

砂粒充填大理岩节理剪切强度试验研究*

焦峰¹, 郭保华^{1,2}, 翟明磊¹, 程坦¹, 董航宇¹

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

摘要:节理充填对节理力学性质具有重要影响,为研究砂粒充填对节理抗剪强度的影响,利用GCTS(RDS-200型)岩石剪切系统对4种粒径砂粒充填的粉晶大理岩节理进行了直剪试验。结果表明:未充填节理剪切应力-位移全程曲线可分为压缩阶段、弹性阶段、屈服阶段、软化阶段和残余阶段,而充填节理剪切应力-位移全程曲线则仅有压缩阶段和硬化阶段,表现出松砂剪切曲线特征;相同法向应力下,4种粒径砂粒充填节理峰值剪切应力明显降低。多层铺设3种较细粒径砂粒的充填对节理粘聚力和内摩擦角的影响基本相同,粘聚力和内摩擦角均降低,且粘聚力降低更为明显;单层铺设的最大粒径砂粒使节理的粘聚力降低,内摩擦角增加。研究结论对理解充填节理岩体稳定性具有一定帮助。

关键词:岩石力学;充填节理;直剪试验;峰值剪切强度;粘聚力;内摩擦角

中图分类号:TD315

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2019)02-0352-06

Experimental Study on Shear Strength of Marble Joint Filled with Sand

Jiao Feng¹, Guo Baohua^{1,2}, Zhai Minglei¹, Cheng Tan¹, Dong Hangyu¹

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, P.R. China;
2. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety, Jiaozuo, Henan 454000, P.R. China)

Abstract: Joint filling has important influence on the mechanical properties of rock joints. In order to study the effect of sandy filling on the shear strength of rock joint, direct shear tests were conducted on jointed fine-grained marble specimens filled with four particle sizes of sand. The results show that the complete shear stress-shear displacement curves of unfilled joints can be divided into compression stage, elastic stage, yield stage, softening stage and residual stage. However, those of filled rock joints only exist compression stage and hardening stage. The peak shear strength of jointed marble specimens fills with four particle sizes of sand reduced under the same normal stress obviously compared with those of unfilled rock joints. The effect of filling the three types of sand with smaller particle sizes on cohesion and internal frictional angle of marble joint is basically same. Specially, cohesion and internal friction angle both decrease, however the cohesion decreases more significantly. For the jointed marble filled with the sand with biggest particle size, the cohesion decreases while the internal frictional angle increases obviously for a single layer of sand. The research conclusions are helpful to understand the stability of rock mass with filled joints.

Keywords: rock mechanics; filled joint; direct shear test; peak shear strength; cohesion; internal friction angle

* 收稿日期:2018-10-11(修改稿)

作者简介:焦峰(1991-),男,河南平顶山人,硕士生,主要从事矿山岩体力学方面的研究。

E-mail:962212397@qq.com

通讯作者:郭保华(1979-),男,河南周口人,博士,副教授,主要从事矿山岩体力学方面的教学与研究工作。

E-mail:guobaohua@139.com

基金项目:国家自然科学基金(51109076);河南省科技攻关计划项目(152102210316)

0 引言

岩石节理剪切强度是岩体稳定性的控制因素,主要受节理面条件、试件尺寸、加载速率、时间和环境等因素的影响,其中节理面条件主要是指节理岩壁的力学性质、节理面粗糙程度和节理充填状况等。众多学者对岩石节理的峰值抗剪强度进行了研究,建立了无充填耦合节理的剪切强度模型^[1-5],其中 Barton 提出的 JRC-JCS 经验模型在工程中已被广泛采用。刘冬寿^[6]阐述了现场岩体抗剪试验方法及各种因素对试验结果的影响,对实际工程有重要的指导。刘健等^[7]开展了不同压应力条件下天然节理直剪试验,借助三维激光扫描技术实现了节理面粗糙度评价,发现同一节理在室内试验尺度上的剪切性能具有一致性,且不同深度处节理的剪切性能也具有相似性。王德咏等^[8]采用三维单元劈裂的数值模拟方法,研究剪应力作用下内嵌裂纹的扩展规律,发现可根据法向应力的大小将内嵌裂纹划分为3种扩展模式,且随着法向应力的增加,剪应力对裂纹扩展的影响减弱。

然而,通常情况下天然节理并不闭合,节理中存在砂质或泥质充填物,充填物的存在使节理强度预测变得困难。张驰等^[9]对云南某铁矿尾矿库内原尾矿砂进行了不同围压及剪切速率条件下的固结不排水(CU)试验,分析应力及剪切速率对尾矿砂抗剪强度的影响。结果表明:尾矿砂的抗剪强度在低法向应力下(小于500 kPa)基本符合线性莫尔库伦准则,但在高法向应力下(大于500 kPa)符合幂函数强度准则。Indraratna 等^[10-12]通过研究泥质充填物在不同充填度条件下对人工规则节理强度的影响,发现软弱充填物使节理峰值剪切强度降低,认为有软弱充填物的节理是剪切破坏的主要控制面,然后建立了充填节理模型,并通过试验验证了模型的合理性。Davies 等^[13]通过试验研究了充填冰混凝土节理的剪切力学特性,发现提高法向应力或降低充填冰温度可提高节理剪切强度。Jahanian 等^[14]认为节理中存在充填物会使节理的抗剪强度降低,通过研究砂质黏土充填的人工规则齿状节理剪切强度,得出砂质黏土充填节理剪切强度较未充填节理下降71%。Pereira^[15]通过做砂质充填节理的旋转剪切试验,发现充填节理剪切强度往往低于未充填节理,在初始剪切阶段,砂子的滚动摩擦起主要作用,随着剪切位移的增加,节理表面凸起被剪断,相应的滚动摩擦影响降低,滑动摩擦起主要作用。Ladanyi 等^[16]通过研究砂质和泥

质充填物厚度对规则齿状节理剪切强度的影响,发现充填节理的剪切强度处于充填物自身强度和同种未充填节理剪切强度之间,且强度随着充填厚度的增加迅速下降。Lu 等^[17]研究了充填水泥浆对规则砂岩节理剪切强度的影响,发现充填度是影响节理强度的重要因素,当充填度 $t/a < 0.1$ 时,节理面剪切强度随着充填度的增大而迅速增加,当 $0.1 < t/a < 1$ 时,节理面强度随着充填度的增大而减小,当 $t/a > 1$ 时,节理剪切力学性质随着充填度的增大几乎保持不变。

综上所述,目前主要研究了充填物对规则人工节理剪切力学特性的影响。本文拟采用直剪试验方法,研究砂粒充填对非规则天然粉晶大理岩试样劈裂节理剪切强度的影响,并分析充填节理剪切应力-位移曲线特征。

1 试验方法

1.1 试样的制备

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,晶粒粒径为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吨位压力机在岩样长轴中点处垂直轴线劈裂圆柱形试样,制成张拉型人工裂隙试件25个,部分试样如图1所示^[22]。岩样的物理力学参数见表1^[22],其中 φ_b 是节理摩擦角; c_1 是节理粘聚力,通过节理直剪试验得到; c_2 是岩样粘聚力; φ 是岩样内摩擦角,通过三轴压缩试验得到。JCS、 E 和 μ 分别是岩样的单轴抗压强度、弹性模量和泊松比,通过单轴压缩试验得到。 σ_t 为岩样抗拉强度,通过巴西劈裂试验得到。



图1 制作模具(左上),节理试样(左下)和试样封装(右)

Fig. 1 Split tool (the upper left), jointed specimens (the lower left) and encapsulation of specimen (right)

节理充填所用的砂子如图 2 所示^[22],共有超细、细、粗、超粗 4 种粒径,通过筛子进行筛选,使粒径比较均匀,粒径如表 2 所示。

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

参数	$\varphi_b/(^{\circ})$	JCS/MPa	c_1/MPa	c_2/MPa
值	32.43	83.02	3.37	18.65

参数	$\varphi/(^{\circ})$	σ_1/MPa	E/GPa	μ
值	41.6	3.57	24.58	0.25

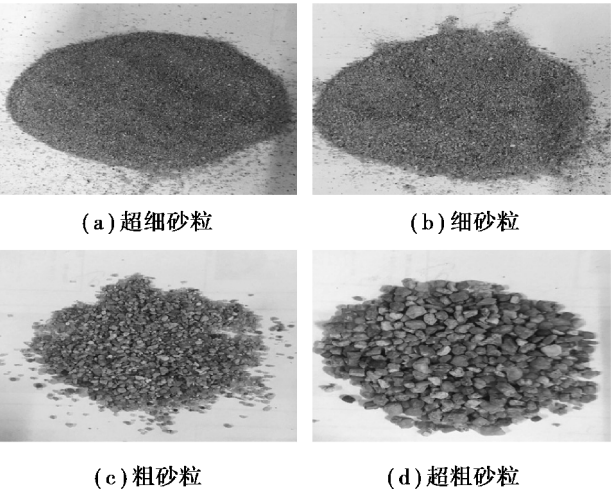


图 2 4 种不同粒径的砂子
Fig. 2 Four different sizes of sands

表 2 充填砂子的粒径
Table 2 The particle size of filling sand

砂粒分组	超细	细	粗	超粗
粒径/目	35	16	10	5

1.2 试验装置

直剪试验采用美国 GCTS (Geotechnical Consulting and Testing Systems) 公司的 RDS-200 直剪系统^[18],由软件 GATS (Computer Aided Testing Software Standard) 控制。这套系统通过电液伺服系统自动控制剪切和垂直载荷或变形,可以进行传统的剪切试验,也可以进行复杂应力路径直剪试验。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负载能力分别是 10 t

和 5 t,最大行程分别是 25 mm 和 24 mm。

试样准备过程如下:将试样放置在下部和上部剪切环的中心孔中,向剪切环内灌入快凝水泥固定试样^[18],上剪切环和下剪切环水泥之间用橡皮泥分隔。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。充填砂粒厚度过大时,剪切过程中上剪切盒易发生倾倒,所以本文试验充填砂粒厚度基本相同,均为一层超粗粒径砂粒的厚度,约为 3.6 mm,充填超粗砂粒质量约为 6 g。封装完成后,将下剪切环固定在下剪切盒中,再将上剪切环放在上剪切盒中,则试验试样安装完成。试验在常法向应力 (CNL) 模式下进行,先以应力加载方式施加法向应力到设计值,然后通过切向油泵施加剪切应力。试验结束时,测试数据可导入 Excel 或其他软件中进行后处理。

1.3 试验方案

剪切试验共分为 2 组,第 1 组为无充填组,共 5 个试样;第 2 组为充填组,分别用 4 种粒径砂粒进行充填,每种砂粒充填试样 5 个,共 20 个。按充填砂粒粒径从小到大将充填试样记为 A、B、C、D 4 组,对每组试样,法向应力设计为 3 MPa、6 MPa、9 MPa、12 MPa 和 15 MPa。剪切速率均为 1 mm/min,最大剪切位移为 5 mm。

2 试验结果

2.1 充填节理剪切应力-位移曲线

未充填节理试样剪切应力-位移曲线如图 3 所示^[22],随着法向应力水平增加,未充填节理峰值剪切应力和峰值剪切位移整体上增加。

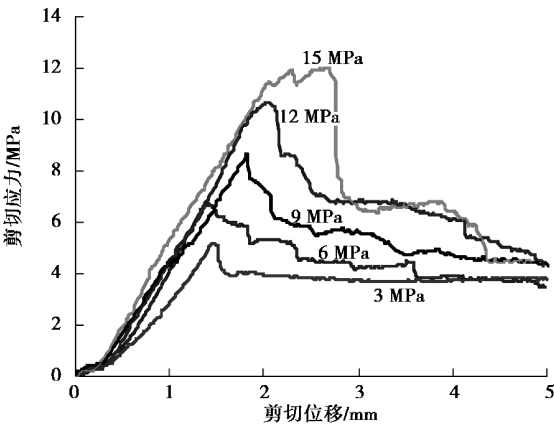


图 3 未充填节理剪切应力-位移曲线
Fig. 3 The curves of unfilled joints of shear stress vs. shear displacement

从图3可看出,剪切应力-位移曲线可以分为5个阶段^[18]:①压缩阶段,从起始点开始,曲线斜率较小或逐渐增加的阶段,对应于节理的闭合^[19];②弹性阶段,峰前近直线部分,反映节理在压缩和剪切载荷综合作用下的弹性变形;③屈服阶段,在直线段终点与峰值点之间,曲线斜率逐渐减小,反映部分节理凸起的压碎或剪断;④软化阶段,峰后逐渐降低的曲线段,反映节理错动过程中大量节理凸起的破坏,节理粗糙程度降低;⑤残余阶段,曲线波动不大,虽然剪切错动仍然存在,但节理凸起的破坏未明显持续发生。

充填节理试样的剪切应力-位移曲线如图4所示。由图4可以看出,充填节理剪切应力-位移曲线与未充填节理有明显不同。与未充填节理一样存在压缩阶段,但是直线段、软化段和残余段不明显。除个别试样外,随剪切位移增加,曲线斜率逐渐变小,但未达到恒定值,表现出明显的硬化特征,类似于软弱型岩石剪切变形曲线^[20]。按照砂土剪切试验相关规范,这里取剪切位移为4 mm^[17]处的剪切应力作为峰值剪切强度。

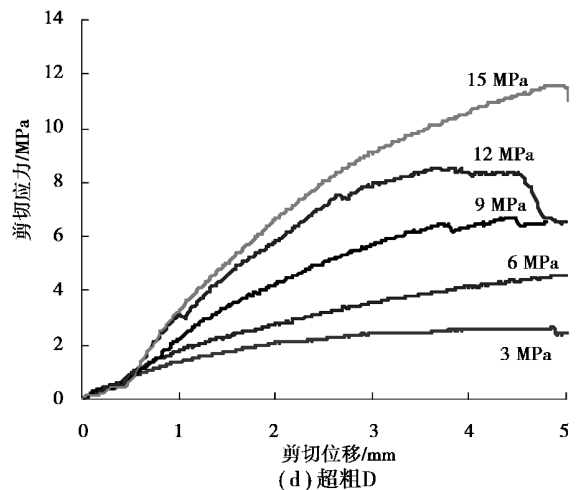
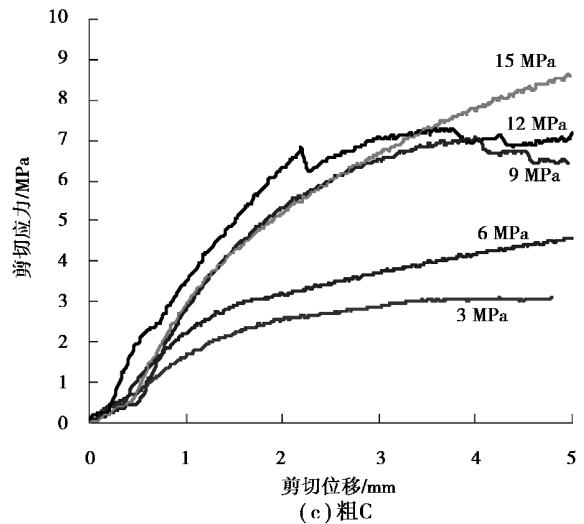
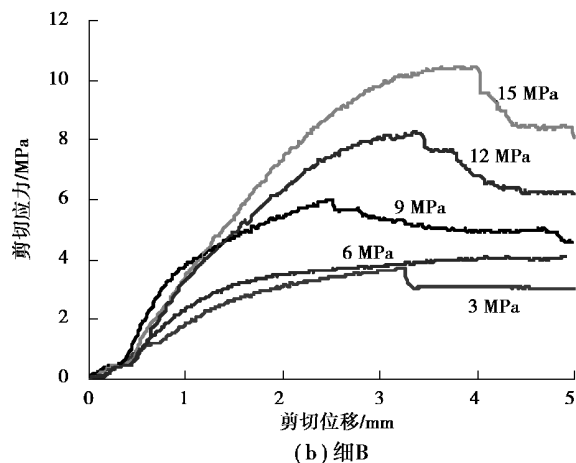
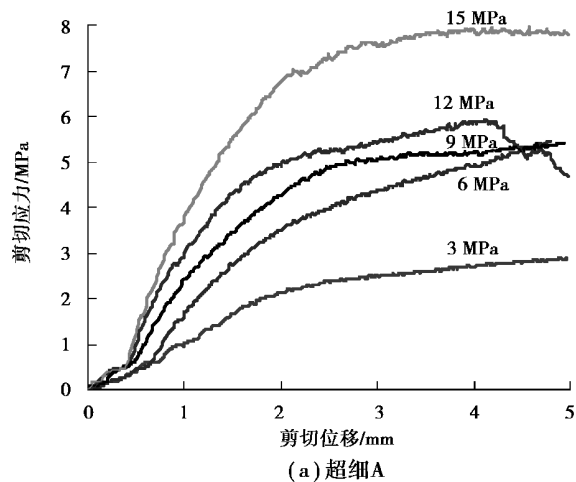


图4 充填节理剪切应力-剪切位移曲线

Fig. 4 The curves of the filled joints of shear stress vs. shear displacement

2.2 充填节理峰值剪切应力与法向应力的关系

节理剪切强度与法向应力的关系如图5所示。由图5可以看出,充填节理的剪切强度都位于未充填节理剪切强度的下方,说明节理内充填松砂降低了节理剪切强度,与Jahanian等^[14]和Pereira^[15]试验得出的结论一致,这是因为卵形砂粒之间及其与节理面之间的摩擦小于节理面之间的摩擦。

对于充填节理,除法向应力为3 MPa外,在相同法向应力下,粒径为3.6 mm左右的超粗砂粒充填节理剪切强度高于用其他粒径砂粒充填节理,因为此组充填砂粒粒径最大,且含有较多的角砾物质;另外,此组充填物砂粒只充填一层,较密实,节理错动需克服砂粒与节理面间的摩擦力;在砂粒粒径较大时,与节理面接触点较少,砂粒与节理面间的有效作用力较大,因此难以滑动。其他3种粒径则是多层填充,为松散砂,在节理错动时克服砂粒之间的摩擦力即可;砂粒粒径较小时,砂粒与节理

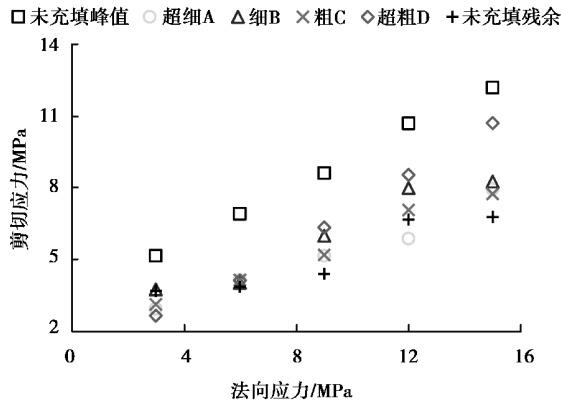


图 5 峰值剪切应力与法向应力的关系

Fig. 5 Relationship between peak shear stress and normal stress

面间接触点多,有效接触应力相应较小,砂粒与节理面间的滑动也相对容易发生。法向应力 <9 MPa 时,未充填节理的残余剪切强度整体上高于或接近充填节理剪切强度;法向应力 ≥ 9 MPa 时,未充填节理的残余剪切强度整体上低于充填节理剪切强度,这是因为虽然在剪切曲线残余阶段节理中存在节理剪断凸起产生的岩屑,但岩屑颗粒较小,且大理岩岩屑强度低于砂粒。

2.3 充填节理的峰值剪切强度参数

由图 5 可得充填及未充填节理的的粘聚力和内摩擦角如表 3 所示。为清楚显示不同粒径砂粒充填对节理剪切强度参数的影响,将节理粘聚力和内摩擦角进行归一化处理,其中未充填节理的粘聚力和内摩擦角都作为 1,各组充填节理粘聚力和内摩擦角值与未充填节理相比,得到其归一化值如表 3 和图 6 所示。

表 3 节理的粘聚力和内摩擦角

Table 3 Cohesion and internal friction angle of joints

填充类型	粘聚力/MPa		内摩擦角/(°)	
	试验值	归一化值	试验值	归一化值
无	3.372	1	30.727	1
超细 A	1.707	0.506	22.391	0.729
细 B	2.121	0.629	24.775	0.806
粗 C	1.820	0.540	23.211	0.755
超粗 D	0.336	0.100	39.150	1.274

由图 6 可得超细、细、粗 3 种粒径充填方式对节理粘聚力和内摩擦角的影响基本一致,充填后节理粘聚力和内摩擦角均有一定程度降低,且粘聚力降低程度高于内摩擦角。与图 4 中充填节理剪切曲

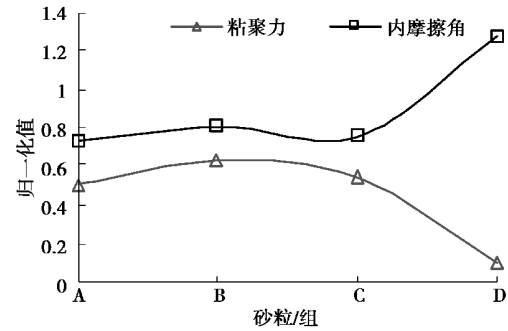


图 6 充填节理粘聚力和内摩擦角归一化值

Fig. 6 Normalized values of cohesion and internal friction angle

线特征产生的原因类似,多层较细砂粒充填时,砂粒间滑移就可以完成节理的错动,而砂粒间的摩擦小于节理面间的摩擦,因此充填节理摩擦力降低。

另外,砂粒强度较高又较为圆润,剪断砂粒的可能性小,所以充填节理粘聚力降低更为明显。超粗粒径充填节理内摩擦角明显增大,粘聚力明显减少。这是因为粒径为 3.6 mm 左右的超粗砂为单层充填,节理错动需要砂粒和节理面之间产生滑移;另外,相对细砂而言,粗砂砂粒与节理面间接触点较少,接触应力较大,其滑动需要克服更大的摩擦,这里表现为充填节理的摩擦力明显升高。超粗砂颗粒较大,发生砂粒的剪断更为困难,因此粘聚力明显降低。

3 结论

(1) 未充填节理剪切应力-位移全程曲线可分为压缩阶段、弹性阶段、屈服阶段、软化阶段和残余阶段,而充填节理剪切应力-位移全程曲线则仅有压缩阶段和硬化阶段,表现出松砂剪切曲线特征。

(2) 砂粒充填使节理在相同法向应力下的峰值剪切应力降低。3 种粒径较小的砂粒充填均使节理粘聚力和内摩擦角降低,三者降低程度较为接近。相对于内摩擦角,粘聚力的降低更为明显。超粗粒径砂粒充填节理粘聚力明显降低而内摩擦角明显增加,主要跟其单层铺设有关。

本文初步研究了砂粒充填对节理剪切力学性质的影响,下一步将进行较小粒径砂粒充填厚度及其他因素如节理形貌、含水性、泥质充填物等对节理剪切力学性质的影响研究。

参考文献 (References)

- [1] Barton N. Review of a new shear strength criterion for rock joints [J]. Engineering Geology, 1973, 7 (4): 287-332.

- [2] Barton N, Choubey V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. *Rock Mechanics*, 1977, 10(1-2): 1-54.
- [3] Ladanyi B, Archambault G. Simulation of shear behaviour of a joint rock mass[A]//Proceedings of the 11th US Symposium on Rock Mechanics(USRMS)[C]. 1969: 105-125.
- [4] Kulatilake P, Shou G, Huang T H, et al. New peak shear strength criterion for anisotropic rock joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1996, 32(7): 673-697.
- [5] Grasselli G. Shear strength of rock joints based on quantified surface description[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2006, 39(4): 295-314.
- [6] 刘冬寿. 岩体抗剪强度试验方法及分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2015, 11(增2): 443-446. (Liu Dongshou. Experimental method and analysis of shear strength of rock body [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2015, 11(Supp. 2): 443-446. (in Chinese))
- [7] 刘健, 陈亮, 刘建峰, 等. 深部花岗岩中天然开启节理剪切性能试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2017, 13(1): 63-70. (Liu Jian, Chen Liang, Liu Jianfeng, et al. Experimental study on shear behavior of naturally opened joint in deep granite [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2017, 13(1): 63-70. (in Chinese))
- [8] 王德咏, 王永平, 莫海鸿. 含内置裂隙的节理岩体的剪切行为数值模拟[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(增2): 488-492. (Wang Deyong, Wang Yongping, Mo Haihong. Numerical study of shear behavior of rock joints with embedded crack [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(Supp.2): 488-492. (in Chinese))
- [9] 张驰, 王文松, 曹冠森. 不同应力下剪切速率对尾矿砂强度特性影响研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(增2): 463-469. (Zhang Chi, Wang Wensong, Cao Guansen. Analysis on the influence of shear velocity on tailing sand shear strength under different stress [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(Supp.2): 463-469. (in Chinese))
- [10] Indraratna B, Oliverira D A F, Brown E T, et al. Effect of soil-infilled joints on the stability of rock wedges formed in a tunnel roof[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(5): 739-751.
- [11] Indraratna B, Welideniya H S, Brown E T. A shear strength model for idealised infilled joints under constant normal stiffness [J]. *Géotechnique*, 2005, 55(3): 215-226.
- [12] Indraratna B, Jayanathan M, Brown T. Shear strength model for overconsolidated clay-infilled idealised rock joints[J]. *Geotechnique*, 2008, 58(1): 55-65.
- [13] 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.
- [14] Jahanian H, Sadaghiani M H. Experimental study on the shear strength of Sandy clay infilled regular rough rock joints[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(3): 907-922.
- [15] Pereira J P. Rolling friction and shear behaviour of rock discontinuities filled with sand[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(3): 1-17.
- [16] Ladanyi B, Archambault G. Shear strength and Deformability of Filled Indented Joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1997, 17(1): 317-326.
- [17] Lu Y L, Wang L G, Li Z L, et al. Experimental study on the shear behavior of regular sandstone joints filled with cement grout [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 50(5): 1-16.
- [18] 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.
- [19] Grasselli G. Shear strength of rock joints based on quantified surface description[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2006, 39(4): 295-314.
- [20] 沈明荣, 陈建峰. 岩体力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2006. (Sheng Mingrong, Chen Jianfeng. *Rock mass mechanics* [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2006. (in Chinese))
- [21] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水利水电工程土工试验规程(DL/T 5355-2006)[S]. 北京: 2006. (National Development and Reform Commission, People's Republic of China. Code for soil tests for hydropower and water conservancy engineering (DL/T 5355-2006)[S]. Beijing: 2006. (in Chinese))
- [22] 焦峰, 郭保华, 翟明磊. 砂土充填大理岩节理的剪切强度经验公式[J]. *岩土力学*, 2018, 39(11): 4102-4108. (Jiao Feng, Guo Baohua, Zhai Minglei. Empirical formula for shear strength of marble joints infilled with sands [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(11): 4102-4108. (in Chinese))