

# 重复剪切作用下充填物对结构面力学性质的影响\*

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>

(<sup>①</sup>河海大学地球科学与工程学院 南京 211100)

(<sup>②</sup>四川志德岩土工程有限责任公司 成都 610041)

**摘要** 目前,对于结构面的研究主要包括对剪切曲线形态的描述及结构面粗糙度、组数、充填物等因素对结构面强度参数的影响,一般情况下,这类研究的基础是结构面经受静荷载的作用。实际上,结构面也很容易遭受地震、水位升降、爆破等动力荷载的反复剪切作用,但是,至今对反复剪切作用下结构面力学特性的研究较少或缺乏系统性。笔者在室内直剪试验的基础上,研究了重复剪切作用下充填物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,在1.56MPa法向应力和两种充填状态下进行多次直剪试验,分析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,初次剪切时,起伏角度越大,结构面剪切破坏方式容易从滑移破坏过渡为剪断破坏;第二次剪切开始,无论起伏角度如何,结构面的剪切破坏方式基本上都转变为滑移破坏;充填物的存在基本不会改变结构面的剪切破坏方式,但会使剪切过程中结构面的爬坡效应增强,使结构面被剪断或磨损的作用减弱,峰值法向位移增大。

**关键词** 重复剪切 充填物 破坏方式 抗剪强度 残余强度

中图分类号: TU45 文献标识码: A

## STUDY ON THE INFLUENCE OF FILLING ON MECHANICAL PROPERTIES OF STRUCTURAL SURFACE UNDER REPEATED SHEAR CONDITION

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>

(<sup>①</sup>School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100)

(<sup>②</sup>Sichuan Zhide Geotechnical Engineering Company, Chengdu 610041)

**Abstract** Structural plane plays an important role in stability of rock mass. Many engineering accidents are caused by structural planes. This phenomenon has attracted enough attention. Up to now, the related researches on structural plane mainly include shearing curve description, impact of roughness, combination, filling and other factors on shear strength. In general, these researches are based on that the structural plane bears static load. In fact, it is very common for structural planes to bear cyclic shear load under conditions of dynamic load of earthquake, water level rise and fall, explosion and so on. However, there is less study on mechanical property of structural plane when it is under cyclic shear load. The paper is based on direct shear test. Influence of filled state on deformation and strength of structural plane is studied. Structural planes of four asperity inclination angles are

\* 收稿日期: 2017-04-18; 收到修改稿日期: 2017-05-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41102162, 41672258)资助.

第一作者简介: 魏继红(1976-),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事岩土体稳定性方面的研究工作. Email: wjhfish@hhu.edu.cn

made using steel mould and concrete. Then several times direct shear tests are conducted under same normal stresses and two filled states. At the same time, shear stress and normal displacement are recorded. The analysis on shear stress - shear displacement and normal displacement-shear displacement curve shows that the asperity inclination angle become larger firstly and 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 serious, and the maximum normal displacement is lower. If the asperity inclination angle increases, the zig-zag pattern will be worn or cut more. From the second shear time, the structural plane is worn every time and not be affected by asperity inclination angle. After the filling, the structural plane is damaged like before. However, this factor makes the structural plane climbing further, weakens the cutting or wearing degree, and adds the normal displacement meanwhile.

**Key words** Repeated shear, Filling state, Failure mode, Shear strength, Residual strength

## 0 引言

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。其中,对于自然特征,由于结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,1977年,国际岩石力学学会实验室和现场试验标准化委员会提出了《岩体不连续面定量描述的建议方法》(CFT第4号文件),规定从产状、延续性、粗糙度、间距、组数、张开度、充填度、侧壁抗压强度、渗流、块体大小等10个方面进行研究描述。因结构面自然形态多样,造成结构面相应的力学性质也产生差异,例如有些沉积成因结构面,因后期构造引动中引起层间错动,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加宽,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,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(汪新红等,2006;张黎明等,2008;陆银龙等,2010)。对于岩石力学特性的研究初期人们主要以完整岩样为基础,通过原位试验及室内试验得出岩石的强度参数,然后付诸工程实践,很少考虑岩体中含有的诸多结构面及其组合方式、各种充填物等的影响。在1964年Krsmanovic与Lango就进行了结构面直接剪切试验,通过整理分析结果数据得出结构面强度公式;Patton(1966)用含石膏充填的锯齿状结构面进行常法向压力下的直剪试验,模拟结构面的爬坡效应,首次提出了岩体结构面剪胀模型;Barton

(1973)提出硬性结构面剪切强度公式,并基于粗糙波状起伏、光滑波状起伏、光滑平直3种典型结构面形态提出粗糙度的概念,后经过对大量资料统计分析,和Choubey共同提出10条标准轮廓曲线(Barton et al.,1977),期间在粗糙度基础上,提出节理峰值剪切强度经验公式,同时考虑了法向应力和结构面表面形态对结构面剪切强度的影响,对不含充填或含少量充填的岩体节理面比较适用(Barton,1976);Landanyi et al.(1977)建立岩体锯齿状结构面的剪切强度模型,假设剪切过程中剪断和磨损同时发生。但因岩石强度、结构面形态、充填状况及受力形式等方面的多样性;近两年有学者对砂岩开展含4组不同结构面性状岩体的力学模拟测试,发现含软弱充填结构面比不含者对岩体力学性质影响大,且软弱充填厚度对岩体内摩擦角影响较大(胡政,2015);通过对不同类型的贯通及非贯通结构面岩体试样进行单轴压缩试验发现随着贯通性结构面数量的增多,同尺寸试件的变形强度参数劣化,非贯通性结构面贯通率的增大,试件的变形、强度参数劣化(郭松峰等,2016)。上述各种模型并不能对所有结构面完全适用,故后期很多学者(张全恒,1982;赵坚,1998;张林洪等,2000;李肖音等,2005;肖卫国等,2010)对前人提出的模型进行修正,但都没有得到广泛推广,目前常用的仍是Barton剪切强度模型及直剪试验法。

有关材料疲劳问题的研究已有100多年的历史,取得了大量成果,但是仍然存在一些不足之处(尹显俊等,2005;杜守继等,2006;李海波等,2008;曹文贵等,2012;夏才初等,2012;Mirzaghorbanali et al.,2014)。在岩石材料方面,多数的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反复剪切作用下疲劳损伤力学特性的变化

研究却很少,对于结构面切向循环加载方面,研究的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。对反复剪切作用下结构面力学性能的变化研究,所得结论考虑因素相对单一,另外,较少考虑充填物的影响,这些方面值得我们继续深入研究。

由于结构面成因的多样性及其后期所处的物理、化学环境的复杂性,导致自然状态下岩体结构面的表面形态也多种多样,而且本身结构面的采集工作就比较困难,因此,在野外采集大量自然特征完全一致的岩石结构面难度较高,所以本文选用预制人工结构面来模拟不同的粗糙度进行室内试验,用来研究反复剪切作用下各种不同因素对结构面力学特性的影响。虽然人工结构面的表面特征跟天然结构面的自然状态有一定的差别,但是人工结构面更易大量复制,影响因素也比较少,因此更容易得出一些基本规律。笔者以室内直剪试验为依托,重点研究在反复剪切作用下,不同起伏角度下充填物对结构面力学性能的影响。

## 1 试验材料与方案

### 1.1 模具制作与试样制作

从制样到剪切过程中用到的仪器设备分为制样设备和剪切设备两大部分。制样设备主要包括振动台、钻样机、切样机等。剪切设备为 YZ-30B 数显式剪切仪,主要由 3 部分组成:加载装置、剪切装置、数显仪。该剪切仪的法向能够施加的最大压力为 500kN,切向最大压力为 300kN,试验精度为 I 级,试样尺寸为  $\phi 50 \sim \phi 100\text{mm}$ 。

本次试验设计  $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$  等 4 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 0.1mm 以内,钢模的尺寸为  $300\text{mm} \times 200\text{mm}$ ,钢制模具(图 1)(以  $30^\circ$  起伏角为例),单个锯齿的宽度为 10mm。

试验模型材料选取水、标号为 32.5 的水泥和充分晒干的黄沙,配合比为 0.45:1:2,在电子秤上按比例称重。再将所称水泥和黄沙置于清扫干净的搅拌盆中进行混合搅拌,搅拌均匀之后加入相应比例的水,继续搅拌。将拌和物放入试样模具中,放于振动台上进行振动捣实,然后在模型上方覆盖一层保鲜膜进行保水 24h。24h 凝固成型之后将模具内的试样取出,为防止试样脱水引起不均匀收缩,遂将取

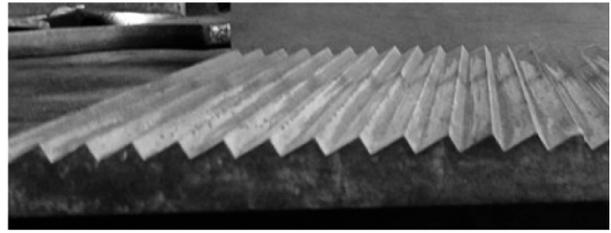


图 1 钢制模具图

Fig. 1 Steel mould

出的试样置于水中养护 28d。待试样养护完毕,根据剪切盒的直径大小,取直径为 70mm 和 100mm 的钻头对养护好的试样进行取芯工作。而后将石膏和水按 3:1 的配比进行搅拌,之后涂抹在结构面的表面,厚度约 1mm,完成后将试样置于干燥环境中(图 2)。

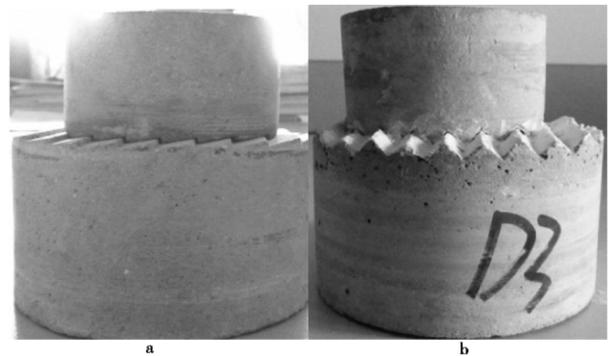


图 2 芯样切割完成后成品图

Fig. 2 Samples and filling material

a. 不含充填; b. 含充填

试验所用混凝土样是以采自南京地铁宁高城际一期禄口机场站的安山岩为样本,依据相似理论制成类岩石材料模型,笔者所在课题组经过试验证实该试样能较好地模拟安山岩的力学特性(王亚杰 2012; 傅伟斌, 2013)。

### 1.2 试验方案

为给含有结构面的试样剪切时法向压力等各项因素的控制提供参考,要对不含结构面的完整试样的无侧限单轴抗压强度及抗剪强度进行测定。首先测定完整试样( $\phi = 70\text{mm}$ 、 $H = 95\text{mm}$ )的无侧限单轴抗压强度,随机抽取 10 个样品进行单轴压缩试验。试样得到的峰值法向应力为 12.56~17.46MPa,得到完整试样平均单轴抗压强度为 15.6MPa。进行抗剪试验时,将试样放入剪切盒中之后,在法向施加恒定压力,后持续施加切向荷载直至试样破坏,剪切过程中数显仪会自动记录切向应力峰值,选取 6 个试样分别施加不同的法向压力进行上述直剪试验,试

验完成之后,将法向力及切向力峰值分别换算成法向应力及切向应力,绘制于图3中得出完整试样剪切破坏法向应力-切向应力曲线图,对图中的应力点进行线性拟合,得到应力之间的关系为 $\tau = 3.438 + 1.14\sigma$ ,由此可见完整试样的黏聚力为3.438MPa,内摩擦角为48.75°。

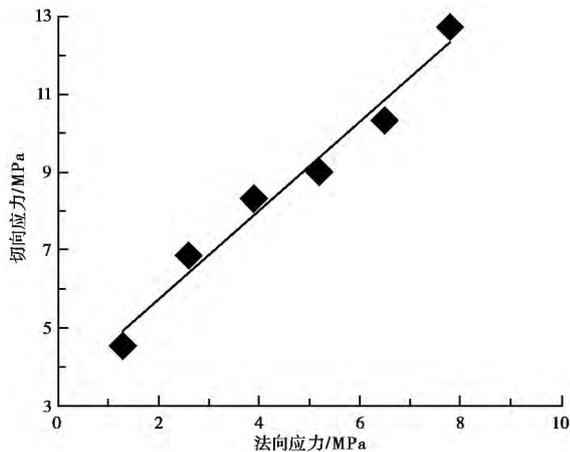


图3 完整试样法向应力-切向应力曲线图

Fig. 3 The complete sample of normal stress and tangential stress graph

对有石膏充填(厚度约1mm)和无石膏充填结构面的试样采用在 $1\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的剪切速率下进行反复剪切试验。

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,按设定速率进行剪切并开始读数,每当切向变形约0.5mm时便记录一次数据,直至剪切位移为10mm。一轮剪切完成之后,首先解除切向荷载,其次解除法向荷载,然后将百分表移开之后,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,对剪切后的试样进行拍照,至此一个试样的直剪试验彻底完成,随后准备下一个试样的剪切。

## 2 充填物对结构面剪切破坏机理的影响分析

选择一种法向应力下充填结构面跟不含充填结构面剪切曲线进行分析,因在1.56MPa法向应力下,结构面第1次剪切时因起伏角度不同产生不同

的剪切破坏方式能较全面地反映剪切情况,所以选择1.56MPa法向应力下的情况进行分析。

由图4可以看出,含充填结构面的抗剪强度比不含充填结构面的要小,剪切曲线也相对平缓,初始剪切段的相同位移处,含充填结构面需要的剪切应力较小,主要是由于其中充填物具有一定的润滑作用。图4a为10°起伏角结构面在含充填和不含充填情况下的剪切曲线,可以看出,充填之后,结构面剪切曲线变缓,抗剪强度减小,跟残余强度之间的差值也从1.15MPa减小为0.65MPa,同时法向位移峰值从1.02mm增加至1.18mm(图4b),说明充填之后结构面的爬坡效应增强,磨损破坏的形式体现得更加明显。

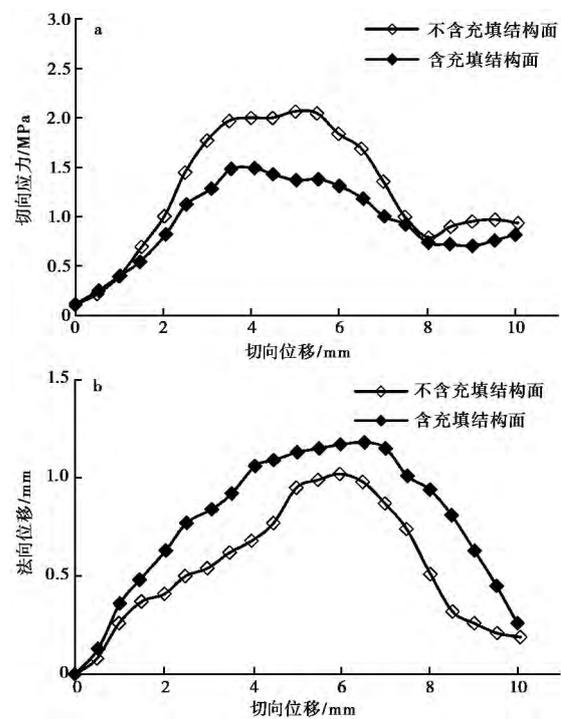


图4 不同充填状态10°起伏角结构面第1次剪切时切向应力和法向位移随切向位移变化曲线图

Fig. 4 Relationship between shear stress and normal displacement for the structure plane with different filling and inclination angle 10° under the first shear

a. 切向应力-切向位移曲线图; b. 法向位移-切向位移曲线图

图5为不同充填状态10°起伏角结构面第2次剪切时切向应力-切向位移变化曲线图,整体上含充填结构面的抗剪强度比不含充填结构面的要小,剪切曲线形态都很平缓,是典型的滑移破坏形式,不随剪切次数的改变而改变,由此推断第3次及以后的剪切过程中剪切形式均是滑移破坏的形态,这里不再赘述。

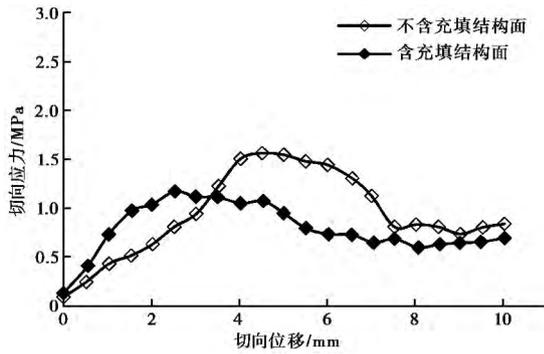


图5 不同充填状态10°起伏角结构面第2次剪切时切向应力-切向位移变化曲线图  
Fig. 5 Tangential stress tangential displacement curves of second shear planes with different degrees of filling at 10° of relief

图6a为20°起伏角结构面在含充填和不含充填情况下的剪切曲线,充填之后,结构面抗剪强度跟残余强度之间的差值从1.31MPa减小为0.91MPa,由于充填物对锯齿的保护作用,峰值法向位移从1.91mm增加为2.38mm,相对完整锯齿高度的减幅从40.50%减小为25.86%,结构面剪切破坏方式从上部剪断破坏变为滑移破坏。

限于篇幅30°、45°起伏角结构面在含充填和不含充填情况下的剪切曲线将不再列出,本文将不同起伏角度含充填与不含充填结构面在不同剪切次数时抗剪强度、残余强度、法向位移等参数值列于表1,根据表中数据可知充填之后切向应力达到峰值的位移有所增加,比不含充填结构面约推迟1mm,说明充填物的存在使结构面在剪切过程中的爬坡距离增大,因此测得结构面峰值剪胀位移充填之后有所增加,以45°起伏角为例,结构面峰值法向位移从0.81mm增加为1.73mm,锯齿高度减幅从83.80%减为65.40%,因此结构面从根部剪断破坏过渡为上部剪断破坏。

从表1中可以看出,充填之后,结构面抗剪强度跟残余强度都有所减小,法向峰值位移有所增大,证明充填物的存在起到一定的润滑和保护锯齿的作用,使结构面被剪断或磨损的程度减弱,同时基本上不会改变结构面的剪切破坏方式。

图7为30°起伏角含充填与不含充填结构面在1.56MPa法向应力下剪切6次之后锯齿表面破坏形态图,从图中能够看到,含充填结构面锯齿残留轮廓更清晰,反应了剪切过程中,充填物的存在使结构面被剪断或磨损的作用有所减弱的特点。

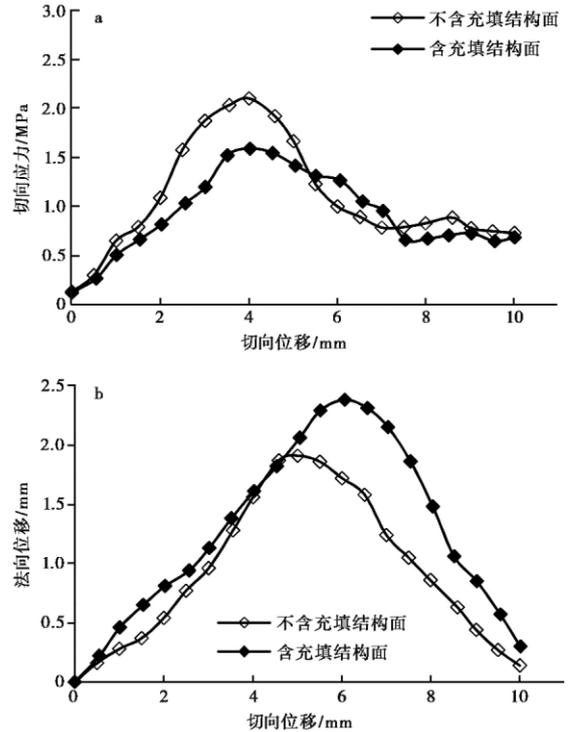


图6 不同充填状态20°起伏角结构面第1次剪切时切向应力和法向位移随切向位移变化曲线图  
Fig. 6 Relationship between shear stress and normal displacement for the structure plane with different filling and inclination angle 20° under the first shear  
a. 切向应力-切向位移曲线图; b. 法向位移-切向位移曲线图

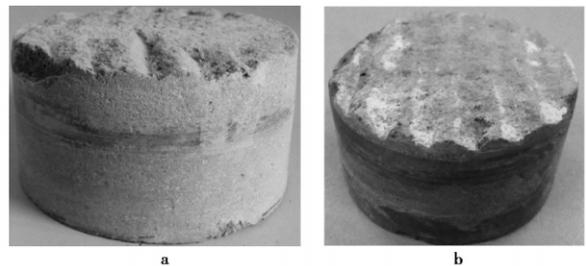


图7 1.56MPa法向应力下不同充填状态30°起伏角结构面剪切6次之后破坏表面形态示意图  
Fig. 7 Schematic diagram of the failure surface of the structure with different filling angle of 30° after shear stress under the normal stress of 1.56MPa  
a. 不含充填; b. 含充填

图8为剪断破坏与滑移破坏示意图,试验中试样所受法向压力较大时试样发生剪断破坏,其断面不规则较粗糙,表现为将预设起伏角切断;当试样所受法向压力较小时,其断面较平滑,表现为将预设起伏角磨平。

表1 1.56MPa 法向应力下含充填和不含充填结构面在不同剪切次数时强度和位移

Table 1 Strength and displacement of filling and non filling structural plane under different shear times and normal stress 1.56MPa

起伏角度	充填状态	剪切次数	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	剪切破坏方式
10°	不含充填	1	2.06	0.91	1.15	1.71	1.02	0.69	滑动破坏
		2	1.56	0.81	0.75	1.02	0.87	0.15	滑动破坏
		3	1.33	1.07	0.26	0.87	0.63	0.24	滑动破坏
		4	1.18	1.01	0.17	0.63	0.48	0.15	滑动破坏
		5	1.13	0.94	0.19	0.48	0.38	0.10	滑动破坏
		6	1.06	0.91	0.15	0.38	0.31	0.07	滑动破坏
	含充填	1	1.40	0.75	0.65	1.71	1.18	0.53	滑动破坏
		2	1.17	0.67	0.50	1.18	1.10	0.08	滑动破坏
		3	1.05	0.66	0.39	1.10	0.87	0.23	滑动破坏
		4	1.02	0.70	0.32	0.87	0.79	0.08	滑动破坏
		5	0.94	0.68	0.26	0.79	0.70	0.09	滑动破坏
		6	0.91	0.69	0.22	0.70	0.58	0.12	滑动破坏
20°	不含充填	1	2.10	0.79	1.31	3.21	1.91	1.30	上部剪断破坏
		2	1.44	0.91	0.53	1.91	1.63	0.28	滑动破坏
		3	1.22	0.82	0.40	1.63	1.34	0.29	滑动破坏
		4	1.12	0.91	0.21	1.34	1.12	0.22	滑动破坏
		5	1.05	0.94	0.11	1.12	0.97	0.15	滑动破坏
		6	0.99	0.93	0.06	0.97	0.72	0.25	滑动破坏
	含充填	1	1.59	0.68	0.91	3.21	2.38	0.83	滑动破坏
		2	1.17	0.58	0.59	2.38	2.13	0.25	滑动破坏
		3	1.00	0.69	0.31	2.13	1.86	0.27	滑动破坏
		4	0.94	0.73	0.21	1.86	1.74	0.12	滑动破坏
		5	0.93	0.64	0.29	1.74	1.52	0.22	滑动破坏
		6	0.86	0.66	0.20	1.52	1.40	0.12	滑动破坏
30°	不含充填	1	2.38	0.69	1.69	4.33	2.13	2.20	上部剪断破坏
		2	1.26	0.81	0.45	2.13	1.87	0.26	滑动破坏
		3	1.09	0.83	0.26	1.87	1.53	0.34	滑动破坏
		4	1.02	0.88	0.14	1.53	1.29	0.24	滑动破坏
		5	0.98	0.81	0.17	1.29	1.01	0.28	滑动破坏
		6	0.95	0.73	0.22	1.01	0.84	0.17	滑动破坏
	含充填	1	1.89	0.60	1.29	4.33	2.68	1.65	上部剪断破坏
		2	1.08	0.59	0.49	2.68	2.25	0.43	滑动破坏
		3	0.92	0.67	0.25	2.25	2.07	0.18	滑动破坏
		4	0.82	0.75	0.07	2.07	1.94	0.13	滑动破坏
		5	0.77	0.74	0.03	1.94	1.67	0.27	滑动破坏
		6	0.76	0.68	0.08	1.67	1.51	0.16	滑动破坏
45°	不含充填	1	2.75	1.11	1.64	5.00	0.81	4.19	根部剪断破坏
		2	1.49	1.00	0.49	0.81	0.49	0.32	滑动破坏
		3	1.38	1.07	0.31	0.49	0.24	0.25	滑动破坏
		4	1.15	1.08	0.07	0.24	0.13	0.11	滑动破坏
		5	1.13	1.10	0.03	0.13	0.05	0.08	滑动破坏
		6	1.12	1.09	0.03	0.05	0.01	0.04	滑动破坏
	含充填	1	2.32	0.76	1.56	5.00	1.73	3.27	上部剪断破坏
		2	1.18	0.85	0.33	1.73	1.57	0.16	滑动破坏
		3	1.08	0.75	0.33	1.57	1.44	0.13	滑动破坏
		4	0.97	0.78	0.19	1.44	1.19	0.25	滑动破坏
		5	0.92	0.78	0.14	1.19	1.08	0.11	滑动破坏
		6	0.90	0.76	0.14	1.08	0.96	0.12	滑动破坏



图8 剪断破坏与滑移破坏示意图

Fig. 8 Sketch of shear failure and slip failure

a. 剪断破坏; b. 滑移破坏

### 3 充填物对结构面抗剪强度及残余强度影响分析

由前面剪切应力-位移曲线的分析可知,充填物的存在会使结构面抗剪强度发生变化,下面进行具体分析。

图9中可以看到,结构面充填之后的抗剪强度变化规律跟不含充填结构面相同,均是随着剪切次数的增加,抗剪强度逐渐减小,6次剪切之后,10°起伏角不含充填结构面与含充填抗剪强度分别减小1.003MPa、0.483MPa,减幅分别为48.62%、34.62%,20°起伏角不含充填与含充填结构面抗剪强度分别减小1.110MPa、0.730MPa,减幅分别为52.86%、45.91%,30°起伏角不含充填与含充填结构面抗剪强度分别减小1.429MPa、1.138MPa,减幅分别为60.04%、60.08%,45°起伏角不含充填与含

充填结构面抗剪强度分别减小1.629MPa、1.423MPa,减幅分别为59.26%、61.26%。由此可见,首次剪切为滑移破坏结构面(10°、20°),充填之后剪切6次降幅比不含充填结构面小;首次剪切为剪断破坏结构面(30°、45°),充填之后剪切6次降幅比不含充填大,主要因为若6次剪切均为磨损破坏,充填物的润滑作用使结构面每次剪切强度降幅都很小(图9a,图9b),若首次剪切为剪断破坏,第2次滑移破坏时在充填物的润滑作用下需要的剪切力比首次剪断小的多,降幅就比较大(图9c,图9d);另外,结构面充填之后,每一次的抗剪强度都比不含充填结构面的要小,且起伏角度越大,第1次剪切减小的幅度越小,10°起伏角减小0.668MPa,减幅32.38%,20°起伏角减小0.510MPa,减幅24.29%,30°起伏角减小0.486MPa,减幅20.42%,45°起伏角减小0.411MPa,减幅14.95%,说明起伏角度越小,充填物对结构面强度的减弱作用越大。

结构面充填之后黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 的变化规律不会改变,依然是起伏角越大,黏聚力和内摩擦角越大,具体结构面不含充填与含充填之后的 $c$ 、 $\varphi$ 值见表2,从表中可以看出,充填之后结构面的 $c$ 、 $\varphi$ 值都有减小的趋势,基本上,起伏角越大,两种强度参数值下降幅度越小。

由图10中可以看出,不论结构面起伏角度如何,结构面充填之后,残余强度都比不含充填时要小,但是残余强度随剪切次数的变化,没有固定的变化规律,而是在某个值附近浮动;另外,一般情况

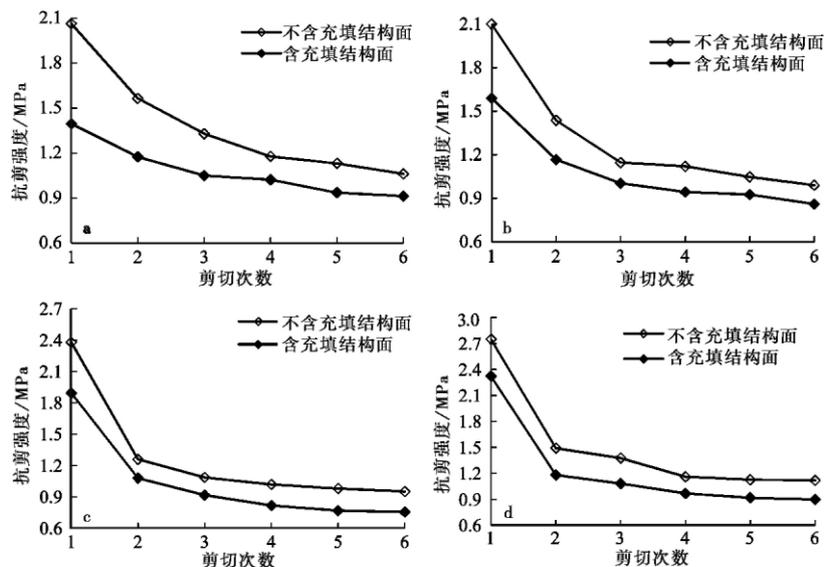


图9 1.56MPa法向应力下慢速剪切时含充填与不含充填结构面抗剪强度随剪切次数变化图

Fig. 9 Shear strength of the filling and non filling structure plane with the shear time and normal stress 1.56MPa

a. 10°起伏角; b. 20°起伏角; c. 30°起伏角; d. 45°起伏角

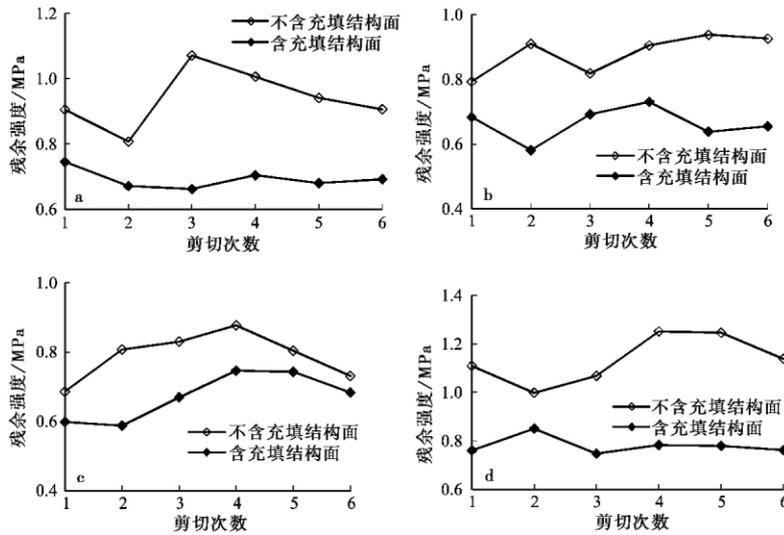


图 10 含充填与不含充填结构面残余强度随剪切次数变化图

Fig. 10 Residual strength of filling and non filling structure with shear times

a. 10°起伏角; b. 20°起伏角; c. 30°起伏角; d. 45°起伏角

表 2 不同起伏角度下不含充填与含充填结构面强度

Table 2 Strength of filling and filling structure with different fluctuation angles

起伏角度	不含充填结构面		含充填结构面		降幅/%	
	c/MPa	$\varphi/(^\circ)$	c/MPa	$\varphi/(^\circ)$	c	$\varphi$
10°	0.728	38.38	0.455	29.20	37.50	23.92
20°	0.797	41.22	0.532	36.02	33.25	12.62
30°	1.006	43.11	0.720	37.56	28.43	12.88
45°	1.257	46.40	0.881	43.05	29.91	7.22

下,同一起伏角度下,含充填结构面残余强度的最大值跟最小值之间的差值比不含充填时要小,比如10°起伏角结构面,不含充填时残余强度最大值跟最小值之间差值为0.199MPa,充填时的差值为0.083MPa,45°起伏角结构面,不含充填时残余强度最大值跟最小值之间差值为0.253MPa,充填之后差值为0.09MPa。

## 4 结论

通过室内直剪试验,研究了结构面在重复剪切作用下的破坏形式、抗剪强度、残余强度等的变化规律,通过对各种因素下的试验结果进行分析整理,得出以下结论:

(1) 充填之后,结构面的剪切破坏方式基本不会改变,法向应力和起伏角度越大,剪切破坏方式越容易从滑移破坏转变为剪断破坏,但是由于充填物

的润滑作用,对结构面锯齿具有一定程度的保护性,使剪切过程中爬坡效应增强,从而导致剪切过程中的剪断或磨损作用有所减弱。

(2) 充填之后,结构面每次剪切时的抗剪强度都有所减小,第1次剪切时减小得最多,起伏角越大,第1次减小的幅度越小,但是,整体上结构面抗剪强度随剪切次数的变化规律几乎没有改变,同样是随剪切次数的增加不断减小,减小的幅度也越来越小,充填之后,抗剪强度减小的速率更加缓慢。

(3) 充填之后,结构面抗剪强度有所减小,但仍然没有固定的变化规律,也是在某个幅值范围内浮动,不过充填之后,这个幅值的范围有所减小。

## 参 考 文 献

Barton N. 1973. Review of a new shear strength criterion for rock joints[J]. *Engineering Geology*, 7(4): 287~332.  
 Barton N, Choubey V. 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. *Rock Mechanics*, 10(1-2): 1~54.  
 Barton N. 1976. The shear strength of rock and rock joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Abstracts*, 13(9): 255~279.  
 Cao W G, Wang J Y, Zhai Y C. 2012. Study of simulation method for the shear deformation of rock structural planes and interfaces with consideration of residual strength[J]. *China Civil Engineering Journal*, 45(4): 127~132.  
 Du S J, Zhu J D, Zhi H T. 2006. Shear tests on rock joints under different shear deformation histories[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(1): 56~60.

- Fu W B. 2013. Research on fine recognition of 3D roughness and shear failure mechanism for structure plane[D]. Nanjing: Hohai University.
- Guo S F, Qi S W, Li X X, et al. 2016. Strength and deformation characteristics of rock sample with discontinuities under numerical uniaxial compression simulation tests[J]. Journal of Engineering Geology **24**(5): 891~898.
- Hu Z, Liu Y R, Niu C Y, et al. 2015. Numerical simulation on mechanical response of rock mass due to trait of structural plane[J]. Journal of Engineering Geology **23**(5): 902~909.
- Landanyi B, Archambault G. 1977. Shear strength and deformability of filled indented joints [C] // International Symposium on the Geotechnics of Structurally Complex Formations. Capri, Italia, **1**: 317~326.
- Li H B, Liu B, Feng H P, et al. 2008. Study of deformability behaviour and failure mechanism by simulating rock joints sample under different loading conditions[J]. Rock and Soil Mechanics **29**(7): 1741~1752.
- Li X Y, Li J J, Wu J B, et al. 2005. The adjusted shearing strength formula of rough rock joint[J]. Journal of Hebei Institute of Technology **27**(1): 4~8.
- Lu Y L, Wang L G, Yang F, et al. 2010. Post-peak strain softening mechanical properties of weak rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering **29**(3): 640~648.
- Mirzaghobanali A, Nemicik J, Aziz N. 2014. Effects of cyclic loading on the shear behaviour of infilled rock joints under constant normal stiffness conditions[J]. Rock Mechanics Rock Engineering **47**(4): 1373~1391.
- Patton F D. 1966. Multiple model of shear failure in rock [C] // Proceedings of the 1st Cong. Lisbon: ISRM, **1**: 509~513.
- Wang X H, Wang M Y. 2006. Relation between rock-burst and rock post-peak behavior[J]. Rock and Soil Mechanics **27**(6): 913~919.
- Wang Y J. 2012. Experimental research on rock mass mechanic parameters based on structural plane association characteristics[D]. Nanjing: Hohai University.
- Xiao W G, Dui G S, Zhu Y P, et al. 2010. Study of constitutive model for single infilled jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering **29**(S2): 3463~3468.
- Xia C C, Song Y L, Tang Z C, et al. 2012. Shear strength and morphology characteristic evolution of joint surface under cyclic loads[J]. Journal of Central South University( Science and Technology) **43**(9): 3589~3594.
- Yin X J, Wang G L, Zhang C H. 2005. Study of constitutive model for rock interfaces and joints under cyclic shear loading[J]. Engineering Mechanics **22**(6): 98~103.
- Zhao J. 1998. A new JRC-JMC shear strength criterion for rock joint[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering **17**(4): 349~357.
- Zhang Q H. 1992. Determination of shear strength along rock stratum plane[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, **14**(S): 113~119.
- Zhang L H, Zhu Y L. 2000. Comment on methods of joint shear strength determination and present of new method[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology **25**(3): 50~53.
- Zhang L M, Wang Z Q. 2008. Stress solution of pressure on tunnel liner considering nonlinear softening of rock mass post-peak[J]. Rock and Soil Mechanics **29**(S1): 283~287.
- 曹文贵, 王江营, 翟友成. 2012. 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 **45**(4): 127~132.
- 杜守继, 朱建栋, 职洪涛. 2006. 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 **25**(1): 56~60.
- 傅伟斌. 2013. 岩体结构面粗糙度 3D 精细识别及剪切破坏机理研究[D]. 南京: 河海大学.
- 郭松峰, 祁生文, 李星星, 等. 2016. 含结构面岩体试样单轴强度与变形特征[J]. 工程地质学报 **24**(5): 891~898.
- 胡政, 刘佑荣, 牛超颖, 等. 2015. 基于结构面性状对岩体力学性质响应的模拟研究[J]. 工程地质学报 **23**(5): 902~909.
- 李海波, 刘博, 冯海鹏, 等. 2008. 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 **29**(7): 1741~1752.
- 李肖音, 李建军, 巫静波, 等. 2005. 粗糙岩石节理剪切强度的修正公式[J]. 河北理工学院学报 **27**(1): 4~8.
- 陆银龙, 王连国, 杨峰, 等. 2010. 软弱岩石峰后应变软化力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报 **29**(3): 640~648.
- 汪新红, 王明洋. 2006. 岩爆与峰后岩石力学特性[J]. 岩土力学 **27**(6): 913~919.
- 王亚杰. 2012. 基于结构面组合特征的岩体力学参数试验研究[D]. 南京: 河海大学.
- 肖卫国, 兑关锁, 朱玉萍, 等. 2010. 充填单节理岩体本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报 **29**(S2): 3463~3468.
- 夏才初, 宋英龙, 唐志成, 等. 2012. 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) **43**(9): 3589~3594.
- 尹显俊, 王光纶, 张楚汉. 2005. 岩体结构面切向循环加载本构关系研究[J]. 工程力学 **22**(6): 98~103.
- 赵坚. 1998. 岩石节理剪切强度的 JRC-JMC 新模型[J]. 岩石力学与工程学报 **17**(4): 349~357.
- 张全恒. 1992. 岩石结构面抗剪强度的确定[J]. 岩土工程学报, **14**(S): 113~119.
- 张林洪, 朱云兰. 2000. 现有结构面抗剪强度确定方法的评述及新方法的提出[J]. 昆明理工大学学报 **25**(3): 50~53.
- 张黎明, 王在泉. 2008. 考虑岩体峰后非线性软化的衬砌压力隧洞应力解[J]. 岩土力学, **29**(增1): 283~287.