人工结构面剪切试验及数值模拟分析

孙敬辉, 郑罗斌[2], 吉 锋[1]

(1. 成都理工大学 环境与土木工程学院, 四川 成都 610059; 2. 中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: [目的] 深入研究岩石结构面在剪切力学行为中三维形貌对抗剪强度的影响,揭示结构面的抗剪实质,为进一步认识结构面的性质提供依据。[方法] 采用三维激光扫描仪和 3 D 打印机完全重铸了人工制作的结构面试样,并且在室内进行 5 级法向应力下的直剪试验,记录下剪切前后的表面形貌。并且用 FLAC 3D 数值模拟软件模拟结构面在不同法向压力下的剪切力学运动,分析和总结剪切应力在结构面表面的分布规律。[结果] 结构面的峰值抗剪强度与法向压力和结构面三维形貌有关,在同一剪切力作用下,法向应力越大,剪切接触面积越大,剪切应力的大小和范围都增大,结构面表面高处的小凸起体被大量剪断,而在较低处的小凸起体损坏区则不明显,表明较高处的结构面凸起体较容易被剪断。[结论] 随着法向压力的增大,剪切应力的大小和范围都增大,区域并没有太明显的改变。

关键词: 结构面; 直剪试验; FLAC 3D 数值模拟; 三维形貌

文献标识码: B **文章编号**: 1000-288X(2019)01-0180-04 **中图分类号**: TV223.1

文献参数: 孙敬辉, 郑罗斌, 吉锋. 人工结构面剪切试验及数值模拟分析[J]. 水土保持通报,2019,39(1): 180-183. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.01.029; Sun Jinghui, Zheng Luobin, Ji Feng. Shear test and numerical simulation of artificial joints[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(1):180-183.

Shear Test and Numerical Simulation of Artificial Joints

Sun Jinghui, Zheng Luobin[2], Ji Feng[1]

(1. *College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan* 610059, *China*; 2. *Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei* 430074, *China*)

Abstract: [Objective] To study the effect of three-dimensional topography on shear strength and reveal the shear essence of structural plane, in order to provide the basis for understanding the properties of structural plane. [Methods] A 3D laser scanner and a 3D printer was used to completely recast the artificially fabricated structural interview samples. The direct shear test was conducted indoors under the normal stress level 5, to record the surface topography change before and after shearing. The FLAC 3D numerical simulation software was used to simulate the shear mechanical movement of the structural plane under different normal pressures. The distribution of shear stress on the surface of structural plane was analyzed and summarized. [Results] The peak shear strength of the structural plane was related to the normal pressure and three-dimensional topography of the structural plane. Under the same shearing force, with the larger normal stress, the shearing contact area, the shearing stress and the scope of the shearing stress were larger. The small bulge at the top of the structural plane surface was significantly sheared, but the damage area of the small bulge at the lower part was not obvious, indicating that the bulge at the higher part of the structural plane was easier to be sheared. [Conclusion] With the increase of normal pressure, the magnitude and range of shear stress increase, but the region does not change obviously.

Keywords: **rock mass joint; direct shear test; FLAC 3D numerical simulation; three-dimensional surface**

收稿日期:2018-07-11 **修回日期**:2018-08-14

资助项目:地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自由探索课题资助"结构面直剪试验研究"(SKLGP2017Z008)

第一作者:孙敬辉(1992—),男(汉族),河北省邢台市人,硕士研究生,主要从事工程地质勘查及地质灾害治理方面的工作。E-mail:930274459@qq.com。

节理抗剪强度影响着岩体的强度和稳定性。目前,室内直剪试验是获取节理强度参数的常用方法。然而,节理的抗剪强度非常依赖于节理表面形貌,随着现代测量技术和试验材料的发展,很多在三维层面上反映节理形貌参数与抗剪强度关系的模型公式被提出来[1-3]。

Patton[4]用石膏制作了锯齿状结构的节理,研究了爬坡效应和切齿效应并且提出了著名的双直线强度模型。该模型首次提出起伏角的剪胀效应,并且引入到摩尔—库伦摩擦定律之中。Ladanyi 等[5]通过假定凸起体面积占节理总面积比例,分析了结构面剪切过程中的剪胀效应和剪断效应。Schneider[6]从结构面起伏角与法向正应力之间的相互关系着手,通过大量的模型试验得出抗剪强度经验公式。Barton 等[7-8]则以真实结构面为研究对象并在大量观察和试验的基础上,引入结构面粗糙度系数并提出了如下的著名的 JRC-JCS 模型:

$$\tau_p=\sigma_n\tan\left\{\mathrm{JRC}\lg\left(\frac{\mathrm{JCS}}{\alpha_n}\right)+\varphi_b\right\} \tag{1}$$

式中:τ_p——峰值抗剪强度;φ_b——基本摩擦角;JSC——结构面面壁强度;σ_n——法向应力;JRC——粗糙度系数。这个模型被广泛的运用于实践工程中。

以上结构面剪切强度模型大多是对结构面剪切方向上的一条剖面线的抗剪强度进行估算[9],实际上,岩体结构面是岩体中的三维面,具有一定的空间延展性,而结构面的抗剪强度也在很大程度上受到结构面三维接触及接触区域分布的影响,如果不考虑结构面三维效应,势必对结构面抗剪强度的正确估算产生影响。Grasselli 等[10]在大量岩石拉断面的直剪试验、模型试验和光学测量的基础上,提出了考虑结构面三维效应的抗剪强度模型。这是一个考虑三维形貌参数的预测模型。本文拟在室内试验和数值模拟的基础上,通过相似比材料,采用精准配比的混凝土浇筑而成的真实的结构面试样,对其进行直剪试验,分析剪切前后结构面形貌的变化和剪切应力的分布规律。以期为岩体结构在剪切情况下的力学特征提供工程依据。

1　人工节理直剪试验

1.1　试样制作

天然岩石结构面在取样过程上有一定的困难,并且结构面直剪试验做完一次后,结构面就遭到了破坏,这样的结构面无法重复利用试验,既没有代表性也使得成本花费大大提高[11]。因此,本研究采用混凝土相似材料制作结构面表面形貌完全相同的试样进行试验[12-13]。首先,采用手持式三维激光扫描仪和 3 D 打印技术复制了结构面三维形貌[14-15],并且用 PLA 材料打印成模具;其次,在模具上浇筑混凝土,浇筑时要预先涂上脱模剂以保证能够容易脱模。

试样上下盘的尺寸均为 100 mm×100 mm×50 mm;试样以水泥为胶凝材料,中粗砂、细砂为集料、细碎石为骨料,掺入减水剂、硅粉、绿色碳化硅等混凝土添加剂复合而成的高强度地质力学模型材料。相似材料[16]的配比方案为:$m_{水泥}:m_{砂}=1:1.5$,$m_{水泥}:m_{水}=1:0.3$,$m_{砂}:m_{碎石}=4:1$,减水剂参量 2%,早强剂参量 2%,硅粉参量 10%,碳化硅参量 15%。节理基本参数如表 1 所示。

表 1　节理基本参数

抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	基本摩擦角/(°)	弹性模量/GPa	泊松比
65.0	8	0	35	22.4	0.18

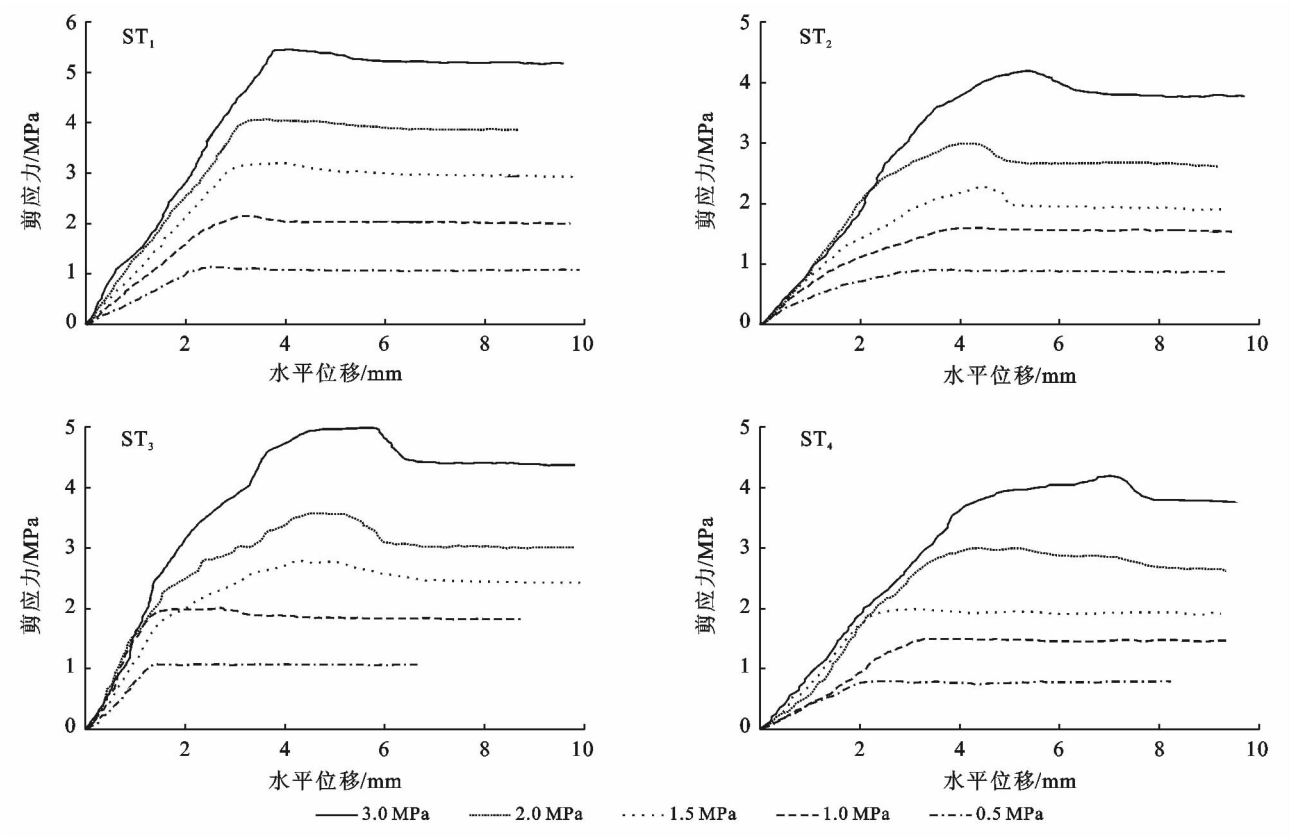
1.2　试验仪器

本次试验中采用的是成都理工大学研制的 XJ-2 型携带式剪切仪,该设备采用手动加载,分别配套了水平、垂向两套油压加载系统,包括油泵(2 个)、千斤顶 6 t(3 个)行程 3 mm、承受荷载的粗钢丝绳及荷载千斤顶钢丝绳套,竖向最大试验力 600 kN,水平最大试验力 600 kN;水平位移数据采集仪表两个(行程 30 mm,精度 0.01 mm),竖向位移采集仪表两个(行程 10 mm,精度 0.01 mm)。能够较好的满足本次试验荷载分级和位移采集的要求。

1.3　试验结果

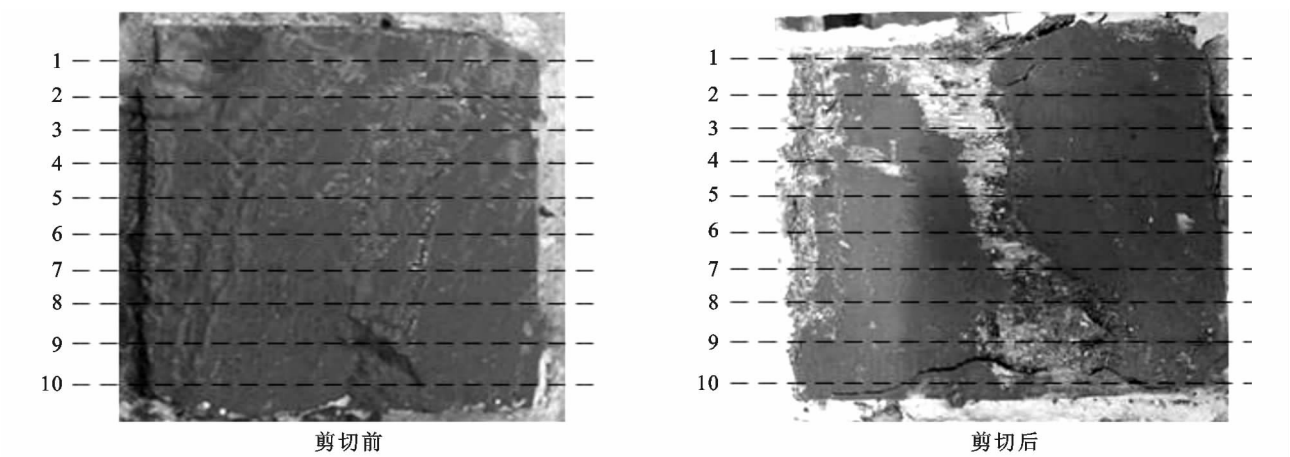
试件共分为 4 组共 20 个试件,为充分研究结构面剪切过程中正应力与剪切位移的关系,每种类型试件分别在的 0.5,1,1.5,2,3 MPa 的法向应力下进行剪切试验,加载方式为分步加载:先加法向力达到预定值保持不变,然后以一定速率施加切向力,一般为保证采样数据的密度要求,每级加载 0.2 MPa 进行一次数据采集,包括水平油压表读数、竖直向油压表读数、水平位移读数(2 个表读数取平均值)、竖向位移读数(2 个表读数取平均值),直至试件发生破坏,获得结构面剪切试验曲线和试验数据。利用计算结果绘制剪应力—水平位移曲线(4 组不同结构面形貌规律基本一致,如图 1 所示)。

为更清晰地反应结构面剪切试验完成后的破坏情况,试验中将结构面表面涂一层不影响结构面摩擦特性的红色的水粉染料(见图 2)。试验中还分别获取了在 3 MPa 法向应力下,剪切前后结构面的 10 条粗糙轮廓线,粗糙轮廓的平均下降高度为 1.03 mm,最大下降高度为 2.92 mm。



注:ST_1,ST_2,ST_3,ST_4 为 4 组不同形貌结构面的编号。

图 1 节理试样剪切位移—剪切应力特征



注:图中数字 1—10 为 10 条粗糙轮廓线的编号。

图 2 剪切前后的节理试样

2 数值模拟分析

为了详细研究结构面在直剪试验过程中的细观力学特性和破坏特征,用数值模拟的方法研究岩石结构面剪切试验时,必须对室内试验的参数完全进行还原。本试验选择了 100 mm×100 mm×50 mm 的上下两块岩石结构面试样,进行编程形成了立方体的研究模型,然后施加边界条件,固定结构面的下盘受到各个方面的约束力,在上盘上给予分布均匀的分布荷载,固定其值,最后给予侧向应力,其值变化区间为[1.0 MPa,10.0 MPa]。剪切荷载以剪切位移方式控制,剪切荷载速率为 5.0×10^{6} mm/step。

由剪切位移分别在 0.5 mm 和 4 mm 时对应的分别是结构面峰值抗剪强度和残余抗剪强度结果可知,不是所有的表面都受到剪应力的作用。受到剪应力作用的表面大都是面向剪切方向的,而且面向剪切方向表面倾角越大,剪应力越大。给出了法向应力0.5,1,1.5,2,3 MPa 时,对应的结构面峰值抗剪强度和残余强度应力分布,由应力分布可知,随着方向应力的增加,结构面受剪应力影响的范围随之增大。

从直剪试验和数值模拟试验得到的剪切前后的二维剖面线和三维表面的应力分布结果可以得到如下结论：

(1) 结构面应力分布规律。从不同法向应力下的剪切应力结果可以看出剪切应力的分布规律是，随着法向压力的增大，剪切应力的大小和范围都增大，随着法向压力的增大，剪应力区域并没有太明显的改变。剪应力最大值是在产生剪应力的部分结构面的中上部，而不是顶部；而且是一些孤立的“岛”是这些“岛”，还有“岛”的基础主要承担剪应力，岛主要承担部分结构面上的小凸起部分的抗剪力，其次才扩大到是“岛”基，最后扩大到部分结果面，而且并不是所有表面都存在剪应力，只有结构面法线方向与施加的剪力方向小于 90°，对剪切提供抗力的表面上存在剪切力。

(2) 结构面剪切特性。从 HAC3D 生成的结构面模型结果可知，节理试样剪切位移—剪切应力曲线与传统规律基本一致，说明了试验数据的可靠性。在法向应力为 3 MPa 结构面的剪切破坏区域并不是包括整个结构面，而是只占了结构面全部面积的一部分，结构面的剪切接触面积与法向应力的大小有关，法向应力越大，剪切接触面积越大，这与数值模拟应力分布规律基本吻合。另外，结构面表面高处的小凸起体显著的被大量剪断了，而在较低处的小凸起体损坏区则不明显，结构面高度通过剪切试验平均被剪断下降了 1.03 mm，结构面最高处容易被剪切掉。

3　结 论

(1) 本试验基于节理的剪切运动机制及岩性相似材料理论，采用了一种配制高强度相似材料的配比方案为：$m_{水泥}:m_{砂}=1:1.5$，$m_{水泥}:m_{水}=1:0.3$，$m_{砂}:m_{碎石}=4:1$，减水剂参量 2%，早强剂参量 2%，硅粉参量：10%，碳化硅参量：15%，该配比方案可为进行岩体结构面试验的人员提供技术参考。

(2) 剪切应力的分布规律：随着法向压力的增大，剪切应力的大小和范围都增大，随着法向压力的增大，剪应力区域并没有太明显的改变。剪应力大小从施加剪切力的一端向另一端总体上呈增大趋势，而且并不是所有表面都存在剪应力，只有结构面法线方向与施加的剪力方向小于 90°，对剪切提供抗力的表面上存在剪切力。岩体结构面剪切破坏过程中，面向剪切方向的微小平面发挥主要抗剪作用，节理面的剪切破坏区域并不包括整个结构面，只占了结构面全部面积的一部分，节理面的剪切接触面积与法向应力的大小有关，法向应力越大，剪切接触面积越大。

[参 考 文 献]

[1] Develi K, Babadagli T, Comlekci C. A new computer-controlled surface-scanning device for measurement of fracture surface roughness[J]. Computer & Geosciences, 2001,27(3):265-277.

[2] Ge Yunfeng, Kulatilake P H S W, Tang huiming, et al. Investigation of natural rock joint roughness[J]. Computers and Geotechnics, 2014,55:290-305.

[3] Stimpson B. A rapid field method for recording joint roughness profiles[J]. International Journal of Rock Mechanics and mining, 1982,19(6):345-346.

[4] Patton F D. Multiple modes of shear failure in rock[C]// First Congress of International Society of Rock Mechanics. Lisbon, Portugal,1966:509-513.

[5] Ladanyi B, Archambault G. Simulation of shear behavior of a jointed rock mass[C]// Proceedings of the 11th U. S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS). California: Berkeley,1969:105-125.

[6] Schneider H J. The friction and deformation behaviour of rock joints[J]. Rock Mechanics. 1976,8:169-184.

[7] Barton N, Choubey V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock Mechanics and Rock Enginnering, 1977,10(1):1-54.

[8] Barton N. Review of a new shear-strength criterion for rock joints[J]. Engineering Geology, 1973,7(4):287-332.

[9] 杜时贵. 岩体结构面抗剪强度经验估算[M]. 北京：地震出版社，2005.

[10] Grasselli G, Wirthc J, Eggerb P. Quantitative three-dimensional descripition of a rough surface and parameter evolution with shearing[J]. International Journal of Rock Mechanics & mining Science, 2002,39(6):789-800.

[11] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京：科学出版社，1979.

[12] 吉锋，石豫川，冯文凯. 一种新型的结构面起伏形态测量工具接触打孔器的研制[C]// 第三届全国岩土与工程学术大会论文集. 成都：四川科学技术出版社，2009，651-653.

[13] 潘凯，谭洵，吉锋，等. 岩石硬性结构面粗糙度量化及其剪切试验研究[J]. 水利与建筑工程学报，2013，11(3)，41-44.

[14] 董秀军. 三维激光扫描技术及其工程应用[D]. 成都：成都理工大学，2007.

[15] 熊祖强，江权，龚彦华，等. 基于三维扫描与打印的岩体自然结构面试样制作方法与剪切试验验证[J]. 岩土力学，2015，36(6)：1557-1565.

[16] 杜时贵，黄曼，罗战友，等. 岩石结构面力学原型试验相似对料研究[J]. 岩石力学与工程学报，2010，29(11)：2263-2270.