DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2021.02.007

渗流侵蚀作用对岩石裂隙剪切特性的影响试验

盛金昌1,高 鹏1,王 珂2,郜会彩3,4,田晓丹1

(1. 河海大学水利水电学院,江苏南京 210098; 2. 常州市金坛区水旱灾害防御调度指挥中心,江苏常州 213200; 3. 浙江省山体地质灾害防治协同创新中心,浙江 绍兴 312000; 4. 绍兴文理学院土木工程学院,浙江 绍兴 312000)

摘要:为研究岩体裂隙受渗流侵蚀作用后剪切特性的变化及其演变机理,对新鲜的和经120h渗透 侵蚀作用的两组不同试件进行对比剪切试验,分析了剪切试验曲线、峰值抗剪强度、残余抗剪强度 以及初始剪切刚度的变化。试验结果表明:与新鲜粗糙裂隙相比,经过渗流侵蚀作用后的粗糙裂隙 剪切应力-剪切位移曲线及法向位移-剪切位移曲线无太大变化,但剪缩位移减小,剪胀位移增大; 渗流侵蚀作用后粗糙裂隙表面粗糙程度增大,峰值抗剪强度平均增大 8.83%,残余抗剪强度无较 大变化,使得残余抗剪强度与峰值抗剪强度之比有所下降;渗流侵蚀作用后粗糙裂隙初始剪切刚度 平均增大 10.84%。

关键词:岩体裂隙;剪切特性;粗糙度系数;渗流侵蚀作用

中图分类号:TU452 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2021)02-0042-07

Experiments of seepage erosion influence on shear characteristics of rock fracture//SHENG Jinchang¹, GAO Peng¹, WANG Ke², GAO Huicai^{3, 4}, TIAN Xiaodan¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Flood and Drought Disaster Prevention Dispatching Command Center of Jintan District, Changzhou 213200, China; 3. Zhejiang Collaborative Innovation Center for Prevention and Control of Mountain Geologic Hazards, Shaoxing 312000, China; 4. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China)

Abstract: In order to investigate the variation of shear characteristics of rock fractures after seepage erosion and its evolution mechanism, shear tests were conducted on two groups of specimens in different states. One group was fresh and the other was after a 120 h seepage-erosion experiment. The variations of shear test curve, peak shear strength, residual shear strength and initial shear stiffness were analyzed. The results show that the shear stress-strain curves and normal displacement-shear displacement curves of rough fractures after seepage erosion change little compared with the fresh rough fractures, but the shear contraction displacement decreases and the shear dilation displacement increases. The seepage erosion increases the surface roughness of the fracture, leading to an average increase of the peak shear strength by 8.83%, but with no significant change in the residual shear strength, indicating a declined ratio of residual strength to peak strength. The initial shear stiffness increases by 10.84% on average after seepage erosion.

 $Key \ words: \ {\rm rock} \ fracture; \ shear \ characteristics; \ roughness \ coefficient; \ seepage \ erosion \ impact$

岩石裂隙的剪切特性对岩石工程安全具有至关 重要的影响,国内外学者以裂隙面形态为出发点对 岩体裂隙面剪切力学特性进行了研究,并根据剪切 试验结果建立了各种抗剪强度模型^[1-7]。在边坡工 程中,岩体长期处于水岩作用下,水岩作用使岩体裂 隙面发生一系列物理化学变化,对裂隙面形貌^[89]及 岩性产生很大影响。因此,学者们对水岩耦合作用 下的裂隙岩体开展了大量研究。Pellet 等^[10]对不同 湿度条件下泥灰岩开展了剪切试验,发现泥灰岩节 理抗剪强度与含水率有极大关系。Nouailletas 等^[11] 开展了裂隙面剪切试验,结果表明强酸腐蚀过的裂 隙表面粗糙度参数无显著变化,但是力学性能衰减 较大。Zhao 等^[12]研究了润湿对砂岩节理特性的弱 化,结果表明浸润后的节理峰值抗剪强度和刚度均 有所下降。Li 等^[13]对干燥、饱和和表面湿润 3 种条 件下的花岗岩和砂岩开展了直剪试验。

岩体边坡常处在流动水流环境中,学者们相继 开展了渗流作用下的裂隙力学特性研究。鲁祖德

基金项目:国家自然科学基金(51579078);浙江省山体地质灾害防治协同创新中心开放基金(PCMGH-2017-Z-02)

作者简介:盛金昌(1969—),男,教授,博士,主要从事岩体渗流及流固热化学多场耦合研究。E-mail: jinchang@ hhu. edu. cn

等^[14]开展了裂隙岩石的应力-水流-化学耦合作用试验研究,分析了预制裂纹排列方式、浸泡溶液 pH 值和流速对单轴抗压强度的影响以及各条件下的破坏特征。申林方等^[15]开展了单裂隙花岗岩在三轴应力及化学溶液渗透压作用下的试验,研究了裂隙面在酸性溶液渗透作用下的物理软化,以及溶解反应作用下的岩石蠕变变形。聂韬译等^[16]针对应力-渗流耦合作用下的裂隙岩体劈裂现象,建立了基于曲线扩展路径的劈裂演化模型,并验证了其合理性。

渗流侵蚀作用下裂隙剪切特性的研究成果已较 为丰富,但此类研究均忽略了裂隙面形貌变化这一 重要中间因素,直接建立宏观力学指标随水岩条件 变化关系,从而导致渗流侵蚀作用下的裂隙剪切特 性演化机理仍不够明确。因此,本文对新鲜的和经 渗流侵蚀作用的两组石灰岩粗糙裂隙开展直剪试 验,研究渗流侵蚀作用对裂隙面形貌改造及裂隙剪 切特性的影响,并分析裂隙剪切特性的演变机理。

1 试验方案

1.1 试件制备

粗糙裂隙试件为石灰岩试件,由标准圆柱形岩 石试件劈裂得到。将劈裂试件分为 I、II 两组(各 5个),其中 I 组为对照组,对试件直接开展剪切试 验;II 组为侵蚀组,先对试件进行渗流侵蚀,然后进 行直剪试验。具体渗流侵蚀试验工况如下^[17]:轴向 荷载为5kN、围压为2.0 MPa,以模拟天然边坡应力 状况;渗透液为 pH 值 5.6 的 H₂SO₄溶液,渗透压为 0.5 MPa;整个渗透试验持续约 120 h。

试验前先计算劈裂试件的裂隙面粗糙度系数 *J*_{RC},具体计算方法为:对裂隙面进行三维激光扫描, 获得裂隙表面三维空间坐标数据,计算出裂隙表面 平均梯度模 *Z*_{2s}^[5],然后代入到下式^[18]即可:

$$J_{\rm RC} = 32.2 + 32.47 \lg Z_{2s} \tag{1}$$

为消除人工劈裂随机性、增强研究可靠性,应使两组试件的 J_{RC}变化区间基本相同,结果见表 1。此外,Ⅱ组试件渗流侵蚀后,也按上述方法计算 J_{RC} (表1)。

叐丨 ��忤杻植度杀剱	ŧ1 ì	式件粗糙	度系数
-------------	------	------	-----

试件编号		$J_{ m RC}$	
	I 组	Ⅱ组(侵蚀前)	Ⅱ组(侵蚀后)
1	9.13	8.80	9.82
2	13.08	10.05	11.51
3	15.34	12.88	13.84
4	18.08	16.05	15.92
5	19.34	20.00	21.26

1.2 试验装置

剪切试验装置为河海大学渗流实验室的 水利水电科技进展,2021,41(2) Tel;025-83786335

YZW-300型微机控制电子式岩石直剪仪,直剪仪简 化示意图如图1所示。



图 1 YZW-300 型微机控制电子式岩石直剪仪示意图

该直剪仪主要由伺服控制单元、法向加载单元、 剪切向加载单元、剪切盒单元和数据测量及采集单元 5部分组成。岩石直剪仪施加的法向和剪切向最大 荷载均为300kN,荷载加载速率范围为0.01~ 30kN/s,测量精度为示值的±1%,法向和剪切向位移 加载速率范围为0.01~100mm/min,测量精度为示值 的±1%。法向加载工作行程最大为30mm,剪切向加载 工作行程最大为45mm,位移测量精度为0.001mm。

1.3 剪切试验方法

将劈裂开的两个半圆柱体分别放入型号为 Ø50 mm×100 mm的上下剪切盒内,保证两个粗糙裂 隙表面水平。调整上下剪切盒位置,使上下粗糙裂 隙表面完全契合,并使剪切盒位于法向加载向和剪 切加载向的交点上,防止加载时剪切盒偏转。将法 向加载触头接触调位环,手轮控制使剪切向左侧触 头接触剪切盒左侧,通过软件控制使剪切向右侧触 头接触剪切盒右侧,随后在法向和剪切向上安装千 分表,试件装载如图2 所示。



图 2 试件装载

设置粗糙裂隙剪切试验工况为:法向为荷载控制,加载至2MPa(10kN),加载速率为1.2kN/min; 剪切向为位移控制,加载至10mm,加载速率为 0.5mm/min。设置完成后,点击法向运行按钮,待法 向荷载达到目标值并保持稳定后,点击剪切运行按 *E-mail*;*jz@ hhu. edu. cn* +43 · 钮,直至剪切向加载位移达到 10 mm 时结束试验。 对 I 组新鲜的和 II 组渗流侵蚀后的粗糙裂隙试件 (共10 个)开展了剪切试验。

2 试验结果与分析

2.1 剪切试验曲线

2.1.1 裂隙剪切应力-剪切位移曲线

图 3(a)和图 3(b)分别为 I 组和 II 组粗糙裂隙 试件剪切应力-剪切位移曲线,两组粗糙裂隙试件的 曲线呈现出类似规律,即随着剪切位移增大,剪切应 力先快速增大至峰值,随后缓慢减小,最后逐渐趋于 稳定。该曲线具体可分为 3 个区段:①剪切应力上 升区(I 区段)。加载初期为压密阶段,曲线为下凹 状,随后曲线呈线性增长,曲线斜率(剪切刚度)基 本不变,表现为弹性变形。②剪切应力峰值区(II 区段)。随着剪切位移持续增加,曲线斜率(剪切刚 度)开始变小,在剪切应力增长至某一峰值后,曲线 斜率变为负值,剪切刚度进一步减小,剪切应力呈现 非线性变化,曲线呈下凹状。③剪切应力下降区 (III 区段)。剪切应力逐渐降低,曲线斜率绝对值变 小并逐渐趋近于零,表现为塑性变形。



图 3 裂隙试件剪切应力-剪切位移曲线

两组裂隙试件剪切强度均在0.5~1.5mm 位移 范围内达到峰值,此时剪切位移占裂隙试件长度的 0.5%~1.5%。Ⅰ组新鲜裂隙试件剪切结果表明, 表面越粗糙,峰值剪切位移越大。与Ⅰ组不同,Ⅱ组 试件经过120h渗透侵蚀后,峰值剪切位移与表面 粗糙度并未表现出正相关关系。

2.1.2 裂隙法向位移-剪切位移曲线

图 4 为粗糙裂隙试件的法向位移-剪切位移曲 线。图 4(a)曲线整体上可依次分为剪缩、剪胀和残 余抗剪强度 3 个阶段。由于初始位移为 0,可按法向 位移是否小于 0 划分剪缩、剪胀两阶段;残余抗剪强度 阶段对应图 3(a)中抗剪强度基本不再下降的阶段。



图 4 裂隙试件法向位移-剪切位移曲线

a. 剪缩阶段。在裂隙试件承受剪切作用初期, 裂隙表面被压密,裂隙表面凹凸体之间的空间不断 调整缩小,法向位移向下,呈现剪缩状态。随着剪切 位移增大,裂隙沿着凸起体爬坡,但爬坡引起的法向 位移向上增量还不足以抵消之前向下的法向位移 量,此时仍然处于剪缩状态。

b. 剪胀阶段。随着剪切作用的持续进行,裂隙 继续沿着凸起体爬坡,法向位移持续向上增大,当法 向位移大于0时,法向变形为正,呈现剪胀状态。在 剪胀阶段,法向变形快速增大,同时裂隙表面的凸起 被剪断甚至磨平,当凸起被破坏后,裂隙面开始屈 服,剪切应力迅速下降。

c. 残余抗剪强度阶段。随着爬坡以及凸起体 被剪断破坏,裂隙面的法向位移基本不再变化,法向 变形趋于稳定,裂隙面进入残余抗剪强度阶段。此 时,裂隙表面的主要凸起体被剪断破坏,抗剪能力基 本丧失。

由图 4(b)可知,渗透试验后粗糙裂隙依旧经历 剪缩、剪胀以及残余抗剪强度这 3 个阶段。

通过观察图4,发现在剪胀阶段、残余抗剪强度

•44 · 水利水电科技进展,2021,41(2) Tel;025 - 83786335 E-mail:jz@hhu.edu.cn http://jour.hhu.edu.cn

阶段不同试件法向位移-剪切位移曲线的趋势并不 一致,有的持续剪胀到一定法向位移,而有的持续剪 缩。其中,I-1、I-5、II-2、II-4 这4个试件曲线较 为特殊;在剪切试验后,发现这4个试件与剪切盒贴 得较紧,难以取下。结合唐志成等^[19]相近试验成 果,认为这4个试件结果有误差,猜测其原因是:圆 柱形试件尺寸有误差,在剪切盒中与剪切盒边壁有 一定空隙,剪切时试件与剪切盒内壁相互靠近,产生 向下法向位移,造成了一些试件并没有产生剪胀现 象。因此,下文仅就其余6个试件的结果以及这 10个试件的共性进行分析。

由图4可以发现,I组粗糙裂隙的平均剪缩位 移为0.092 mm,而Ⅱ组粗糙裂隙的平均剪缩位移为 0.073 mm;I组剪胀阶段最大剪胀不超过0.2 mm, Ⅱ组最大剪胀超过0.2 mm。可见,120 h 渗流侵蚀 作用使粗糙裂隙平均剪缩位移变短,但使裂隙剪胀 位移有所增加。

圆柱形岩石劈裂后,裂隙面上可能留有一些岩 石碎屑,用刷子无法清扫干净,而渗流侵蚀作用可以 溶蚀这些碎屑,对两裂隙面形貌进行改造,使两壁面 更加贴合,所以粗糙裂隙经过渗流侵蚀作用后剪缩 位移有所减小。同时,渗流侵蚀作用会对裂隙表面 岩体产生软化、弱化作用,剪切过程中凸起体被剪断 会产生更大碎屑,填充在两裂隙面之间,从而导致剪 胀位移增大。

2.2 峰值抗剪强度对比

由表1可以看出, I 组的 J_{RC} 与 II 组未经过渗流 侵蚀作用前的 J_{RC} 有差距, 直接用 I 组的剪切强度来 代替 II 组裂隙渗流试验前的强度极为不妥。由此, 可通过用 Barton^[2-3]建立的 J_{RC} - J_{CS} 模型(式(2))对 I 组试件剪切强度结果进行拟合, 从而可预估 II 组 裂隙渗流试验前的峰值抗剪强度。

$$\tau_{\rm p} = \sigma_{\rm n} \tan \left(\varphi_{\rm b} + J_{\rm RC} \lg \frac{J_{\rm CS}}{\sigma_{\rm n}} \right)$$
(2)

式中: τ_{p} 为试件峰值抗剪强度, MPa; σ_{n} 为施加在岩体裂隙表面上的法向应力, MPa; J_{cs} 为岩体裂隙表面的抗压强度, MPa; φ_{b} 为岩体裂隙表面的基本摩擦角, (°)。

未风化的新鲜裂隙抗压强度 J_{cs} 可取为完整岩石的单轴抗压强度^[2],通过抗压试验算出 J_{cs} 为 147.7 MPa。裂隙表面的基本摩擦角 φ_b 可以通过光 滑裂隙剪切试验获得^[20],计算得 φ_b =37.82°。根据 式(2)计算得到的 I 组粗糙裂隙峰值抗剪强度 τ_p 与 试验值如图 5 所示。

当 $J_{\rm RC}$ 较小时,由式(2)得到的计算值与试验值 近似,而当 $J_{\rm RC}$ 较大时,计算值要高于试验值,且 $J_{\rm RC}$ 越



图 5 【组裂隙峰值抗剪强度试验值和计算值对比

大,计算值高于试验值的程度越大。因此,需要对 $J_{\rm RC}$ - $J_{\rm CS}$ 抗剪强度模型进行一定的修正。本文采用如 下修正方法:在 $J_{\rm RC}$ - $J_{\rm CS}$ 抗剪强度公式中添加一个与 $J_{\rm RC}$ 相关的修正函数 $f(J_{\rm RC})$,将式(2)修正为式(3),其 中修正函数 $f(J_{\rm RC})$ 可通过Origin 软件对试验值和计算 值拟合得到,拟合结果如图6所示,相关性高达0.992。

$$\tau_{\text{p} \not \in \mathbb{E}} = \sigma_n \tan \left[\varphi_{\text{b}} + J_{\text{RC}} \lg \left(\frac{J_{\text{CS}}}{\sigma_n} \right) + f(J_{\text{RC}}) \right] \quad (3)$$



图 6 修正函数 $f(J_{BC})$ 拟合结果

重新计算后的Ⅰ组新鲜粗糙裂隙峰值抗剪强度 修正值与试验值的对比见图7。可以看出,采用修 正后的抗剪强度公式计算所得的Ⅰ组新鲜粗糙裂隙 峰值抗剪强度与试验值极为接近,说明用式(3)估 算Ⅱ组粗糙裂隙渗透试验前新鲜状态时的峰值抗剪 强度是可行的。



图7 【组裂隙峰值抗剪强度修正值和试验值对比

通过式(3)以及 II 组粗糙裂隙试件新鲜状态时的粗糙度系数 $J_{\rm RC}$,对其在渗透试验前的峰值抗剪强度进行估算。将 II 组粗糙裂隙试件峰值抗剪强度 $\tau_{\rm p}$ 渗透前估算值、渗透后试验值与粗糙度系数 $J_{\rm RC}$

水利水电科技进展,2021,41(2) Tel:025-83786335 E-mail:jz@hhu.edu.cn http://jour.hhu.edu.cn

· 45 ·

的关系绘于图8。



图 8 Ⅱ 组裂隙 *τ*_p-*J*_{RC}对比曲线

两组粗糙裂隙的峰值抗剪强度均随着裂隙表面 粗糙度的增大而增大。经过 120 h 渗流侵蚀作用后 的裂隙试件 II -1、II -2、II -3、II -4、II -5 峰值抗剪强 度分别提高了 9.33%、9.73%、13.43%、8.60%和 3.04%,平均为 8.83%,其中试件 II -3 提高幅度最 大。粗糙度系数 J_{RC}除试件 II -4 降低了 0.78% 外, 试件 II -1、II -2、II -3、II -5 分别提高了 11.61%、 14.53%、7.45%和 6.30%。

2.3 残余抗剪强度对比

粗糙裂隙残余抗剪强度 τ_r 与残余摩擦角 φ_r 之间存在式(4)的关系, Grasselli 等^[6]认为残余摩擦角取决于裂隙基本摩擦角 φ_b 和裂隙表面形貌特征,因此,建立残余摩擦角 φ_r 与粗糙度系数 J_{RC} 之间的函数关系如式(5)所示。

$$\frac{\tau_{\rm r}}{\sigma_{\rm n}} = \tan\varphi_{\rm r} \tag{4}$$

$$\varphi_{\rm r} = \varphi_{\rm b} + \varphi_{\rm JRC} \tag{5}$$

式中: φ_{JRC} 为裂隙表面形态控制的部分残余摩擦角, 与裂隙粗糙度系数 J_{RC} 相关。

根据 I 组新鲜粗糙裂隙的残余抗剪强度,计算 各个试件的残余摩擦角,拟合 I 组新鲜粗糙裂隙试 件部分残余摩擦角 $\varphi_{\rm IRC}$ 与粗糙度系数 $J_{\rm RC}$ 之间的关 系(图9),根据拟合结果,可以估算II组粗糙裂隙在 新鲜状态时的残余抗剪强度。图 10 为两组试件的残 余强度试验值与估算值,可看出II组粗糙裂隙试件渗流 侵蚀前残余抗剪强度估算值在 1.95~2.22 MPa 范围 内,经过渗流侵蚀后的残余抗剪强度试验值在 1.85~



图 9 I 组裂隙残余摩擦角拟合



图 10 Ⅱ组裂隙残余抗剪强度对比关系曲线

2. 28 MPa 范围内。对于渗流侵蚀作用前后的II组试 件,分别计算残余抗剪强度与峰值抗剪强度的比值: 渗流侵蚀前试件II-1、II-2、II-3、II-4、II-5 的 τ_r 估算值与 τ_p 估算值的比值分别为 72. 99%、70. 48%、65. 28%、 59. 94%和 54. 26%;渗流侵蚀后这 5 个试件的 τ_r 试 验值与 τ_p 试验值的比值分别为 68. 54%、60. 22%、 62. 68%、59. 32%和 52. 59%。

图 11 对比了 5 个试件在渗透侵蚀前、后的残余 抗剪强度与峰值抗剪强度比值,结果显示裂隙面经 过 120 h 渗流侵蚀作用后,试件II-1、II-2、II-3、II-4、II-5 残余抗剪强度与峰值抗剪强度的比值分别下降了 4. 45%、10. 26%、2. 60%、10. 26%和4. 45%。



图 11 Ⅱ 组裂隙残余抗剪强度与峰值抗剪强度比值

2.4 初始剪切刚度对比

粗糙裂隙的初始剪切刚度受到法向应力、岩石 剪切模量以及表面形貌共同影响,一般定义剪切刚 度为裂隙试件在弹性变形阶段单位变形内的应力 梯度^[2]:

$$k_{\rm s} = \frac{\partial \tau}{\partial u} \tag{6}$$

式中: k_s 为剪切刚度; τ 为剪切强度;u为剪切位移。

以剪切应力-应变曲线在 I 区段的线性斜率作 为裂隙的初始剪切刚度 k_a,通过下式计算^[6]

$$k_{\rm s0} = \frac{1}{\Delta u_{\rm p}} \tau_{\rm p} \tag{7}$$

其中
$$\Delta u_{\rm p} = u_{\rm p} - z$$

式中: u_p 为达到峰值抗剪强度时所对应的位移, mm; u_m 为初始位移, mm,取决于试验设置。

图 12 为 Ⅱ 组粗糙裂隙的初始剪切刚度 k_a对 比, Ⅱ 组粗糙裂隙试件的初始剪切刚度估算值及试

水利水电科技进展,2021,41(2) Tel:025-83786335 E-mail:jz@hhu.edu.cn http://jour.hhu.edu.cn



Ⅱ组裂隙初始剪切刚度对比 图 12

验值均随着 J_{BC}变大而变大。120 h 渗流侵蚀作用后 裂隙初始剪切刚度试验值高于渗流侵蚀作用前估算 值,渗流侵蚀作用前的裂隙初始剪切刚度估算在 4.94~7.16 MPa/mm 范围内, 而渗流侵蚀作用后的 裂隙初始剪切刚度在 5.50~7.52 MPa/mm 范围内, 试件Ⅱ-1、Ⅱ-2、Ⅱ-3、Ⅱ-4、Ⅱ-5 渗透试验后裂隙初 始剪切刚度分别增大了 11.38%、11.85%、 15.48%、10.58%和4.89%,平均增大10.84%。

分析讨论 3

岩体裂隙的剪切力学特性主要取决于岩石岩 性、法向应力以及裂隙表面形貌特征,本试验主要考 虑渗流侵蚀作用后裂隙表面形貌特征变化对裂隙剪 切特性的影响。

3.1 峰值抗剪强度与初始剪切刚度变化原因分析

峰值抗剪强度与初始剪切刚度的变化规律总体 一致。剪切过程中,裂隙表面受到爬坡效应和切齿 效应共同作用。 $J_{\rm BC}$ 越大的裂隙面,起伏程度越大, 剪切时切齿效应越强,凸起体积攒的弹性势能就越 大。当裂隙表面上的凸起体被剪断时,释放的能量 也就越多,其峰值抗剪强度越大。图13为剪切试验



(a)试件I-5剪切试验前



(c)试件II-5剪切试验前



(b)试件I-5剪切试验后



(d)试件II-5剪切试验后

图 13 剪切试验前后裂隙表面形貌对比

前后试件表面对比,其中,试件Ⅱ-5表面绿色部分 为渗流侵蚀试验中加入的亮蓝指示剂。渗流侵蚀过 程中,粗糙裂隙面存在沟槽流现象,裂隙面凹陷区域 为渗透水流的优势渗流通道,这些区域岩石矿物被 溶蚀带走量比其他区域的更多,使裂隙面凹凸程度 变大,裂隙粗糙度系数 J_{BC}变大,从而导致渗流侵蚀 后的裂隙峰值抗剪强度大于渗透前估算值。

分析图 8 中的曲线可知,渗流侵蚀后的裂隙剪 切强度明显增大,其增大原因不仅是粗糙度增大,还 可能是渗流侵蚀后岩性发生变化。这种岩性变化可 能是渗流侵蚀作用溶蚀了裂隙表面矿物,改变了矿 物原先的结构,从而在一定程度上增大了裂隙峰值 抗剪强度。J_{RC}变大和岩性变化共同使得渗流侵蚀 作用后裂隙峰值抗剪强度高于渗透试验前的估算 值。初始刚度变化原因同上。

3.2 残余抗剪强度变化原因分析

图 13 部分区域显示为白色部分,代表凸起体被 剪断。对比发现,渗透试验后白色部分多于渗透试 验前。渗流侵蚀作用使裂隙面粗糙度变大,剪切过 程中被剪断的凸起体更多,当主要凸起体被剪断后, 进入残余抗剪强度阶段。此时,残余抗剪强度则由 未被剪断的次级凹凸体和剪断部分共同承担。由于 没有更多的凸起体被剪断,裂隙面运动从剪切逐步 变成滑动,这可能就是残余抗剪强度变化不大的 原因。

经过120h 渗流侵蚀作用后,裂隙面峰值抗剪 强度明显变大,而残余抗剪强度变化幅度不大,所以 与新鲜状态时相比,渗流侵蚀作用后的裂隙残余抗 剪强度与峰值抗剪强度的比值有所下降。

论 4 结

a. 渗流侵蚀作用后裂隙表面粗糙度增大,峰值 抗剪强度平均增大8.83%,而残余抗剪强度无太大 变化,使得残余抗剪强度与相应峰值抗剪强度的比 值降低。

b. 渗流侵蚀作用后的裂隙初始剪切刚度高于 新鲜裂隙,平均增大10.84%。

c. 与新鲜裂隙相比,渗流侵蚀作用后的裂隙面 剪缩位移减小,剪胀位移增大。

参考文献:

- [1] PATTON F D. Multiple modes of shear failure in rock [C]// Proceeding of the Congress of International Society of Rock Mechanics. Lisbon: [s. n.], 1966: 509-513.
- [2] BARTON N. The shear strength of rock joints in theory and practice [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,

· 47 ·

1977,10(1/2):1-54

- [3] BARTON N. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1985, 22(3): 121-140.
- [4] ZHAO J. Joint surface matching and shear strength part B: JRC-JMC shear strength criterion [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1997, 34(2): 179-185.
- [5] BELEM T, HOMAND-ETIENNE F, SOULEY M. Quantitative parameters for rock joint surface roughness
 [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2000, 33 (4): 217-242.
- [6] GRASSELLI G, EGGER P. Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(1): 25-40.
- [7] 孙辅庭,佘成学,万利台,等.基于三维形貌特征的岩石 节理峰值剪切强度准则研究[J].岩土工程学报,2014, 36(3): 529-536. (SUN Futing, SHE Chengxue, WAN Litai, et al. Peak shear strength criterion for rock joints based on three-dimensional morphology characteristics
 [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2014, 36(3): 529-536. (in Chinese))
- [8]速宝玉,张文捷,盛金昌,等. 滲流-化学溶解耦合作用 下岩石单裂隙渗透特性研究[J]. 岩土力学,2010,31 (11): 3361-3366. (SU Baoyu, ZHANG Wenjie, SHENG Jinchang, et al. Study of permeability in single fracture under effects of coupled fluid flow and chemical dissolution[J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(11): 3361-3366. (in Chinese))
- [9]盛金昌,李凤滨,姚德生,等. 渗流-应力-化学耦合作用 下岩石裂隙渗透特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学 报,2012,31(5): 1016-1025. (SHENG Jinchang, LI Fengbin, YAO Desheng, et al. Experimental study of seepage properties in rocks fracture under coupled hydromechano-chemical process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 1016-1025. (in Chinese))
- [10] PELLET F, KESHAVARZ M, BOULON M, et al. Influence of humidity conditions on shear strength of clay rock discontinuities[J]. Engineering Geology, 2013, 157: 33-38.
- [11] NOUAILLETAS O, PERLOT C, RIVARD P, et al. Impact of acid attack on the shear behaviour of a carbonate rock joint[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50 (6): 1439-1451.
- [12] ZHAO Z, YANG J, ZHOU D, et al. Experimental investigation on the wetting-induced weakening of sandstone joints[J]. Engineering Geology, 2017, 225: 61-67.

- [13] LI B, YE X, DOU Z, et al. Shear strength of rock fractures under dry, surface wet and saturated conditions [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53 (6): 2605-2622.
- [14] 鲁祖德,丁梧秀,冯夏庭,等. 裂隙岩石的应力-水流-化 学耦合作用试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008, 27(4): 796-804. (LU Zude, DING Wuxiu, FENG Xiating, et al. Experimental study on mechano-hydrochemical coupling process in cracked rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (4): 796-804. (in Chinese))
- [15] 申林方,冯夏庭,潘鹏志,等. 单裂隙花岗岩在应力-渗 流-化学耦合作用下的试验研究[J]. 岩石力学与工程 学报,2010,29(7): 1379-1388. (SHEN Linfang, FENG Xiating, PAN Pengzhi, et al. Experimental research on mechano-hydro-chemical coupling of granite with single fracture [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(7):1379-1388. (in Chinese))
- [16] 聂韬译,浦海,刘桂宏,等. 渗流-应力耦合下的裂隙岩体劈裂模型研究[J]. 采矿与安全工程学报,2015,32(6): 1026-1030. (NIE Taoyi, PU Hai, LIU Guihong, et al. Research on splitting failure model of fractured rock mass under the coupling effect of seepage-stress [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(6): 1026-1030. (in Chinese))
- [17] 王珂,盛金昌,郜会彩,等.应力-渗流侵蚀耦合作用下 粗糙裂隙渗流特性研究[J].岩土力学,2020,41(增刊 1):30-40.(WANG Ke,SHENG Jinchang,GAO Huicai, et al. Study on seepage characteristics of rough crack under coupling of stress-seepage erosion [J]. Rock and Soil Mechanics,2020,41(Sup1):30-40.(in Chinese))
- [18] TSE R, CRUDEN D M. Estimating joint roughness coefficients [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1979, 16(5): 303-307.
- [19] 唐志成,夏才初,肖素光.节理剪切应力-位移本构模型 及剪胀现象分析[J].岩石力学与工程学报,2011,30
 (5): 917-925. (TANG Zhicheng, XIA Caichu, XIAO Suguang. Constitutive model for joint shear stressdisplacement and analysis of dilation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(5): 917-925. (in Chinese))
- [20] 王刚,张学朋,蒋宇静,等.一种考虑剪切速率的粗糙结构面剪切强度准则[J].岩土工程学报,2015,37(8):
 1399-1404. (WANG Gang, ZHANG Xuepeng, JIANG Yujing, et al. New shear strength criterion for rough rock joints considering shear velocity [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(8): 1399-1404. (in Chinese))

(收稿日期:2020-08-21 编辑:雷燕)