DOI:10.19322/j. cnki. issn. 1006-4710. 2017. 04. 003

# 不同 JRC 岩石节理剪切力学性质研究

# 张志强, 郇久阳, 李 宁, 任艳婷

(西安理工大学 岩土工程研究所,陕西西安 710048)

摘要:以 Barton 提出的十条标准节理曲线为研究基础,利用离散元软件 PFC 建立岩石节理试样 模型,在不同法向应力下进行直接剪切试验,研究粗糙度系数 JRC 与抗剪强度峰值的关系,以及不 同 JRC、不同法向应力条件下试样裂纹的扩展规律。结果表明:离散元节理剪切试验模拟结果与 物理试验结果吻合较好。抗剪强度峰值随 JRC 和法向应力的增大而增大。试验过程中,裂纹产生 在节理位置处,并主要集中在较大凸起处;裂纹数随着节理 JRC 的增加呈增多趋势,并且法向应力 越大,裂纹数目线性增加。

关键词:节理;粗糙度;峰值抗剪强度;法向应力;裂纹 中图分类号:TU43 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-4710(2017)04-0390-06

#### Research on shear mechanical properties of rock joints with different JRCs

ZHANG Zhiqiang, HUAN Jiuyang, LI Ning, REN Yanting

(Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China) **Abstract:** Ten standard jointed curve proposed by Barton is taken as the research foundation with the model of rock joint generated and direct shear tests under different normal stresses conducted by PFC. Relationship between *JRC* and the peak shear strength along with development rules of cracks at different *JRCs* and normal stresses are studied. The results show that test results of simulated joints correspond well with that observed from physical tests. The peak shear strength increases with the increase of *JRC* and normal stress. Micro-cracks are produced in joint and concentrated in larger fluctuation. The number of crack number increased with the increase of joint *JRC* and crack number increases linearly with the change of normal stress.

Key words: joint; roughness; peak shear strength; normal stress; crack

岩体中存在不同规模、方向、形态的结构面,如 裂隙,节理,断层等,不仅是岩体的薄弱环节,其力学 性质更控制着岩体的稳定性。Patton<sup>[1]</sup>经过大量节 理岩体剪切试验后总结发现节理表面粗糙性对节理 抗剪强度有重要影响。1973年,Barton<sup>[2-3]</sup>总结了 前人研究成果,在大量室内倾斜试验以及节理剪切 试验基础上提出了反映节理起伏状况的粗糙度系数 *JRC*,得到了著名的*JRC-JCS*模型,且提出了10条 标准 *JRC*节理曲线,并认为 *JRC* 处于 0~20 之间。

目前对于岩石节理力学性质的影响研究很多, 首先是众多学者基于天然含节理岩石的常规理论、 物理试验研究<sup>[4-5]</sup>;其次是借助模型材料砂浆、石膏 等制作节理试样,考虑不同角度对节理抗剪强度峰 值的影响<sup>[6-9]</sup>;随后就是目前应用较广的数值模拟方 法,通常采用有限元软件 ANSYS<sup>[10]</sup>、离散元软件 UDEC<sup>[11]</sup>、PFC<sup>[12-15]</sup>等。刘顺桂等<sup>[12]</sup>模拟了断续岩 石节理的剪切过程,对破坏形貌和剪切应力变化进 行了相应的讨论。Bahaaddini等<sup>[13]</sup>对含不同间距、 角度节理岩石试样进行数值建模,模拟了单轴压缩、 直剪条件下岩石的力学性质;Cho等<sup>[14]</sup>对完整岩石 样进行直剪试验,并与 PFC 模拟试验的结果进行对 比,破坏特征以及拉裂节理形状吻合较好;余华中 等<sup>[15]</sup>对天然单一岩石节理在抗剪过程中的细观特 性进行了研究,讨论了剪切过程中局部应力的变化 以及裂纹扩展。

以上研究提高了人们对岩石节理的力学性质的

收稿日期: 2016-04-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11572246)

作者简介:张志强,男,副教授,研究方向为岩体力学及岩土工程数值分析。E-mail:zhangzq87@hotmail.com

认识。但上述研究对具体节理的粗糙度系数 JRC 的考虑还不够深入,大多数节理为近似光滑的情况, 规则节理仅考虑了不同起伏角度的影响,而文<sup>[14-15]</sup> 中则只对特定节理的力学性质进行了讨论。因此本 文拟考虑节理表面粗糙度系数 JRC 的差异,借助离 散元软件 PFC 对岩石节理的抗剪过程进行模拟,探 讨不同法向应力下、不同 JRC 下岩石节理剪切过程 的宏观、细观力学特性。

# 1 岩石节理直剪试验模拟

#### 1.1 PFC 原理简述

PFC<sup>[16]</sup>是由 ITASCA 国际咨询公司开发的离 散元软件,主要应用在岩土工程领域,特别适用于研 究物理破裂等问题。PFC 模型中的基本要素是圆 盘或者圆球,统称颗粒。材料属性是通过颗粒的大 小、以及颗粒之间的接触属性来实现。颗粒之间则 满足离散元的通用力学原理,即符合牛顿第二定律。 在计算过程中,颗粒之间的接触关系应用力-位移方 程(物理方程),对于单个颗粒则应用牛顿第二定律 (运动方程),循环流程见图 1。





#### 1.2 岩石节理直剪试验模型建立及试验原理

岩石试样模型生成主要有以下几个步骤,首先 生成6道墙体围成一个封闭的区域。为了防止在试 验过程中发生颗粒的逃逸,墙体的长度超过试样的 长度或者宽度一定比例。然后在墙体围成的区域内 采用半径扩大法<sup>[16]</sup>生成满足一定空隙率的颗粒集 合体,继而减小颗粒之间的接触力,使模型达到自平 衡状态。生成颗粒的过程中,极少数颗粒会处于悬 浮状态,即与周围颗粒都不接触,因此其在模型计算 中并不起作用,反而影响计算时间,可利用 FISH 语 言编写命令将其消除。最后一步则是赋予模型细观 参数,为了使其模型宏观参数满足岩石的力学性质, 需要花费大量时间进行细观参数的调整。

本文通过模拟单轴压缩试验来确定试样的宏观 参数是否合理,压缩试验为无围压条件,试样宽度为 50 mm,高度为100 mm。试样模型由颗粒和接触组成,根据前人的研究成果<sup>[12-15]</sup>可知,本文模拟岩石材料采用接触黏结模型中的平行黏结模型(Parallel Bond)。

从图 2 中可以得到试样的单轴抗压强度为 27.5 MPa,峰值应变为 0.008,因此可以得到弹性模 量近似为 3.43 GPa。试样与岩石的力学性质吻合, 试样的细观参数见表 1。



图 2 应力应变曲线 Fig. 2 Stress-strain curve

表 1	试样细观参数
-----	--------

Tab. 1	Sample	mesoscopic	parameters
	1	1	1

参数	墙体	颗粒法	颗粒切	颗粒	试样孔
	刚度	向刚度	向刚度	密度	隙率
	$W-K_n/$	$K_n/$	$K_s$ /	ho/	prop
	(N/m)	(N/m)	(N/m)	$(Kg/m^3)$	
试样	1.5×10 <sup>10</sup>	1.5×10 <sup>8</sup>	1.5×10 <sup>8</sup>	2700	0.15
节理		1.5×10 <sup>8</sup>	1.5×10 <sup>8</sup>	2700	0.15
参数	摩擦	法向黏	切向黏	法向黏	切向黏
	系数	结刚度	结刚度	结强度	结强度
	fric	$pb-K_n/$	$pb-K_s/$	pb-ns/	pb-ss/
		(N/m)	(N/m)	Pa	Pa
试样	1.5	$1 \times 10^{12}$	$1 \times 10^{12}$	$3 \times 10^7$	$3 \times 10^7$
节理	0	0	0	0	0

生成的岩石直接剪切试样模型见图 3,模型大 小为 100 mm×100 mm,颗粒半径大小满足  $R_{min} \sim$  $R_{max}$ 的平均分布,其中  $R_{min} = 0.000 2$  m, $R_{max} =$ 0.000 4 m,颗粒总数 30 062 个。其主要由上、下剪 切盒组成,上剪切盒由 3 + 、4 + 、5 + 墙组成,下剪切 盒由 1 + 、2 + 、6 + 墙组成,试样中间的节理为光滑 节理,在此仅作示例。试验过程中,上部剪切盒以一 定速度向右移动,下剪切盒保持固定。为了研究不 同法向应力下岩石节理直剪试验,需要保证试样上 下表面所受法向应力在试验过程中保持恒定。这可 以通过自编 FISH 函数在试验过程中调整试样上下 表面(1 + 、4 + 墙)的速度来实现,因此试验效果更加 接近室内物理试验的情况。



图 3 岩石节理直剪试验模型 Fig. 3 Rock joint model for the direct shear test

试验中剪应力通过记录每特定计算步 2 # 墙与 6 # 墙的水平合力与剪切面积的比值来得到; 相应 的,剪应变定义为 5 # 墙的水平位移,这样通过后处 理程序即可得到岩石节理直剪试验完整的剪应力应 变关系。另外,为了保持试验结果的稳定,参考余华 中等<sup>[15]</sup>的方法,取上剪切盒的加载速度为 0.2 m/s。

# 1.3 节理选型

为了探讨节理粗糙度的差异对直剪试验结果的 影响,试验模型中节理的选择至关重要。其粗糙度 既不能简单归结于节理表面角度、高差的变化,也不 能无规律的随机产生。根据前人的研究可知,Barton<sup>[2-3]</sup>根据大量的试验研究提出了十条标准轮廓曲 线(见图 4)和著名的 *JRC-JCS* 模型,模型原理是根 据已知某结构面的壁岩抗压强度 *JCS*、法向的应力  $\sigma_n$ 、结构面抗剪强度  $\tau$  和岩石基本摩擦角  $\phi_b$ 的条件 下由式(1)进行 *JRC* 的反向计算:

$$JRC = \frac{\arctan \frac{\tau}{\sigma_{n}} - \phi_{b}}{\log_{10} \frac{JCS}{\sigma_{n}}}$$
(1)

序号 典型剖面 粗粒 1	糙度 0~2
2	2~4
3 4	4~6
4 0	6~8
5 8	~10
6	0~12
7	2~14
8	4~16
9	6~18
10	8~20
0 5 10 0	cm

图 4 10 条标准节理曲线 Fig. 4 Ten standard joint roughness profiles

节理标准轮廓曲线每条长度为 10 cm(横坐标投影),笔者通过扫描技术对 10 条曲线进行高精度数据 扫描,获取 5 000 个坐标点,采样精度高达 0.02 mm。 在 PFC 岩石节理试样模型中,节理数据通过 JSET 命令进行设置,节理小段为 100 段,表面起伏 高度接近标准轮廓曲线。节理设置完成后,采用去 除黏结法<sup>[16]</sup>将节理位置处的接触黏结模型参数取 为 0,为了能更加凸显节理表面粗糙起伏在直剪试 验中的相互作用效果,摩擦系数 fric 也取为 0。至 此,岩石节理试验模型建立完成。

# 2 直剪试验宏观力学性质分析

首先进行不同法向应力作用下、不同粗糙度岩 石节理的抗剪强度规律分析,法向应力综合考虑取 0.5 MPa、1 MPa、1.5 MPa、2 MPa、2.5 MPa 和 3 MPa,粗糙度设置方法见上节所述,取 4 组,JRC 分 别为 2~4、6~8、10~12 和 14~16,计算得到的节 理抗剪强度峰值结果汇总于表 2 中。可以看出,节 理粗糙度 JRC 以及法向应力不同时均对抗剪强度 峰值的数值产生很大影响。

表 2 抗剪强度峰值结果 Tab. 2 Results of peak shear strength

法向应	不同 JRC 下的峰值抗剪强度/MPa			
力/MPa	$2\!\sim\!4$	$6\!\sim\!8$	$10\!\sim\!12$	$14\!\sim\!16$
0.5	0.814	1.659	2.183	2.557
1	1.264	1.926	2.605	3.263
2	1.974	2.531	3.565	4.182
3	2.336	3.051	4.164	4.350

图 5 给出了在不同法向应力下岩石节理粗糙度 JRC 对试样抗剪强度峰值的影响规律, 拟合函数曲 线采用线性关系。可以看出 JRC 与抗剪强度峰值 相关性很好:随着岩石 JRC 的增加, 抗剪强度峰值 线性增大。



图 5 不同 JRC 条件下抗剪强度峰值变化曲线 Fig. 5 Curves of peak shear strength under different JRCs

从图 6 中节理粗糙度相同时法向应力对试样 抗剪强度峰值的影响规律可以看出:随着法向应 力的增大,节理抗剪强度峰值线性增加,且两者的 相关性很强,这与前人在物理试验基础上得到的 规律一致。



图 6 不同法向应力条件下抗剪强度峰值变化曲线 Fig. 6 Curves of peak shear strength under different normal stresses

# 3 直剪试验细观力学性质分析

常规物理试验中,含节理岩石试样在剪切过程 中的细观破坏过程很难得知,通常需要采用高精度 扫描仪对剪切过程中的节理表面进行扫描,进而运 用图像处理技术加以分析解析。这种方法不仅对设 备要求高、费时费力、误差高,且不易获得可用的结 果。相比,离散元分析软件 PFC 在这方面具有很大 的优势,通过命令流可以实时监测节理岩石剪切过 程中的细观属性变化,其中以裂纹最为形象直观。

#### 3.1 直剪过程裂纹发育特征

为研究岩石节理在直剪过程中试样内部微裂纹的发育情况,在命令流中添加 crk 裂纹追踪语句,并 对裂纹数目进行追踪和分析。为了研究剪切过程节 理周围裂纹的扩展规律,现以节理试样(*JRC*=14~ 16)在法向应力为 3 MPa 时为例说明这一问题,其 他方案规律一致。图 7 给出了其剪切应力-剪切位 移曲线以及裂纹总数随剪切位移变化曲线,横坐标 为剪切位移,纵坐标为剪切应力以及裂纹数目。



图 7 剪切过程中剪切应力及裂纹数变化曲线 Fig. 7 Change curves of shear stress and crack number in the shear process

从图 7 可见,试样剪切开始后,随着剪切位移的 增长,剪切应力逐渐增加,在剪切位移 2.2 mm 时达 到最大值 4.35 MPa,然后逐渐下降至 1.6 MPa,保 持恒定。从裂纹数量来看,在剪切位移在 0~2 mm 过程中,试样内部并没有裂纹产生;当剪切位移略微 大于 2 mm 以后,试样开始产生裂纹,结合应力位移 曲线来看,此时剪应力为最大值稍前处;当剪切位移 在 2~3 mm 之间时,裂纹数目急剧增长,剪应力急 剧下降;当剪切位移在 3 mm 至 3.8 mm 之间时,裂 纹扩展速率下降,但数目仍然保持增加的趋势,此时 剪应力将至最低,并保持恒定。

#### 3.2 节理试样剪切后裂纹分布特征

从上文的模拟试验计算结果可知,岩石节理表 面粗糙度 JRC 对抗剪强度峰值的影响很大,其本质 原因是节理表面的粗糙度不同,剪切过程中表面凸 起的相互接触挤压效果有很大差异。图 8 给出了不 同 JRC 节理试样剪切完成后,模型裂纹的直观显示 图。图中绿色为颗粒,红色和黄色为颗粒之间黏结 断裂后产生的裂纹,红色为拉裂纹,黄色为压裂纹, 本文裂纹数目取两者之和。



图 8 剪切过程后裂纹示意图 Fig. 8 Schematic diagram of crack after the shear process

从图 8 可以看出,节理 JRC 为 2~4 时,节理的 粗糙起伏并不明显,试样剪切过后裂纹稀疏且间断; 当 JRC 为 6~8 时,裂纹数明显增多,分布较广泛; 当 JRC 为 10~12 时,试样生成的裂纹在节理处分 布更广,并且在凸起处有集中现象;当 JRC 为 14~ 16 时,裂纹数目继续增加,分布并没有更广泛,而是 在较大凸起处产生明显的裂纹集中。

在法向应力以及试样参数一定的前提下,试样 节理的 JRC 值对剪切裂纹的扩展影响很大,整体表 现为 JRC 越大,裂纹数目越大。在裂纹分布方面, JRC 越大也导致了更多凸起的接触受力,产生明显 的裂纹集中现象。另外可以看出,无论 JRC 的数值 在何区间,仍然有部分节理段在剪切后并没有产生 裂纹,这种现象在 JRC 较小时愈明显,这也从另外 一方面说明了节理较平缓段在剪切过程中对抗剪强 度的贡献很小。

# 3.3 JRC 及法向应力对剪切后裂纹数的影响

表 3 给出了节理 JRC 以及法向应力不同时试 样剪切完成后产生的裂纹数目,节理 JRC 和法向应 力方案与前文相同。

表 3 裂纹数目结果 Tab.3 Results of crack number

法向应	不同 JRC 下剪切后裂纹数目/个			
力/MPa	$2 \sim 4$	$6\!\sim\!8$	$10 \sim 12$	$14 \sim \! 16$
0.5	19	49	75	109
1	22	57	82	115
2	32	60	100	134
3	46	68	114	150

根据表 3 中的数据,图 9 绘制了法向应力一定时,裂纹数与粗糙度 JRC 的关系曲线,横坐标为节理粗糙度 JRC,纵坐标为裂纹数。可以看出不同法向应力条件下,试样剪切后产生的裂纹数与 JRC 均呈正相关规律,即节理粗糙度越大,裂纹数目越多,与图 7 所示的图示规律吻合。



图 9 不同法向应力下 JRC 与裂纹数目关系曲线 Fig. 9 Curves of JRC and crack number under different normal stresses

从图 10 可以看出,当试样 JRC 不变时,作用于 试样上的法向应力越大,试样剪切完成后产生的裂 纹数目均有明显增多,且幅度稳定。



图 10 不同 JRC 条件下法向应力与裂纹数目关系曲线 Fig. 10 Curves of normal stress and crack number under different JRCs

裂纹是节理剪切过程中的微观特征,裂纹数目 越大,说明剪切过程中节理面破坏越明显,因此剪切 应力较大,相应的抗剪强度峰值也愈大。

# 4 结 论

对不同 JRC 节理岩石试样模型进行不同法向 应力下的直剪试验,研究不同 JRC、不同法向应力 对节理抗剪强度峰值以及微裂纹扩展的影响规律, 得到了以下几点结论:

 1) 岩石试样节理粗糙度越大,抗剪强度峰值越大;法向应力越大,抗剪强度峰值亦越大。数值试验 模拟结果与前人物理试验结果规律一致。

2)剪切过程中,抗剪强度未达到峰值以前,试 样产生的裂纹数极少;当抗剪强度达到峰值后,试样 裂纹产生速度急剧增大;当抗剪强度降至残余抗剪 强度后,裂纹产生速度明显减缓。

3)试验完成后产生的裂纹主要集中在节理表 面较大凸起处,数目随岩石试样节理粗糙度和法向 应力的增加呈增大趋势,最终导致剪切强度的增加。

#### 参考文献:

- [1] PATTON F D. Multiple modes of shear failure in rock [C] // Proceedings of the 1st Congress of International Society of Rock Mechanics, 1966, 1: 509-513.
- [2] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice [J]. Rock Mechanics, 1977, 10(1): 1-54.
- [3] BARTON N, BANDIS S. Effects of block size on the shear behavior of jointed rock [C] // Proceedings of the 23rd U. S. Symposium on Rock Mechanics, 1982, 739-760.
- [4] 陈蕴生,马立新,李宁,等.非贯通节理介质损伤演化 分形特征分析 [J].西安理工大学学报,2006,22(1): 1-4.

CHEN Yunsheng, MA Lixin, LI Ning, et al. An analysis of damaging evolution and fractional features of non-consecutive joint media [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2006, 22(1): 1-4.

- [5] 张志强. 非贯通裂隙岩体破坏细观特征及其宏观力学参数确定方法 [D]. 西安:西安理工大学,2009.
  ZHANG Zhiqiang. Meso-mechanical failure characteristics & macro-mechanical parameters estimation of fractured rock mass with non-penetrative fissures [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009.
- [6] 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 Haibo, FENG Haipeng, LIU Bo. 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.

 [7] 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): 1741-1746.

LI Haibo, LIU Bo, FENG Haipeng, et al. Study of deformability behavior and failure mechanism by simulating rock joints sample under different loading conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (7): 1741-1746.

[8] 沈明荣,张清照.规则齿型结构面剪切特性的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(4):713-719.

SHEN Mingrong, ZHANG Qingzhao. Experimental study of shear deformation characteristics of rock mass discontinuities [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 713-719.

[9] 罗战友,杜时贵,黄曼. 岩石结构面峰值摩擦角应力效 应试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(6): 1142-1148.

LUO Zhanyou, DU Shigui, HUANG Man. Experimental study of stress effect on peak friction angle of rock structural plane [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1142-1148.

 [10] 沈明荣,张清照.规则岩体结构面的蠕变特性研究
 [J].岩石力学与工程学报,2008,27(增刊 2): 3973-3979.

SHEN Mingrong, ZHANG Qingzhao. Study on creep characteristics of regular rock mass discontinuity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2): 3973-3979.

[11] 周峰,张鹏,王旭东.吻合度对节理力学特性影响的 细观数值试验[J].南京工业大学学报(自然科学版), 2015, 37(2): 85-90.

ZHOU Feng, ZHANG Peng, WANG Xudong. Influence of matching coefficient on joint mechanics characteristics based on meso-numerical analysis [J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 37(2): 85-90.

- [12] 刘顺桂,刘海宁,王思敬,等.断续节理直剪试验与 PFC2D 数值模拟分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008,27(9):1828-1836.
  LIU Shungui, LIU Haining, WANG Sijing, et al. Direct shear tests and PFC2D numerical simulation of intermittent joints [J]. Chinese Journal of Rock Mechan-
- ics and Engineering, 2008, 27(9): 1828-1836.
  [13] BAHAADDINI M, SHARROCK G, HEBBLE-WHITE B K. Numerical investigation of the effect of joint geometrical parameters on the mechanical properties of a non-persistent jointed rock mass under uniaxial compression [J]. Computers and Geotechnics, 2013, 49: 206-225.
- [14] CHO N, MARTIN C D, SEGO D C. Development of a shear zone in brittle rock subjected to direct shear [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(8): 1335-1346.
- [15] 余华中,阮怀宁,褚卫江. 岩石节理剪切力学行为的 颗粒流数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32 (7):1482-1490.

YU Huazhong, RUAN Huaining, ZHU Weijiang. Particle flow code modeling of shear behavior of rock joints [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1482-1490.

[16] ITASCA CONSULTING GROUP INC. PFC<sup>2D</sup> (particle flow code in 2D) theory and background [R]. Minnesota, USA: Itasca Consulting Group Inc., 2008. (责任编辑 王绪迪)