

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2018.01.09

# 重复剪切作用下结构面起伏角度对其力学特性影响研究

魏继红<sup>1</sup>, 王武超<sup>1</sup>, 杨圆圆<sup>2</sup>, 朱峰<sup>1</sup>, 范昊天<sup>1</sup>

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100;

2. 四川志德岩土工程有限责任公司, 四川 成都 610041)

**摘要:** 在室内直剪试验的基础上, 研究了重复剪切作用下起伏角对结构面变形和强度的影响。采用钢制模具和混凝土材料预制 4 种起伏角度结构面, 分别在 5 级法向应力下进行 6 次直剪试验, 记录每次剪切过程中的切向应力和法向位移随切向位移的变化。通过对切向应力和法向位移随切向位移变化曲线分析可知, 首次剪切时, 法向应力和起伏角度越大, 结构面剪切破坏方式越容易从滑移破坏过渡为剪断破坏, 对于同一种剪切破坏方式, 法向应力越大, 对结构面磨损或剪断的作用越强烈, 峰值剪胀位移越小, 起伏角度越大, 锯齿被磨损或剪断的高度越大; 第 2 次剪切开始, 不论法向应力和起伏角度如何, 结构面的剪切破坏方式基本上都转变为滑移破坏。

**关键词:** 重复剪切; 起伏角度; 破坏方式; 抗剪强度; 残余强度

中图分类号: TU458<sup>+</sup>.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2018)01-0060-09

## A study of the influence of asperity inclination angle on the mechanical properties of a structural plane under repeated shear

WEI Jihong<sup>1</sup>, WANG Wuchao<sup>1</sup>, YANG Yuanyuan<sup>2</sup>, ZHU Feng<sup>1</sup>, FAN Haotian<sup>1</sup>

(1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China;

2. Sichuan Zhide geotechnical engineering company, Chengdu, Sichuan 610041, China)

**Abstract:** On the basis of direct shear tests, influence of asperity inclination angle on deformation and strength of a structural plane are examined. Structural planes of four asperity inclination angles are made using steel mould and concrete, and direct shear tests are conducted six times under five normal stresses. At the same time, shear stress and normal displacement are recorded. The analysis of shear stress-horizontal displacement and vertical displacement-horizontal displacement curve shows that the normal stress and asperity inclination angle become larger firstly and the structural plane is easier to be cut. For the same shear failure style, if the normal stress increases, the structural plane will be worn or cut more seriously, and the maximum vertical displacement is lower. If the asperity inclination angle increases, the zig-zag pattern will be worn or cut more seriously. From the second shear time, the structural plane is worn every time and is not affected by the normal stress and asperity inclination angle.

**Keywords:** repeated shear; asperity inclination angle; failure style; shear strength; residual strength

目前对于结构面的研究主要集中于对自然特征的描述及其力学性质的分析上。对于自然特征, 由于结

收稿日期: 2017-05-04; 修订日期: 2017-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(41102162; 41672258)

第一作者: 魏继红(1976-), 女, 博士, 副教授, 主要从事岩土体稳定性研究工作。E-mail: wjhfish@hhu.edu.cn

构面本身的成因比较复杂,再加上后期不同性质构造运动的改造,造成结构面的形态千差万别。例如有些沉积成因结构面,因后期构造运动中引起层间错动,使层间结合力降低;有些结构面内因后期岩浆喷发注入其中形成石英、方解石脉,使得结合力有所增加;而有的节理面则经水的溶蚀作用而变宽,后期又被气、水、黏土等物质充填,继而使其黏聚力降低甚至完全丧失,结构面力学性质的复杂性一直深受学术界和工程界的关注,国内外学者对此的研究从来没有间断过,主要集中于通过室内试验、原位试验、数值模拟等方法确定结构面强度参数、对不同条件下剪切曲线形态进行分析描述、建立强度与粗糙度等参数的本构模型等<sup>[1~7]</sup>。

以上研究大多在静力荷载下进行,对岩体动力特征的研究较少。然而各种工程建设在施工和运行过程中,难免受到地震、水位升降、爆破等动力荷载的作用,因此地基岩体中的结构面便要经受循环加载、重复剪切作用,期间结构面应力位移等特性的损伤累积变化将直接关系到结构物的长期稳定和安全。至今有关岩体经受动力荷载的少量研究大都是针对完整岩石或含非贯通结构面岩样进行<sup>[8~15]</sup>,对含有贯通裂隙岩体动力特性这一基本问题,受理论发展及试验条件等的限制,目前国内外相关研究更为少见,该研究可为岩体稳定、工程设计等提供更多参考依据,因此有关重复剪切作用下结构面疲劳损伤力学特性的问题值得深入研究。

20 世纪 70 年代以来,国内外学者逐步开始研究循环荷载下结构面强度和变形等力学特性的变化,主要分为法向循环加载和切向循环加载两个方面,取得了大量成果,但是仍然存在一些不足之处。在岩石材料方面,多数研究都集中在对完整岩石试样或存在断续节理面的岩石试样的研究上,对于存在贯通结构面的裂隙岩体在重复剪切作用下疲劳损伤力学特性的变化研究却很少,被认为是涉及复杂动力过程且少有参考资料的国际性前沿课题<sup>[16]</sup>。对于结构面切向循环加载方面,研究重点多数放在切向应力-位移本构关系的研究上,对于结构面抗剪强度及残余强度的变化规律研究较少,且多数停留在定性研究方面。

自然界中,结构面表面形态多种多样,在野外填图的初始阶段,可分为台阶型、波浪形、平面型三种,它们的力学成因分别为张性、压性和剪性,其中每种剖面又可分为粗糙的、平坦的、光滑的三种类型,理论上用粗糙度来表示,这对于研究岩体的抗剪强度和评价岩体的剪胀有重要意义。此次研究以规则锯齿状人工结构面为研究对象,以室内直剪试验为依托,重点研究重复剪切

作用下不同起伏角度对结构面力学性能的影响。选择用不同的起伏角度来表示不同的粗糙度,对重复剪切作用下起伏角度对结构面力学性质的影响进行具体分析。

## 1 试验材料与方案

鉴于结构面表面形态复杂、野外很难取到大量粗糙度一致的天然结构面试样等因素,目前多数采用类岩石材料(混凝土、石膏等)制作规则结构面试样来对结构面进行试验研究<sup>[17~21]</sup>,本次试验也不例外。为研究重复剪切作用下起伏角度对结构面力学特性损伤规律,本次试验制作了大量规则锯齿状混凝土人工结构面,进行直接剪切试验。

试验设计  $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$  四种起伏角度,通过线切割技术对矩形钢模进行加工,制成试验设计所需的锯齿形状,控制切割误差在  $0.1\text{ mm}$  以内,钢模的尺寸为  $300\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ,钢制模具图及锯齿示意图如图 1 所示,单个锯齿的宽度为  $10\text{ mm}$ 。剪切设备为 YZ-30B 数显式剪切仪。

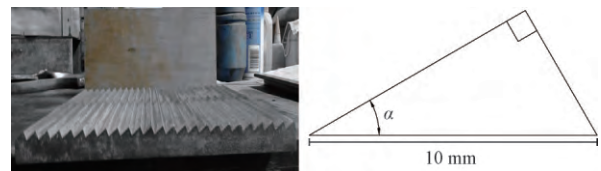


图 1 钢制模具图及锯齿示意图

Fig. 1 Schematic diagram showing the steel mould and sawtooth

直剪仪在使用时,原本设定上、下剪切盒相同,所以上、下试样的直径大小及位移也是完全相同及对应,故而剪切开始前,上、下试样的形心位置在一条竖直线上,然而当剪切现象发生时,上、下试样开始产生相对位移,使得两块试样的形心位置产生偏移,从而导致施加的法向荷载不再均匀分布,试样出现扭转,边缘产生应力集中现象(图 2a),容易破裂,对试验结果有一定影响。为降低这种现象的影响,本试验决定采用上部试样较小、下部试样较大的方法,保证剪切过程中上、下试样接触面边缘不会出现临空扭转现象(图 2b)。

将水、标号为 32.5 水泥和充分晒干的黄沙按  $0.45:1:2$  配合比均匀搅拌制成混凝土试样(图 3)。将试样放入预制剪切盒中,首次剪切方向为水平沿起伏角起伏方向,然后同剪切盒一起放入直剪仪中。准备工作完成之后开始对试样施加荷载,首先施加法向荷载至设计值,并在剪切过程中维持稳定,待切向千斤顶接触到剪切盒时,按  $0.5\text{ mm/min}$  的速率进行剪切并

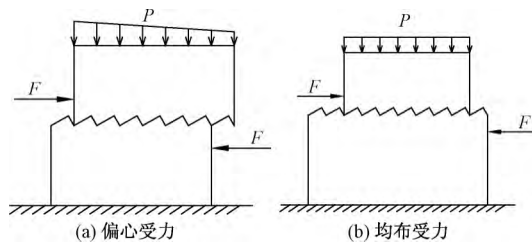


图2 试样偏心受力(a)和均布受力(b)示意图  
 Fig.2 Schematic diagram showing (a) the specimen eccentric force and (b) uniformly distributed force

开始读数,每当切向变形约 0.5 mm 时便记录 1 次数据,直至剪切位移为 10 mm。一轮剪切完成之后,轻轻将试样与剪切盒一起移出,旋转 180°,重新放入直剪仪中,如此重复直至完成 6 次剪切,之后将剪切盒取出,至此 1 个试样的直剪试验彻底完成,随后准备下一个试样的剪切。

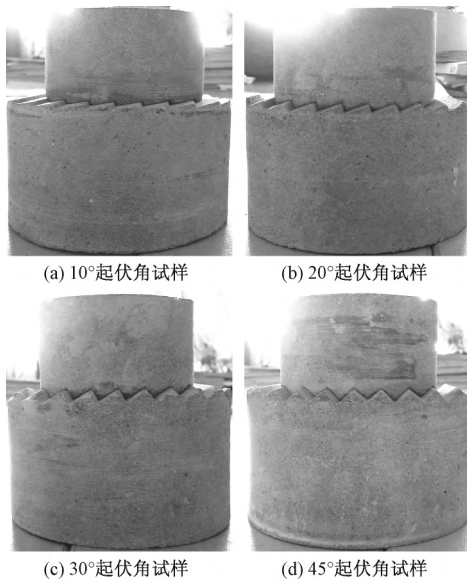


图3 试样成品图  
 Fig.3 Specimen map

本文主要着眼于重复剪切作用下探讨起伏角度对试样残余强度的影响因素,在第 1 次剪切过后设置的锯齿便会被剪坏,试样和剪切盒旋转 180°后进行第 2 次剪切时锯齿对残余强度的影响就不是控制性因素了,在 2~6 次的剪切中更关心反复剪切对试样残余强度的影响。基于这种考虑,本文把 2 个剪切方向不做区分,而是从整体分析的角度考虑重复剪切对结构面强度的影响。

## 2 起伏角度对结构面剪切破坏机理的影响

由于试样要承受多次剪切,而且试样强度不是很

高,所以只选择研究低法向应力下反复剪切过程中结构面力学性质的变化规律。

由图 4~6 可知,无论起伏角度大小如何,结构面切向应力随剪切位移的增加都显示出先增大后减小至某一值并趋于稳定的趋势,同时伴随着结构面的法向剪胀现象。另外,在相同的法向应力下,结构面起伏角度越大,剪切过程中的峰值切向应力越大。由图 4(a)中可以发现,起伏角度为 10°、20°、30°时,结构面切向应力-切向位移曲线表现得相对平缓,切向应力在达到峰值前后的一段位移内,曲线形式极其平缓,切向应力值跟峰值之间差距非常小,该区段的宽度在 2~2.5 mm,之后曲线才缓慢下降至残余值。另外,结构面切向应力峰值跟残余值之间的差距也比较小,分别为 0.77、0.95、0.97 MPa,对应图 4(b)中,结构面剪胀位移最大值分别为 1.53、2.82、3.54 mm,相对完整锯齿高度分别减小了 10.53%、12.15%、18.24%,由此推断结构面的剪切破坏方式为滑移破坏,并且起伏角度越大,磨损作用越强烈;起伏角度为 45°时,结构面切向应力随切向位移的增大缓慢增大到峰值之后,出现大幅下降,说明在切向应力的作用下试样先是沿着结构面缓慢爬坡,当切向应力足够大时,则剪断锯齿顶端

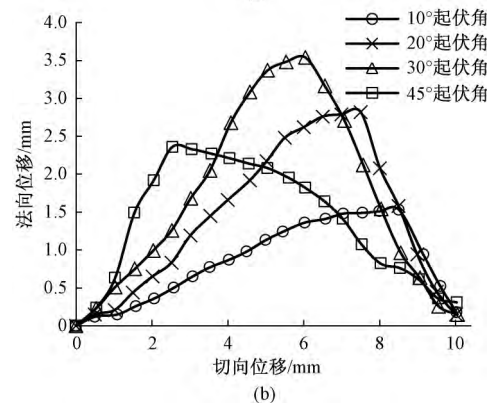
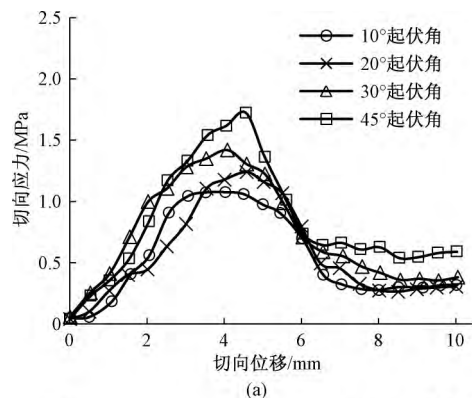


图4 0.39 MPa 法向应力下第 1 次剪切时变形曲线  
 Fig.4 Deformation of the structural plane under the normal stress of 0.39 MPa and the 1<sup>st</sup> shear

部,然后切向应力就陡然变小,因此可判断,此时结构面的破坏方式为上部剪断破坏,图 4(b)中,法向位移最大值为 2.36 mm,比完整锯齿 5 mm 的高度减小近 50%,也足以说明上述论断的正确性。从图 5(a)中可以看到,起伏角度为 10°、20°、30°时,结构面切向应力缓慢增加至峰值后又缓慢下降,全程没有出现陡升或陡降的现象,并且抗剪强度和剪切后期的残余强度相差也不大,对应图 5(b)中法向位移的最大值,分别为 1.53 mm/1.71 mm,2.82 mm/3.21 mm,3.04 mm/4.33 mm(注:斜线“/”后面的值为完整锯齿的高度,下同),可见锯齿高度减少量很小,由此推断此时结构面的剪切破坏方式为滑移破坏;起伏角度为 45°时,剪切曲线变陡了许多,结构面切向应力增加至峰值及减小至残余值的速率都有所增大,抗剪强度与残余强度的差值分别为 1.16、1.63 MPa,据此分析认为,此时结构面发生了脆性破坏,剪切破坏方式为剪断破坏,另外从图 5(b)中看到法向位移最大值分别为 1.84 mm/5 mm,锯齿高度减少 63.20%,进一步证明结构面被上部剪断。

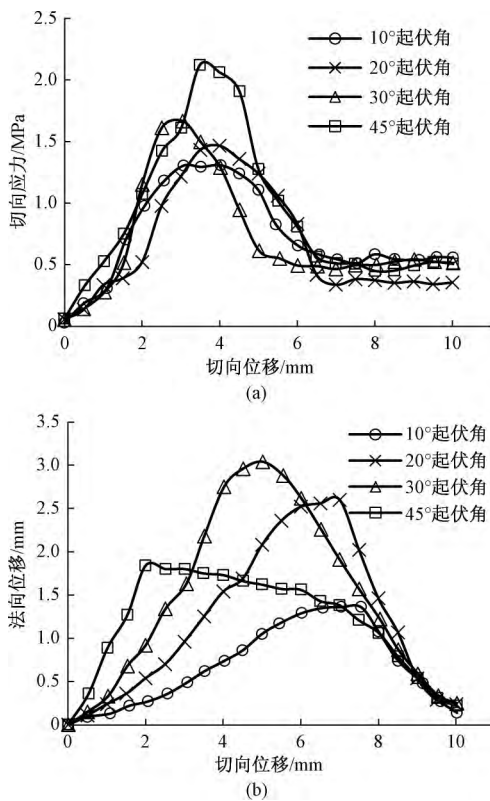


图 5 0.78 MPa 法向应力下第 1 次剪切时变形曲线  
Fig.5 Deformation of the structural plane under the normal stress of 0.78 MPa and the 1<sup>st</sup> shear

图 6 中法向应力为 1.17 MPa 时,切向应力和法向

位移随切向位移的变化规律与图 4 具有相似性,起伏角度较小时,结构面剪切曲线比较平缓,抗剪强度与残余强度之间的区别不大,法向位移最大值与完整锯齿之间的高度差值也较小,10°和 20°起伏角分别为 0.35 mm和 0.41 mm,共同体现为磨损破坏;起伏角度较大时,结构面抗剪强度与残余强度之间差值变大,30°和 45°锯齿高度减小量分别为 1.68、3.92 mm,共同体现为剪断破坏,起伏角越大,锯齿剪断量越大。

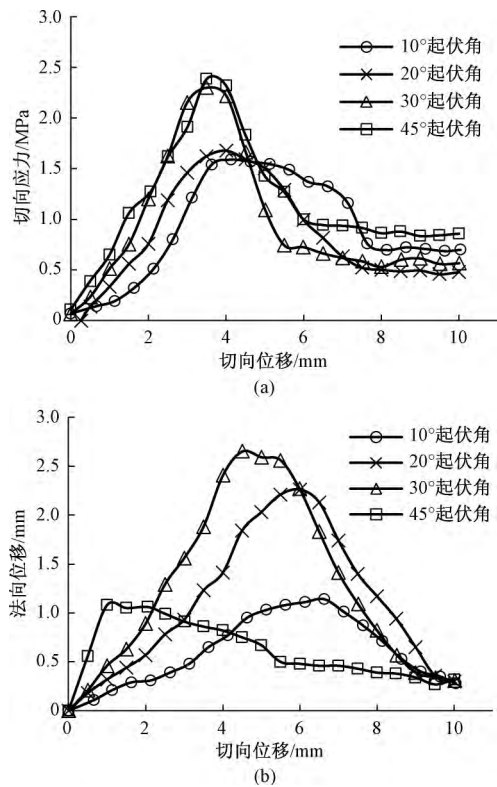


图 6 1.17 MPa 法向应力下第 1 次剪切时变形曲线  
Fig.6 Deformation of the structural plane under the normal stress of 1.17 MPa and the 1<sup>st</sup> shear

限于篇幅,1.56 MPa 与 1.95 MPa 法向应力下结构面第 1 次剪切时切向应力和法向位移随切向位移变化曲线将不再列出。从实验数据结果来看,随起伏角度不断增大,结构面抗剪强度也不断增大,同时抗剪强度对应的切向位移值也不断提前,由 5 mm 左右逐渐提前至约 2.5 mm,说明起伏角度越大,爬坡效应越弱,切齿效应越强,结构面剪切破坏方式随着起伏角的增大逐渐由滑移破坏变为剪断破坏,而且切齿效应加强,结构面切向应力增加的就越快,因此起伏角度越大,结构面切向应力到达峰值前的弹性阶段斜率就越大,到达峰值以后,切向应力下降的速率也随起伏角度的增大而加快。

综上所述,第1次剪切过程中,相同法向应力下,起伏角度越大,结构面越容易从磨损破坏转变为剪断破坏,对应结构面锯齿被磨损或剪断的高度也越大,说明起伏角越大,结构面被磨损或剪断的程度越严重。对于10°起伏角和45°起伏角,结构面剪切破坏方式在各法向应力下分别保持磨损破坏和剪断破坏的方式不变。

第2次剪切过程中,为分析不同法向压力下不同起伏角度对结构面剪切破坏的影响,将第2次剪切时不同起伏角度结构面在不同法向应力下的切向应力-切向位移曲线绘制于图7中。

从图7(a)~(c)中可以发现,起伏角度从10°增

加到30°的过程中,结构面抗剪强度逐渐减小,切向应力-位移曲线也变得越发平缓。剪切曲线最初弹性阶段的斜率也相应减小,主要是因为第2次与第1次的剪切方向相反,起伏角度越小,第2次剪切时的爬坡角度就越陡,从而导致第2次剪切时,若要达到相同位移,初始起伏角度越小则所需切向应力值基本就越大,抗剪强度便随起伏角度的减小而增大;起伏角度从30°增加到45°时,抗剪强度又有所增加,并且比10°起伏角的抗剪强度还要大一些,因为第1次剪切时,45°起伏角结构面被剪断破坏,断裂表面经受的磨损作用相对较小,剪断后的棱角相对尖锐,粗糙度也相对增大,

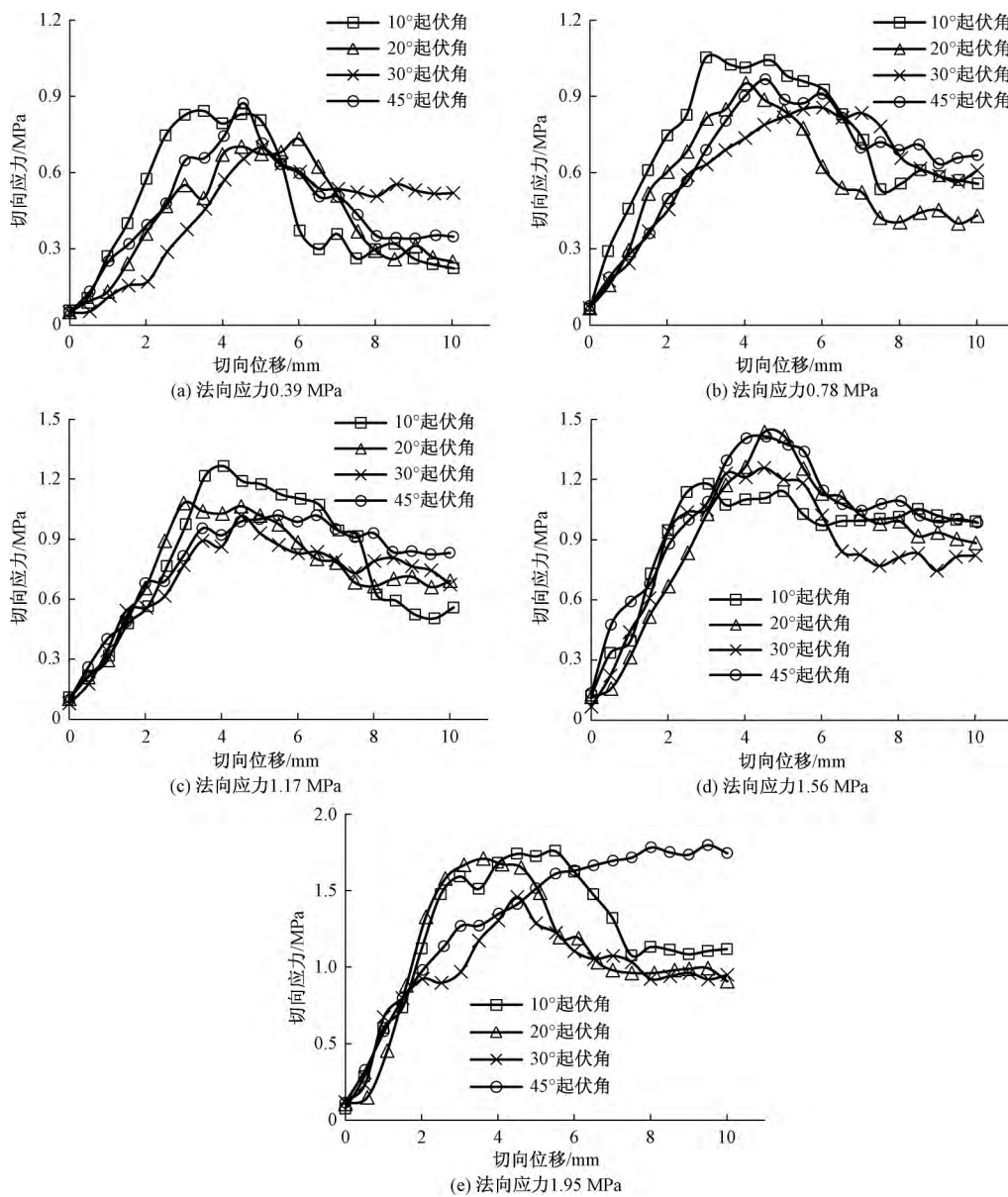


图7 不同起伏角度第2次剪切时切向应力-位移曲线

Fig.7 Shear stress and displacement of the structural plane with different shear angles in 2<sup>nd</sup> shear

因此第 2 次剪切时抗剪强度有所增强。整体看来,结构面抗剪强度与残余强度之间的差值较小,例如图 7 (a) 中  $10^\circ$  到  $45^\circ$  起伏角分别为 0.54, 0.46, 0.17, 0.53 MPa, 因此第 2 次剪切时,结构面剪切破坏方式不再受起伏角度的影响,都为滑移破坏。

从图 7(d) 中可以看出,对于  $10^\circ$  和  $20^\circ$  起伏角结构面,位移较小时,起伏角度越大,达到相同位移所需切向应力越小,剪切曲线初始弹性阶段的斜率越小,但是峰值切向应力却随起伏角增大从 1.18 MPa 增加到 1.44 MPa,因为这两种起伏角度下结构面第 1 次剪切方式均为滑移破坏,都是以爬坡效应为主,第 2 次剪切方向与第 1 次相反,所以初始起伏角度越大,第 2 次剪切时爬坡角度就越小,达到相同位移所需爬坡力也越小,但是又由于  $20^\circ$  起伏角结构面锯齿高度相对较高,结构面在剪切爬行过程中切向应力不断增大,峰值最终超过了  $10^\circ$  起伏角的抗剪强度。另外  $10^\circ$  起伏角结构面抗剪强度与残余强度之间的差值为 0.27 MPa,小于  $20^\circ$  起伏角结构面的差值 0.64 MPa,证明起伏角度越大,磨损破坏作用越强烈;对于  $30^\circ$  和  $45^\circ$  起伏角结构面,也是起伏角度越大,抗剪强度越大,主要因为第 1 次剪切时,该法向压力下,两种结构面都被剪断破坏,但是  $45^\circ$  起伏角结构面剪断作用更强烈,剪断面面积更大,残余结构面的粗糙度相对较大,因此此次剪切时结构面抗剪强度大于  $30^\circ$  起伏角结构面。

从图 7(e) 中可以看到,  $10^\circ$  到  $30^\circ$  起伏角结构面,随剪切位移的增加,切向应力都呈先增大至最大值后缓慢下降至某一值后趋于稳定的趋势,  $45^\circ$  起伏角结构面切向应力却随位移的增加不断增大,体现为切向应力强化现象,因为大起伏角度结构面在高法向应力下,第 1 次剪切时,锯齿被剪断之后会产生较多碎屑物,在第 2 次剪切过程中的持续碾压作用下,碎屑物被磨碎后重新排列在结构面缝隙内形成一个强化夹层,导致剪切曲线出现这样的趋势。总而言之,各剪切曲线中抗剪强度与残余强度之间的差值都比较小,切向应力-位移曲线相对平滑,因此判断结构面剪切破坏方式均为磨损破坏,不受起伏角度的影响。

由以上 2 次剪切的分析情况来看,第 1 次剪切时的剪断及磨损作用,使结构面起伏差变小,表面形态变得圆滑,从第 2 次剪切开始,不同起伏角度结构面均被磨损破坏,只不过磨损程度有所差别,因此这里不再对第 3 次及以后的剪切过程进行具体分析,仅将剪切过程中不同剪切次序时的结构面强度值及剪胀位移峰值等列于表 1 中以供参考,以 1.56 MPa 法向应力下的值

为例(其中第 1 次剪切时,前一次剪切峰值法向位移为完整锯齿的高度)。从表 1 中可以看出,同一次剪切中,在起伏角度较小范围内( $10^\circ \sim 30^\circ$ ),峰值法向位移随起伏角度的增加而增加,主要是因为起伏角度越大,锯齿高度越高,但是相邻次序间峰值法向位移的差值却变大,说明起伏角越大,结构面被磨损或剪断的程度越大;起伏角度较高( $45^\circ$ )时,峰值法向位移又出现减小的现象,因为第一次剪切时,切齿效应非常强,以致锯齿几乎从根部剪断,后面几次剪切过程中,结构面的剪胀现象也就变得非常小。

从图 8 可以看到,  $10^\circ$  到  $30^\circ$  起伏角结构面残留锯齿高度越来越高,同表 1 中显示的第 6 次剪切时峰值法向位移值的变化相吻合,分别为 0.31, 0.72, 0.84 mm, 3 个数值之间差距较小,但是剪切之前的完整锯齿高度差值较大,分别为 1.71, 3.21, 4.33 mm,说明起伏角度越大,结构面被磨损或剪断的程度越大,最终导致 6 次剪切后结构面表面形态差距减小,同表 1 中不同起伏角度下,相邻剪切次序间峰值法向位移的变化规律相一致;图 8(d) 中  $45^\circ$  起伏角结构面的表面锯齿形状变得很不明显,因为第 1 次剪切时,表面锯齿被从根部剪断,后期再经历多次剪切后,表面形态变得越发平整,表 1 中,第 6 次峰值剪胀位移仅 0.01 mm。

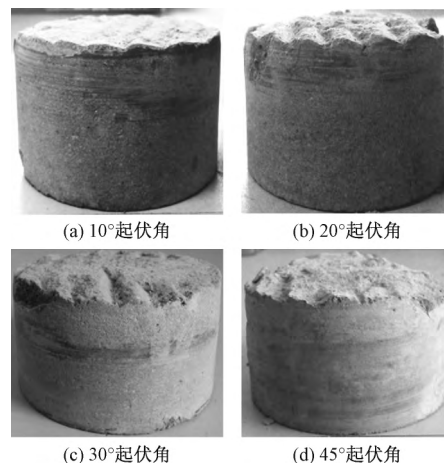


图 8 1.56 MPa 法向应力下剪切 6 次后表面破坏形态

Fig. 8 Surface failure after 6 times repeated shear under the normal stress of 1.56 MPa

### 3 起伏角对结构面抗剪强度及残余强度影响

影响结构面抗剪强度很重要的两个参数即是结构面黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ , 目前最常用的一种求值方法即是莫尔-库伦准则,前提是结构面在进行不同法向应力下的剪切试验时表面形态必须一致,因只有第 1 次剪切时各起伏角度结构面可以达到这样的要求,第 1



表1 1.56 MPa 法向应力下结构面强度和位移

Table 1 Strength and displacement of different structural planes under the normal stress of 1.56 MPa

剪切次数	起伏角度/ (°)	抗剪强度 $\tau_{max}$ /MPa	残余强度 $\tau_{min}$ /MPa	$(\tau_{max} - \tau_{min})$ /MPa	前一次峰值 法向位移 $H$ /mm	此次峰值法向位移 $h$ /mm	$(H - h)$ /mm	主要剪切 破坏方式
第1次	10	2.06	0.91	1.15	1.71	1.02	0.69	滑移破坏
	20	2.10	0.79	1.31	3.21	1.91	1.30	上部剪断破坏
	30	2.38	0.69	1.69	4.33	2.13	2.20	上部剪断破坏
	45	2.75	1.11	1.64	5.00	0.81	4.19	根部剪断破坏
第2次	10	1.56	0.81	0.75	1.02	0.87	0.15	滑移破坏
	20	1.44	0.91	0.53	1.91	1.63	0.28	滑移破坏
	30	1.26	0.81	0.45	2.13	1.87	0.26	滑移破坏
	45	1.50	1.00	0.50	0.81	0.49	0.32	滑移破坏
第3次	10	1.33	1.07	0.26	0.87	0.63	0.24	滑移破坏
	20	1.22	0.82	0.40	1.63	1.34	0.29	滑移破坏
	30	1.09	0.83	0.26	1.87	1.53	0.34	滑移破坏
	45	1.38	1.07	0.31	0.49	0.24	0.25	滑移破坏
第4次	10	1.18	1.01	0.17	0.63	0.48	0.15	滑移破坏
	20	1.12	0.91	0.21	1.34	1.12	0.22	滑移破坏
	30	1.02	0.88	0.14	1.53	1.29	0.24	滑移破坏
	45	1.16	1.08	0.08	0.24	0.13	0.11	滑移破坏
第5次	10	1.13	0.94	0.19	0.48	0.38	0.10	滑移破坏
	20	1.05	0.94	0.11	1.12	0.97	0.15	滑移破坏
	30	0.98	0.80	0.18	1.29	1.01	0.28	滑移破坏
	45	1.13	1.10	0.03	0.13	0.05	0.08	滑移破坏
第6次	10	1.06	0.91	0.15	0.38	0.31	0.07	滑移破坏
	20	0.99	0.93	0.06	0.97	0.72	0.25	滑移破坏
	30	0.95	0.73	0.22	1.01	0.84	0.17	滑移破坏
	45	1.12	1.09	0.03	0.05	0.01	0.04	滑移破坏

次剪切之后各起伏角度结构面粗糙度都发生变化,所以文中仅根据结构面的抗剪强度-法向应力关系求得第1次剪切时各起伏角度结构面的  $c$ 、 $\varphi$  值,依照前面对结构面抗剪强度的分析,将不同起伏角度结构面第1次剪切时的法向应力-抗剪强度关系绘制于图9中,并进行线性拟合,可以看到,10°起伏角结构面的黏聚力和内摩擦角都是最小的,分别为0.728 MPa和38.38°。随起伏角的增大,2个参数值不断增加,45°起伏角时最大,黏聚力为1.257 MPa,内摩擦角为46.4°。

从图10中可以看出,残余强度随起伏角度的增加多数呈先减小后增加的趋势,主要因为起伏角度较小时,随起伏角度的增加,结构面被磨损的作用增强,剪切过程中产生的碎屑也能更多地填充在结构面表面锯齿之间,使结构面表面形态变得平缓,残余强度有所减小;第1次剪切后,锯齿被剪断之后会产生较多碎屑物,且颗粒粒径大小不均匀,这时粗颗粒对强度的影响占主要地位,在其后重复剪切过程中,粗颗粒被剪碎,在法向压力的作用下,颗粒组持续被碾压和调整,碎屑物被磨碎后重新排列在结构面缝隙内形成一个颗粒密度要高于第1次剪切时形成的剪切带。从微观角度上看,粗颗粒被反复剪切碾压后颗粒的粒径级配越来

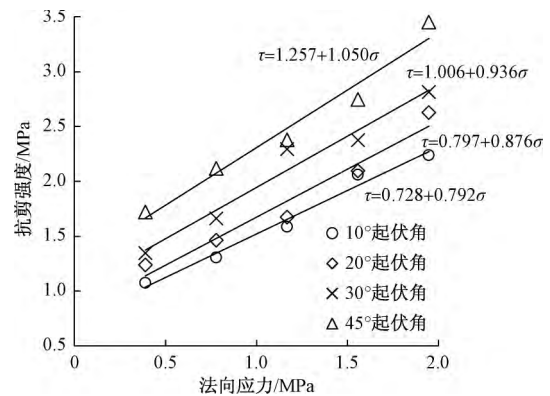


图9 结构面在不同起伏角度下的  $\tau - \sigma$  关系图

Fig. 9 Relationship between the shear strength and normal stress of the structural plane at different asperity inclination angles

越好,使得剪切面的颗粒排列趋于密实,因此残余强度出现减小后又增加的现象。但是,不同法向应力下不同剪切次序时残余强度的这种变化规律并不具有一致性,这是因为在不同法向应力下,不同起伏角的试样其各向异性很强,因此会有个体上的差异,但从大量的试样剪切结果来看,在一定范围内试验结果满足残余强度先减小后增加的规律。

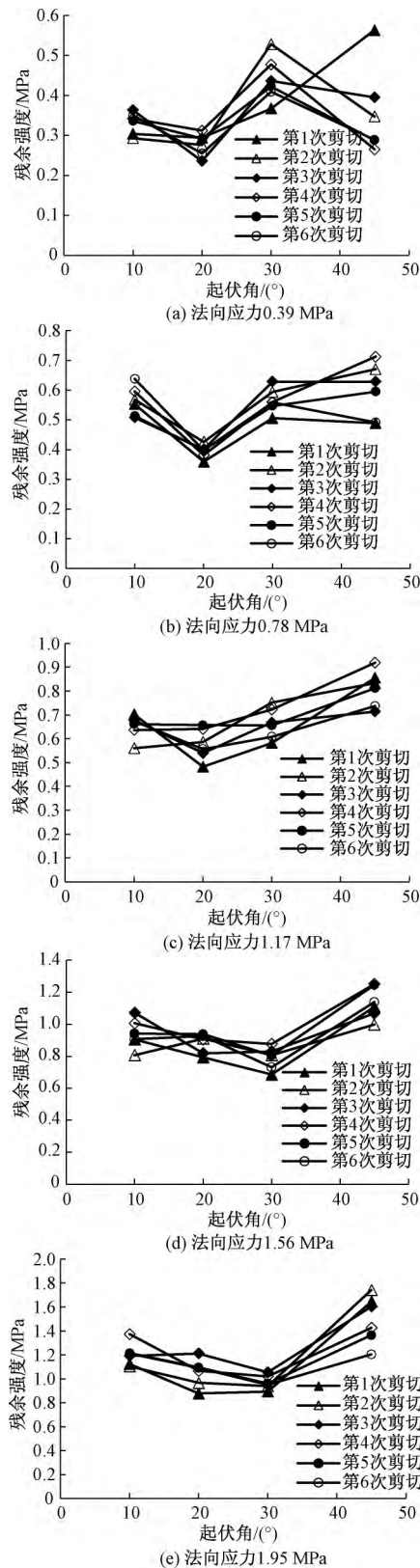


图 10 不同剪切次数下结构面残余强度随起伏角度变化

Fig. 10 Variation in the residual strength of the structural plane with the asperity inclination angle

### 4 结论

(1) 起伏角越大,第 1 次剪切过程中的爬坡效应越弱,切齿效应越强,因此就越容易发生剪断破坏,与第 2 次剪切时的抗剪强度的差值越大;经历过第 1 次剪切过程的磨损或剪断作用,结构面表面形态都变得平滑,第 2 次剪切开始结构面的破坏方式不再受起伏角度的影响,均为滑移破坏。

(2) 第 1 次剪切时,起伏角越大,结构面抗剪强度越大,呈线性增加趋势,结构面的强度参数  $c$ 、 $\varphi$  值也越大;第 2 次剪切开始,抗剪强度随起伏角增大先减小后增大,30°起伏角时最小,剪切次数越多,各起伏角结构面抗剪强度越接近。

(3) 结构面残余强度随起伏角的增加不具有系统的变化规律。

### 参考文献:

[ 1 ] Barton N. Review of new shear-strength criterion for rock joints [J]. *Engineering Geology*, 1973, 7 ( 3 ): 287 - 332.

[ 2 ] Bandis S C, Lumsden A C, Barton N R. Fundamentals of rock joint deformation [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1983, 20( 6 ): 249 - 268.

[ 3 ] Amadei B, Saeb S. Constitutive models of rock joints [C]//*Proceedings of the International Symposium on Rock Joints*. Loen, Norway, 1990: 581 - 94.

[ 4 ] 杜守继, 朱建栋, 职洪涛. 岩石节理经历不同变形历史的剪切试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25( 1 ): 56 - 60. [DU S J, ZHU J D, ZHI H T. Shear Tests on Rock Joints under Different Shear Deformation Histories [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25( 1 ): 56 - 60. ( in Chinese ) ]

[ 5 ] 李海波, 冯海鹏, 刘博. 不同剪切速率下岩石节理的强度特性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25( 12 ): 2435 - 2440. [LI H B, FENG H P, LIU B. Study on Strength Behaviors of Rock Joints under Different Shearing Deformation Velocities [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25( 12 ): 2435 - 2440. ( in Chinese ) ]

[ 6 ] 周莲君, 彭振斌, 何志明, 等. 结构面剪切特性的试验与数值模拟分析 [R]. *科技导报*, 2009, 27( 4 ): 31 - 35. [ZHOU L J, PENG Z B, HE Z M, et al. Test for Shear Characteristics of Structural Plane and Its Numerical Simulation Analysis [R]. *Science & Technology Review*, 2009, 27( 4 ): 31 - 35. ( in Chinese ) ]



- [7] Hang Lin, Ping Cao, Yong Zhou. Numerical simulation for direct shear test of joint in rock mass [J]. *I J Image, Graphics and Signal Processing*, 2010, 1: 39 - 45.
- [8] 吴绵拔. 加载速率对岩石断裂韧度的影响[J]. *力学与实践*, 1986(4): 21 - 23. [WU M B. Effect of Loading Rate on Fracture Toughness of Rock [J]. *Mechanics in Engineering*, 1986(4): 21 - 23. (in Chinese) ]
- [9] 金济山, 石泽全, 方华, 等. 在三轴压缩下大理岩循环加载试验的初步研究[J]. *地球物理学报*, 1991, 34(4): 488 - 494. [JIN J S, SHI Z Q, FANG H, *et al.* A preliminary Study on Cyclic Loading Experiments of Marble Under Triaxial Compression [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1991, 34(4): 488 - 494. (in Chinese) ]
- [10] 乔河, 柴华友. 爆炸作用下花岗岩动态本构关系试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 1996, 15(增刊): 446 - 451. [QIAO H, CHAI H Y. Experimental Study of Granite's Constitutive Relation under Blasting Loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1996, 15(Sup): 446 - 451. (in Chinese) ]
- [11] 信礼田, 刘建武, 何翔. 高应变速率下石灰岩的力学特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 1998, 17(增刊): 780 - 783. [XIN L T, LIU J W, HE X. The Mechanical Properties of Limestone under High Strain Rate [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(Sup): 780 - 783. (in Chinese) ]
- [12] 李宁, 陈文玲, 张平. 动荷作用下非贯通裂隙介质的强度性质[J]. *自然科学进展*, 2000, 10(11): 1029 - 1034. [LI N, CHEN W L, ZHANG P. Strength Properties of Through Fractured Media under Dynamic Loading [J]. *Progress in Natural Science*, 2000, 10(11): 1029 - 1034. (in Chinese) ]
- [13] 邵鹏. 断续节理岩体中弹性波动力效应研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2003. [SHAO P. Study on Dynamic Effect of Elastic Wave in Intermittent Jointed Rock Mass [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology 2003. (in Chinese) ]
- [14] 徐建光, 张平, 李宁. 循环荷载下断续裂隙岩体的变形特性[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(6): 802 - 806. [XU J G, ZHANG P, LI N. Deformation Properties of Rock Mass with Intermittent Cracks under Cyclic Loading [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* 2008, 30(6): 802 - 806. (in Chinese) ]
- [15] 胡盛斌, 邓建, 马春德, 等. 循环荷载作用下含缺陷岩石破坏特征试验研究[J]. *岩石力学与工程学报* 2009, 28(12): 2490 - 2495. [HU S B, DENG J, MA C D, *et al.* Experimental Study of Failure Characteristics of Rock Containing Flaw under Cyclic Loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(12): 2490 - 2495. (in Chinese) ]
- [16] 李宁, 程国栋, 谢定义. 西部大开发中的岩土力学问题[J]. *岩土工程学报*, 2001, 23(3): 268 - 272. [LI N, CHENG G D, XIE D Y. Geomechanics Development in Civil Construction in Western China [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(3): 268 - 272. (in Chinese) ]
- [17] 夏才初, 孙宗硕, 潘长良. 节理表面波纹度对其闭合性质的影响[J]. *工程地质学报*, 1995, 3(2): 47 - 53. [XIA C C, SUN Z Q, PAN C L. The Effect of Surface Waviness of Joints on Their Closure Behaviors [J]. *Journal of Engineering Geology*, 1995, 3(2): 47 - 53. (in Chinese) ]
- [18] 李海波, 刘博, 冯海鹏, 等. 模拟岩石节理试样剪切变形特征和破坏机制研究[J]. *岩土力学* 2008, 29(7): 1741 - 1752. [LI H B, LIU B, FENG H P, *et al.* Study of Deformability Behaviour and Failure Mechanism by Simulating Rock Joints Sample under Different Loading Conditions [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(7): 1741 - 1752. (in Chinese) ]
- [19] 曹文贵, 王江营, 翟友成. 考虑残余强度影响的结构面与接触面剪切过程损伤模拟方法[J]. *土木工程学报* 2012, 45(4): 127 - 132. [CAO W G, WANG J Y, ZHAI Y C. Study of Simulation Method for Shear Deformation of Rock Structural Planes and Interfaces with Consideration of Residual Strength [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(4): 127 - 132. (in Chinese) ]
- [20] 高旭, 晏鄂川, 崔学杰, 等. 应变速率对含砾滑带土抗剪强度影响研究[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(1): 94 - 98. [GAO S, YAN E C, CUI X J, *et al.* Influence of Strain Rate to the Shear Strength of Conglomeratic Sliding-zone Soil [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(1): 94 - 98. (in Chinese) ]
- [21] 史卜涛, 张云, 王哲成, 等. 不同固结状态下黏土抗剪强度与剪切速率的关系[J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(6): 59 - 64. [SHI B T, ZHANG Y, WANG Z C, *et al.* Shear Strength and Shear Rates of Clay Soils under Different Consolidation States [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(6): 59 - 64. (in Chinese) ]

责任编辑: 张明霞