

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.2403

砂土充填大理岩节理的剪切强度经验公式

焦 峰¹, 郭保华^{1,2}, 翟明磊¹

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 河南理工大学 煤炭安全生产河南省协同创新中心, 河南 焦作 454000)

摘 要: 为研究砂土充填对节理抗剪强度的影响, 利用 GCTS (RDS-200 型) 岩石剪切测试系统对 4 种不同摩擦系数砂土充填的粉晶大理岩节理进行了直剪试验。结果表明: 相同法向应力下, 未充填节理的峰值剪切应力大于充填节理的峰值剪切应力, 说明砂土的存在降低了节理的剪切强度; 由节理面三维形貌参数最大谷深 S_v 表征节理面粗糙程度, 得到了未充填节理的峰值剪切强度公式, 公式预测值与试验值基本吻合; 得到了用充填砂土摩擦系数表达的充填节理峰值剪切强度公式, 公式预测值与试验值较为吻合。研究结论对充填节理岩体稳定性评价具有一定指导意义。

关 键 词: 岩石力学; 充填节理; 直剪试验; 三维形貌参数; 强度经验公式

中图分类号: TU 451

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)11-4102-07

Empirical formula for shear strength of marble joints infilled with sands

JIAO Feng¹, GUO Bao-hua^{1,2}, ZHAI Ming-lei¹

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China;

2. The Collaborative Innovation Center of Coal Safety Production of Henan Province, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

Abstract: To investigate the effect of sandy fillings on the shear strength of rock joints, direct shear tests were conducted on single-joint fine-grained marble specimens infilled with four types of sands with different frictional coefficients. The results show that the peak shear stress of unfilled marble joints was greater than those of infilled marble joints under a same normal stress. It is indicated that the existence of sandy fillings reduced the shear strength of rock joints. A new empirical formula for the shear strength of the unfilled joints was proposed, expressed by the three-dimensional roughness parameter of maximum valley depth S_v of the joint surfaces, and its calculated shear strength of the unfilled joints roughly coincided with their test values. An empirical formula of peak shear strength for infilled fine-grained marble joints was also obtained, expressed by the friction coefficients of infilled sands. the predicted shear strength of infilled rock joints was in accordance with the test values. Above conclusions have some helps to evaluate the stability of infilled jointed rock mass in rock engineering.

Keywords: rock mechanics; infilled joint; direct shear test; 3D morphology parameter; strength empirical formula

1 引 言

工程岩体强度主要由岩块及节理结构控制, 而节理通常被砂土、软泥等填充, 这些充填物的存在一定程度上改变了节理的强度, 岩石节理的力学性质受完整岩石的力学性质和节理面粗糙程度的影响。至今已有许多节理峰值抗剪强度公式, 已有的峰值抗剪强度公式绝大部分遵循 Mohr-Coulomb 公式的形式, 内摩擦角由节理材料的基本摩擦角与剪胀角确定, 其中剪胀角体现了节理形貌对抗剪强度的影响。Patton^[1]通过对一系列齿状节理进行常法向应力条件下的直剪试验, 建立了考虑节理起伏角的

双线性强度准则。Barton 等^[2]基于大量岩石节理直剪试验的结果, 认为法向应力会影响粗糙节理表面的剪胀角, 提出节理粗糙度系数-节理压缩强度 ($JRC-JCS$) 公式, 该公式形式简单且能够反映不规则节理面的粗糙度, 成为目前应用最为广泛的节理峰值抗剪强度公式。

上述节理岩体峰值剪切强度公式最大的局限在于不能反映节理面真实三维形貌特征的影响。实际上, 节理的剪切力学行为与节理面接触位置及分布密切相关, 节理面三维形貌参数可以更为准确地表征节理粗糙度和预测峰值抗剪强度^[3]。Grasselli^[4]通过岩石节理直剪试验, 建立了节理面微元有效剪

收稿日期: 2017-12-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51109076)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51109076).

第一作者简介: 焦峰, 男, 1991 年生, 硕士研究生, 主要从事充填节理剪切方面的学习与研究工作。E-mail: jfeng26@163.com

通讯作者: 郭保华, 男, 1979 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩石裂隙变形与渗流方面的研究工作。E-mail: guobaohua@139.com

切角和与其对应的接触面积的统计函数关系, 提出了新的节理面三维形貌函数和峰值抗剪强度公式。唐志成等^[5]发现坡度均方根 Z_2 (slope root mean square, RMS) 能够较好地描述节理的宏观起伏特征, 并用它表征节理的三维形貌特征, 在直剪试验的基础上建立了相应的剪切强度经验准则。然而, 通常情况下天然节理并不闭合, 节理中存在的软弱充填物会使得节理的强度大大弱化, 因而 Indraratna^[6-7]、Davies^[8]等对含有软弱充填物的人工制作规则节理的峰值剪切强度进行了试验研究。史玲等^[9]研究发现, 充填节理的剪切强度与节理的破坏模式有关, 主要有充填物破坏和充填物与节理之间的接触面破坏两种形式。

综上所述, 未充填节理和充填规则节理的峰值剪切强度得到了一些研究, 但充填不规则节理的剪切试验研究还不多。本文拟通过直剪试验, 研究具有不同摩擦系数的砂土充填对粉晶大理岩张拉节理剪切强度的影响, 并提出砂土充填大理岩节理的剪切强度经验公式。

2 试验方法

2.1 试验装置

直剪试验采用美国 GCTS (Geotechnical Consulting and Testing Systems) 公司的 RDS-200 直剪装置^[10]完成, 控制软件为 GATS (Computer Aided Testing Software Standard)。这套装置通过电液伺服系统自动控制剪切和垂直载荷或变形, 可以进行复杂应力路径下的直剪试验。该系统通过编程可实现常法向位移、常法向应力、常法向刚度及其组合方式下的多种控制方式, 对于剪切位移、剪切速度等试验参数也可以设置调整。剪切系统的切向和法向加载能力分别是 10 t 和 5 t, 最大切向和法向行程分别是 25 mm 和 24 mm。

节理表面三维形貌参数通过 Okio-400 三维扫描仪扫描后计算得到^[10]。该仪器采用全局误差控制模块来控制节理形貌的扫描精度, 平均精度为 0.02~0.03 mm, 扫描仪的最大覆盖扫描区域为 400 mm×300 mm。所配套的测量与分析软件, 可以对岩石节理表面的三维形貌进行图形显示与分析。

2.2 试样制备

试验所用的岩石试样均采自河南南阳市, 主要成分为方解石、白云石与菱铁矿, 晶粒为 0.2~0.5 mm, 宏观均质, 无明显缺陷, 加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的标准岩样。采用自制劈裂模具制作节理, 用 60 t 压力机在岩样长轴中点处垂直轴线劈裂圆柱形试

样, 制成张拉性人工裂隙试件 25 个, 部分试样如图 1 所示, 岩样表面的黑色圆点是扫描标记点。

岩样的物理力学参数由表 1 所示。其中, ϕ_b 为节理的基本摩擦角, 通过自倾斜试验得到; c_1 是节理的黏聚力, 通过节理直剪试验得到; c_2 是完整岩样的黏聚力; ϕ 是完整岩样的内摩擦角, 通过标准岩样的三轴压缩试验得到; JCS 是节理壁抗压强度, E 和 μ 分别为完整岩样的弹性模量和泊松比, 通过单轴压缩试验得到。



图 1 制作模具 (左上), 节理试样 (左下) 和试样封装 (右)
Fig.1 Split tool (upper left), jointed specimens (lower left) and encapsulation of specimen (right)

表 1 岩样节理和完整岩样的物理力学参数
Table 1 Mechanical properties of rock joint and intact rock specimens

ϕ_b /(°)	JCS /MPa	c_1 /MPa	c_2 /MPa	ϕ /(°)	σ_t /MPa	E /GPa	μ
32.43	83.02	3.37	18.65	41.6	3.57	24.58	0.25

节理充填所用的 4 组砂土如图 2 所示。通过筛子筛选, 砂土粒径比较均匀, 粒径如表 2 所示。通过直剪试验得到 4 组砂土黏聚力和内摩擦角也如表 2 所示, 黏聚力均较小, 接近 0 MPa。

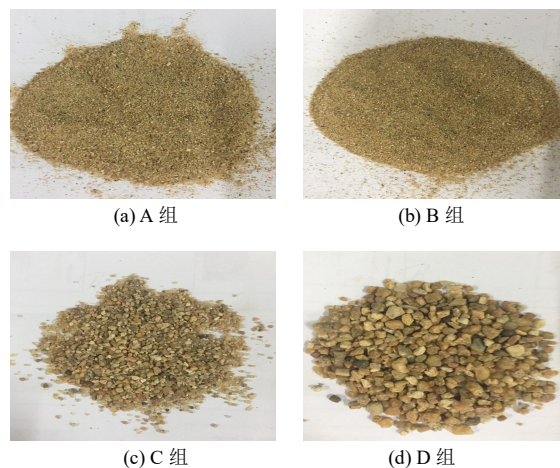


图 2 4 组砂土
Fig.2 Four groups of sand

表 2 砂土的力学参数

Table 2 Mechanical parameters of sand

砂土分组	粒径 / mm	ϕ / ($^{\circ}$)	c / kPa
A 组	1.19	27.47	8.83
B 组	0.50	31.11	2.79
C 组	2.00	34.42	6.79
D 组	3.90	39.26	5.58

2.3 试验过程

首先, 利用两条夹棍把已加工好的岩石节理试样放入下剪切环中, 并且保证试样基本与下剪切环同心, 且试样节理比下剪切环稍高。利用快凝水泥浇筑下剪切环, 流态水泥平面与下剪切环上端面基本持平。待下剪切环内水泥凝固后, 撤除上述两条夹棍, 与下剪切环同心放置上剪切环, 两剪切环之间设置隔离环片, 环片厚度覆盖节理分布范围, 然后在已凝固水泥上面铺设与隔离环片等厚的橡皮泥, 再往上剪切环内浇筑水泥, 流态水泥高度与上剪切环上端面基本持平。待上剪切环内水泥凝固并达到设计强度后, 拆除隔离环片, 将上下剪切环一并放入下剪切盒, 然后将上剪切盒覆盖上剪切环, 试样准备工作完成。试验在常法向应力 (CNL) 模式下进行, 先按应力控制方式施加法向应力直至设定值; 再按变形控制方式施加切向荷载, 剪切速率均为 1 mm/min , 最大剪切位移为 5 mm 。试验结束时, 测试数据可导入 Excel 或其他软件中进行后处理。

快凝水泥单轴抗压强度为 80 MPa , 杨氏模量为 30 GPa , 在本文试验条件下, 其变形较小可以忽略不计。由于试样端面直径仅为 50 mm , 当充填砂土厚度过大时, 上剪切盒易在剪切位移较大时发生倾倒, 从而造成试验的失败。因此, 本文试验充填砂土厚度基本相同, 均约为 3.6 mm 。

2.4 试验方案

剪切试验共分为两组, 第 1 组为未充填组, 共 5 个试样; 第 2 组为充填组, 分别用 4 种不同摩擦系数的砂土进行充填, 每种砂土充填岩石节理试样 5 个, 共 20 个。按充填砂摩擦系数从小到大将充填试样分为 A、B、C 和 D 4 组。试验在常法向应力 (CNL) 模式下进行, 对每组试样, 法向应力设计为 3、6、9、12 和 15 MPa。

3 试验结果

未充填节理和充填节理的全程剪切应力-剪切位移曲线如图 3 和图 4 所示。

由图 3 可以看出, 随着法向应力水平的提高, 未充填节理的峰值剪切应力和峰值剪切位移整体增

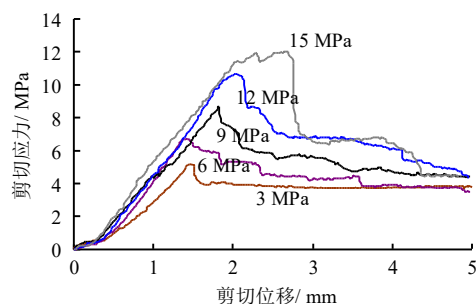
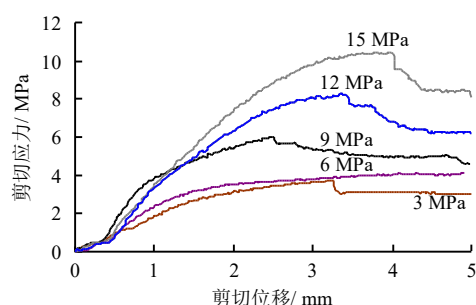
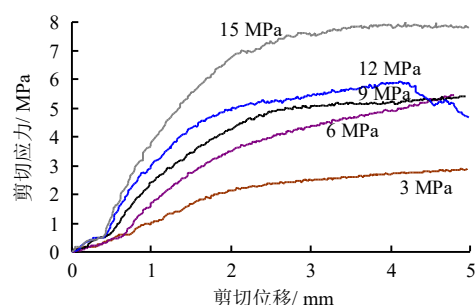


图 3 未充填节理剪切应力-剪切位移曲线

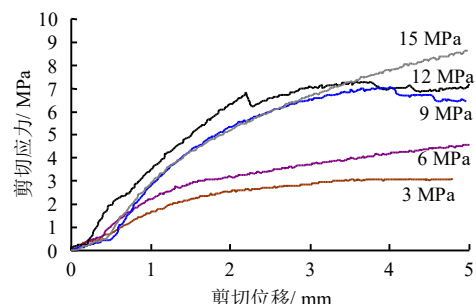
Fig.3 Shear stress vs. shear displacement curves of unfilled joints



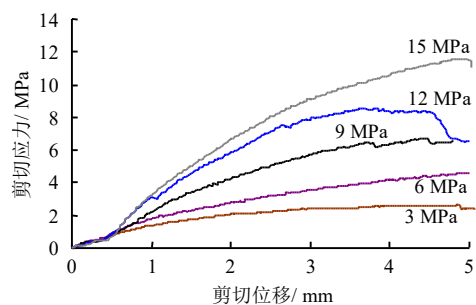
(a) A 组



(b) B 组



(c) C 组



(d) D 组

图 4 充填节理剪切应力-剪切位移曲线

Fig.4 Shear stress vs. shear displacement curves of infilled joints

大, 峰后剪切应力的跌落特征也越明显。这是因为, 法向应力越高, 岩石节理在破坏前积蓄的弹性能越多, 峰后弹性能释放也越明显。

由图 4 可以看出, 大部分充填节理未达到剪切应力峰值, 呈现应变强化特征, 所以很少出现剪切应力的峰后跌落现象, 类似于软弱型岩石剪切变形曲线^[11-12]。对比相同法向应力下未充填节理和充填节理剪切后的图片 (见图 5) 可知, 试验结束后, 未充填节理表面磨损比较明显, 而充填节理表面未见有明显磨损。因此, 可以推断, 未充填节理在剪切过程中存在着峰前弹性能的存储和峰后弹性能的释放, 而充填节理在整个剪切过程中弹性能的存储和释放并不明显。同时说明, 未充填节理剪切强度与节理形貌关系较大, 而节理形貌对充填节理剪切强度影响较小。在本文充填砂土厚度较大的情况下, 充填节理的剪切强度与砂土的剪切强度相关性较大, 属于文献[9]中充填物破坏类型。

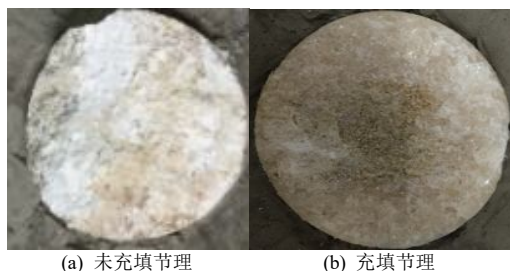


图 5 未充填节理和充填节理在 $\sigma=3$ MPa 时节理面的磨损情况

Fig.5 Damage of unfilled joint surface and infilled joint surface at $\sigma=3$ MPa

4 未充填节理剪切强度公式

通过对节理上下表面进行扫描, 得到未充填节理和充填节理的形貌数据, 分别如表 3、4 所示。

表 3、4 中 σ 为施加的法向应力, Z_2 为坡度均方根, 本文中 Z_2 为通过节理面中心的 4 条相互成 45° 测线上坡度均方根的平均值, 测线采样间隔为 0.5 mm; R_s 为三维轮廓面积比; S_v 为节理面最大谷深 (mm)。

表 3 未充填节理面的形貌参数
Table 3 Morphology parameters of unfilled joint surfaces

试样编号	σ / MPa	Z_2	R_s	S_v / mm
A1	3	0.30	1.08	-0.26
A2	6	0.26	1.06	-0.13
A3	9	0.30	1.07	-0.05
A4	12	0.27	1.07	-0.03
A5	15	0.28	1.07	-0.03

表 4 充填节理面三维形貌参数
Table 4 3D morphology parameters of infilled joint surfaces

组别	试样编号	σ / MPa	R_s	S_v / mm
A	A6	3	1.04	-0.10
	A7	6	1.06	-0.13
	A8	9	1.05	-0.01
	A9	12	1.06	-0.08
	A10	15	1.08	-0.04
B	A11	3	1.05	-0.12
	A12	6	1.09	-0.03
	A13	9	1.05	-0.09
	A14	12	1.05	-0.05
	A15	15	1.06	-0.27
C	A16	3	1.08	-0.39
	A17	6	1.07	0.00
	A18	9	1.08	-0.28
	A19	12	1.06	-0.05
	A20	15	1.06	-0.10
D	A21	3	1.10	0.00
	A22	6	1.06	-0.11
	A23	9	1.10	0.00
	A24	12	1.06	-0.08
	A25	15	1.11	-0.01

李晓锋等^[13]通过数值模拟认为节理岩体主要呈现磨损和剪断两种破坏形态, 不同的破坏形态对应不同的强度模型。考虑节理面基本摩擦角 ϕ_b 和平均爬坡角 $\arccos(1/R_s)$, 节理面的滑动破坏模型可表达为

$$\tau = \sigma \tan[\phi_b + \arccos(1/R_s)] \quad (1)$$

式 (1) 的剪切强度计算值与试验值如图 6 所示。当 $\sigma \leq 6$ MPa 时, 节理面发生滑动破坏, 式 (1) 计算值与试验值较为接近; 当 $\sigma > 6$ MPa 时, 计算值明显高于试验值, 且随法向应力增大, 计算值与试验值差值也越大, 说明节理发生剪断破坏。由此

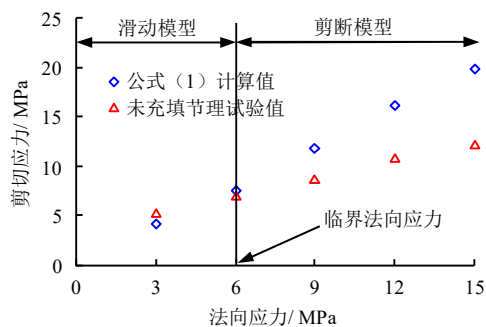


图 6 公式 (1) 计算峰值剪切强度与试验值
Fig.6 Calculated peak shear strength by formula (1) and measured values

可以看出法向应力对节理面的剪切强度有较大影响,式(1)不适合所有法向应力下的节理剪切强度估计。

节理面凸起的剪断与节理凸起分布有关,因此,可以提出一个与节理面基本摩擦角、法向应力和节理形貌有关的非充填节理强度公式为

$$\tau = \sigma \tan \left[\varphi_0 + \frac{\arccos(1/R_s)}{(1+\sigma)^m} \right] \quad (2)$$

式中: m 为形貌系数,与节理形貌有关,反映法向应力对节理剪切强度的影响程度。 $(1+\sigma)^m$ 反映法向应力对爬坡角的折减程度,当形貌系数 $m=0$ 时,说明该节理为爬坡破坏形式;当 m 越大,爬坡角的折减越大,节理强度越低;当 m 越小,爬坡角的折减越小,节理强度越大。

形貌系数 m 和节理面最大谷深 S_v 有较好的线性关系,如图 7 所示。因此,可得到式(2)的计算值与试验值如图 8 所示。由图 8 可以看出, Barton 公式计算值偏低,式(2)预测值与试验值接近。

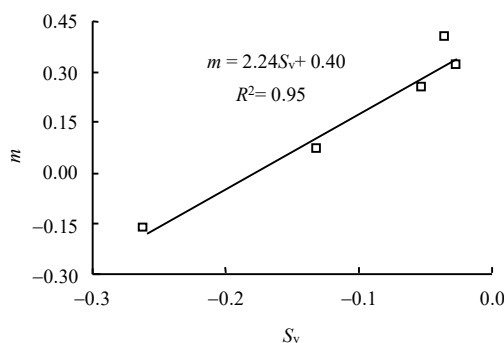


图 7 m 和 S_v 的关系
Fig.7 Relationship between m and S_v

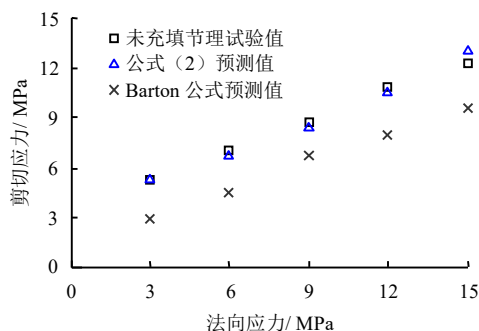


图 8 未充填节理强度预测值与试验值
Fig.8 Predicted peak shear strength and measured values of unfilled joint

5 充填节理强度经验公式

由式(2)计算得出的充填节理在未充填情况下的峰值剪切应力、由表 2 中砂土的黏聚力和内摩

擦角根据摩尔-库仑准则计算砂土的峰值剪切应力以及充填节理的峰值剪切应力试验值,如图 9 所示。

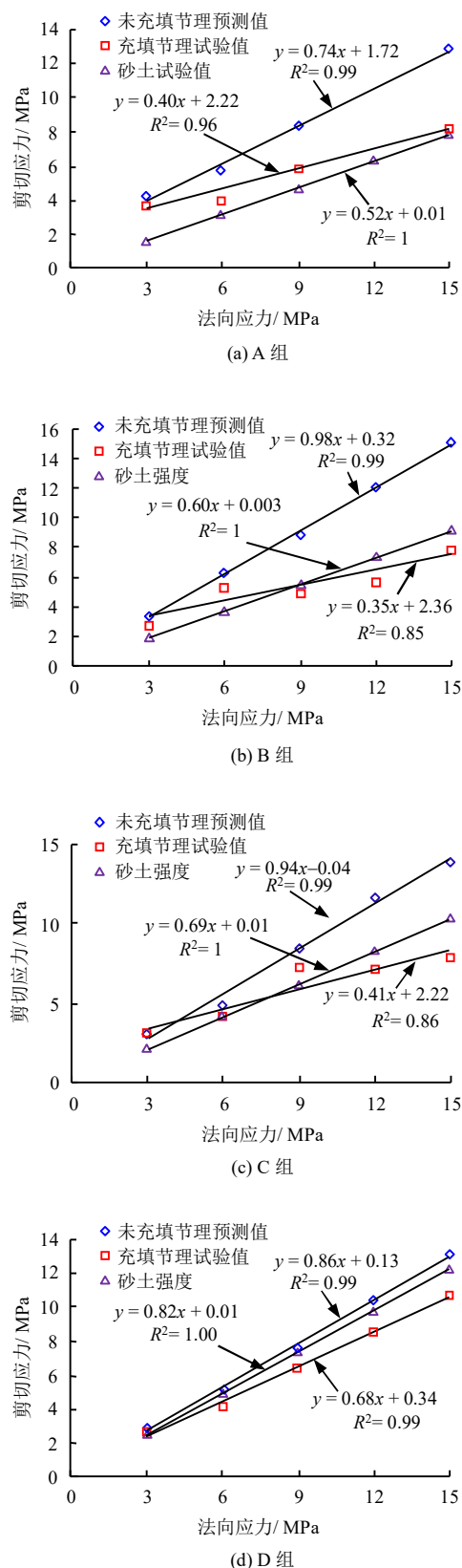


图 9 公式(2)预测值与砂土剪切强度和充填节理剪切试验值
Fig.9 Predicted values of formula (2), measured shear strength of sands and infilled joints

由图 9 可以看出, 由公式 (2) 计算的未充填情况下节理的剪切应力高于充填情况下节理的剪切强度, 因此, 节理面之间存在充填物会降低节理的剪切强度。在内摩擦角较小的 A 组, 充填节理剪切强度均高于砂土的剪切强度; 而在其他 3 组, 均出现了充填节理剪切强度低于砂土的情况, 且 4 组充填节理试样强度线斜率均小于砂土。因为节理内砂土的存在, 使节理面的接触更加不充分, 接触率进一步降低, 实际法向应力和剪切应力高于按照节理投影面积计算的法向应力和剪切应力, 所以在较小的名义剪切应力(计算值)下就可以达到剪切应力峰值。

由图 9 可得各组砂土的剪切强度线斜率 f_s 、充填节理强度线斜率 f , 砂土剪切强度线与充填节理剪切强度线交点坐标如表 5 所示。其中砂土剪切强度线和充填节理剪切强度线交点的横坐标为法向应力 σ_j 、纵坐标为剪切应力 τ_j 。

表 5 充填节理剪切强度参数
Table 5 Shear strength parameters of infilled joint

试验组	f_s	f	σ_j / MPa	τ_j / MPa
A	0.52	0.40	18.40	9.57
B	0.60	0.35	9.20	5.56
C	0.69	0.41	7.91	5.42
D	0.82	0.68	2.47	2.02

砂土剪切强度线和充填节理剪切强度线交点的横坐标 σ_j 、纵坐标 τ_j 及充填节理剪切强度线斜率 f 与砂土剪切强度线斜率 f_s 的关系如图 10 所示, 由图可以看出 σ_j 和 τ_j 与 f_s 呈指数关系, f 与 f_s 呈抛物线关系, 拟合公式如下:

$$\sigma_j = 523.53e^{-6.45f_s} \quad (3)$$

$$\tau_j = 125.24e^{-4.93f_s} \quad (4)$$

$$f = 7.12f_s^2 - 8.55f_s + 2.92 \quad (5)$$

由此, 充填节理剪切强度公式确定过程如下: 首先将 4 组砂土的 f_s 值代入式 (3)、(4), 得到 4 组试样砂土强度线和充填节理强度线交点坐标, 分别记为 (σ_j, τ_j) ; 然后将 4 组砂土的 f_s 值代入式 (5), 得到 4 组充填节理剪切强度线斜率拟合值 f , 最后确定不同摩擦系数砂土充填节理的强度公式如下:

$$\tau = f(\sigma - \sigma_j) + \tau_j \quad (6)$$

将本文设计的法向应力分别为 3、6、9、12、15 MPa, 分别代入式 (6), 得到 4 组砂土充填节理剪切强度拟合值与试验值如图 11 所示。

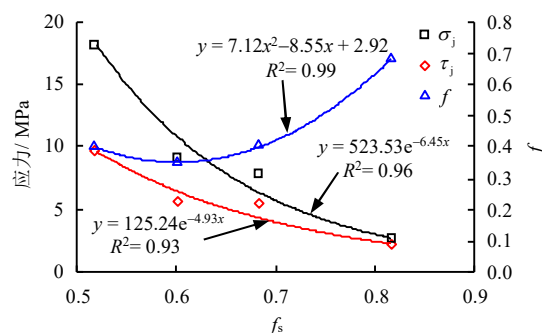


图 10 f 、 σ_j 和 τ_j 与 f_s 的关系
Fig.10 Relationships of f , σ_j , τ_j with f_s

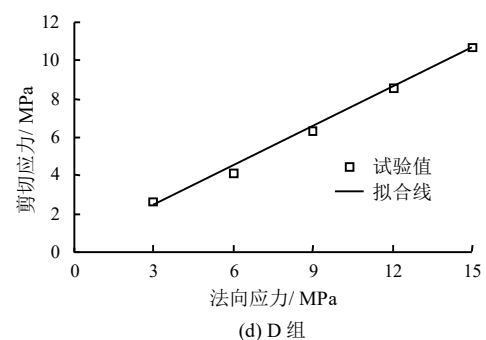
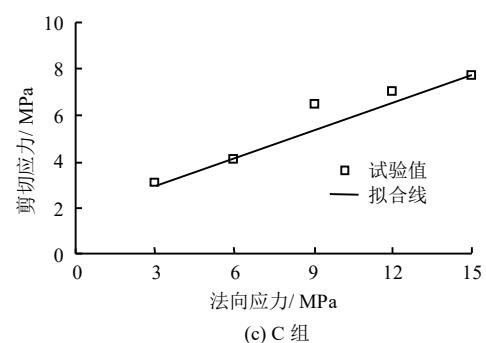
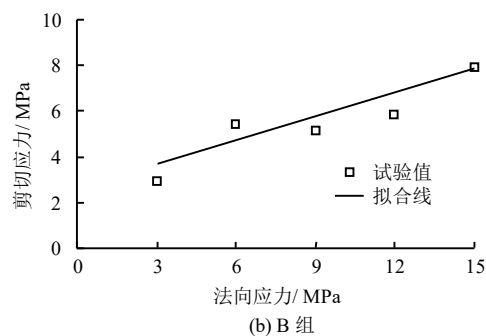
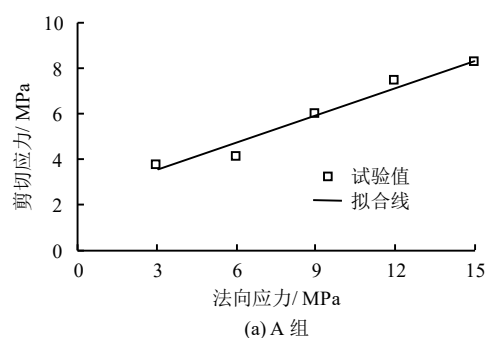


图 11 充填节理强度计算值和试验值的比较
Fig.11 Comparisons of calculated strength with measured values of infilled joints

由图可以看出, 充填节理的试验值与强度拟合直线接近, 说明所提出的充填节理的强度经验公式可以进行砂土充填岩石节理的剪切强度估计。

6 结 论

(1) 相同法向应力下, 未充填节理的峰值剪切应力高于充填节理的峰值剪切应力, 说明节理面之间的充填物降低了节理剪切强度。大部分充填节理没有明显的剪切应力峰值, 很少出现剪切应力的峰后跌落现象, 呈现应变强化特征, 类似于软弱型岩石剪切变形曲线。

(2) Barton 公式预测值明显低于试验值, 拟合效果不理想。通过分析节理面的三维形貌参数, 得出相关性系数 m 和节理面最大谷深 S_v 的平均值有很好的线性关系, 用 S_v 表示节理形貌系数 m , 得到新的未充填节理的剪切强度经验公式, 公式预测值与试验值基本吻合, 拟合效果较好。

(3) 砂土剪切强度线和充填节理剪切强度线交点的横坐标和纵坐标均与砂土剪切强度线斜率呈指数关系, 充填节理剪切强度线斜率与砂土剪切强度线斜率呈抛物线关系, 因此, 可用砂土剪切强度线斜率确定充填节理强度公式。该公式预测值与试验值较为接近, 可用于估算充填岩石节理的剪切强度。

参 考 文 献

- [1] PATTON F D. Multiple modes of shear failure in rock[C]//Proceedings of First Congress of International Society of Rock Mechanics. Lisbon, Portugal: [s. n.], 1966: 509—513.
- [2] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. **Rock Mechanics**, 1977, 10(1): 1—54.
- [3] 唐志成, 夏才初, 宋英龙. 粗糙节理的峰值抗剪强度准则[J]. 岩土工程学报, 2013(3): 571—577.
TANG Zhi-cheng, XIA Cai-chu, SONG Ying-long. New peak shear strength criteria for roughness joints[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, (3): 571—577.
- [4] GRASSELLI G. Shear strength of rock joints based on quantified surface description[D]. Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology, 2001.
- [5] 唐志成, 黄润秋, 张建明, 等. 含坡度均方根的节理峰值剪切强度经验公式[J]. 岩土力学, 2015, (12): 3433—3438.
TANG Zhi-cheng, HUANG Run-qi, ZHANG Jian-ming et al. Empirical peak shear strength criterion for rock joints based on slope root-mean-square[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, (12): 3433—3438.
- [6] INDRARATNA B, WELIDENIYA H S, BROWN E T. A shear strength model for idealized infilled joints under constant normal stiffness[J]. **Geotechnique**, 2005, 55(3): 215—226.
- [7] INDRARATNA B, JAYANATHAN M, BROWN T. Shear strength model for overconsolidated clay-infilled idealized rock joints[J]. **Geotechnique**, 2008, 58(1): 55—65.
- [8] DAVIES M C R, HAMZA O, LUMSDEN B W, et al. Laboratory measurement of the shear strength of ice-filled rock joints[J]. **Annals of Glaciology**, 2000, 31(1): 463—467.
- [9] 史玲, 蔡美峰, 赵坚. 充填节理破坏机理及实验[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(3): 253—259.
SHI Ling, CAI Mei-feng, ZHAO Jian. Fracture mechanism and experiment of infilled rock joints[J]. **Journal of University of Science and Technology**, 2012, 34(3): 253—259.
- [10] DONG H Y, GUO B H, LI Y Z, et al. Empirical peak shear strength formula for rock fractures based on 3D morphology parameters[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2017, 35(3): 1169—1183.
- [11] 沈明荣, 陈建峰. 岩体力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2006.
SHEN Ming-rong, CHEN Jian-feng. Rock mass mechanics[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2006.
- [12] 刘婷婷, 李建春, 李海波, 等. 剪切速率对平直充填节理的剪切力学特性影响研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1967—1973.
LIU Ting-ting, LI Jian-chun, LI Hai-bo, et al. Influence of shearing velocity on shear mechanical properties of planar filled joints[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(7): 1967—1973.
- [13] 李晓锋, 李海波, 夏祥, 等. 类节理岩石直剪试验力学特性的数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 583—591.
LI Xiao-feng, LI Hai-bo, XIA Xiang, et al. Numerical simulation of mechanical characteristics of jointed rock in direct shear test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(2): 583—591.