

DOI: 10.11779/CJGE202008015

薄层充填岩石节理剪胀特性试验研究

肖维民^{1, 2}, 余欢^{1, 2}, 朱占元^{1, 2}, 李锐^{1, 2}, 刘伟超^{1, 2}

(1. 四川农业大学土木工程学院, 四川 都江堰 611830; 2. 四川农业大学村镇建设防灾减灾四川省高等学校工程研究中心, 四川 都江堰 611830)

摘要: 岩石节理剪胀特性是影响节理渗流的重要因素, 主要受节理表面粗糙性和法向应力的影响。而对于充填岩石节理而言, 其剪胀特性还受到充填介质的影响。为了研究薄层充填岩石节理的剪胀特性, 首先制备了3组具有Barton标准剖面线形貌特征、充填度 $\Delta=0.00, 0.25, 0.50, 0.75$ 及 1.00 的薄层充填模拟岩石节理试件, 然后在低、中、高三级法向应力下进行直剪试验, 得到了薄层充填岩石节理试件法向位移-剪切位移曲线及其破坏特征。结果表明: 在低法向应力条件下, 节理表面粗糙性和充填度共同影响薄层充填岩石节理试件的剪胀特性, 而在中高法向应力条件下, 节理表面粗糙性是影响其剪胀特性的关键因素; 薄层充填岩石节理破坏特征包含充填介质的剪切挤碎和节理上下表面粗糙凸起体被剪断两种, 且随着充填度的增加, 充填介质剪切挤碎逐渐占主导地位, 成为薄层充填岩石节理试件的主要破坏特征。在此基础上, 考虑充填介质对节理表面粗糙度系数JRC的弱化作用, 建立了薄层充填岩石节理峰值剪胀角随充填度呈指数变化的经验关系式, 并通过直剪试验数据和已有文献数据对其适用性进行了初步分析。

关键词: 岩石力学; 薄层充填岩石节理; 直剪试验; 剪胀; 充填度

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)08-1499-10

作者简介: 肖维民(1983—), 男, 博士, 副教授, 主要从事节理岩体力学和水力学等方面的教学和科研工作。E-mail: sicauxwm@163.com。

Experimental study on shear dilatancy characteristics of thinly-infilled rock joints

XIAO Wei-min^{1, 2}, YU Huan^{1, 2}, ZHU Zhan-yuan^{1, 2}, LI Rui^{1, 2}, LIU Wei-chao^{1, 2}

(1. School of Civil Engineering, Sichuan Agricultural University, Dujiangyan 611830, China; 2. Sichuan Higher Education Engineering

Research Center for Disaster Prevention and Mitigation of Village Construction, Sichuan Agricultural University, Dujiangyan 611830, China)

Abstract: The shear dilatancy has a significant effect on the seepage properties of rock joints, which is influenced by the roughness and normal stress acting on the rock joint surface. However, except for joint the surface roughness and normal stress, the infills also have an important effect on the shear dilatancy of infilled rock joints. So, in order to investigate the shear dilatancy of thinly-infilled rock joints, three groups of specimens which have the same surface roughness as Barton's standard profiles and different infill thicknesses are prepared firstly. Then the direct shear tests are performed on these specimens under three levels of normal stress, and the normal displacement vs. shear displacement curves and failure characteristics of thinly-infilled rock joints are obtained. The results show that the shear dilatancy is influenced by both the surface roughness and the infill thickness under low normal stress condition, whereas the surface roughness is the key factor influencing the shear dilatancy under middle and high levels of the normal stress. Furthermore, the failure modes of specimens include the shear and crush of infill particles and the shear of surface asperities, and the former failure mode becomes dominant with the increase of infill thickness. Then an empirical exponential expression is proposed to describe the peak shear dilatancy angle of thinly-infilled rock joints quantitatively by considering the weakening effect of infills on joint surface roughness, which is validated preliminarily by the direct shear test results and published data in literatures.

Key words: rock mechanics; thinly-infilled rock joint; direct shear test; shear dilatancy; infill ratio

0 引言

岩体在经历地质构造运动以及浅表生地质作用后, 内部广泛存在各类不同规模的节理, 这在一定程度上对岩体强度和稳定性起控制作用^[1]。同时岩体又赋存在一定地下水环境中, 且完整岩块渗透系数远远

小于节理渗透系数^[2], 因而岩石节理是地下水在岩体中渗流的主要通道。对于非充填岩石节理, 其隙宽大

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877195, 41502242)

收稿日期: 2019-10-20

*通信作者(E-mail: zhuzhuan910@163.com)

小是影响地下水渗流流量的决定因素,而节理隙宽大小的改变主要源自节理在剪切错动过程中的剪胀效应^[3-6]。因此,岩石节理剪胀特性是研究其渗流特性的基础。

目前关于非充填岩石节理渗流特性的研究成果也主要从剪胀效应对节理隙宽变化的影响方面着手,如:Barton等^[7]考虑剪胀效应的影响,建立了剪切过程中节理机械隙宽增量 ΔE 与剪胀角之间的定量关系,在此基础上建立了节理水力隙宽和机械隙宽之间的经验关系式;Esaki等^[8]、Olsson等^[9]通过岩石节理室内剪切-渗流耦合试验对上述Barton经验关系式进行了验证和改进;Lee等^[10]通过岩石节理室内剪切-渗流耦合试验得出岩石节理水力隙宽存在一个临界值,当节理水力隙宽小于该临界值时,水力隙宽与机械隙宽呈线性变化关系,且节理剪胀效应直接影响节理渗透性的变化;赵延林等^[11-12]采用离散元数值方法建立裂隙岩体离散元数值模型,建立了岩石节理剪胀-渗流耦合模型,研究了剪胀效应对岩石节理渗透系数的影响;夏才初等^[13]通过常法向刚度条件下岩石节理剪切-渗流耦合试验,研究剪切过程中岩石节理的渗流特性演化规律,结果表明岩石节理等效水力开度与剪胀变形都存在三阶段变化规律:快速增长阶段、增速变缓阶段和稳定阶段。

但是,对于天然岩石节理而言,由于风化、侵蚀等物理作用和节理岩壁间剪切错动影响,节理中将产生一定厚度的充填物,形成充填节理。自然界中绝大部分天然岩石节理都是充填节理。根据充填物厚度不同可将充填节理分为薄膜、夹泥、薄层夹层和厚层四类^[14]。其中,薄层夹层和厚层充填节理中充填物厚度较大,节理上下岩壁间不存在接触,节理力学和渗流特性主要由充填介质的性质控制,与节理岩壁强度和表面粗糙度无关,一般参照土力学的相关理论进行研究;薄膜和夹泥充填节理中充填物厚度较薄,一般小于或略大于节理表面平均起伏差,在此将该类充填节理定义为薄层充填节理。此类充填节理既不同于非充填节理,也不同于厚层充填节理。一方面,与非充填节理相比,薄层充填节理中充填介质对其剪切力学特性有显著的弱化作用;另一方面,与厚层充填节理相比,薄层充填节理剪切强度受节理岩壁表面形貌的影响十分明显。

目前关于充填岩石节理剪胀力学特性的研究还不多见。如:Papaliangas等^[15]和Phien-wej等^[16]通过充填岩石节理室内直剪试验发现,随着充填岩石节理中充填介质厚度的增加,节理剪胀效应逐渐减弱,当充填

介质厚度达到一定值时,节理仅表现为剪缩;许江等^[17]通过对充填石膏模拟岩石节理进行剪切-渗流耦合试验,发现节理剪胀位移随着充填介质厚度的增加而减小,直至出现较大的负值;Indraratna等^[18-21]通过一系列充填岩石节理直剪试验发现:当充填介质厚度较小时,剪切过程中岩石节理上下岩壁在发生很小的剪切位移时就会产生接触,节理表面粗糙凸起体开始介入剪切过程,产生剪胀效应;随着充填介质厚度的增加,充填介质逐渐隔绝节理上下岩壁之间的接触作用导致剪胀效应逐渐减弱;当充填厚度增加到某一临界值时,剪切过程中节理上下岩壁在剪切过程中不再接触,充填岩石节理试件法向变形特性主要表现为充填介质的剪缩效应;Mirzaghorbanali等^[22]通过对规则锯齿状模拟岩石节理试件进行常法向刚度条件下的直剪试验,结果表明在初始法向应力较小且充填度小于1.0时,试件表现为剪胀,且随着充填度的增加逐渐转变为剪缩;Shrivastava等^[23]通过对规则锯齿状模拟岩石节理试件同时进行常法向刚度和常法向应力条件下的直剪试验发现,随着充填度的增加,节理试件主要表现为剪缩,且试件在常法向刚度条件下的剪缩现象更加明显;Han等^[24]通过对充填石膏和砂混合料的模拟岩石节理试件进行常法向刚度条件下的循环剪切试验,结果发现试件均表现为剪缩。在上述研究成果中,研究人员仅对充填岩石节理剪胀效应进行定性描述,而没有对其进行定量研究。特别地,对于充填介质厚度较小的薄层充填岩石节理,其剪胀力学特性同时受充填介质厚度和节理粗糙表面形貌影响,作用机理较为复杂,目前关于该方面的研究成果还比较欠缺。

鉴于此,本文以具有Barton标准节理剖面线形貌特征的薄层充填模拟岩石节理为研究对象,通过薄层充填模拟岩石节理试件室内直剪试验研究充填介质厚度和节理表面粗糙性对其剪胀力学特性的影响,在此基础上建立薄层充填岩石节理峰值剪胀角公式并对其适用性进行分析,为后续研究充填岩石节理剪切-渗流演化规律奠定理论基础。

1 直剪试验方案

1.1 薄层充填岩石节理试件制备

为了定量表征岩石节理表面粗糙程度,Barton等^[2]给出了岩石节理10条标准剖面线,任意天然岩石节理表面粗糙性可将其剖面线与标准剖面线进行比较得到。该方法已被国际岩石力学与岩石工程学会所采纳,广泛应用于岩体工程领域^[25]。在此制备模拟岩石节理试件时,为了研究节理表面粗糙性的影响,选取第5条、

第6条和8条Barton标准剖面线作为典型剖面线（如表1所示），通过对其进行精细数字化处理得到典型剖面线二维坐标数据，具体过程详见文献[26]。然后将精细化处理后的二维坐标数据导入Solidworks软件中重构标准剖面线，并沿垂直剖面线所在平面方向将剖面线拉伸为三维粗糙面，得到含标准剖面线形貌特征的岩石节理表面三维数字模型，再采用光敏树脂利用3D打印技术得到具有标准剖面线形貌特征的岩石节理面板（如图1（a）所示）。最后将光敏树脂节理面板放置在图1（b）所示模型盒（平面尺寸为200 mm×200 mm）的中部凹槽处，浇筑水灰比为0.44的净水泥浆（基本力学参数见表2），养护后得到偶合模拟岩石节理试件。

表 1 Barton 标准节理剖面线^[2]

Table1 Standard joint profiles proposed by Barton

编 号	序 号	标准节理剖面线	JRC ₀	平均起伏差 h/mm
#1	5		8~10	7.98
#2	6		10~12	10.96
#3	8		14~16	12.93

表 2 净水泥浆基本力学参数

Table 2 Basic mechanical parameters of cement slurry

参数	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 φ/(°)	单轴抗压强度 σ _c /MPa	弹性模量 E/MPa
数值	10.35	27.89	28.3	3140

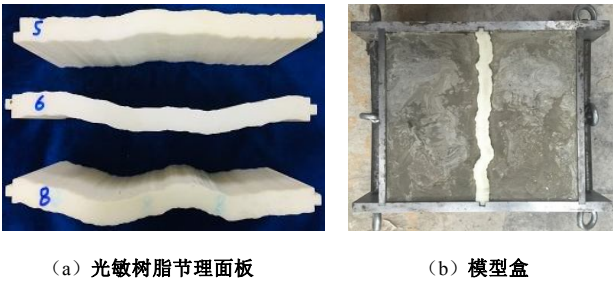


图 1 模拟岩石节理试件制备

Fig. 1 Preparation of artificial rock joint specimens

在制备好偶合模拟岩石节理试件后，采用粒径为0.3~0.6 mm的石英砂作为充填介质制备薄层充填模拟岩石节理试件。根据Ladanyi等^[27]关于充填度 Δ 的定义，不同充填度下所需充填介质厚度 t 按下式计算：

$$\Delta = t/h$$

(1)

式中， h 为岩石节理表面平均起伏差。

试验中设定5种充填度 $\Delta=0.0, 0.25, 0.50, 0.75$ 和1.0，结合表1所示3条典型标准剖面线的平均起伏差 h 值，即可得到不同充填度情况下所需充填介质厚度

t 。为了精确控制充填介质厚度，图2所示装置采用如充填石英砂，具体步骤如下：①将制备好的偶合模拟岩石节理试件放置在基座上，保证试件左右部分是完全吻合的，拧紧定位螺杆；②轻轻转动推进手柄，试件右半部分逐渐向右侧整体平移，此时观测右侧数显百分表读数，当读数达到所需充填介质厚度 t 时拧紧锁止蝶形螺母，此时试件左右岩块间形成宽度为 t 的空隙；③将准备好的石英砂分次倒入空隙中并用细铁丝捣实，即得到具有设定充填度的薄层充填岩石节理试件。

将充填好的试件沿节理四周用透明胶带缠紧密封，防止后期试件安装过程中充填介质漏掉以及上下部分错位，试验时用小刀将胶带划开，避免胶带影响试验结果。

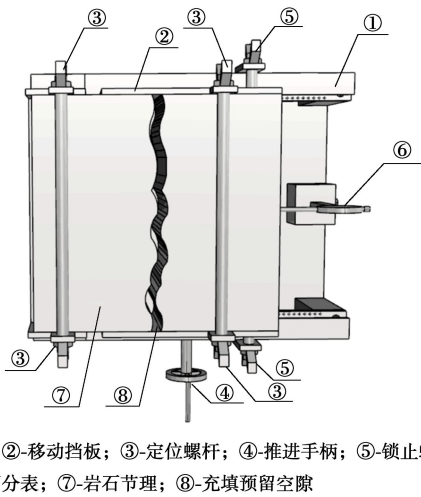


图 2 石英砂充填装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a device for filling quartz sands

1.2 直剪试验方案

薄层充填岩石节理直剪试验在四川农业大学村镇建设防灾减灾四川省高等学校工程研究中心YZW50岩石剪切试验机上进行（如图3所示）。直剪试验应力边界条件采用常法向应力条件，所采用的三级法向应力分别为 $\sigma_n=0.2\sigma_c, 0.5\sigma_c, 0.7\sigma_c$ ，其中 σ_c 为净水泥浆单轴抗压强度；试验时法向应力采用应力控制方式，加载速率为0.6 kN/s，切向应力采用位移控制方式，剪切速率为0.8 mm/min，当剪切位移达到20 mm时停止试验。

为了量测薄层充填岩石节理试件在剪切过程中的法向位移和剪切位移，沿剪切方向在上剪切盒顶板左右两端和下剪切盒左侧端板分别布置了2支高精度位移传感器（如图3所示），测量时取2支传感器读数平均值作为法向位移和剪切位移量测结果。

本次试验共有3组薄层充填岩石节理试件，对应3种节理表面粗糙程度；每组试件包含15个试件，对应5种充填度和三级法向应力的情况。其中充填度为零时重复作了两次，一共进行了54组直剪试验。

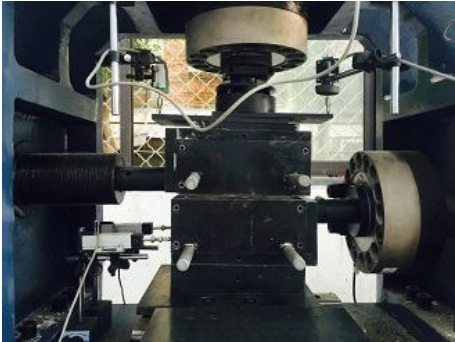


图3 YZW50 岩石剪切试验机
Fig. 3 YZW50 rock shear system

2 直剪试验结果

2.1 剪切应力 - 剪切位移曲线

薄层充填岩石节理试件在三级法向应力下的典型剪切应力 - 剪切位移曲线如图4所示(限于篇幅仅列举#1试件剪切应力 - 剪切位移曲线)，相应的峰值剪切强度汇总如表3所示。由图4可知：随着充填度的增加，薄层充填岩石节理试件峰值抗剪强度逐渐降低，且曲线峰值点逐渐趋于不明显。

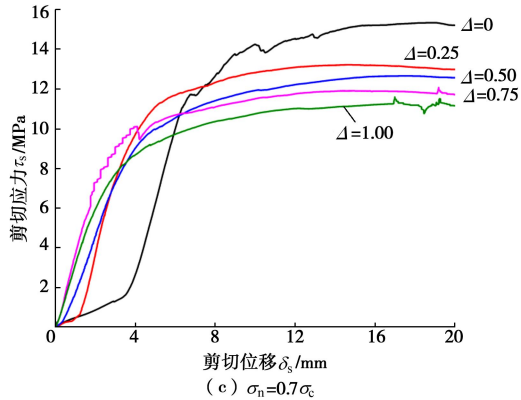
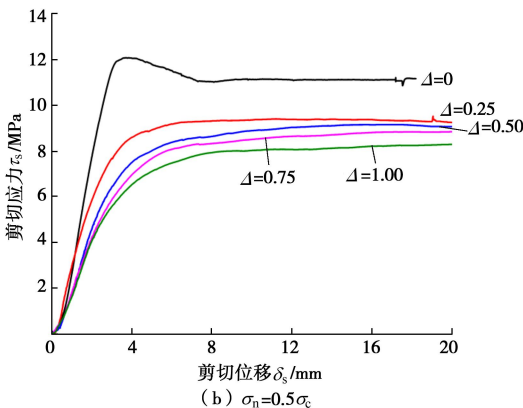
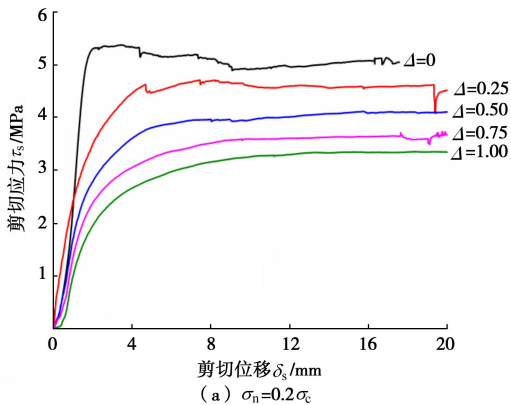


图4 #1 试件剪切应力 - 剪切位移曲线

Fig. 4 Shear stress vs. shear displacement curves of specimen No.1

表3 薄层充填岩石节理试件峰值抗剪强度试验结果

Table 3 Peak shear strengths of thinly-infilled rock joints

法向应力 σ_n	充填度	峰值抗剪强度 τ_f /MPa		
		#1	#2	#3
$0.2 \sigma_c$	0.00	5.378	6.290	7.654
	0.25	4.712	5.231	5.815
	0.50	4.121	4.277	4.933
	0.75	3.738	3.906	3.926
	1.00	3.209	3.298	3.414
$0.5 \sigma_c$	0.00	12.096	11.079	14.496
	0.25	9.541	10.008	11.091
	0.50	9.173	9.411	10.426
	0.75	8.869	8.902	9.176
	1.00	8.307	8.501	8.392
$0.7 \sigma_c$	0.00	15.353	15.402	15.493
	0.25	13.231	14.278	15.026
	0.50	12.672	13.499	13.738
	0.75	12.093	12.163	12.321
	1.00	11.610	12.222	11.277

2.2 法向位移 - 剪切位移曲线

3组具有不同充填度的薄层充填岩石节理试件法向位移 - 剪切位移曲线如图5~7所示。由图5~7可知：对于#1和#2试件，在低法向应力 ($\sigma_n=0.2 \sigma_c$) 条件下，当充填度为零时表现出较明显的剪胀现象，但随着充填度的增加，试件的法向位移逐渐由剪胀转变为剪缩，而在中、高法向应力 ($\sigma_n=0.5 \sigma_c, 0.7 \sigma_c$) 条件下，具有不同充填度的两组试件在剪切过程中主要表现为剪缩，且剪缩现象的明显程度随充填度的增加而增加；对于#3试件，在不同充填度情况下，试件在剪切初期均表现为剪缩，这主要是由于充填介质颗粒之间相互调整位置引起的，剪缩明显程度随法向应力的增加而减小，且随着剪切位移的增加，节理试件法向位移又由剪缩逐渐发展为剪胀。

另外需要说明的是，对于#1和#3试件，当充填度

为0.0, 法向应力为 $0.7\sigma_c$ 时, 其在剪切后期出现明显剪缩现象, 主要原因是在高法向应力下#1和#3节理试件表面粗糙凸起体被磨平、岩壁被压裂引起的。

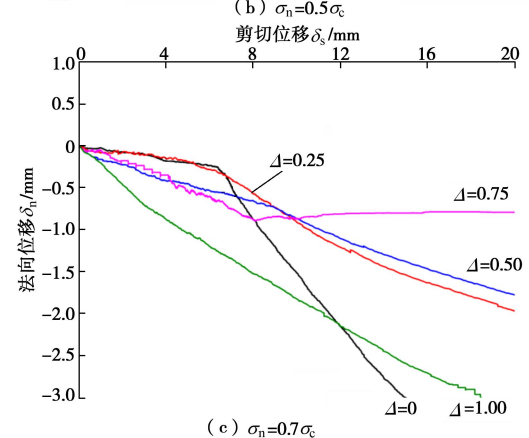
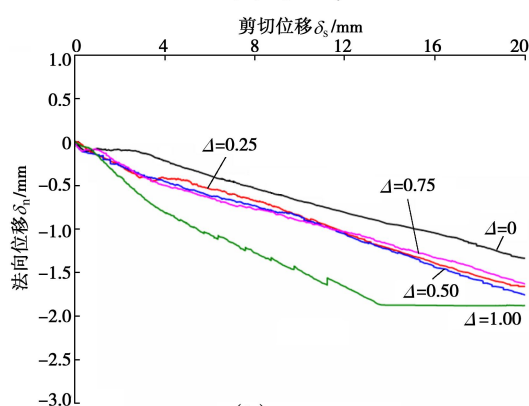
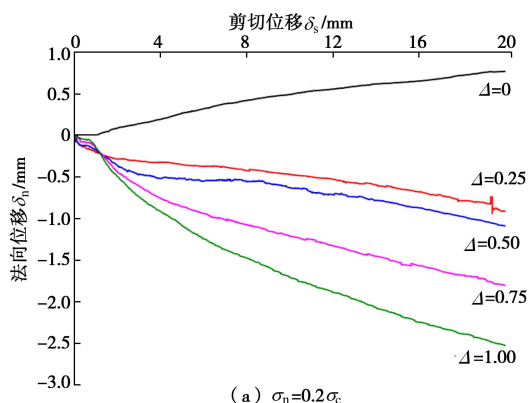


图5 #1 试件法向位移 - 剪切位移曲线

Fig. 5 Normal displacement vs. shear displacement curves of specimen No. 1

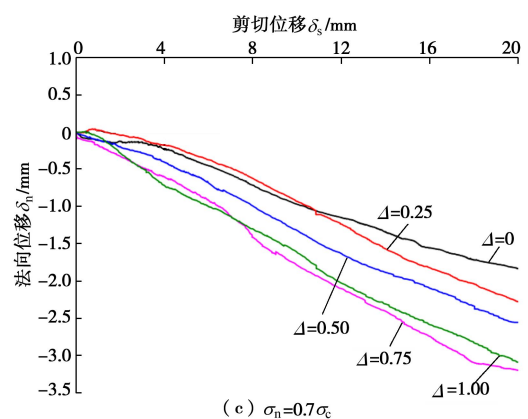
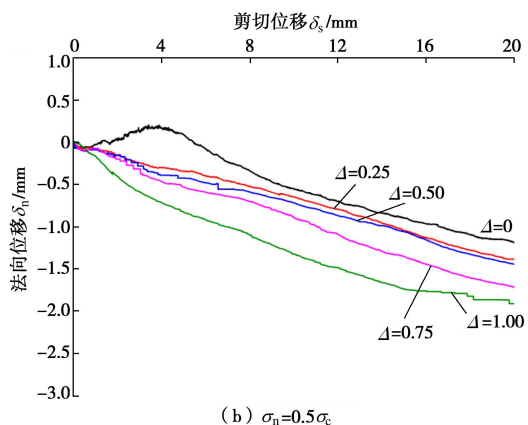
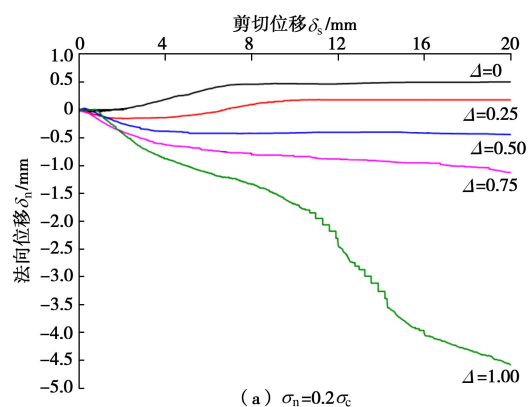
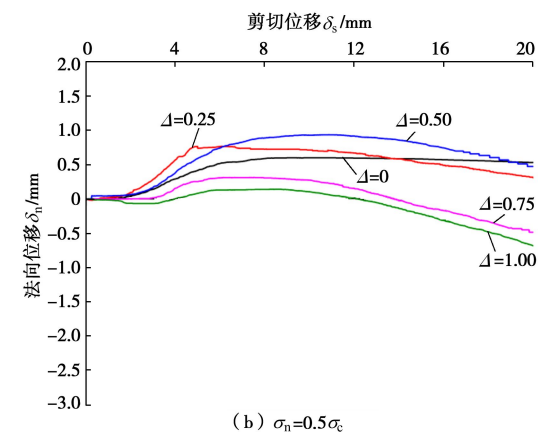
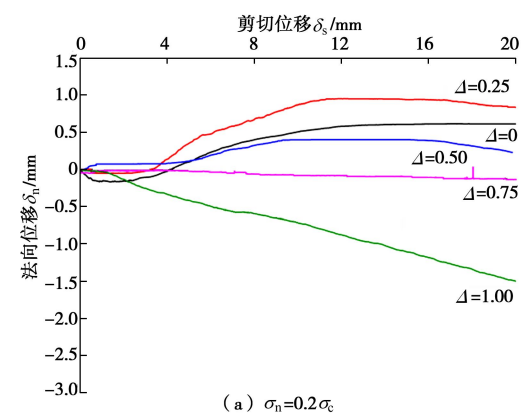


图6 #2 试件法向位移 - 剪切位移曲线

Fig. 6 Normal displacement vs. shear displacement curves of specimen No. 2



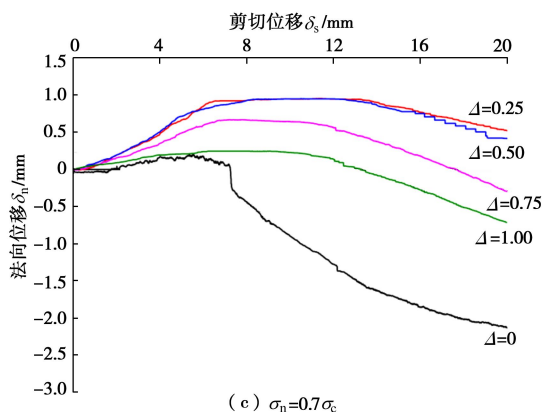


图7 #3 试件法向位移-剪切位移曲线

Fig. 7 Normal displacement vs. shear displacement curves of specimen No.3

2.3 试件破坏特征

剪切作用下薄层充填岩石节理试件节理表面形貌及充填介质典型破坏特征如图8所示。图中列举了#3薄层充填岩石节理试件在法向应力为 $0.5\sigma_c$ 时充填度 Δ 分别为 0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 时的破坏特征; 同时为了便于对比分析, 在图8中还列举了#3试件在剪切前的初始表面形貌。

由图8可知: ①对于充填度 $\Delta=0.00$ 的非充填偶合岩石节理, 在剪切过程中主要是节理表面粗糙凸起体受到挤压进而被剪断, 试验结束后打开试件可以观测到试件表面分布有大量由于表面微凸体被剪断挤碎产生的颗粒物, 并且在整个节理面上都分布有剪切擦痕, 在中高法向应力下节理表面粗糙凸起体基本被磨平(见图8(b))。②随着充填度增加, 充填介质在节理上下表面间形成了一个缓冲区, 即节理试件上下表面不再是一发生剪切位移就彼此挤压, 而是要达到一定剪切位移后节理上下表面才会产生接触, 在挤压过程中夹在其间的充填介质首先被挤碎, 然后节理表面凸起体才逐渐发生接触, 并最终在相互挤压过程中被剪断, 试验后在节理面可以观测到节理岩壁水泥颗粒和石英砂粉的混合物, 且节理表面中部剪切擦痕显著减少(见图8(c))。③随着充填度的进一步增加, 剪切过程中充填介质间的挤压作用更加显著, 而节理上下表面间的相互挤压剪断作用进一步削弱, 试验结束后在节理面上有大量白色石英砂粉, 而节理表面仅在两侧端部位置有少量剪切擦痕(见图8(d), (e))。④当充填度进一步增加至 $\Delta=1.0$ 时, 此时剪切作用主要由充填介质承担, 剪切破坏后一部分石英砂由于剪切作用而挤碎呈粉末状, 而节理表面形貌基本完好无损(见图8(f))。

综上所述, 与非充填岩石节理相比, 由于充填介质的存在, 薄层充填岩石节理的破坏特征包含充填介

质的剪切挤碎和节理上下表面粗糙凸起体被剪断两种, 且随着充填度的增加, 充填介质剪切挤碎逐渐占主导地位, 成为薄层充填岩石节理试件的主要破坏特征。

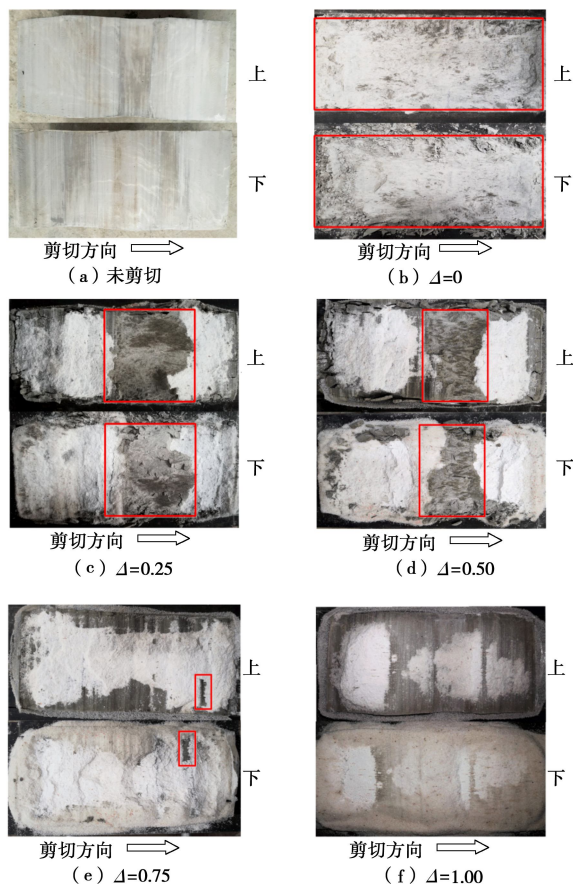


图8 薄层充填岩石节理试件典型剪切破坏特征

Fig. 8 Typical failure properties of thinly-infilled rock joints

3 薄层充填岩石节理峰值剪胀角

根据Barton的定义, 岩石节理峰值剪胀角 d_n 为节理剪胀曲线在峰值剪切位移处的切线与水平方向的倾角^[2]。在获得如图5~7所示薄层充填岩石节理试件剪胀曲线后, 根据上述峰值剪胀角的定义计算#1, #2, #3试件对应的峰值剪胀角, 汇总结果如表4所示。需要说明的是: ①对于试验中没有明显峰值峰值抗剪强度的试件, 根据《土工试验方法标准: GB/T 50123—2019》^[28]选取峰值剪切位移为4 mm, 进行峰值剪胀角计算; ②为了便于分析, 对于试件出现剪缩现象的情况, 在此也按照Barton关于峰值剪胀角的定义进行计算, 但所得计算结果用负号表示, 将其与剪胀情况所得结果进行区分。

将表4所得3组薄层充填岩石节理试件在三级法向应力作用下的峰值剪胀角计算结果用柱状图表示如图9所示。由图9可知:

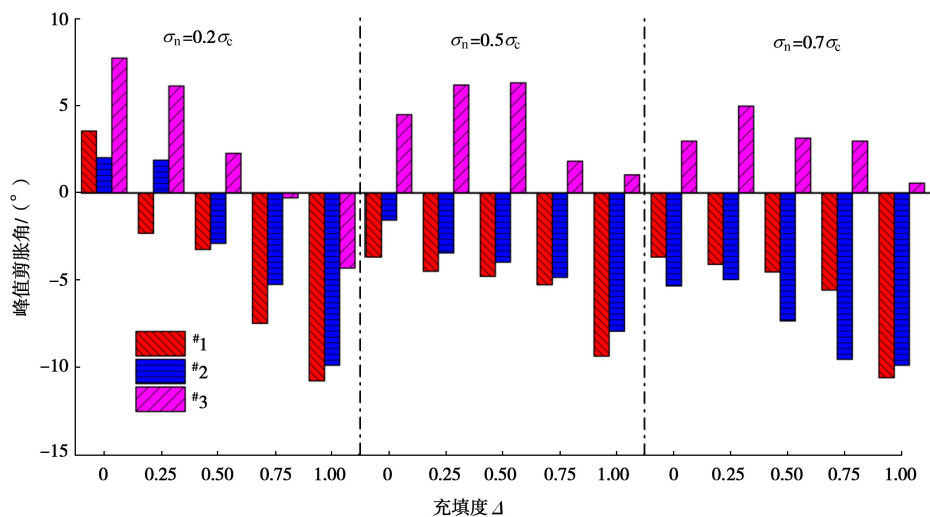


图 9 3 组薄层充填岩石节理试件峰值剪胀角汇总结果

Fig. 9 Summary of peak dilation angles of three groups of thinly-infilled rock joint specimens

(1) 在低法向应力条件下, 当充填度较小 ($\Delta=0.0\sim0.25$) 时, 薄层充填岩石节理试件主要表现为剪胀, 且峰值剪胀角随节理表面粗糙性增大而增大, 而当充填度较大 ($\Delta=0.5\sim1.0$) 时, 薄层充填岩石节理试件主要表现为剪缩, 此时峰值剪胀角也表现为随节理表面粗糙性增大而增大的特点, 这说明在低法向应力条件下, 节理表面粗糙性和充填度共同影响薄层充填岩石节理试件的剪胀特性。

(2) 在中高法向应力条件下, #1 和 #2 试件在不同充填度情况下均表现为剪缩, 且峰值剪胀角同样随节理表面粗糙性增大而增大, 而 #3 试件在不同充填度情况下 ($\Delta=0.0$ 除外) 主要表现为剪胀, 但峰值剪胀角随充填度增加而减小, 这说明在中高法向应力条件下, 节理表面粗糙程度是影响其剪胀特性的关键因素。

表 4 薄层充填岩石节理试件峰值剪胀角试验值

Table 4 Results of peak dilation angle of thinly-infilled rock joint specimens

试件 编号	充填度 Δ	峰值剪胀角 $d_n/(^{\circ})$		
		$0.2\sigma_c$	$0.5\sigma_c$	$0.7\sigma_c$
#1	0.00	3.552	-1.789	-3.676
	0.25	-2.310	-4.487	-4.099
	0.50	-3.239	-4.779	-4.534
	0.75	-7.480	-5.261	-5.566
	1.00	-10.772	-9.348	-10.585
#2	0.00	2.022	-1.559	-5.333
	0.25	1.884	-3.432	-4.967
	0.50	-2.889	-3.961	-7.340
	0.75	-5.241	-4.836	-9.531
	1.00	-9.871	-7.925	-9.875
#3	0.00	7.744	4.491	2.973
	0.25	6.141	6.197	4.986
	0.50	2.279	6.320	3.149
	0.75	-0.276	1.836	2.987
	1.00	-4.309	1.046	0.567

上述关于薄层充填岩石节理剪胀特性影响因素的分析可以用图10所示关系图表示。

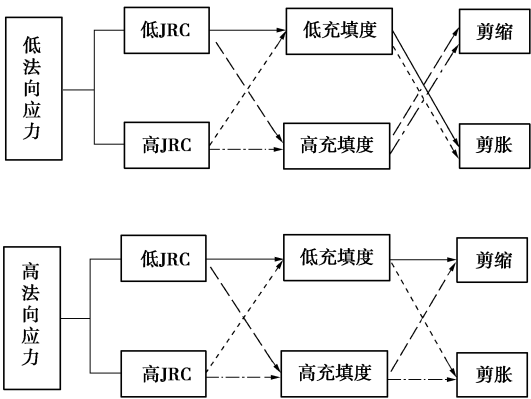


图 10 薄层充填岩石节理剪胀特性影响因素分析

Fig. 10 Influencing factors of dilation property of thinly-infilled rock joints

4 薄层充填岩石节理峰值剪胀角公式

4.1 峰值剪胀角经验公式的建立

基于大量非充填岩石节理试件直剪试验结果, Barton提出了非充填岩石节理峰值剪胀角经验公式^[2]:

$$d_n = JRC \cdot \lg(JCS/\sigma_n) \quad (2)$$

式中 d_n 为峰值剪胀角; JRC 为节理表面粗糙度系数; JCS 为节理岩壁抗压强度, 可取为完整岩石单轴抗压强度 σ_c ; σ_n 为作用于节理面上的法向应力。

由于上述Barton峰值剪胀角经验公式具有参数物理意义明确且确定方式简单和公式实用性较强的特点, 已在工程实践中得到广泛运用, 因而在建立薄层充填岩石节理峰值剪胀角公式时, 参考Barton峰值剪胀角经验公式, 将充填介质对剪胀特性的影响考虑为充填介质对岩石节理表面粗糙性的弱化, 引入粗糙度

修正系数 C ，得到考虑充填介质影响的薄层充填岩石节理峰值剪胀角经验公式：

$$d_{\text{nfilled}} = C \cdot \text{JRC}_0 \cdot \lg(\text{JCS}/\sigma_n) \quad , \quad (3a)$$

其中，

$$C = p_1 \cdot e^{p_2 \cdot \Delta} \quad . \quad (3b)$$

式中 C 为薄层充填岩石节理粗糙度修正系数； JCS 及 σ_n 含义同式（2）； Δ 为充填度； p_1 和 p_2 为待定系数，与充填介质类型、节理岩壁岩性等参数有关。 JRC_0 为非充填岩石节理粗糙度系数，在已知节理剖面线二维坐标数据后可由Tse等^[29]公式计算如下：

$$\text{JRC} = 32.2 + 32.47 \lg Z_2 \quad , \quad (4a)$$

其中，

$$Z_2 = \frac{1}{L} \sqrt{\int_{x=0}^{x=L} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 dx} = \left[\frac{1}{M(\Delta x)^2} \sum_{i=1}^M (y_{i+1} - y_i)^2 \right]^{1/2} \quad . \quad (4b)$$

式中 L 为节理剖面线在 x 方向的投影长度； Δx 为沿 x 方向取样间距，取值为 0.5 mm； $\Delta y = y_{i+1} - y_i$ 为剖面线上相邻两取样点在 y 方向的高度差， M 为取样间距总数。

根据式（4）计算得到#1，#2和#3试件的节理表面粗糙度系数 JRC_0 分别为11.6，12.3和15.7。在此基础上就可以根据薄层充填岩石节理剪胀角试验结果对式（3）进行拟合，确定待定系数 p_1 和 p_2 。由于Barton岩石节理峰值剪胀公式仅适用于剪胀情况，因而在此进行拟合分析时仅考虑剪胀情况，首先根据表4将峰值剪胀角为正的数据选出来，按照式（3a）反算对应的薄层充填岩石节理粗糙度修正系数 C ，对于充填度相同而法向应力不同的同一组试件，对取其平均值作为相应的粗糙度修正系数，然后按照式（3b）进行拟合分析，拟合曲线如图11所示，得到拟合曲线表达式如下：

$$C = 1.013e^{-1.159\Delta} \quad (R^2 = 0.874) \quad . \quad (5)$$

需要说明的是：在对具有相同充填度的薄层充填岩石节理试件进行粗糙度修正系数 C 进行计算时，根据峰值剪胀角反算不同法向应力条件下的（ CJRC_0 ）值再进行平均时，对于差异明显较大的计算结果已剔除。

再将式（5）代入式（3a）中得到薄层充填岩石节理峰值剪胀角经验公式如下：

$$d_{\text{nfilled}} = \text{JRC}_0 \cdot (1.013e^{-1.159\Delta}) \cdot \lg(\text{JCS}/\sigma_n) \quad . \quad (6)$$

式（6）即为针对文中薄层充填砂模拟岩石节理试件峰值剪胀角经验公式。由图11所示拟合结果可知：式（6）与试验数据较为吻合，采用式（3b）所示指数关系式可以较好地反映薄层充填岩石节理粗糙度修正系数 C 与充填度 Δ 之间的定量关系；同时，待定系数 p_1 和 p_2 与充填介质类型以及节理岩壁岩性有关。

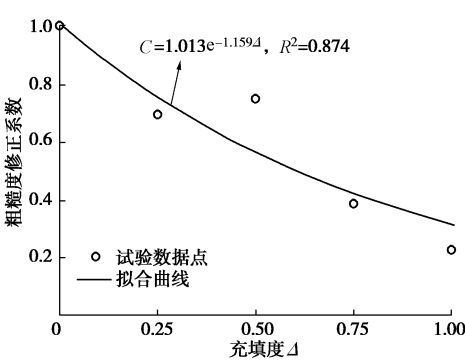


图 11 试验数据拟合分析曲线

Fig. 11 Fitting curve of experimental data

4.2 公式适用性分析

为了验证上述薄层充填岩石节理峰值剪胀角指数经验关系式的适用性，选取文献[7]公开的充填粉煤灰模拟岩石节理试件剪胀曲线，求解相应的峰值剪胀角，结果如表5所示。文献[7]中所采用的石膏模拟岩石节理试件基本力学参数如表6所示。选取表5中出现剪胀的情况，采用式（3b）所示指数表达式按照4.1节拟合过程进行分析，最终得到如图12所示拟合曲线。由图12可知：采用指数表达式对试验数据进行拟合，拟合效果非常理想，说明采用指数表达式能够很好地反映充填粉煤灰模拟岩石节理试件剪胀角随充填度的变化规律。

表 5 薄层充填岩石节理试件峰值剪胀角试验值

Table 5 Results of peak dilation angle of thinly-infilled rock joints

σ_n/kPa	Δ	d_{nfilled}
50	0.06	7.22
	0.14	4.25
	0.28	-0.15
	0.78	-1.90
	1.11	-5.25
100	0.12	3.92
	0.30	-1.53
	0.42	2.44
	0.69	-3.33
	1.11	-5.27

表 6 充填节理试件基本力学参数

Table 6 Mechanical parameters of infilled rock joint specimens

密度 $/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	单轴抗压强度 $/\text{MPa}$	基本摩擦角 $/(^{\circ})$	节理粗糙度 JRC_0
1.85	3.5	30	10.04

尽管根据图 12 所示拟合结果表明，采用式（3b）所示指数关系式可以较好地描述粗糙度修正系数 C 与充填度 Δ 之间的关系，但是由于试验数据有限，该指数关系式的适用性还有待进一步深入研究，同时指数表达式中的待定参数 p_1 和 p_2 并不是固定的常数，其值与充填介质类型有关，在后续研究中将针对不同充填介质进行试验，在此基础上得到不同充填介质对应

的 p_1 和 p_2 值, 为式 (6) 所示薄层充填岩石节理峰值剪胀角经验公式的推广应用奠定基础。

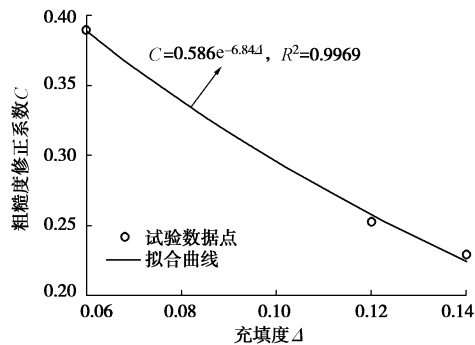


图 12 充填粉煤灰模拟岩石节理试件拟合曲线

Fig. 12 Fitting curve of fly-ash-infilled artificial rock joints

5 结 论

通过对充填度 $\Delta=0.0\sim 1.0$ 的3组薄层充填岩石节理试件进行三级法向应力作用下的直剪试验, 开展薄层充填岩石节理试件剪胀力学特性研究, 得到以下4点结论。

(1) 在低法向应力条件下, 节理表面粗糙性和充填度共同影响薄层充填岩石节理试件的剪胀特性, 即: 当充填度较小时, 薄层充填岩石节理试件主要表现为剪胀, 而当充填度较大 ($\Delta=0.5\sim 1.0$) 时, 薄层充填岩石节理试件主要表现为剪缩; 而在中高法向应力条件下, 节理表面粗糙程度是影响其剪胀特性的关键因素。

(2) 由于充填介质的存在, 薄层充填岩石节理破坏特征包含充填介质的剪切挤碎和节理上下表面粗糙凸起体被剪断两种, 且随着充填度的增加, 充填介质剪切挤碎逐渐占主导地位, 成为薄层充填岩石节理试件的主要破坏特征。

(3) 基于室内直剪试验成果, 以峰值剪胀角表征薄层充填岩石节理试件剪胀特性, 在参考Barton非充填岩石节理峰值剪胀角经验公式的基础上, 将充填介质对试件剪胀特性的影响简化为充填介质对节理表面粗糙度系数JRC的弱化作用, 建立了薄层充填岩石节理峰值剪胀角随充填度呈指数变化的经验关系式, 并通过直剪试验数据和已有文献试验结果对其进行了初步验证。

(4) 在上述薄层充填岩石节理峰值剪胀角随充填度呈指数变化的经验关系式中, 待定系数 p_1 和 p_2 与充填介质类型和节理岩壁岩性密切相关, 因此其数值不是定值, 虽然在此对该公式进行了初步验证, 但是仅针对石英砂和粉煤灰两种充填介质, 需要在后续研究中开展含其他类型充填介质的薄层充填岩石节理试件

试验研究, 进一步验证本文所建议公式的适用性。

参考文献:

- [1] 夏才初. 工程岩体节理力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002. (XIA Cai-chu. Engineering Jointed Rock Mechanics[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002. (in Chinese))
- [2] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1977, **10**(1/2): 1 - 54.
- [3] SCHNEIDER H J. The friction and deformation behavior of rock joints[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1976, **8**(3): 169 - 185.
- [4] LEE Y K, PARK J W, SONG J J. Model for the shear behavior of rock joints under CNL and CNS conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, **70**(9): 252 - 263.
- [5] GHAZVINIAN A H, TAGHICHIAN A, HASHEMI M, et al. The shear behavior of bedding planes of weakness between two different rock types with high strength difference[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, **43**(1): 69 - 87.
- [6] ASADOLLAHI P, TONON F. Constitutive model for rock fractures Revisiting Bartons empirical model[J]. Engineering Geology 2010, **113**(1/2/3/4): 11 - 32.
- [7] BARTON N, BANDIS S, BAKHTAR K. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics abstracts, 1985, **22**(3): 121 - 140.
- [8] ESAKI T, DU S, MITANI Y, IKUSADA K, et al. Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, **36**(5): 641 - 650.
- [9] OLSSON R, BARTON N. An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, **38**(3): 317 - 329.
- [10] LEE H S, CHO T F. Hydraulic characteristics of rough fractures in linear flow under normal and shear load[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2002, **35**(4): 299 - 318.
- [11] 赵延林, 王卫军, 万 文, 等. 节理剪胀耦合的岩体渗透特性数值研究与经验公式[J]. 煤炭学报, 2013, **38**(1): 91 - 96. (ZHAO Yan-lin, WANG Wei-jun, WAN Wen, et al. Numerical study of joint shear dilatation coupling seepage

- characteristic of rock mass and experiential formula[J]. Journal of China Coal Society, 2013, **38**(1): 91 - 96. (in Chinese))
- [12] 赵延林, 万 文, 王卫军, 等. 随机形貌岩石节理剪切-渗流数值模拟和剪胀-渗流模型[J]. 煤炭学报, 2013, **38**(12): 2133 - 2139. (ZHAO Yan-lin, WAN Wen, WANG Wei-jun, et al. Shear-seepage numerical simulation and shear dilatancy-seepage model of rock joint with random morphology[J]. Journal of China Coal Society, 2013, **38**(12): 2133 - 2139. (in Chinese))
- [13] 夏才初, 喻强锋, 钱 鑫, 等. 常法向刚度条件下岩石节理剪切-渗流特性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(1): 57 - 66. (XIA Cai-chu, YU Qiang-feng, QIAN Xin, et al. Experimental study on shear-flow behavior of rock joints under constant normal stiffness[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(1): 57 - 66. (in Chinese))
- [14] BARTON N. A Review of the Shear Strength of Filled Discontinuities in Rock[R]. Oslo: Norwegian Geotechnical Institute, 1974.
- [15] PAPALIANGAS T, HENCHER S R, LUMSDEN A C, et al. The effect of frictional fill thickness on the shear strength of rock discontinuities[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1993, **30**(2): 81 - 91.
- [16] PHIEN-Wej N, SHRESTHA U B, RANTUCCI G. Effect of infill thickness on shear behaviour of rock joints[C]// Proceedings of the International Conference on Rock Joints, 1990, Loen: 289 - 294.
- [17] 许 江, 邬君宇, 刘义鑫, 等. 不同充填度下岩体剪切-渗流耦合试验研究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(9): 3416 - 3424, 3434. (XU Jiang, WU Jun-yu, LIU Yi-xin, et al. Experimental study on shear-seepage of coupled properties for rock mass under different filling degrees[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(9): 3416 - 3424, 3434. (in Chinese))
- [18] INDRARATNA B, HAQUE A, AZIZ N. Shear behavior of idealized filled joints under constant normal stiffness[J]. Géotechnique, 1999, **49**(3): 331 - 355.
- [19] INDRARATNA B, WELIDENIYA H S, BROWN E T. A shear strength model for idealized filled joints under constant normal stiffness[J]. Géotechnique, 2005, **55**(3): 215 - 226.
- [20] INDRARATNA B, OLIVEIRA D A F, BROWN E T. A shear-displacement criterion for soil-filled rock discontinuities[J]. Géotechnique, 2010, **60**(8): 623 - 633.
- [21] INDRARATNA B, PREMADASA W, BROWN E T. Shear behaviour of rock joints with unsaturated infill[J]. Géotechnique, 2013, **63**(15): 1356 - 1360.
- [22] MIRZAGHORBANALI A, NEMCIK J, AZIZ N. Effects of cyclic loading on the shear behaviour of infilled rock joints under constant normal stiffness conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, **47**(4): 1373 - 1391.
- [23] SHRIVASTAVA A K, RAO K S. Physical modeling of shear behavior of infilled rock joints under CNL and CNS boundary conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, **51**(1): 101 - 118.
- [24] HAN G S, JING H W, JIANG Y J, et al. Effect of cyclic loading on the shear behaviours of both unfilled and infilled rough rock joints under constant normal stiffness conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, **53**(1): 31 - 57.
- [25] International Society for Rock Mechanics Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1978, **15**(6): 319 - 368.
- [26] 李 锐, 肖维民. 基于 Barton 标准剖面线精细数字化处理的岩石节理 JRC 计算新公式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(增刊 1): 3515 - 3522. (LI Rui, XIAO Wei-min. Study on a new equation for calculating JRC based on fine digitization of standard profiles proposed by Barton[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(S1): 3515 - 3522. (in Chinese))
- [27] LADANYI B, ARCHAMBAULT G. Shear strength and deformability of filled indented joints[C]// Proceedings of International Symposium on Geotechnics of Structurally Complex Formations, 1977, Capri: 317 - 326
- [28] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (in Chinese))
- [29] TSE R, CRUDEN D M. Estimating joint roughness coefficients[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1979, **16**(5): 303 - 307.