

DOI: 10.11779/CJGE202209020

# 法向卸荷条件下非贯通节理岩体剪切力学特性试验研究

杨 超<sup>1,2</sup>, 蒋淏南<sup>2</sup>, 岳六一<sup>2</sup>, 王乐华<sup>1,2</sup>, 骆祚森<sup>\*1,2</sup>, 王瑞红<sup>1,2</sup>

(1. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 实际中较多处于压剪应力状态的岩体在开挖后的受力路径为法向应力卸荷。鉴于此, 通过相似材料制备不同粗糙度 JRC 的非贯通节理试样, 开展了法向应力  $\sigma$  逐渐减小的卸荷直剪试验, 并与常规直剪试验进行了对比。试验结果显示, 两种应力路径下试样在破坏和强度特征等方面的变化规律均有所不同: 随着 JRC 的逐渐增加, 法向卸荷下试样破坏表现出更强的张拉特性, 常规直剪下试样则表现出更强的剪切破坏特性; 无论是法向卸荷还是常规直剪, 试样的强度均随 JRC 的增大而增大, 但法向卸荷主要体现在  $\varphi$  值的增加上, 而常规直剪则主要表现为  $c$  值的增加。其主要原因在于, 法向卸荷下是  $\sigma$  逐渐减小, 因此试样的爬坡效应更加明显。常规直剪则是剪应力  $\tau$  逐渐增大, 从而啃咬效应更加明显。实际工程中应结合岩体受力路径获取强度参数, 若按常规直剪试验强度参数推导法向卸荷下试样的强度, 其值将远大于试样的实际强度, 从而偏于不安全。最后基于 Jennings 强度准则提出了考虑岩桥弱化与 JRC 影响的修正模型, 模型预测结果与试验值误差在 10% 以内, 表明建立的模型可较好地用于法向卸荷下非贯通节理岩体强度的预测。

**关键词:** 岩石力学; 非贯通节理; 法向卸荷; 粗糙度; 强度准则

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)09-1741-10

作者简介: 杨 超(1986—), 男, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事岩土工程和地下工程方面的研究工作。

E-mail: yangchao0615@ctgu.edu.cn。

## Shear mechanical properties of rock mass with discontinuous joints under unloading normal stress

YANG Chao<sup>1,2</sup>, JIANG Hao-nan<sup>2</sup>, YUE Liu-yi<sup>2</sup>, WANG Le-hua<sup>1,2</sup>, LUO Zuo-sen<sup>1,2</sup>, WANG Rui-hong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education (China Three Gorges University),

Yichang 443002, China; 2. College of Civil Engineering & Architecture, Yichang 443002, China)

**Abstract:** In practice, the rock masses in a state of compression-shear stress are subjected to the normal stress unloading path after excavation. In view of this, the specimens of discontinuous joints with different roughnesses JRC are prepared by using the similar materials, and then the unloading shear tests with gradually decreasing normal stress  $\sigma$  are carried out, and compared with the conventional direct shear tests. The test results show that the change laws of failure and strength characteristics of the specimens under two stress paths are different: with the increase of JRC, the specimens under unloading normal stress exhibit stronger tensile failure characteristics, while those under conventional direct shear show stronger shear failure characteristics. The strength of the specimens increases with the increase of JRC under both the normal stress unloading and the conventional direct shear, but the normal stress unloading condition is mainly reflected in the increase of  $\varphi$ , while the conventional direct shear condition is mainly expressed in the increase of  $c$ . The main reason is that the normal stress unloading condition exhibits a gradual decrease in  $\sigma$ , resulting in a more obvious climbing effect. The conventional direct shear condition shows a gradual increase in shear stress  $\tau$ , resulting in a more obvious gnawing effect. If the strength of the specimens under normal stress unloading is deduced according to the strength parameters of the conventional direct shear tests, it will be much greater than the actual strength, which may lead to unsafe results. Finally, a modified model considering the weakening of rock bridge and the influences of JRC is proposed based on the Jennings criterion. The errors between the theoretical prediction and the experimental results are less than 10%, which shows that the proposed model can be better used to predict the strength of discontinuous jointed rockmass under unloading normal stress.

**Key words:** rock mechanics; discontinuous joint; unloading normal stress; roughness; strength criterion

## 0 引言

实际工程中存在大量的非贯通节理岩体。由于节

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177132); 湖北省自然科学基金重点项目(2020CFA049, 2021CFA090)

收稿日期: 2021-09-22

\*通信作者(E-mail: lzs@ctgu.edu.cn)

理间岩桥的存在，其力学性质较贯通节理岩体与完整岩石更为复杂，因而也一直是国内外众多学者研究的重点<sup>[1-2]</sup>。

由于节理岩体在实际中主要处于压剪应力状态，许多研究通过直剪加载方式分析了不同条件下非贯通节理岩体的力学特性变化规律。如夏才初等<sup>[3]</sup>分别制备了不同节理粗糙度以及不同节理、岩桥分布的两类试样，基于试验结果建立了非贯通节理的岩桥弱化模型；唐志成等<sup>[4]</sup>通过试验研究了含不同起伏角的非贯通节理剪切变形规律；陈庆芝等<sup>[5]</sup>采用试验和数值计算分析了节理粗糙度对非贯通岩体剪切力学特性的影响；刘超等<sup>[6]</sup>分析了连通率、节理形貌以及法向压力等因素对非贯通节理岩体抗剪强度的影响规律；陈国庆等<sup>[7]</sup>则分析了连通率对节理岩体直剪破坏特征的影响。

上述研究主要采用的是常规直剪（ $\sigma$  恒定， $\tau$  逐渐增加）的加载路径，而近年来，结合实际如边坡开挖或河谷下切后处于压剪应力状态岩体的加载路径为法向应力卸荷，部分学者开展了法向卸荷条件下（ $\tau$  恒定， $\sigma$  逐渐减小）岩体的剪切力学特性研究<sup>[8-11]</sup>。研究结果表明，法向卸荷下岩体的强度、变形以及破坏模式与常规直剪下的有明显区别。如黄达等<sup>[8]</sup>通过对含不同角度的单裂隙红砂岩开展的试验结果显示，法向卸荷不仅使得抗剪能力降低，也会造成在卸荷方向的变形显著增大；Zhu 等<sup>[9]</sup>对完整红砂岩进行试验后指出，法向卸荷条件下试样的黏聚力随着初始剪应力的增加而明显降低，内摩擦角则略有增大，且试样破坏后的主裂隙附近伴随大量碎块剥落，而常规直剪试验中试样裂隙较为平整。

从现有研究来看，法向卸荷条件下岩体的剪切力学特性主要是从不同裂隙条数、角度等特征开展的，而针对不同节理特征下非贯通节理岩体的剪切力学特性的研究还相对较少。鉴于此，本文通过制备不同粗糙度的非贯通节理试样开展试验，通过分析不同应力水平、不同节理粗糙度下试样的变形、强度以及破坏模式，并与常规直剪试验进行对比，对非贯通节理在法向卸荷条件下的剪切力学特性开展研究。

## 1 试验概况

### 1.1 试样制备

试验在三峡库区地质灾害教育部重点实验室（三峡大学）的 HYZW-500L 岩石直剪流变试验机上进行。结合《岩石物理力学性质试验规程：DZ/T 0276.25—2015》<sup>[12]</sup>和试验设备的参数要求，最终确定试样尺寸为长 100 mm×宽 100 mm×高 100 mm 的立方体。如图 1 所示，每个试样在左右两侧分别设置有长 25 mm

的水平节理，本文主要考虑节理粗糙度 JRC 的影响，节理角度、长度以及位置等均保持不变。关于节理粗糙度 JRC，Barton 等<sup>[13]</sup>最早定义了 10 条不同粗糙度的标准轮廓曲线，分别对应 JRC 数值为 0~20。因此本文考虑 JRC=0, 5, 10, 15 和 20 共 5 种工况，具体节理的几何尺寸则根据谢和平等<sup>[14]</sup>提出的 JRC 估算公式进行确定：

$$JRC = 85.267(D - 1)^{0.5679}, \quad (1)$$

$$D = \lg 4 / \lg \{2[1 + \cos(\arctan(2h/L))]\}, \quad (2)$$

式中， $L$  和  $h$  分别为节理粗糙度的平均基底长度和平均高度。

由于获取相对规则的天然节理难度较大，本文采用相似材料制备类岩体节理。相似材料的原型为重庆蟠龙抽水蓄能电站石英细砂岩<sup>[15]</sup>，其主要参数为：密度  $\gamma = 2630 \text{ kN/m}^3$ ，单轴抗压强度  $\sigma_c = 46.52 \text{ MPa}$ ，弹性模量  $E = 6.60 \text{ GPa}$ ，黏聚力  $c = 9.76 \text{ MPa}$ ，内摩擦角  $\varphi = 46.5^\circ$ 。基于反复的配比试验，最终确定相似模型的材料及配比为：#425 普通硅酸盐水泥：石英砂（20~40 目）：水=1:1:0.4。相似材料的主要物理、力学参数： $\gamma$  约  $2455 \text{ kN/m}^3$ ， $\sigma_c = 46.37 \text{ MPa}$ ， $E = 5.68 \text{ GPa}$ ， $c = 11.23 \text{ MPa}$ ， $\varphi = 43.0^\circ$ 。相似材料和原型的相似比  $C_\gamma=1.07$ ， $C_\sigma=1.00$ ， $C_E=1.16$ ， $C_c=0.87$ ， $C_\varphi=1.08$ ，能基本满足相似理论的相关要求。

试样制备的具体步骤为：先将不同角度的钢片（厚度约 0.5 mm）插入模具卡槽内并固定好位置，之后将配比好的材料搅拌均匀后倒入模具内并充分振捣。在浇筑完成约 6 h 后将钢片缓缓拔出，使节理面达到较好的闭合效果。浇筑完成约 24 h 后将模具拆除并在标准条件下养护 28 d。最终制备的试样如图 1 所示。

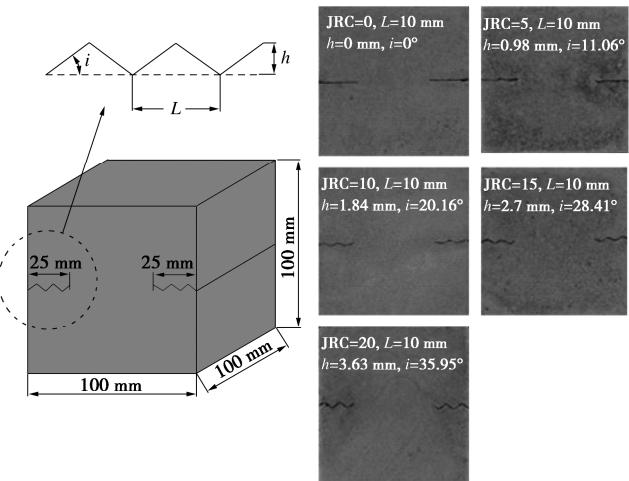


图 1 非贯通节理试样

Fig. 1 Specimens of discontinuous joints

### 1.2 试验方案

首先针对所有试样开展恒定  $\sigma$ 、逐渐增大  $\tau$  的常规

直剪试验, 其一方面是确定法向卸荷直剪试验中 $\tau$ 的数值, 另一方面是为了与法向卸荷结果进行对比。常规剪切试验中考虑 $\sigma=2, 4, 6, 8$ 和 $10\text{ MPa}$ 共5种情况, 具体加载方案为: 首先以 $0.1\text{ kN/s}$ 的速率施加 $\sigma$ 至设定值, 再以相同的速率施加 $\tau$ , 直至试样发生破坏。

然后开展恒定 $\tau$ 、逐渐减小 $\sigma$ 的法向卸荷直剪试验。为便于与常规直剪试验对比, 初始 $\sigma$ 仍取2, 4, 6, 8和 $10\text{ MPa}$ 5种情况。恒定切向应力 $\tau$ 由常规直剪试验结果确定, 目的是要保证在卸荷的过程中所有试样均可发生破坏, 最终开展的试验方案如表1所示。法向卸荷试验的具体加载步骤为: 首先以 $0.1\text{ kN/s}$ 的速率施加 $\sigma$ 至设定值, 再以相同的速率施加 $\tau$ 至设定值, 然后保持 $\tau$ 不变以相同的速率减小 $\sigma$ 直至试样发生破坏。所有JRC和应力状态下的工况均做两组重复性试验。

另外, 为了便于对比和理论分析, 在常规直剪(A组)和法向卸荷(B组)试验中还增加了完整试样和完全贯通平直节理( $JRC=0$ )试样, 具体如表1所示。

## 2 试验结果分析

### 2.1 破坏特征

以如图2所示的一组代表性试样(法向卸荷条件, 初始 $\sigma=10\text{ MPa}$ 、 $\tau=6.5\text{ MPa}$ )的试验结果分析试样破坏过程。所有试样均是首先在原节理端部出现裂缝, 并逐渐向岩桥扩展并最终贯通破坏。从最终破坏情况来看, 其区别主要体现在: ①岩桥表面的剥落情况有所不同。如图2中 $JRC=0$ 和 $5$ 的试样表面剥落情况较为严重;  $JRC=10$ 的试样表面有一定的剥落, 但较 $JRC=0$ 和 $5$ 的试样要少;  $JRC=15$ 和 $20$ 的试样表面几乎不存在剥落情况; ②破坏断面擦痕占整个破坏面的比重有所不同。从本文试验结果来看, 试样破坏后断面上的擦痕是非常明显且肉眼可见的(如图2所示试样破坏断面图中标出的区域), 而且擦痕所占整个断面的破坏面积也是不一样的。如图2中, 随着 $JRC$ 从0增加到20的5个试样, 擦痕占整个断面的面积分别为 $55.89\%$ ,  $29.86\%$ ,  $27.99\%$ ,  $16.31\%$ 和 $3.58\%$ 。

一般来讲, 可根据试样在裂纹起裂与贯通过程以及破坏后的断面形态来判断其破坏特征<sup>[7]</sup>: 张拉破坏表现为有一定程度的张开位移, 剪切破坏表现为破裂面上下侧有相对错动位移(擦痕)且伴随表面岩石碎屑剥落。为进一步了解擦痕面处的破坏特点, 对擦痕面和非擦痕面分别取样进行电镜扫描, 得到250倍和

表1 试验加载方案

Table 1 Loading schemes for tests

试验分组	节理特征	初始 $\sigma/\text{MPa}$	初始 $\tau/\text{MPa}$
A(常规直剪)	非贯通节理试样( $JRC=0, 5, 10, 15, 20$ )、完整试样、贯通平直节理试样( $JRC=0$ )	2, 4, 6, 8, 10	—
B(法向卸荷)	非贯通节理试样( $JRC=0, 5, 10, 15, 20$ )、完整试样、贯通平直节理试样( $JRC=0$ )	6	5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5
C(法向卸荷)	非贯通节理试样( $JRC=0, 5, 10, 15, 20$ )	2, 4, 8, 10	6.5

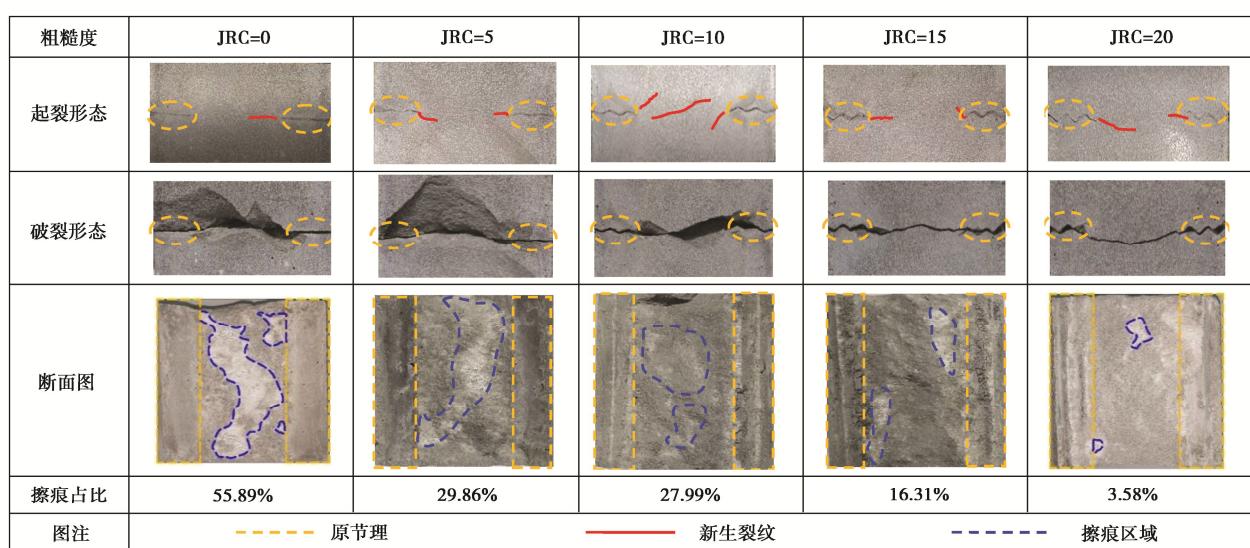


图2 法向卸荷直剪试验典型试样破坏图(初始 $\sigma=10\text{ MPa}$ ,  $\tau=6.5\text{ MPa}$ )

Fig. 2 Failure of typical specimens in unloading normal stress tests (initial  $\sigma=10\text{ MPa}$ ,  $\tau=6.5\text{ MPa}$ )

1000倍下两者的对比结果如图3所示。分析擦痕面的扫描结果,其整体上平坦光滑,坑洞较少(图3(a)),断面主要表现为穿晶剪断裂,晶粒有明显的错动破坏,且晶粒间有较多胶结物破碎(图3(b)),体现出较为明显的剪切破坏特征。而非擦痕断面起伏粗糙,有大量晶粒被拉出后留下的坑洞(图3(c));断面主要表现为沿晶面张裂,胶结物保存完整,胶结物无明显破碎(图3(d)),表现出较为明显的张拉破坏特征。基于上述分析,本文直接通过擦痕面积及其占整个断面面积的比值来判断试样的破坏特征。计算得到各条件下两组试样破坏断面擦痕占比的平均值如表2所示。

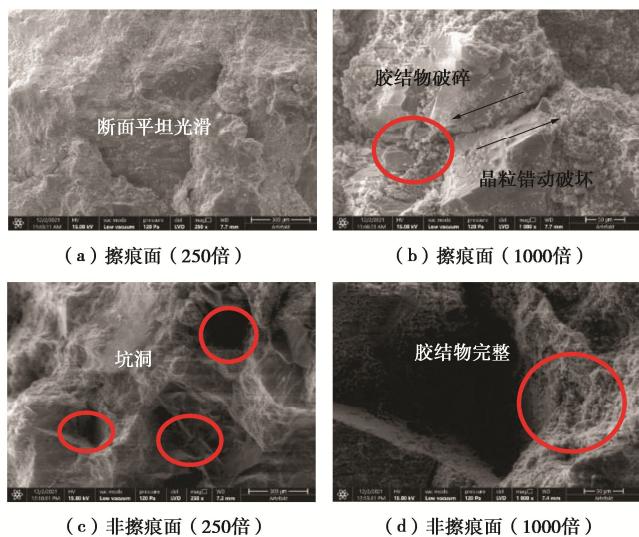


图3 擦痕与非擦痕断面电镜扫描图

Fig. 3 Electron microscope scanning images of abrasion mark and tensile section

表2 非贯通节理试样擦痕占比

Table 2 Area ratio of scratches on discontinuous joints

试验分组	初始 $\sigma$ /MPa	$\tau$ /MPa	擦痕占比/%			
			JRC=0	JRC=5	JRC=10	JRC=15
A	2	—	0.00	0.00	0.00	1.35
	4	—	0.00	0.00	0.00	4.83
	6	—	4.31	8.22	9.03	11.48
	8	—	5.58	9.28	11.17	12.61
	10	—	6.34	11.32	18.17	19.35
B	5.5	23.27	14.47	0.00	0.00	0.00
	6.0	25.21	19.12	17.37	11.86	3.87
	6	6.5	47.59	26.81	20.66	16.17
	7.0	86.37	33.18	26.01	20.11	11.94
	7.5	92.29	34.71	29.91	21.78	19.25
C	2	42.40	16.07	19.74	12.38	8.13
	4	45.78	16.16	15.83	13.91	7.98
	8	53.37	26.00	22.17	15.95	5.13
	10	57.63	27.45	25.43	17.16	4.12

综合分析3组破坏特征,可以得到以下结论:

(1) 大部分试样擦痕均占有一定比例,这表明试样大多呈现出拉剪破坏的特征。相同初始应力水平下,随着JRC的不断增大,法向卸荷试样(B、C两组)

擦痕占比均呈现降低的趋势,即试样表现出更多的张拉破坏特征,而常规直剪试样(A组)则相反,表现出更强的剪切特性。

(2) JRC相同时,法向卸荷条件下随着 $\tau$ 的增大,断面擦痕的占比越来越大,即试样的破坏表现出更强的剪切特征;常规直剪下随着 $\sigma$ 的增大,试样破坏断面擦痕占比越来越大,即表现出更强的剪切特性。

(3)  $\tau$ 不变的情况下,法向卸荷试样在JRC=0~15时随着初始 $\sigma$ 的增大,试样断面擦痕会略微增加,表现出略多的剪切特性;而JRC=20时,试样则呈现相反趋势,但变化范围较小,表明初始 $\sigma$ 对试样破坏特征的影响较JRC和 $\tau$ 的影响要小得多。

分析上述试样破坏特征变化规律,其原因主要在于:

(1) 随着JRC的增大,试样在破坏前需要“爬坡”和“啃断”尖端原凸起节理的过程越来越长,由于常规试验中 $\sigma$ 不变继续增加 $\tau$ 直至试样破坏,其“啃断”效应更加明显。而法向卸荷条件下则是 $\tau$ 不变,继续减小 $\sigma$ ,其破坏过程中的“爬坡”效应更为明显。因此常规试验中随JRC的增加表现出更强的剪切特性而法向卸荷表现出更强的张拉特性。

(2) JRC相同的情况下,常规直剪条件下随着初始 $\sigma$ 的增加,试样破坏对应的 $\tau$ 也越大,破坏前产生的切向位移也越多,因此表现出更多的剪切破坏特性;法向卸荷条件下随着初始 $\tau$ 的增加,试样破坏对应的 $\sigma$ 也越大,卸荷过程也越短,因此由于卸荷产生的剪胀效应越小,试样破坏前产生的法向位移也越小,试样的张拉特征减弱而表现更多的剪切特征。

(3) 初始 $\tau$ 相同的情况下,法向卸荷条件下JRC=0~15试样总体卸荷时间较短,随着初始 $\sigma$ 的增大,试样卸荷时的裂隙闭合程度越高,因此表现出更强的剪切特性;而在JRC=20时,由于试样卸荷时间要大于其余粗糙度试样,随着初始 $\sigma$ 的增大,由于初始 $\tau$ 不变,破坏时的 $\sigma$ 也不会有明显变化,卸荷时间越长,在卸荷阶段积累的法向位移也就越大,试样因此表现出更强的张拉特征。

## 2.2 变形特征

图4中常规直剪试验(A组)中部分试样的剪应力-切向位移曲线。试验结果显示,常规直剪试验下各试样的曲线形状都较为相似,均可以分为3个阶段:①初裂前阶段。此阶段曲线呈向下凸特点,此过程中观察到随着 $\tau$ 的施加,在原节理端部逐渐萌生出细新的新裂纹;②裂纹稳定扩展阶段。此阶段曲线呈近似直线,此阶段中观察到新生裂纹不断增长扩展,有些试样还萌生出分支裂纹;③裂纹不稳定扩展阶段。曲线

呈向上凸起,  $\tau$  随剪切位移的增加而增大, 但增加的速度明显变小, 直到达到峰值抗剪强度, 随后试样破坏, 在此过程中发现一些试样的节理中间部分出现剥落掉块等现象, 裂纹随之很快扩展直至破坏。

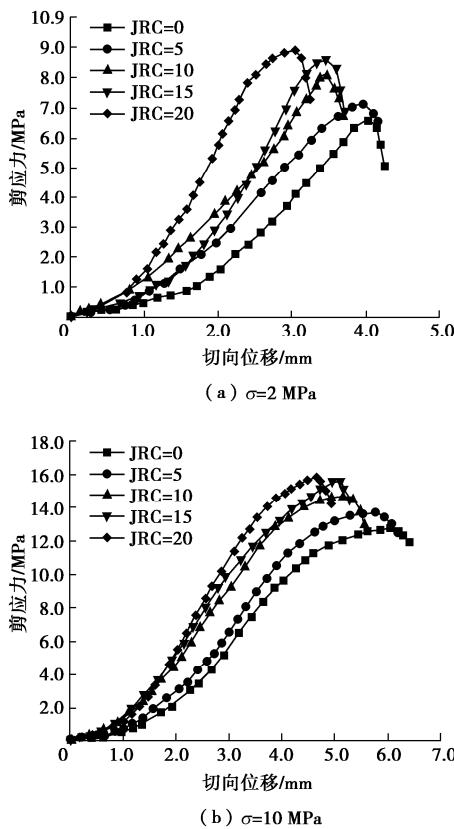


图 4 A 组试样应力 - 位移曲线

Fig. 4 Stress-displacement curves of group A specimens

图 5, 6 为 B 组和 C 组试样的应力 - 位移曲线, 由于法向卸荷条件下  $\tau$  保持不变, 试样为法向应力 - 法向位移 - 切向位移曲线。同组情况下试样的曲线形态也较为相似, 整体均呈现先线性增加然后加快增加的趋势。由于试样在卸荷处于一定的初始法向和切向应力状态下, 在法向卸荷初期试样处于弹性阶段, 因此应力和应变基本呈线性关系; 而随着卸荷量的增加, 曲线逐渐呈下凹形态, 即变形增加越来越大。在此过程中可观察到新生裂纹快速贯通, 试样突然破坏。

法向卸荷条件下试样典型的时间 - 位移曲线如图 7 所示, 根据加载的阶段可分为: ① 法向加载阶段。此时  $\tau=0$ ,  $\sigma$  从 0 加至目标值, 试样处于单轴压缩状态, 法向位移随着  $\sigma$  的增大而增大。② 切向加载阶段。此时  $\sigma$  保持不变,  $\tau$  从 0 加至目标值, 此时试样处于压剪应力状态, 剪切位移随着  $\tau$  的增大显著增大, 由于  $\tau$  增加的不大, 法向位移几乎不产生变化。③ 法向卸载阶段。此时  $\tau$  保持不变,  $\sigma$  卸载直至试样破坏, 法向位移随  $\sigma$  的减小明显减小, 剪切位移随之先缓慢增大, 临近破坏时突然快速增大。

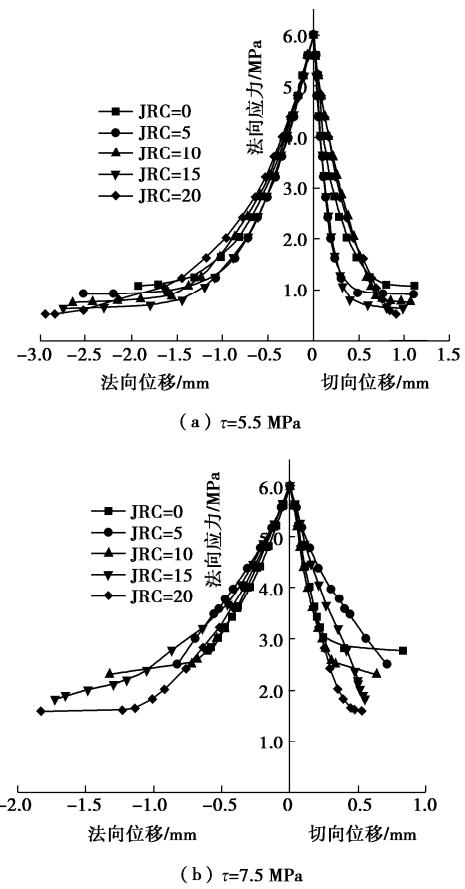


图 5 B 组试样应力 - 位移曲线

Fig. 5 Stress-displacement curves of group B specimens

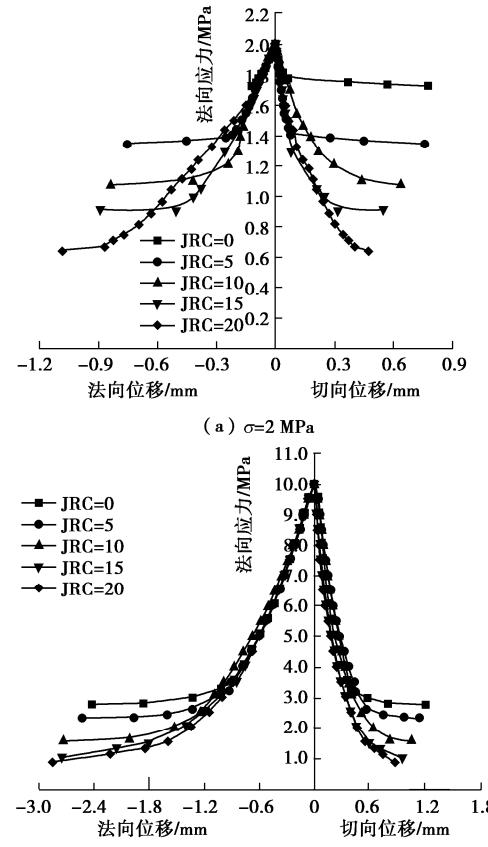


图 6 C 组试样应力 - 位移曲线

Fig. 6 Stress-displacement curves of group C specimens

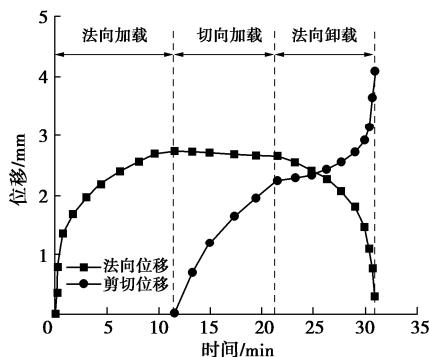
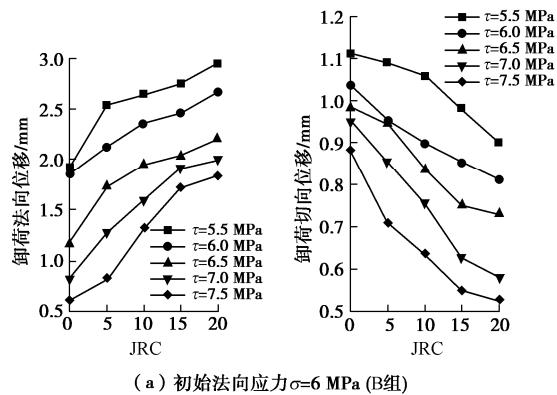


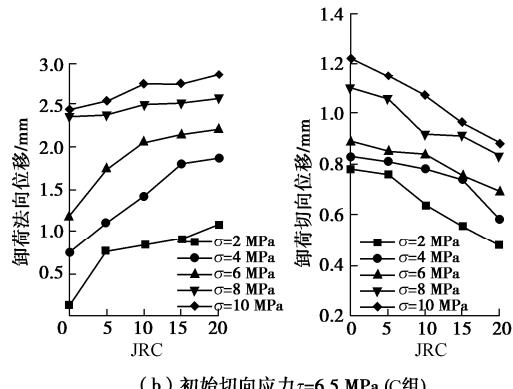
图 7 试样典型位移时间曲线 (B 组,  $\sigma=6 \text{ MPa}$ ,  $\tau=5.5 \text{ MPa}$ ,  $JRC=0$ )

Fig. 7 Typical displacement-time curves (group B,  $\sigma=6 \text{ MPa}$ ,  $\tau=5.5 \text{ MPa}$ ,  $JRC=0$ )

为分析卸荷阶段位移的变化规律, 定义卸荷法向位移和卸荷切向位移两个特征值, 即法向卸荷阶段法向位移减少的绝对值和切向位移增加的绝对值。图 8 为两个特征值的变化规律, 可以看出: ①相同初始应力下, 卸荷法向位移随 JRC 的增大而增大, 但卸荷切向位移则随着 JRC 的增大而减小; ②相同 JRC 和初始切向应力  $\tau$  下, 法向位移和切向位移均随着初始法向应力  $\sigma$  的增大而增大; ③相同 JRC 和初始  $\sigma$  下, 法向位移和切向位移均随着初始  $\tau$  的增大而减小。



(a) 初始法向应力  $\sigma=6 \text{ MPa}$  (B组)



(b) 初始切向应力  $\tau=6.5 \text{ MPa}$  (C组)

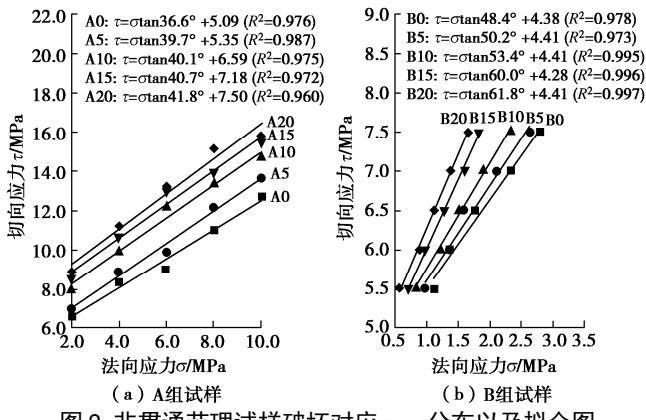
图 8 非贯通节理试样卸荷特征位移变化

Fig. 8 Change in unloading characteristic displacement of discontinuous joint

结合前面试样的破坏特征, 分析上述试样变形特征变化规律, 其原因在于: ①相同初始应力特征条件下, 随着 JRC 的增大, 节理面的起伏角越来越大, 卸荷后试样要“爬坡”的过程越来越长, 因此法向卸荷位移越来越大而切向位移越来越小。这也从另一方面验证了试样破坏特征随 JRC 增大表现出更强张拉性质的规律; ②在  $\tau$  不变的情况下, 初始  $\sigma$  增大后需要更大的卸荷量和时间致使试样破坏, 因此不管是卸荷法向位移还是切向位移都将增大; ③初始  $\sigma$  不变的情况下, 初始  $\tau$  增大后在更小的卸荷量和更少的时间内试样便会破坏, 因此无论是卸荷法向还是切向位移都将变小。

### 2.3 强度特征

A 组和 B 组试样破坏时对应的  $\tau - \sigma$  分布以及基于 Mohr-Coulomb 准则 ( $\tau = \sigma \tan\varphi + c$ ) 进行拟合得到的结果如图 9 所示, 图中 A0 代表 A 组  $JRC=0$  的试样, 其他以此类推。可以看出, 无论是常规直剪还是法向卸荷, 在相同  $\sigma$  下, 破坏剪应力  $\tau$  均随着 JRC 的增大而增大, 即试样的强度均随着 JRC 的增大而增大。但从拟合得到的抗剪强度参数  $\varphi$  和  $c$  来看, 其又存在一定区别。常规直剪试验中不同 JRC 的  $\varphi$  和  $c$  均随着 JRC 的增大而增大, 但  $\varphi$  值增加很小 (从  $36.6^\circ$  增加至  $41.8^\circ$ , 平均参数变化率为 3.42%), 其主要体现在  $c$  值的增加上 (从 5.09 MPa 增加至 7.50 MPa, 平均参数变化率为 10.42%)。而法向卸荷条件下随着 JRC 的增加, 试样的  $c$  值几乎没有变化 (介于 4.28~4.41 MPa 之间, 平均参数变化率为 1.65%),  $\varphi$  值则呈现明显的增加趋势 (从  $48.4^\circ$  增加至  $61.8^\circ$ , 平均参数变化率为 6.37%)。结合试样在不同情况下的破坏及变形特征来看, 本文认为其主要与受力路径和破坏时对应法向应力  $\sigma$  的大小有关。常规直剪下, 由于  $\sigma$  相对较大 (2.0~10.0 MPa) 且保持不变, 而  $\tau$  逐渐增大直至试样发生破坏, 此时试样更多的是沿节理面发生“啃断”破坏。随着 JRC 增大, 需要更大的剪力来将齿剪断破坏, 因此破坏时试样的黏聚力不仅有岩桥黏聚力, 还有节理切齿剪断的黏聚力, 因此得到的  $c$  值增大, 而  $\varphi$  值不会发生较大变化, 这也是常规条件下试样破坏随 JRC 的增大表现出更强剪切特性的原因; 法向卸荷条件下, 此时  $\tau$  保持不变而  $\sigma$  逐渐减小至较小水平 (0.5~2.8 MPa) 才发生破坏, 试样破坏时法向产生较大位移, 其“爬坡”效应更为明显, 因此与常规条件下刚好相反, 得到的  $c$  值变化较小, 而  $\varphi$  值随着 JRC 的增大逐渐增大。

图 9 非贯通节理试样破坏对应  $\tau - \sigma$  分布以及拟合图Fig. 9  $\tau - \sigma$  distribution of specimens of discontinuous joints at time of failure and fitting plots

为进一步分析法向卸荷路径的影响, 将图 9 中两种路径下的拟合曲线延长至同一应力区间, 结果如图 10 所示。图中实线为试验中的应力范围, 虚线为延长线。可以看出, 当  $\sigma$  在较小的应力区间时, 常规直剪得到的剪断强度  $\tau$  将大于法向卸荷得到的剪断强度  $\tau$ ; 随着  $\sigma$  增大至某一值时, 法向卸荷下的剪断强度  $\tau$  将大于常规直剪试验下的剪断强度  $\tau$ 。从理论上来看, 莫尔包络线形状并非直线而实为先陡后缓, 由于试验中法向卸荷破坏时试样整体对应的法向应力较小 (0.5~2.7 MPa 之间), 从而法向卸荷拟合得到的各试样  $\varphi$  值要大一些。但本文认为这不是主导因素, 法向卸荷的影响更大一些。如图 10 中标出的两个对比区域, 两种路径下破坏时对应的  $\sigma$  差别不大, 但  $\tau$  存在较大差距。若将标注区域相同 JRC 的两个点直接相连, 则在连接处存在非常明显的陡增特点, 这显然与莫尔包络线不尽符合。实际工程中在考虑岩体强度时一般取  $c$  和  $\varphi$  为定值, 那么如果不考虑实际岩体的加卸载路径的话可能导致出现偏差, 如根据常规试验结果, JRC=20 试样在  $\sigma=0.53$  MPa 时破坏的剪应力  $\tau=7.97$  MPa, 而基于法向卸荷试验结果得到的破坏剪应力仅为 5.50 MPa (降低了约 31.0%), 显然这将偏于不安全。因此, 对于实际中处于压剪应力状态的节理岩体, 根据工程特点判断其受力路径再开展试验获取强度参数显得十分重要。

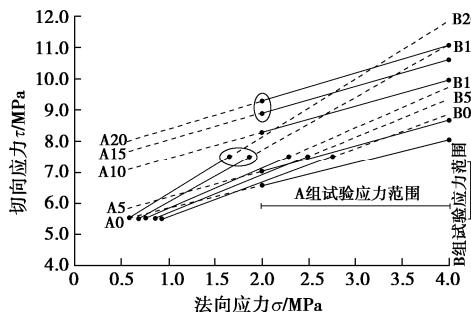


图 10 法向卸荷与常规直剪试验的强度对比

Fig. 10 Comparison of strength between unloading normal stress tests and conventional direct shear tests

另外, 拟合得到的 A 组和 B 组试验中完整和贯通平直节理 ( $JRC=0$ ) 试样的抗剪强度参数如表 3 所示。可以看出, 与非贯通节理试样规律较为相似, 无论是完整岩石还是贯通节理, 法向卸荷条件下得到的  $\varphi$  值大于常规直剪试验, 而  $c$  值则小于常规直剪试验 (贯通平直节理试样  $c$  值均为 0.00 MPa)。

表 3 完整试样与平直贯通节理试样抗剪强度参数

Table 3 Shear strength parameters of whole specimens and specimens of flat continuous joints

加载方式	完整试样		贯通平直节理试样	
	$\varphi/^\circ$	$c/MPa$	$\varphi/^\circ$	$c/MPa$
A 组 (常规直剪)	43.0	11.23	32.1	0
B 组 (法向卸荷)	60.7	8.62	43.0	0

### 3 法向卸荷下非贯通节理 Jennings 强度准则的修正

#### 3.1 传统 Jennings 强度准则

目前, Jennings 强度准则在非贯通节理岩体中应用最为广泛<sup>[16]</sup>。假设法向卸荷条件下非贯通节理的抗剪强度符合 Jennings 强度准则, 则法向卸荷条件下试样破坏时对应的法向应力  $\sigma$  为<sup>[16]</sup>

$$\sigma = \frac{\tau - c}{\tan \varphi} = \frac{\tau - [kc_j + (1-k)c_b]}{k \tan \varphi_j + (1-k) \tan \varphi_b}, \quad (3)$$

式中,  $k$  为节理连通率,  $c_j$  和  $c_b$  分别为节理面和岩桥的黏聚力,  $\varphi_j$  和  $\varphi_b$  分别为节理面和岩桥的摩擦角。

从式 (3) 可以看出, 要得到破坏时对应的  $\sigma$  值, 除了初始  $\tau$  外, 还需要得到节理面和岩桥的黏聚力  $c_j$  和  $c_b$ , 节理面和岩桥的摩擦角  $\varphi_j$  和  $\varphi_b$ 。取贯通平直节理面的黏聚力  $c_0$  和摩擦角  $\varphi_0$  作为节理面的  $c_j$  和  $\varphi_j$ , 将表 3 中数据代入式 (3), 得到非贯通节理 Jennings 强度准则与试验结果对比如图 11 所示。

由图 11 可知, 当  $JRC=0$  时, Jennings 强度准则预测的破坏法向应力比试验值偏低, 说明根据 Jennings 强度准则得出的非贯通节理抗剪能力比实际抗剪能力更强。这是由于传统 Jennings 准则中未考虑岩桥弱化的影响, 而在卸荷过程中可明显观察到试样的岩桥尖端或中部先产生许多细小裂纹, 导致计算时岩桥黏聚力的取值比实际值偏大; 当  $JRC$  不为 0 时, Jennings 强度准则预测的破坏法向应力则比试验值偏高, 说明根据 Jennings 强度准则计算得出的非贯通节理抗剪能力比实际抗剪能力更弱, 且随着  $JRC$  的增大, 两者的差值逐渐增大, 可以看出节理粗糙度对抗剪强度有很大的影响。综上所述, 在计算法向卸荷条件下非贯通节理岩体的抗剪强度时, 必须同时考虑节理间岩桥的

弱化以及节理粗糙度的影响。

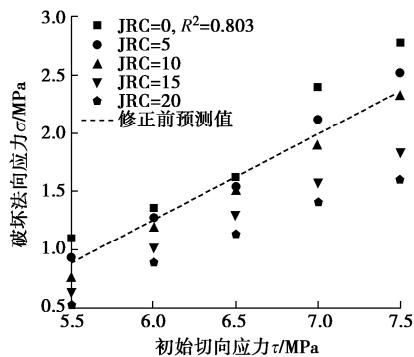


图 11 传统 Jennings 准则与试验结果对比

Fig. 11 Comparison between traditional Jennings criterion and experimental results

### 3.2 考虑岩桥弱化和 JRC 影响的强度修正

先考虑岩桥的弱化, 如前文分析, 卸荷过程中岩桥尖端或中部先出现了许多细小裂纹, 因此岩桥的弱化主要考虑岩桥黏聚力的弱化<sup>[16]</sup>。引入折减系数  $\lambda$  乘以岩桥黏聚力来表示对岩桥黏聚力的弱化, 即弱化后岩桥黏聚力  $c'_b = \lambda c_b$ , 可得到考虑岩桥弱化的非贯通节理黏聚力  $c'$  的表达式:

$$c' = k c_j + (1 - k) \lambda c_b \quad (4)$$

结合法向卸荷试验结果, 非贯通节理试样的黏聚力  $c$  基本不发生变化(图 9), 也就是说折减系数  $\lambda$  可视为一定值。由于  $JRC=0$  非贯通节理试样的起伏角为  $0^\circ$ , 无需考虑  $JRC$  的影响, 因此可通过  $JRC=0$  试样的试验结果来确定  $\lambda$ 。根据表 3, 岩块内摩擦角  $\varphi_b = 60.7^\circ$ , 平直节理内摩擦角  $\varphi_j = \varphi_0 = 43.0^\circ$ , 将  $\varphi_b$ ,  $\varphi_j$  与节理连通率  $k=0.5$  代入式(3)中并结合  $JRC=0$  的非贯通法向卸荷试验结果进行回归分析, 可得等效黏聚力  $c'_{JRC=0} = 4.01$  MPa。将  $c'$  代入式(4)即可得出岩桥黏聚力折减系数  $\lambda=0.93$ 。

其次是考虑粗糙度  $JRC$  的影响。结合上文对破坏特征的分析, 由于法向卸荷条件下对应破坏的  $\sigma$  值较小, 试样破坏的爬坡效应明显。且爬坡特征随着  $JRC$  的增大而更为明显。因此, 节理面的等效摩擦角  $\varphi'_j$  的包含了节理面摩擦角和因为粗糙度  $JRC$  影响的爬坡效应。考虑到  $JRC=0$  时, 节理面不受粗糙度的影响, 因此等效内摩擦角  $\varphi'_j$  可写为

$$\tan \varphi'_j = \tan \varphi_0 + s \cdot JRC \quad (5)$$

式中,  $\varphi_0$  为  $JRC=0$  的节理摩擦角,  $s$  则代表了由于  $JRC$  引起的爬坡效应, 本文称为爬坡效应系数。为了分析本文条件下试样的  $s$  值, 课题组还开展了相同  $JRC$  的贯通节理法向卸荷试验, 拟合得到不同  $JRC$  试样的等效内摩擦角  $\varphi'_j$  如表 4 所示。将表中  $\varphi'_j$  与  $JRC$  进行线

性拟合并与式(5)对比, 可得本文试样的爬坡效应系数  $s$  为 0.085 ( $R^2=0.980$ )。

表 4 不同  $JRC$  下贯通节理试样的等效内摩擦角  $\varphi'_j$  拟合结果

Table 4 Fitting results of equivalent internal friction angle  $\varphi'_j$  of specimens of continuous joints under different  $JRC$

$JRC$	0	5	10	15	20
$\varphi'_j / (\text{°})$	43.0	50.5	58.6	66.8	69.3
$c / \text{MPa}$	0	0	0	0	0
$R^2$	0.991	0.993	0.994	0.995	0.995

将式(5)和式(4)代入式(3), 得到修正后的强度准则表达式为

$$\sigma = \frac{\tau - [kc_j + (1 - k)\lambda c_b]}{k(\tan \varphi_j + s \cdot JRC) + (1 - k)\tan \varphi_b} \quad (6)$$

根据式(6), 分别对 5 种  $JRC$  的非贯通节理在不同初始切向应力下的破坏法向应力进行预测, 并与试验结果进行对比, 结果如图 12 所示。可以看出, 根据修正后的强度准则预测的 5 种不同粗糙度的节理破坏法向应力与实测值接近, 其与试验实测值的误差大部分都在 10% 左右, 拟合优度的可决系数  $R^2$  均达到了 0.906 以上。由此可见, 修正后的强度准则可以较好地预测 5 种  $JRC$  的非贯通节理在法向卸荷条件下的破坏强度。

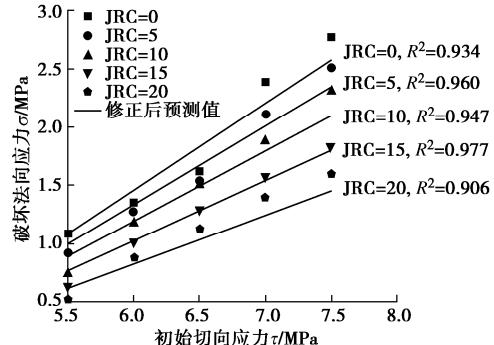


图 12 修正后 Jennings 准则与试验结果对比

Fig. 12 Comparison between modified Jennings criterion and experimental results

## 4 结 论

(1) SEM 电镜扫描的结果表明, 擦痕面为剪切破坏而非擦痕面为张拉破坏。通过分析试样破坏后擦痕面占比的变化规律发现, 随着  $JRC$  的增加, 法向卸荷试样的破坏表现出更强的张拉破坏特征, 而常规直剪下则表现出更强的剪切破坏特征。其主要原因是由于法向卸荷下  $\tau$  不变而  $\sigma$  逐渐减小, 试样破坏时的爬坡效应更加明显, 而常规直剪下  $\sigma$  不变而  $\tau$  逐渐增大, 试样破坏时的啃断效应更加明显。这也是法向卸荷下试样强度参数随  $JRC$  增加的变化主要体现在  $\varphi$

值的增加, 常规直剪则主要表现为  $c$  值增加的主要原因。

(2) 相同初始应力情况下, 随着 JRC 的增大, 由于在卸荷过程中试样“爬坡”的过程越来越长, 因此卸荷法向位移随 JRC 的增大而增大, 但卸荷切向位移则随着 JRC 的增大而减小。相同 JRC 和初始切向应力  $\tau$  的情况下, 初始  $\sigma$  增大后需要更大的卸荷量和时间致使试样发生破坏, 因此卸荷法向位移和卸荷切向位移均随着  $\sigma$  的增大而增大。而相同 JRC 和初始  $\sigma$  的情况下, 初始  $\tau$  增大后在更小的卸荷量和更少的时间内试样便会破坏, 因此无论是卸荷法向位移还是卸荷切向位移均会变小。

(3) 常规直剪试验和法向卸荷条件下得到节理岩体的抗剪强度参数存在区别, 直接通过常规直剪试验推导法向卸荷路径下节理岩体的抗剪强度, 将导致得到的结果偏大, 从而偏于不安全。实际工程中应根据岩体的初始应力及受力路径来开展试验获取强度参数。

(4) 对传统 Jennings 准则进行了考虑岩桥弱化和 JRC 影响的修正, 并与试验结果进行了对比。结果显示预测值与实际值的误差大部分都在 10% 左右, 修正后的 Jennings 准则能较好的预测法向卸荷条件下不同 JRC 非贯通节理的抗剪强度。

## 参考文献:

- [1] 王桂林, 张亮, 许明, 等. 单轴压缩下非贯通节理岩体损伤破坏能量演化机制研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 639–647. (WANG Gui-lin, ZHANG Liang, XU Ming, et al. Energy damage evolution mechanism of non-across jointed rock mass under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(4): 639–647. (in Chinese))
- [2] DELONCA A, GUNZBURGER Y, VERDEL T. Cascade effect of rock bridge failure in planar rock slides: numerical test with a distinct element code[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2021, 21(4): 1263–1278.
- [3] 夏才初, 肖维民, 刘远明. 非贯通节理的岩桥弱化力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1538–1545. (XIA Cai-chu, XIAO Wei-min, LIU Yuan-ming. Study of mechanical model for weakening process of discontinuous joint rock bridge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(8): 1538–1545. (in Chinese))
- [4] 唐志成, 夏才初, 丁增志. 非贯通类节理岩体剪切变形规律分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2353–2358. (TANG Zhi-cheng, XIA Cai-chu, DING Zeng-zhi. Analysis of shear deformation law for intermittent jointed rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(8): 2353–2358. (in Chinese))
- [5] 陈庆芝, 张玉石, 刘远明, 等. 节理起伏角对非贯通节理岩体力学特性的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(2): 351–358, 365. (CHEN Qing-zhi, ZHANG Yu-shi, LIU Yuan-ming, et al. Influence of joint undulation angle on mechanical properties of non-penetrated joint rock mass[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(2): 351–358, 365. (in Chinese))
- [6] 刘超, 刘远明. 非贯通节理岩体抗剪强度影响因素分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 551–555. (LIU Chao, LIU Yuan-ming. Analysis of influence factors on shear strength of non-penetration jointed rock mass[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2018, 39(4): 551–555. (in Chinese))
- [7] 陈国庆, 王剑超, 王伟, 等. 不同连通率断续节理岩体直剪破坏特征[J]. 工程地质学报, 2017, 25(2): 322–329. (CHEN Guo-qing, WANG Jian-chao, WANG Wei, et al. Failure characteristics of rock mass with intermittent joints of different connecting rates under direct shear test[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(2): 322–329. (in Chinese))
- [8] 黄达, 郭颖泉, 朱谭谭, 等. 法向卸荷条件下含单裂隙砂岩剪切强度与破坏特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(7): 1297–1306. (HUANG Da, GUO Ying-quan, ZHU Tan-tan, et al. Experimental investigation on shear strength and failure characteristics of sandstone with a single preexisting flaw under unloading normal stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(7): 1297–1306. (in Chinese))
- [9] ZHU T T, DA HUANG. Experimental investigation of the shear mechanical behavior of sandstone under unloading normal stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 114: 186–194.
- [10] YIN Z M, LIU X R, YANG Z P, et al. Shear behavior of marlstone containing parallel fissure under normal unloading[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(4): 1283–1294.
- [11] ZHONG Z, DA HUANG, ZHANG Y F, et al. Experimental study on the effects of unloading normal stress on shear mechanical behaviour of sandstone containing a parallel fissure pair[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020,

- [53(4): 1647 - 1663.]
- [12] 岩石物理力学性质试验规程: DZ/T 0276.25—2015[S]. 2015. (Regulation for Testing the Physical and Mechanical Properties of Rock: DZ/T 0276.25—2015[S]. 2015. (in Chinese))
- [13] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock Mechanics, 1977, 10(1/2): 1 - 54.
- [14] 谢和平, PARISEAU W G, 王建峰, 等. 节理粗糙度系数的分形估算 [J]. 地质科学译丛, 1992(1): 85 - 90. (XIE He-ping, PARISEAU W G, WANG Jian-feng, et al. Fractal estimate of the joint roughness coefficient[[J]. Journal of Geoscience Translations, 1992(1): 85 - 90. (in Chinese))
- [15] 张冰祎. 深埋硐室软岩卸荷蠕变力学特性研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2019. (ZHANG Bing-yi. Study on Unloading Creep Mechanical Characteristics of Soft Rock in Deep-Buried Chamber[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2019. (in Chinese))
- [16] 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 Cai-chu, XIAO Wei-min, DING Zeng-zhi. Modification of jennings strength criterion for intermittent joints considering rock bridge weakening and joint surface undulating angle[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 485 - 492. (in Chinese))

## 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先利用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 ([www.cgejournal.com](http://www.cgejournal.com)) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金和油气资源等行业中从事岩土力学与岩土工程专业的科研、设计、施工、监理和学习人员。

本刊为月刊, A4 开本, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)