

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 404500; 2. 上海申元岩土工程有限公司, 上海 200000;
3. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

摘要: 使用水泥砂浆浇筑试样模拟含节理岩石, 并设置不同角度的锯齿状节理, 进行直剪试验研究其剪切力学特性, 以及剪切强度与法向变化规律. 试验结果显示, 节理面的剪切破坏形式主要受锯齿角度控制, 起伏角度较大的节理面, 主要发生剪断破坏; 起伏角度较小的情况下则多发生磨损破坏. 剪切过程中出现剪胀现象, 并在低法向应力和较大锯齿角度下较明显. 同一法向应力条件下, 节理面抗剪强度基本符合 Mohr-Coulomb 准则, 使用该准则对试验数据拟合得到内摩擦角和粘聚力与节理面锯齿角度呈正相关. 分别用 Patton 和 Ladanyi 模型分析试验结果, 前者在节理面锯齿起伏较小的情况下拟合结果较好, 后者则相反.

关键词: 节理; 直剪试验; 剪切力学性质; 剪切强度

中图分类号: TU452, TD315

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)05-0635-08

Study on shear mechanical properties of rock-like joints with regular roughness

XIE Qiang¹, NING Yue¹, WANG Jingjing^{1, 2}, BAN Yuxin¹, FU Xiang³

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 404500; China;

2. Shanghai Shenyuan Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shanghai 200000, China;

3. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation,
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Cement mortar samples with jagged joints of different angles were made to study their shear mechanical properties, shear strength and normal variation. The results show that the shear failure mode of the joint plane is mainly controlled by the sawtooth angle, the joint surface with larger angle mainly cause shear failure to and occur when the angle is gentle, wearing and tearing often occur. Shear dilatation occurs during the process, especially under lower normal stress and with sharp sawtooth angle. Under the same normal stress condition, the shear strength of the joint surface is positively correlated with the sawtooth angle. This basically meets the Mohr-Coulomb criterion. The cohesive force and internal friction angle of the joint surface obtained by fitting the criterion increase the sawtooth angle. Patton and Ladanyi strength models were used to data analysis. Results show that the former has a better fitting effect on the strength of the joint surface with smaller sawtooth angle, while the latter is better for fitting the joint surface with larger sawtooth angle.

Key words: joint, direct shear test, shear behavior, shear strength

在工程实践中, 节理是影响天然岩体力学性质的主要因素, 而节理面最常见的破坏方式为剪切破坏. 影响节理面剪切力学性质的因素包括节理面的几何特征、粗糙度、填充物、岩石粘聚力与内摩擦角等. 其中关于节理粗糙度对于其剪切特性的影响, 已有众多学者开展了一系列研究, 在量化评价节理粗糙度方面取得了一定成果^[1-5]. 有关试验方法与抗剪强度理论公式的研究, 唐志

成^[6]将节理的形貌参数与峰值剪胀角相结合, 提出了一种基于剪胀效应的节理抗剪强度公式. 杨洁^[7]通过对人工劈裂岩石节理试样进行直剪试验, 建立了基于三维形貌参数的节理峰值抗剪强度模型. 冯海鹏、张清照等^[8-9]在浇筑试件时垫上不同角度的钢板以形成不同起伏角度的贯通节理面. 张菊连^[10]选取 Barton 提出的标准剖面线中的 5 条形状, 浇筑不规则的水泥砂浆贯通节理面试件. 白

世伟、夏才初等^[11-12]在试样内部埋设薄钢片预制裂纹,模拟非贯通节理面。李海波^[13]利用混凝土试件进行了锯齿状节理直剪试验,提出了考虑剪切速率和起伏角度影响的节理剪切刚度公式。孙辅庭^[14]等建立了考虑三维形貌特征的充填水泥浆岩石节理峰值剪切强度模型,采用建立的强度模型计算充填水泥浆节理的峰值剪切强度并与直剪试验结果进行对比。周辉^[15]基于不同起伏高度的不规则锯齿形结构面直剪实验,归纳出结构面的破坏机制可分为锯齿滑移错断机制、结构面上下盘的拉伸断裂机制和上盘前端下盘后端的冲击断裂机制。

为进一步探究节理面粗糙度对剪切力学特性的影响,本文对含锯齿形节理面的类岩石试样进行直剪试验,研究了试验过程中试样破坏形式,以及抗剪强度、剪切变形等参数。

1 试验器材与方案

1.1 试验设备与材料

天然岩石节理面的采集较为困难,且天然岩石节理的粗糙度形状各异,填充物也不尽相同,因此通常采用人工形成类节理面的方法开展室内的规律性试验。人造类岩石节理的方法常用的有拉断法、喷砂法、浇筑法。拉断法和喷砂法形成的节理面形态比较随机,而本次试验需要用到成批量的相同起伏角度的节理面,因此本试验采用水泥砂浆浇筑形成人工节理面。使用5块木板制造模具盒,用透明胶带缠绕固定。在模具盒宽度方向的中部放入锯齿形木隔板(厚15 mm),用以浇筑锯齿形节理面。试样尺寸为150 mm×150 mm×100 mm(长×宽×高),节理面设置四种锯齿角度,分别为15°、25°、35°和45°。

试件使用42.5号普通硅酸盐水泥砂浆浇筑,后经过7 d标准条件下的养护,对养护完成后的试件利用YZW-30微机控制电动应力式岩石直剪仪进行直剪试验。

1.2 试验方案

为研究类节理面锯齿起伏角度和法向应力两个因素各自的影响,试验采用以下方案:(1)法向应力和加载速率不变,改变起伏角度;(2)起伏角度和加载速率不变,改变法向应力。

浇筑尺寸与类节理试样相同的完整水泥砂浆试样,测定其单轴抗压强度为10 MPa,试验在4种不同的法向应力条件下进行,分别为单轴抗压强度的5%、10%、30%和50%。具体的试验加载

方案如表1:

采用应力控制的方式施加荷载,速率为0.5 kN/s。法向应力达到指定值后稳定30 s再施加切向荷载。

表1 试验方案

Tab. 1 Test plan

起伏角度 $\beta/^\circ$	试件编号	加载速率 $\mu/\text{kN}\cdot\text{s}$	法向应力 σ/MPa
15	1-1	0.5	0.5
	1-2		1
	1-3		3
	1-4		5
25	2-1	0.5	0.5
	2-2		1
	2-3		3
	2-4		5
35	3-1	0.5	0.5
	3-2		1
	3-3		3
	3-4		5
45	4-1	0.5	0.5
	4-2		1
	4-3		3
	4-4		5

2 实验结果分析与讨论

2.1 剪切破坏模式

从整个试验过程来看,类岩石节理面主要有两种破坏形式,一种为沿锯齿的磨损破坏,此现象较为多见,另有少部分破坏是锯齿被剪断,并且两种破坏形式均发生在节理面上,其他部位没有破坏。试验中,锯齿起伏角度较大($\beta=45^\circ$)或法向应力较大会出现锯齿被剪断的破坏形式,并且剪断破坏发生的较为突然,表现出明显的脆性破坏特性。而沿锯齿磨损破坏更为缓慢,剪切过程中锯齿逐渐被磨平,最终达到破坏。

整个试验过程中,所有试件节理面并没有表现出一致的破坏规律。可以将上述两种节理剪切破坏形式分为磨损破坏与剪断破坏。两种破坏方式的典型剪切应变-应力曲线可大致表示如图2。

可以看出,剪断破坏形式的剪切应变-应力曲线可分为明显的“爬坡”、“剪断”、“滑移”三个阶

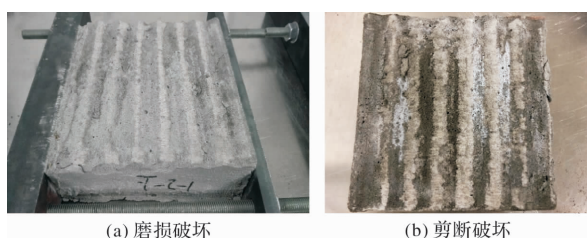


图1 节理面破坏形态

Fig. 1 Failure shape of triangular joints

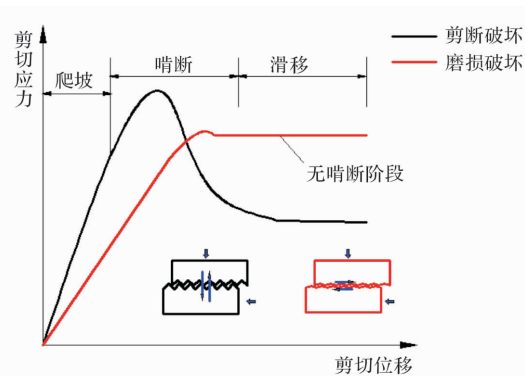


图2 节理面两种剪切破坏形态

Fig. 2 Two shear destruction forms of joints

段,且峰值强度和残余强度的差值较大,破坏后强度明显降低,具有明显脆性特征;而磨损破坏的曲线以“爬坡段”和“滑移段”为主,且破坏前后强度无明显变化。

试验过程中会出现试件法向位移增大的情况,这是因为试件在破坏之前,上下两部分沿着锯齿面滑动,产生相对位移,此位移可分解为切向和法向,法向位移即体现为试件的剪胀现象。不同锯齿角度与不同法向应力下的实验,剪胀程度也不相同。

2.2 法向应力对类节理面剪切力学行为的影响

(1) 15°锯齿节理面

试验中 15°和 45°锯齿的类节理面表现出两种典型的破坏模式,现对这两个节理面进行分析。图 3 为 15°锯齿节理面在不同法向应力条件下的剪切位移-应力曲线图。

图 4 中可以看出,随着法向应力增大,剪切应力的峰值强度也逐渐增大,在低法向应力条件下,试件节理面锯齿主要在齿尖部位磨损,节理面主体仍具有一定的抗剪能力,因此表现出明显的峰值抗剪强度,同时峰后残余部分强度;高法向应力下,曲线在破坏后呈现出明显的滑移趋势,且无明显的强度峰值。这是因为法向应力的增加导致试件被压密,上下节理面之间的锯齿更加吻合,使整个节理面锯齿被磨平。

试验过程中会出现试件法向位移增大的情况,

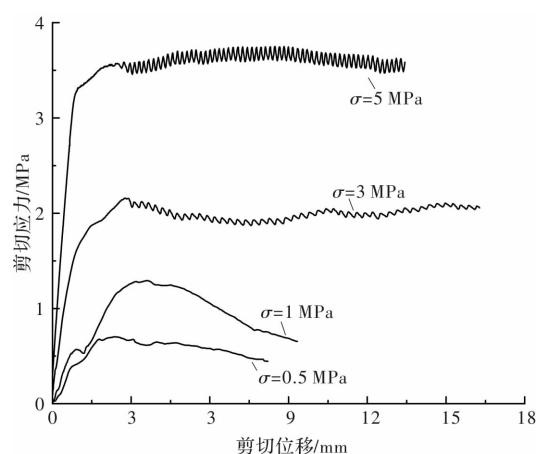


图3 15°锯齿节理面在不同法向应力条件下的剪切位移-应力曲线图

Fig. 3 Shear displacement-stress curve of joints with 15° sawtooth under different normal stress

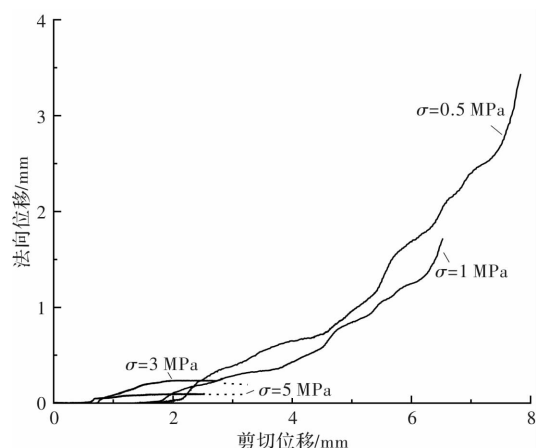


图4 15°锯齿节理面在不同法向应力条件下的剪切位移-法向位移曲线图

Fig. 4 Shear displacement-normal displacement curve of joints with 15° sawtooth under different normal stress

可能是由于试件在破坏之前,上下两部分沿着锯齿面滑动,产生相对位移,此位移可分解为切向和法向,法向位移即表现为试件的剪胀现象。不同剪切条件下的剪胀程度也不相同。15°锯齿的节理面的法向位移曲线如图 5。当法向应力逐渐增大,试件上下节理面之间吻合更紧密,法向位移逐渐减小,爬坡现象更不明显。法向应力为 5 MPa 时,法向变形大小约为 0.5 mm,约占试件竖向高度的 0.5%,说明法向位移很小,几乎没有剪胀现象。

(2) 45°锯齿节理面

45°锯齿的类节理面在不同法向应力条件下的剪切应变-应力曲线如图 5。

45°锯齿节理面主要发生剪断破坏,与 15°的节理面剪切时的破坏方式不同,所以剪切位移-应力曲线也有所不同。随着法向应力的增加,节理面

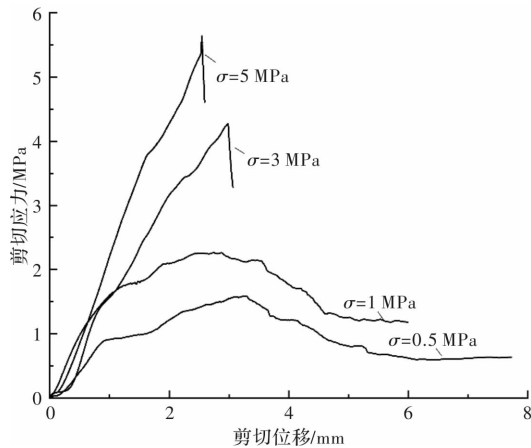


图 5 45°锯齿节理面在不同法向应力条件下的剪切位移-应力曲线图

Fig. 5 Shear displacement-stress curve of joints with 45° sawtooth under different normal stress

的峰值剪切强度逐渐增大,而在最终破坏时产生总的剪切位移随着法向应力的增加而减小,这是由于法向应力的增加,类节理面上下锯齿咬合的更加紧密,更不易产生相对滑移。在高法向应力下,强度达到峰值后下降的幅度更大,类节理面锯齿被剪断的现象越明显,表现出更显著的脆性破坏特性。

类节理面在不同法向应力下的切向位移-法向位移曲线如图 6。法向应力较低时,类节理面锯齿间有较长爬坡过程,造成显著剪胀现象,法向位移较大;高法向应力条件下,法向变形,在 5 MPa 作用下,法向位移不足 0.05 mm,剪胀现象几乎可以忽略不计。

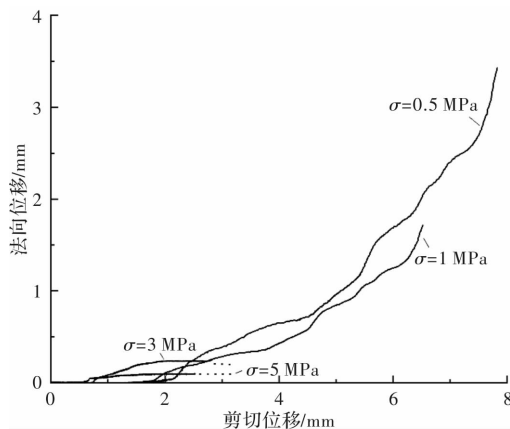


图 6 45°锯齿节理面在不同法向应力条件下的剪切位移-法向位移曲线图

Fig. 6 Shear displacement-normal displacement curve of joints with 45° sawtooth under different normal stress

各锯齿角度节理面在不同法向应力下的抗剪强度峰值如表 2。

表 2 不同法向应力下节理面抗剪强度

Tab. 2 Shear strength at different normal stresses

节理面锯齿角度 $\beta / ^\circ$	法向应力 σ / MPa	峰值剪切强度 τ / MPa
15	0.5	0.703
	1	1.506
	3	2.158
	5	3.751
25	0.5	0.999
	1	1.788
	3	3.644
	5	4.813
35	0.5	1.271
	1	2.039
	3	4.405
	5	5.344
45	0.5	1.588
	1	2.264
	3	4.267
	5	5.642

2.3 锯齿起伏角度对类节理面剪切力学行为的影响

现以法向应力为 0.5 MPa 时,不同锯齿起伏角度的类岩石节理面剪切试验为例进行分析。节理面试件的剪切位移-应力曲线如图 7。剪切初期,剪切应力基本上随剪切位移迅速增长。当进入了塑性变形阶段,剪切应力增速放缓。15°、35°和 45°锯齿的节理面在强度峰值后有小幅度的波动,是粗糙度变化引起的内部裂纹扩展过程承受的阻力变化。锯齿角度越大,节理面的抗剪强度也逐渐增大,峰后残余强度也越来越明显,表现出越来越明显的剪断破坏现象。

0.5 MPa 法向应力下切向-法向位移如图 8。可以看出锯齿角度越大,法向位移增长越快,节理面相对滑移的距离就越大,剪胀现象就越明显。

总结在各个应力条件下不同锯齿角度的节理面抗剪强度峰值,如图 9。在 0.5 MPa、1 MPa、3 MPa 和 5 MPa 法向应力作用下,抗剪强度与节理面的锯齿起伏角度呈现正相关。

3 强度公式对实验数据拟合结果

使用经典的 Mohr-Coulomb 强度准则判断节理的强度

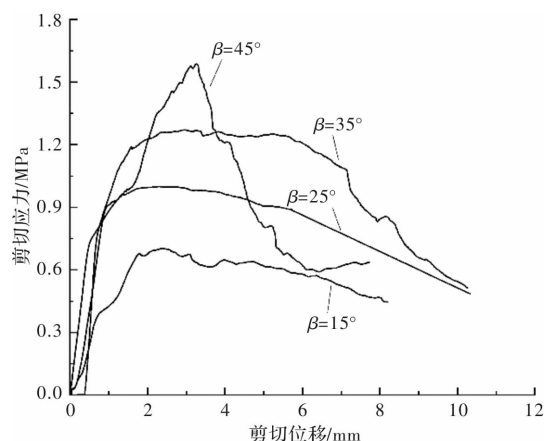


图7 0.5MPa法向应力下不同角度
节理面剪切应力-位移曲线

Fig. 7 Shear stress-displacement of joints with different
saw tooth angle at normal stress of 0.5MPa

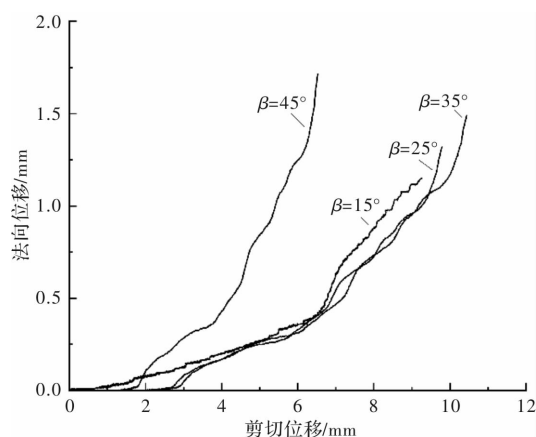


图8 0.5 MPa法向应力下节理面法向位移曲线对比
Fig. 8 Comparison of normal displacement of joints
at normal stress of 0.5 MPa

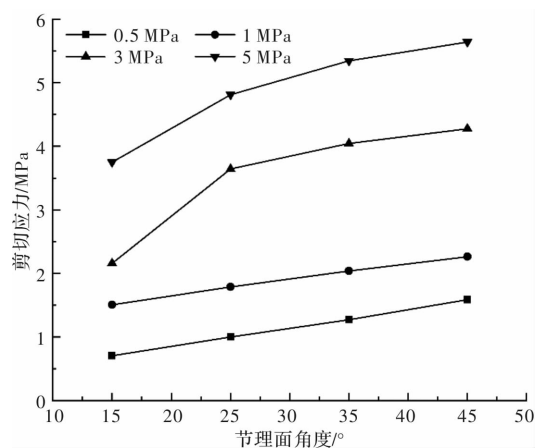


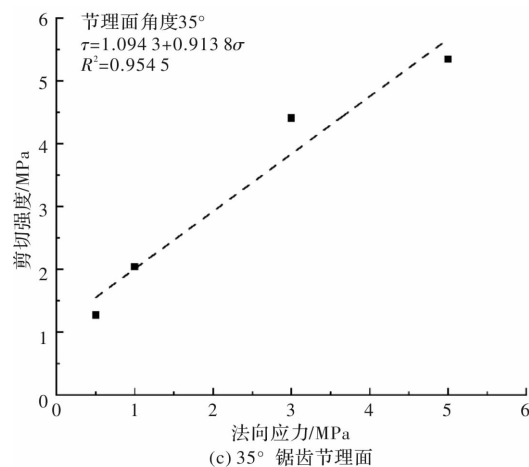
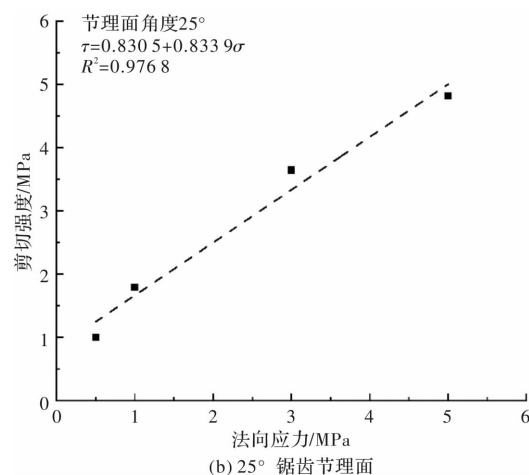
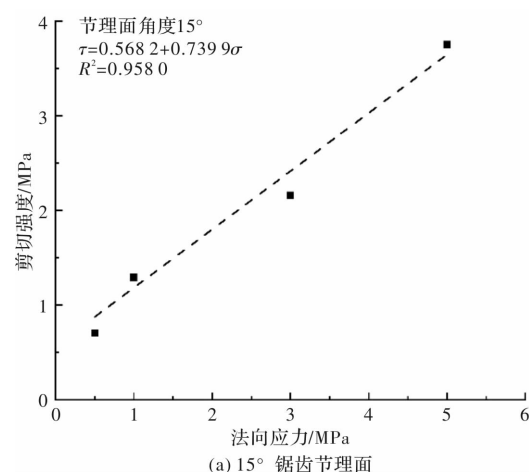
图9 锯齿角度与节理面抗剪强度的关系
Fig. 9 Relationship between sawtooth angle
and shear strength of joint

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中: τ 为节理的抗剪强度, c 、 φ 分别是粘聚力和内摩擦角, σ 为法向应力. 基于试验数据, 利用

Mohr-Coulomb 准则进行线性拟合, 获得 c 、 φ 值, 结果如图 10 所示.

可以看出, 剪切峰值强度与法向应力拟合度大于 0.9, 线性关系明显. 说明 Mohr-Coulomb 强度准则较好的反映了真实情况. 模拟结果同时表明同一水泥砂浆浇筑的试件粘聚力 c 和内摩擦角 φ 在不同锯齿角度下拟合结果不同. 说明锯齿对节理面的抗剪强度造成了较大的影响. 数据显示随着锯齿角度的增大, 粘聚力与内摩擦角都有增大的趋势, 因此剪切试验中试件的抗剪强度也增大, 这与试验结果也吻合.



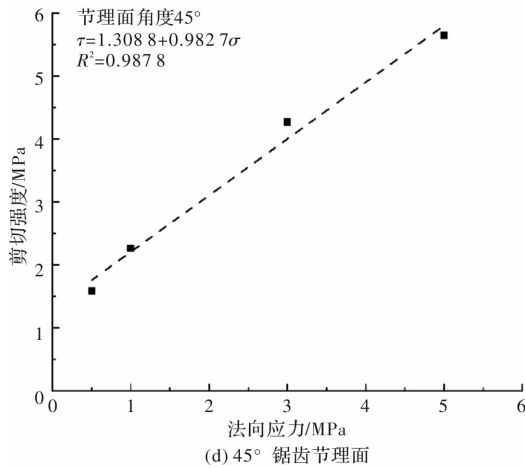


图10 使用 Mohr-Coulomb 准则的拟合曲线

Fig. 10 Fitting result of Mohr-Coulomb mode

Mohr-Coulomb 强度准则最初主要应用在完整岩石, 只反映了粘聚力与内摩擦角的作用, 没有考虑到节理间的几何形态、粗糙度、填充物等因素的影响。

Patton 最早提出了锯齿角度为 β 的规则起伏节理面双直线强度公式。

$$\tau = \sigma \tan(\varphi + \beta) \quad \sigma < \sigma_T \quad (2)$$

$$\tau = c + \sigma \tan(\varphi_r) \quad \sigma > \sigma_T \quad (3)$$

$$\sigma_T = c / [\tan(\varphi + \beta) + \tan(\varphi_r)] \quad (4)$$

式中: σ 为法向应力, φ 为节理面基本内摩擦角, β 为节理面锯齿起伏角度, φ_r 为节理面的残余内摩擦角, σ_T 为法向应力临界值, $\varphi_r < \varphi + \beta$, c 为岩石节理面粘聚力。当法向应力较小时, 节理面锯齿没有被剪断, 产生相对的滑移, 剪切强度主要由摩擦力提供, 此时的总的摩擦角等于节理面的内摩擦角 φ 与锯齿起伏角度 β 之和。当法向应力持续增加并超过临界值 σ_T 时, 节理面的锯齿被剪断, 此后的剪切强度则需要考虑节理的粘聚力。

Patton 理论把节理面的剪切破坏分成两种不同的类型, 低法向应力下节理面摩擦破坏; 高法向应力下发生锯齿的剪断破坏。然而现实中这两种破坏方式可能同时发生, 没有明显的分界点。并且节理面的粘聚力参数难以获得, 应用时常使用岩体的粘聚力, 也会产生误差。

为此, Ladanyi 综合考虑功能原理、节理面摩擦力和形貌特征等因素, 提出了一个反映节理面剪切破坏特征的强度准则, 如式(5)。

$$\sigma = \frac{\sigma(1 - \alpha_s)(V + \tan\varphi) + \alpha_s S_R}{1 - (1 - \alpha_s)V \tan\varphi} \quad (5)$$

式中: α_s 为剪切面积比, V 为剪胀率, φ 为节理面的基本内摩擦角, S_R 为完整岩块的抗剪强度, 计算方

法如式(6)。

$$S_s = \sigma_c \frac{\sqrt{n+1}-1}{n} \left(1 + n \frac{\sigma}{\sigma_c}\right)^{0.5} \quad (6)$$

式中: σ_c 为完整岩石的单轴抗压强度, n 为完整岩石的抗压强度与抗拉强度之比, 一般情况下 $n \approx 10$ 。基于大量室内试验, Ladanyi 提出了以下经验公式确定 α_s 和 \dot{V} 。

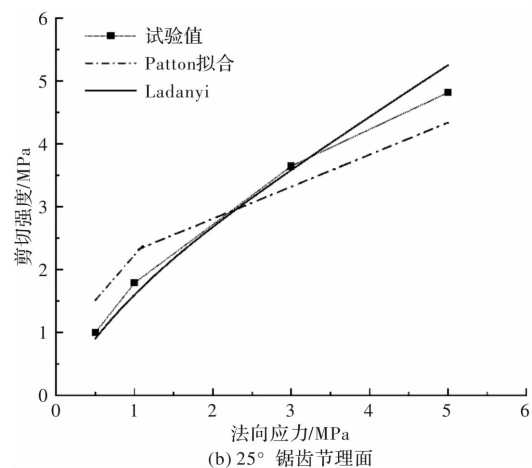
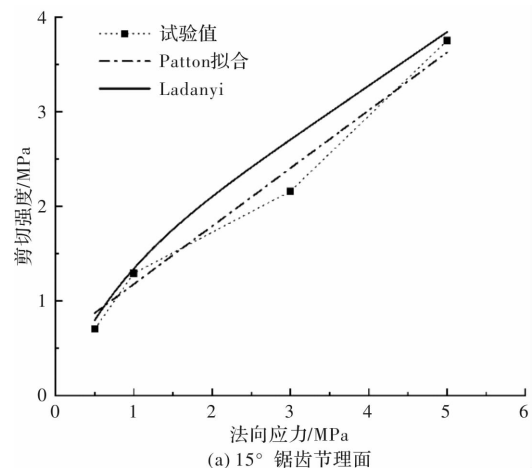
$$\alpha_s = 1 - \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_P}\right)^L \quad (7)$$

$$\dot{V} = \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_P}\right) K \tan\beta \quad (8)$$

式中: σ_P 为节理面强度等于完整岩石强度时的临界值, L 和 K 为经验参数, 分别取值 1.5 和 4, β 为节理面的锯齿起伏角度。

分别用 Patton 和 Ladanyi 公式对试验数据进行分析比较。其中节理面基本内摩擦角, 根据前述对 Mohr-Coulomb 强度准则的拟合, 推断其约为 36° , 这也与张清照等人的实验结果大致相符。

从图 11 可以看出, 只有在类节理面锯齿起伏角度为 15° 时 Patton 拟合的准确性大于 Ladanyi 拟合, 锯齿角度较小的节理面, 剪切破坏形式主要为磨损破坏, 主导因素为摩擦角, 说明 Patton 模型前段部分直线着重考虑了节理锯齿角度与内摩



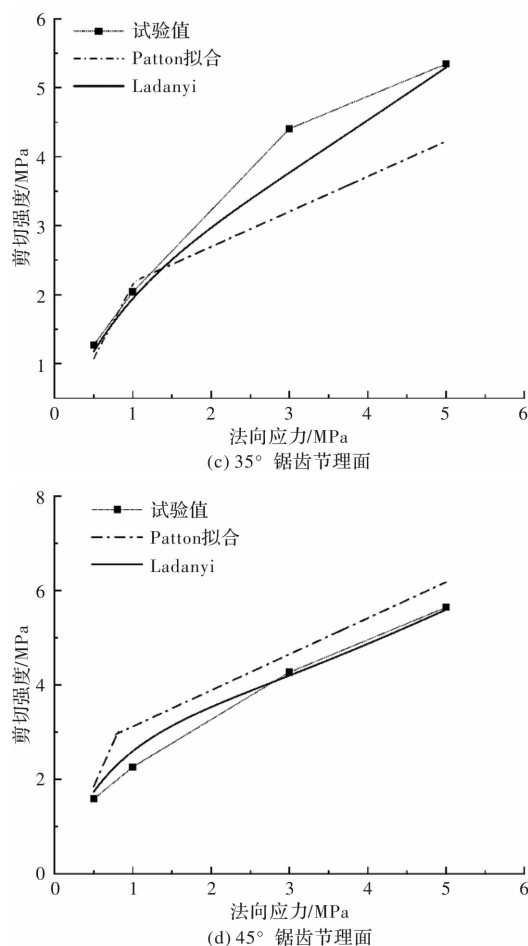


图 11 Patton 和 Ladanyi 两种强度模型拟合比较

Fig. 11 Comparison of Patton and Ladanyi strength models fitting result

擦角的叠加效果是较合理的。锯齿角度增大后,节理面破坏方式逐渐变为剪断破坏。因剪断破坏前期必然伴随节理面的磨损, Ladanyi 模型在考虑锯齿角度和内摩擦角基础上引入了完整岩石单轴抗拉和抗压强度,能较好地解释剪断破坏。

4 结论

(1)进行具有不同角度锯齿的类岩石节理试件直剪试验,发现主要有磨损破坏和锯齿的剪断破坏两种剪切破坏形式。节理面锯齿较小的试件主要发生磨损破坏,其应力-位移曲线可分为“爬坡”和“滑移”两阶段,无明显峰值和残余强度;锯齿角度较大的节理面多发生剪断破坏,应力位移曲线有明显“爬坡”“剪断”“滑移”三阶段。

(2)在相同锯齿起伏角度下,抗剪强度与法向压力之间线性关系明显,能够较好的使用 Mohr-Coulomb 准则进行拟合。但是节理面粘聚力和内摩擦角的拟合结果不是固定值。锯齿起伏角度增大,节理面粘聚力和内摩擦角的拟合值随之线性增大。

(3)采用 Patton 强度模型和 Ladanyi 强度模型分别对直剪试验数据拟合, Patton 模型对于锯齿角度较小的节理面拟合效果较好;而 Ladanyi 模型更符合锯齿起伏较大的节理面。两者适用的节理面锯齿角度分界点在 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 之间。

参考文献 References

- [1] PATTON F D. Multiple modes of shear failure in rock [A]// Proceedings of the 1st Congress on International Society for Rock Mechanics[C]. Lisbon, Portugal: Jaroslav Černý Institute for Development of Water Resource, 1966: 509-513.
- [2] LADANYI B, ARCHAMBAULT G. Simulation of shear behavior of a jointed rock mass [A]// Proceedings of the 11th US Symposium on Rock Mechanics[C]. Berkeley, CA: ResearchGate, 1969: 105-125.
- [3] BARTON N, CHOUHEY V. The shear strength of rock joint in theory and practice [J]. Rock Mechanics, 1977, 10(1): 1-54.
- [4] GOODMAN R E. The mechanical property of joints [A]// In Proc. 3rd Cong ISRM. Denver: Research-Gate, Part A, 1974: 127-140.
- [5] Bandis, Lumsden, Barton. Fundamentals of rock joint deformation [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. 1983, 20(6): 249-268.
- [6] 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.
TANG Zhicheng, XIA Caichu, SONG Yinglong, et al. Discussion about grasselli peak shear strength criterion for rock joints [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 356-364.
- [7] 杨洁, 荣冠, 程龙, 等. 节理峰值抗剪强度试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(5): 884-894.
YANG Jie, RONG Guan, CHENG Long, et al. Experimental study of peak shear strength of rock joints Chinese [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(5): 884-894.
- [8] 冯海鹏. 不同剪切速率下节理的力学特性研究 [D]. 武汉: 中国科学院研究生院 (武汉岩土力学研究所), 2006.
FENG Haipeng. Studies on mechanics behavior of joints under different shearing velocity [D]. Wuhan: The Chinese Academy of Science, Institute of Rock and soil Mechanics, 2006.
- [9] 张清照, 沈明荣, 丁文其. 结构面在剪切状态下的力学特性研究 [J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(2): 37-42.
ZHANG Qingzhao, SHEN Mingrong, DING Wenqi. Study on the mechanical properties of rock mass discontinuity under shear condition [J]. Hydrogeology

- &. Engineering Geology, 2012, 39(2): 37-42.
- [10] 张菊连, 沈明荣, 梁志荣. 不规则结构面剪切特性试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(6): 993-1000.
ZHANG Junlian, SHEN Mingrong, LIANG Zhirong. Experimental study on shear strength characteristics of irregular rock mass discontinuities[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(6): 993-1000.
- [11] 白世伟, 任伟中, 丰定祥, 等. 共面闭合断续节理岩体强度特性直剪试验研究[J]. 岩土力学, 1999(2): 10-16.
BAI Shiwei, REN Weizhong, FENG Dingxiang, et al. Research on the strength behaviour of rock containing coplanar close intermittent joints by direct shear test[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999(2): 10-16.
- [12] 夏才初, 肖维民, 丁增志. 非贯通节理 Jennings 强度准则的岩桥弱化和节理面起伏角修正[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 485-492.
XIA Caichu, XIAO Weimin, DING Zengzhi. Modification of jennings strength criterion for intermittent joints considering rock bridge weakening and joint surface undulating angle[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 485-492.
- [13] 李海波, 刘博, 冯海鹏, 等. 模拟岩石节理试样剪切变形特征和破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2008(7): 1741-1746.
LI Haibo, LIU bo, FENG Haipeng, et al. Study of deformability behaviour and failure mechanism by simulating rock joints sample under different loading conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(7): 1741-1746.
- [14] 孙辅庭, 余成学, 万利台. 充填水泥浆岩石节理峰值剪切强度模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2481-2489.
SUN Futing, SHE Chengxue, WAN Litai. A peak shear strength model for cement filled rock joints[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(12): 2481-2489.
- [15] 周辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 结构面剪切破坏特性及其在滑移型岩爆研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1729-1738.
ZHOU Hui, MENG Fanzhen, ZHANG Chuanqing, et al. Characteristics of shear failure of structural plane and slip rockburst[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(9): 1729-1738.

(编辑 沈波)

(上接第 622 页)

- [8] 邢海燕, 陈鑫彧, 黄保富, 等. 拉压荷载下焊缝的磁记忆表征及热处理评价[J]. 大庆石油学院学报, 2011, 35(1): 100-102.
XING Haiyan, CHEN Xinyu, HUANG Baofu, et al. MMM characterization of welded joint and heat treating evaluation under tension and compression loading[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2011, 35(1): 100-104.
- [9] 梁志芳, 李午申, 王迎娜, 等. 金属磁记忆检测焊接裂纹的时间空间有效性[J]. 焊接学报, 2006, 27(8): 9-11.
LIANG Zhifang, LI Wushen, WANG Yingna, et al. Available time and dubious zone size of welding crack by metal magnetic memory method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(8): 9-11.
- [10] DOUBOV A A. Diagnostics of boiler tubes with usage of metal magnetic memory [M]. Moscow: Energoatomizdat, 1995.
- [11] 苏三庆, 马小平, 王威, 等. 基于 ANSYS 有限元模拟的钢丝绳单丝拉伸力-磁耦合研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(3): 309-316, 331.
SU Sanqing, MA Xiaoping, WANG Wei, et al. Research on magneto-machanical coupling on tensile monofilament steel wire rope based on ANSYS finite element simulation[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2017, 49(3): 309-316, 331.
- [12] 王威, 樊浩, 苏三庆, 等. 钢结构对接焊缝隐性损伤的磁记忆检测试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, 46(4): 497-501.
WANG Wei, FAN Hao, SU Sanqing, et al. Experimental detection on implicit damage of butt weld of steel structure by magnetic memory testing[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2014, 46(4): 497-501.
- [13] DOUBOV A A. Development of a metal magnetic memory method[J]. Chemical and Petroleum Engineering, 2002, 47(11-12): 837-839.
- [14] 赵鹏, 潘清红, 邹宗树. Q235 钢板表面裂纹形成原因分析[J]. 理化检验(物理分册), 2016, 52(3): 210-212.
ZHAO Peng, PAN Qingjiang, ZOU Zongshu. Formation cause analysis of crack on the surface of Q235 Steel plate[J]. Physical and Chemical Examination (Physical), 2016, 52(3): 210-212.
- [15] 任吉林, 林俊明. 电磁无损检测[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
REN Jilin, LIN Junming. Electromagnetic nondestructive testing[M]. Beijing: Science Press, 2008.

(编辑 沈波)