

DOI: 10.11779/CJGE2018S2037

重复剪切作用下节理强度和形貌特征劣化规律

邓华锋, 肖 瑶, 李建林, 段玲玲, 支永艳, 潘 登

(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)

摘 要: 为了分析重复剪切作用下节理面剪切力学特性及微观形貌特征劣化规律, 制备了单节理砂岩试样, 考虑 4 种法向应力分别进行了 6 次重复剪切试验。研究结果发现: ①在重复剪切作用下, 节理面剪应力-剪切变形曲线变化特征明显, 经过 2~3 次剪切, 不再出现明显峰值, 剪切硬化现象明显, 残余抗剪强度逐渐趋于稳定; ②随着重复剪切次数增加, 节理面的抗剪强度劣化趋势明显, 呈先陡后缓的劣化趋势, 前 2 次剪切的劣化幅度占总劣化值的 65%以上, 而且法向应力越大, 抗剪强度劣化幅度和劣化速度越大; ③在重复剪切作用下, 节理面上相互咬合的微凸起和凹陷部分发生切齿、磨损和填充, 节理面的凹凸起伏程度逐渐减小, 使得其形貌特征参数及粗糙度系数逐渐降低, 进而导致其剪切力学特性逐渐劣化; ④建立了重复剪切作用下节理面粗糙度系数劣化方程, 结合 N.Barton 提出的结构面抗剪强度经验公式, 建立了考虑重复剪切作用的节理面抗剪强度计算公式, 结果表明计算值与试验值吻合的较好。

关键词: 岩石力学; 节理; 重复剪切; 微观形貌; 粗糙度系数; 劣化规律

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)S2-0183-06

作者简介: 邓华锋(1979-), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: dhf8010@ctgu.edu.cn。

Degradation laws of joint strength and micro-morphology under repeated shear tests

DENG Hua-feng, XIAO Yao, LI Jian-lin, DUAN Ling-ling, ZHI Yong-yan, PAN Deng

(Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area (China Three Gorges University), Ministry of Education, Yichang 443002, China)

Abstract: In order to analyze the degradation laws of shear mechanics properties and micro-morphology of joint planes under repeated shear tests, single joint sandstone specimens are prepared and six times of repeated shear tests are carried out respectively considering four kinds of normal stresses. The results show that: (1) During the repeated shearing process, the shear stress-shear deformation curve changes obviously. After 2 or 3 times of shear tests, there is no obvious peak shear strength and the shear hardening phenomenon is obvious, and the residual shear strength is gradually stabilized. (2) With the increase times of repeated shearing, the shear strength of the joint planes are deteriorated obviously. The deterioration trend is fast in the first place and then become slow. The degradation rate of the first two times of shear tests is more than 65% of the total deterioration value. In addition, the greater the stress, the greater and fast the shear strength degradation rate. (3) Under the repeated shearing effect, the occlusive micro-embossment and depression begin to incise, wear and fill with each other on the joint plane, and the concavo-convex fluctuation of the joint plane gradually decreases, thus makes the morphological parameters and roughness coefficient gradually decrease, and then it leads to the gradual deterioration of shear mechanics properties. (4) The deterioration equation for roughness coefficient under repeated shearing is established. Combining with N. Barton's empirical formula for shear strength of structural planes, the formula for calculating the shear strength considering the repeated shearing effect is established. The results show that the calculated values agree well with the experimental ones.

Key words: rock mechanics; joint; repeated shear; micro-morphology; roughness coefficient; deterioration law

0 引 言

工程岩体的变形破坏往往是由节理、裂隙等结构面的强度所控制^[1]。结构面的变形和强度一直是工程界关注和研究的热点, 较多学者对不同性状的节理岩体进行了大量的剪切试验研究^[2-5], 获得了丰富的研究

成果。但是从工程中节理岩体的受力和变形破坏过程来看, 除单调的直接剪切破坏之外, 还存在大量的重

基金项目: 湖北省自然科学基金重点项目(2015CFA140); 国家自然科学基金项目(51679127); 国家自然科学基金重点项目(51439003); 三峡大学 2015 级硕士学位论文论文培优基金项目(2017YYPY016)

收稿日期: 2018-07-22

复剪切作用过程,如动力作用导致的节理面重复剪切、开挖或者其它荷载作用下边坡节理岩体的多期剪切-滑移变形。较多学者结合工程中节理岩体的变形破坏特点对重复剪切的损伤效应进行了分析,典型如杨志全等^[6]研究发现,某磷矿边坡中的滑移面表现为滑移-弯曲-剪切的变形失稳破坏特征,随着开挖卸荷进行,该滑面出现了多次剪切滑移而导致最终破坏;黄润秋等^[7]研究发现,高边坡的变形破坏是从量变到质变的过程,也是坡体内部潜在滑动面重复剪切作用的过程,当潜在滑动面的剪切“损伤”累积所导致的强度降低已经无法维持坡体的稳定时,就会导致质变,即滑坡。

在重复剪切作用下,节理面的剪切力学特性存在明显的劣化趋势。夏才初等^[8]、Belem等^[9]、Jafaria^[10]、尹显俊^[11]等开展了节理岩体重复剪切试验研究,分析得到了重复剪切作用下抗剪强度等力学参数的劣化规律。同时,以往大量研究表明节理面的抗剪强度与其形貌特征关系密切,典型如Barton^[1]在统计分析的基础上,提出了基于节理面粗糙度系数JRC的不规则节理面抗剪强度计算公式;杜时贵等^[12]对节理面在干燥和饱水状态分别进行直剪试验,发现其抗剪强度和形貌特征的关系可以用JRC-JCS模型较好的评价;较多学者也推导并建立了大量的形貌参数与抗剪强度的相关关系式^[13-16]。

上述研究为完善节理面剪切力学特性分析奠定了较好的基础。但在以往的节理面重复剪切试验研究中,主要着重于节理面抗剪强度劣化规律的统计分析,对节理面微观形貌特征变化规律及其与剪切强度的相关性方面研究较少,对节理面的剪切力学特性劣化机制分析还不够完善。

基于此,本文制备单节理砂岩岩样,进行不同法向应力下的重复剪切试验,并在每次剪切前对节理面进行扫描,研究重复剪切作用下节理面剪切力学特性、形貌特征的劣化规律及其相互关系,分析解释其劣化机制。

1 节理岩样重复剪切试验方案

现场采集天然节理岩样难度较大,试验结果的离散性也很难控制。本文采用人工方法制备单节理制样。砂岩是一种非常典型的层理弱面发育的岩石,在地质作用和环境因素影响下容易沿层理弱面张开发育形成宏观节理面,为此,以层理明显的砂岩为试验对象。将现场取回的岩块,制成边长为100 mm的标准立方体,然后采用劈裂法顺层理面将岩样从中部劈开,选取节理面平整、无局部掉块的试样作为单节理岩样,标注剪切方向。典型岩样如图1。

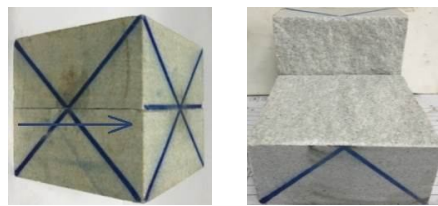


图1 典型单节理岩样

Fig. 1 Typical single joint rock specimen

对制备好的单节理岩样,考虑0.5, 1.0, 1.5, 2.0 MPa等4种法向应力情况,分别进行6次重复剪切试验,每次剪切试验前对节理面进行三维形貌扫描分析。剪切试验在YZW 1000型微机控制电动直剪仪上进行,节理面三维微观形貌扫描在ST500三维非接触式形貌扫描仪上进行。

2 重复剪切试验结果分析

2.1 节理面剪应力-剪切变形曲线分析

典型重复剪切的剪应力-剪切变形曲线如图2(以法向应力2.0 MPa为例)。

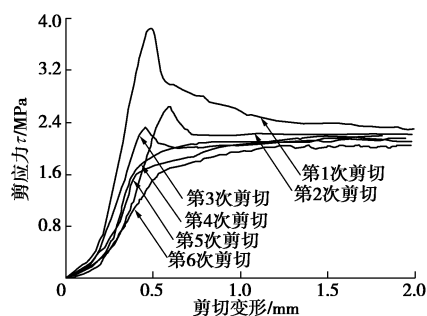


图2 重复剪切作用下节理面剪应力-剪切变形曲线

Fig. 2 Stress-shear deformation curves of joint plane under repeated shear tests

由图2可以看出:①在重复剪切作用下,节理面剪应力-剪切变形曲线变化特征明显。第1次剪切时的剪应力-剪切变形曲线均有明显的峰值、强度下降阶段和残余强度阶段,随着重复剪切次数的增加,剪切刚度逐渐变小,峰值剪切强度逐渐降低,直至不再出现明显峰值,逐渐呈现剪切硬化现象,残余抗剪强度逐渐趋于稳定,经过3次重复剪切后,剪应力-剪切变形曲线形态逐渐趋于稳定。②重复剪切对节理面残余抗剪强度也存在一定的劣化作用,但明显小于峰值抗剪强度的劣化幅度。

2.2 节理面抗剪强度劣化规律分析

不同法向应力情况下,节理面抗剪强度随重复剪切次数增加的劣化规律可以采用指数函数较好拟合,如图3(a)所示。

为更好地分析重复剪切次数对抗剪强度劣化的影响,定义重复剪切作用过程中抗剪强度降低程度为劣

化度, 总劣化度 Γ_{n-1} 可表示为 $\Gamma_{n-1} = [(\tau_1 - \tau_n) / \tau_1] \times 100\%$ (其中 τ_1 , τ_n 分别为第 1 次、第 n 次抗剪强度); 定义单次剪切作用过程的劣化度为阶段劣化度, 用 $\Delta\Gamma_n$ 表示: $\Delta\Gamma_n = \Gamma_{n+1} - \Gamma_n$, 单次剪切劣化图如图 3 (b) 所示。在统计抗剪强度时, 剪应力-剪切变形曲线中有峰值时取峰值, 无峰值时取曲线稳定阶段的值作为抗剪强度。

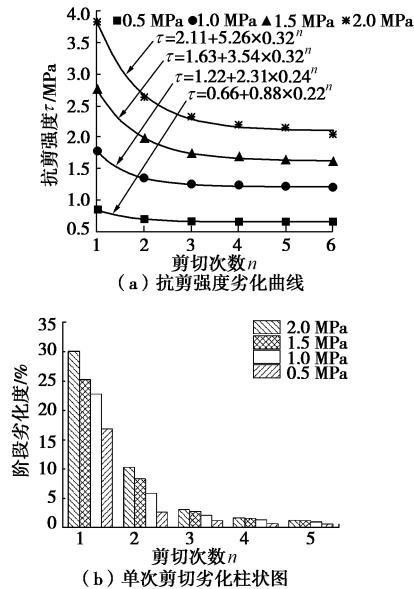


图 3 重复剪切作用下节理面抗剪强度劣化规律

Fig. 3 Degradation of shear strength of joint plane under repeated shear tests

由图 3 可以看出:

(1) 随剪切次数的增加, 节理面抗剪强度下降趋势明显, 不同法向应力总体呈现先陡后缓的变化趋势, 可以用指数函数 $\tau = a + bc^n$ 较好地拟合。

(2) 不同法向应力下, 节理面抗剪强度的劣化幅度差别较为明显。在 2 次剪切后, 4 种法向应力下的总劣化度为 19.7%~40.5%; 5 次剪切后总劣化度为 22.5%~46.9%, 比较而言, 法向应力越大, 抗剪强度劣化幅度和劣化速度越大。

(3) 重复剪切作用对节理面抗剪强度的影响呈现明显的非均匀性, 不同法向应力下第 1 次剪切作用的阶段劣化度为 16.9%~30.1%, 第 2 次剪切的阶段劣化度为 2.79%~10.4%, 第 5 次剪切的阶段劣化度为 0.71%~1.33%。比较而言, 前 2 次剪切作用对节理面抗剪强度的劣化影响显著, 说明重复剪切作用下节理面抗剪强度的劣化主要集中在前 2 次剪切。

(4) 根据莫尔-库仑强度准则, 对重复剪切作用下节理面抗剪强度进行拟合, 计算得到节理面的抗剪强度参数 (内摩擦角和黏聚力), 其变化趋势如图 4 所示。

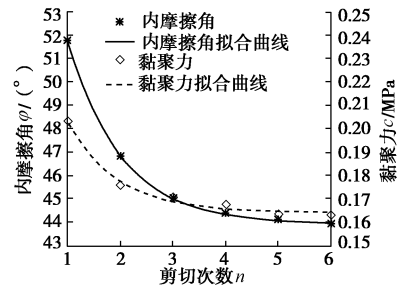


图 4 重复剪切作用下节理面抗剪强度参数劣化规律

Fig. 4 Degradation of shear strength parameters of joint plane under repeated shear tests

由图 4 可以看出, 节理面的黏聚力和内摩擦角随重复剪切次数的增加而减小, 总体呈现先陡后缓的劣化趋势, 且主要集中在前 2 次, 占总劣化值的 65% 以上, 后随剪切次数的增加黏聚力和内摩擦角逐渐趋于稳定; 比较而言, 内摩擦角下降幅度较小, 2 次剪切后下降了 9.56%, 5 次剪切后下降了 14.8%; 而黏聚力下降幅度较大, 2 次剪切后下降 13.5%, 5 次剪切后下降 19.47%。

由于本试验中的岩样节理面由人工劈裂方式制成, 节理面咬合的契合度很高, 由 Patton 提出节理面抗剪强度理论^[17]可知, 节理面在剪切作用下会表现出 2 种不同的受力和破坏类型, 即切齿效应和爬坡效应, 节理面由于切齿效应表现出一定的黏聚力, 随重复剪切次数的增加, 其相互咬合的微凸起和凹陷发生磨损和充填, 切齿效应迅速减弱, 从而使黏聚力迅速下降。

3 重复剪切节理面形貌变化特征分析

在重复剪切过程中, 从节理面宏观形貌特征来看, 前 2 次剪切后, 节理面上掉落的小碎块及碎屑较多, 随着剪切次数增加, 节理面上的碎屑明显减少, 凸起与凹陷位置逐渐平缓。比较而言, 法向应力越大, 剪切过程中掉落的碎屑越多, 节理面的凹凸形态变化越明显。为更加直观地反映节理面在重复剪切作用的变化特征, 特结合重复剪切作用下节理面三维微观形貌扫描结果进行定量分析。

典型节理面第 1, 3, 6 次剪切前微观扫描结果如图 5 (以法向应力 2.0 MPa 为例)。

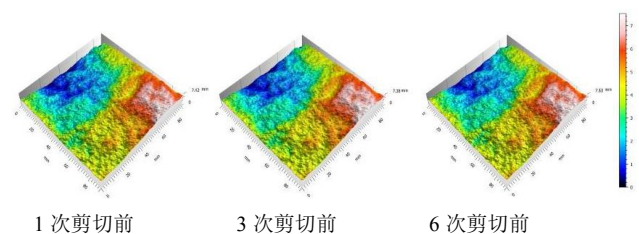


图 5 重复剪切作用下节理面微观形貌扫描结果

Fig. 5 Scanning results of micro-topography of typical joint plane under repeated shear tests

节理面微观形貌分析中,采用最小二乘法作为形貌的基准面,并运用 ST500 专业软件提取各微观形貌特征参数。参考以往类似研究^[18],选取节理面形貌的最大高度 S_z 、高度均方根 S_q 、坡度均方根 S_{dq} 和展开面积比 S_{dr} 等 4 个参数进行统计分析,对各形貌参数进行归一化处理,以对比重复剪切作用对节理面微观形貌的影响,曲线如图 6。

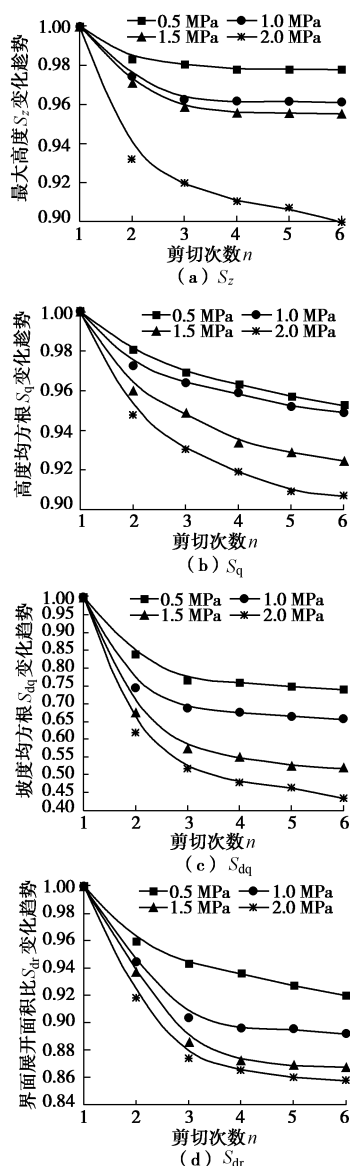


图 6 重复剪切作用下节理面微观形貌参数变化规律

Fig. 6 Variation law of morphology of joint plane under repeated shear tests

由图 6 可以看出:

(1) 1 次剪切后,各法向应力下形貌参数 S_z , S_q , S_{dq} 与 S_{dr} 的劣化幅度分别为 1.67%~6.80%, 1.94%~5.23%, 16.2%~38.1%, 2.10%~8.17%; 2 次剪切后, S_z , S_q , S_{dq} 与 S_{dr} 的劣化幅度分别为 1.92%~8.07%, 3.06%~6.97%, 23.4%~48.1%, 5.7%~12.6%; 5 次剪切后, S_z , S_q , S_{dq} 与 S_{dr} 的劣化幅度分别为 2.20%~

10.0%, 0.73%~3.22%, 23.4%~48.2%, 8.00%~14.2%。随着重复剪切次数的增加,节理面各微观形貌参数迅速减小,在 2 次剪切之后,各参数逐渐趋于稳定。其中形貌参数 S_z 反映扫描节理面的最大峰谷高度分布情况, S_q 反映节理面表面微观形貌的波动性, S_{dq} 则可以较好地反映节理面的倾斜状态和轮廓形状,而 S_{dr} 表示所扫描节理面表面复杂情况的大小程度。说明在重复剪切的过程中,节理面的最大峰谷高度值、波动性、倾斜状态、复杂程度等明显减小。

(2) 微观形貌参数在各法向应力情况下的变化规律类似,总体呈先快后慢的变化趋势,且法向应力越大,劣化幅度越明显,这与节理面的宏观力学参数变化规律是一致的。

(3) 在重复剪切过程中,节理面相互咬合的微凸起和凹陷部分发生切齿、磨损和充填等,法向应力越大,节理面咬合程度越好,剪切过程中的切齿、磨损程度就越大,从而导致了节理面微观形貌参数的迅速降低和抗剪强度的快速劣化。前 2 次剪切对节理面的损伤程度明显较大,而后,随着剪切次数的增加,剪切过程中节理面的切齿、力学磨损和充填作用明显减弱,节理面各形貌参数变化趋于缓慢,同时,节理面抗剪强度参数也逐渐趋于稳定。从而使得重复剪切作用下,节理面的微观形貌参数和宏观剪切力学特性呈现一致的变化规律。

4 重复剪切作用下节理面抗剪强度劣化方程

以往的研究表明,节理面粗糙度系数 JRC 与坡度均方根 S_{dq} 有较强的相关性, Yang 等^[19]提出根据 S_{dq} 确定 JRC 取值的经验公式:

$$JRC = 32.69 + 32.98 \lg S_{dq} \quad (1)$$

为定量分析节理面形貌特征与抗剪强度的相关性,采用式 (1) 作为节理面 JRC 的理论计算依据,由重复剪切微观形貌扫描后统计的坡度均方根 S_{dq} , 计算粗糙度系数 JRC。不同法向应力下归一化的 JRC 变化趋势如图 7 所示。

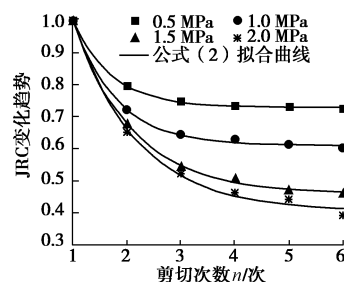


图 7 重复剪切作用下节理面归一化的 JRC 变化规律

Fig. 7 Normalized JRC variation laws of joint plane under repeated shear tests

由图 7 分析发现, JRC 与剪切次数 n 和法向应力 σ_n 均有明显的相关性, 在以往分析^[8]的基础上, 建立重复剪切作用下 JRC 与剪切次数 n 和法向应力 σ_n 的关系式, 表示如下:

$$JRC^* = JRC_0 \frac{1}{a\sigma_n + b} \left(1 - \frac{\sigma_n}{JCS}\right)^n \exp\left(\frac{c \frac{\sigma_n}{JCS} + d}{n}\right). \quad (2)$$

式中 JRC_0 为第 1 次剪切前节理面的粗糙度系数; σ_n 为法向应力; JCS 为节理面壁抗压强度; n 为剪切次数; a, b, c, d 为与节理面剪切试验相关的经验系数, 依次为 0.68, 0.96, 13.58, -0.06。

将式 (2) 代入 N.Barton 提出的结构面抗剪强度经验公式^[1], 即可得到重复剪切作用下, 节理面抗剪强度劣化计算公式:

$$\tau_n = \sigma_n \tan \left[JRC^* \lg \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right], \quad (3)$$

式中, 根据试验, JCS 取值 50 MPa, ϕ_b 取值 35° 。

由式 (3) 计算得到重复剪切作用下不同法向应力的抗剪强度, 与试验值比较如图 8 所示。

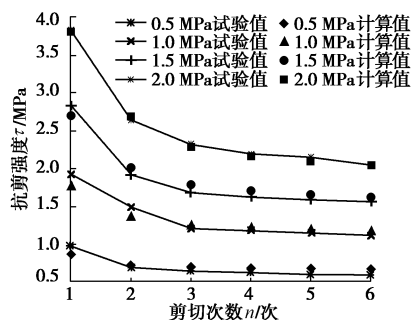


图 8 重复剪切作用节理面抗剪强度计算值和试验值比较

Fig. 8 Comparison between calculated and experimental values of shear strength of joint plane under repeated shear tests

由图 8 可以看出, 计算的节理面抗剪强度与试验值可以较好的吻合, 说明基于节理面微观形貌特征及其与抗剪强度的相关性建立的抗剪强度劣化方程可以较好的反映重复剪切作用下节理面抗剪强度的损伤劣化过程。这也说明在重复剪切作用过程中, 节理面上相互咬合的微凸起和凹陷发生切齿、磨损和填充, 使得其形貌特征及粗糙度发生变化, 进而导致其剪切特性劣化, 是一个微观结构特征变化到宏观力学特性劣化的过程。

5 结 论

(1) 随重复剪切次数的增加, 节理面剪应力 - 剪切变形曲线变化特征明显, 峰值剪切强度降低幅度明显, 经过 2~3 次剪切后, 不再出现明显峰值, 剪切硬化现象明显, 残余抗剪强度逐渐趋于稳定。

(2) 随着重复剪切次数增加, 节理面的抗剪强度劣化趋势明显, 呈先陡后缓的劣化趋势, 可用指数函数较好的拟合, 抗剪强度的劣化主要集中在前 2 次剪切, 其劣化幅度占总劣化值的 65% 以上, 而且, 法向应力越大, 抗剪强度劣化幅度和劣化速度越大。

(3) 在重复剪切作用下, 节理面微观形貌参数 S_z, S_q, S_{dq}, S_{dr} 呈现与抗剪强度一致的变化规律。重复剪切作用下, 节理面的切齿效应和摩擦效应在微观上使节理面的起伏度和粗糙度降低, 在宏观上表现为剪切力学特性劣化, 是由微观形貌特征变化导致宏观力学特性劣化的过程。

(4) 根据重复剪切作用下节理面微观形貌参数坡度均方根的变化规律及其与粗糙度系数的相关性, 结合 Barton 提出的结构面抗剪强度经验公式, 建立了考虑重复剪切作用的节理面抗剪强度计算公式, 验证表明所建立的公式可较好地反映节理面在重复剪切作用下的抗剪强度劣化规律。

参考文献:

- [1] 沈明荣, 陈建峰. 岩体力学[M]. 2 版. 上海: 同济大学出版社, 2015: 66 - 83. (SHEN Ming-rong, CHEN Jian-feng. Rock mass mechanics[M]. 2nd ed. Shanghai: Tongji University Press, 2015: 66 - 83. (in Chinese))
- [2] 杨 洁, 荣 冠, 程 龙, 等. 节理峰值抗剪强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(5): 884 - 894. (YANG Jie, RONG Guan, CHENG Long, et al. Experimental study of peak shear strength of rock joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(5): 884 - 894. (in Chinese))
- [3] KWON T H, HONG E S, CHO G C. Shear behavior of rectangular-shaped asperities in rock joints[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2010, 14(3): 323 - 332.
- [4] 黄 曼, 杜时贵, 罗战友, 等. 基于多尺度直剪试验的岩石模型结构面抗剪强度特征研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3180 - 3186. (HUANG Man, DU Shi-gui, LUO Zhan-you, et al. Study of shear strength characteristics of simulation rock structural planes based on multi-size direct shear tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3180 - 3186. (in Chinese))
- [5] 唐志成, 王晓川. 不同接触状态岩石节理的剪切力学性质试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(12): 2312 - 2319. (TANG Zhi-cheng, WANG Xiao-chuan. Experimental studies on the mechanical behavior of rock joints with varying matching degrees[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(12): 2312 - 2319. (in Chinese))

- [6] 杨志全, 张震, 侯克鹏, 等. 开挖与卸载交替作用对上陡下缓型高陡层状岩质边坡变形失稳影响试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, **48**(6): 8 - 15. (YANG Zhi-quan, ZHANG Zhen, HOU Ke-peng, et al. Experiment of alternating actions of excavation and unload high and steep bedding rock slopes with upper effects on deformation and instability of steep and lower gentle style[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, **48**(6): 8 - 15. (in Chinese))
- [7] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(8): 1525 - 1544. (HUANG Run-qiu. Geodynamical process and stability control of high rock slope development[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(8): 1525 - 1544. (in Chinese))
- [8] 夏才初, 宋英龙, 唐志成, 等. 反复直剪试验节理强度与粗糙度变化的研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, **43**(9): 3589 - 3594. (XIA Cai-chu, SONG Ying-long, TANG Zhi-cheng, et al. Shear strength and morphology characteristic evolution of joint surface under cyclic loads[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, **43**(9): 3589 - 3594. (in Chinese))
- [9] 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.
- [10] JAFARIA M K, AMINI HOSSEINIA K, PELLET F, et al. Evaluation of shear strength of rock joints subjected to cyclic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, **23**: 619 - 630.
- [11] 尹显俊, 王光纶, 张楚汉. 岩体结构面切向循环加载本构关系研究[J]. 工程力学, 2005, **22**(6): 97 - 103, 57. (YIN Xian-jun, WANG Guang-lun, ZHANG Chu-han. Study of constitutive model for rock interfaces and joints under cyclic shear loading[J]. Engineering Mechanics, 2005, **22**(6): 97 - 103, 57. (in Chinese))
- [12] 杜时贵, 胡晓飞, 郭霄, 等. JRC-JCS模型与直剪试验对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(增刊1): 2747 - 2753. (DU Shi-gui, HU Xiao-fei, GUO Xiao, et al. Comparison study of JRC-JCS model and direct shear test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(S1): 2747 - 2753. (in Chinese))
- [13] 陈世江, 朱万成, 于庆磊, 等. 基于多重分形特征的岩体结构面剪切强度研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(3): 703 - 710, 718. (CHEN Shi-jiang, ZHU Wan-cheng, YU Qing-lei, et al. Shear strength research on rock joint surfaces based on multifractal theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(3): 703 - 710, 718. (in Chinese))
- [14] 孙辅庭, 余成学, 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 - 5368. (SUN Fu-ting, SHE Cheng-xue, WAN Li-tai, 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 - 5368. (in Chinese))
- [15] 游志诚, 王亮清, 杨艳霞, 等. 基于三维激光扫描技术的结构面抗剪强度参数各向异性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(增刊1): 3003 - 3008. (YOU Zhi-cheng, WANG Liang-qing, YANG Yan-xia, et al. Anisotropic research on shear strength parameters of discontinuity based on three-dimensional laser scanning technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(S1): 3003 - 3008. (in Chinese))
- [16] GRASSELLI G. Manuel rocha medal recipient shear strength of rock joints based on quantified surface description[J]. Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, **39**(4): 295 - 314.
- [17] PATTON F D. Multiple modes of shear failure in rock[C]// Proceedings of the 1st ISRM Congress. Lisbon, 1966: 509 - 513.
- [18] 陈瑜, 曹平, 蒲成志, 等. 水-岩作用对岩石表面微观形貌影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(11): 3452 - 3458. (CHEN Yu, CAO Ping, PU Cheng-zhi, et al. Experimental study of effect of water-rock interaction on micro-topography of rock surface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(11): 3452 - 3458. (in Chinese))
- [19] YANG Z Y, LO S C, DI C C. Reassessing the joint roughness coefficient (JRC) estimation using Z2[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2001, **24**(3): 243 - 251.

(本文责编 孙振远)