

断续节理直剪试验与 PFC^{2D} 数值模拟分析

刘顺桂^{1,2}, 刘海宁³, 王思敬¹, 胡波¹, 张晓平¹

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 福建省国土资源厅, 福建 福州 350001;
3. 华北水利水电学院, 河南 郑州 450011)

摘要: 在以往有关断续节理模型试验和数值模拟的研究基础上, 设计不同连通情况和法向应力的断续节理模型材料直剪试验, 并采用颗粒流离散元软件 PFC^{2D} 对模型试验进行全真数值模拟。以贯通节理试样、完整试样的剪应力-应变数值模拟曲线和模型试验曲线吻合作为 PFC 细观力学参数选取准则, 并利用获得的细观力学参数对共面断续节理试样直剪试验进行数值重现。对比分析数值模拟曲线和模型试验曲线, 对断续节理受剪贯通的力学机制进行研究。根据模型试验和数值试验的成果, 分析断续节理预剪面上应力随剪应变的演化过程, 发现剪切过程中的剪胀效应使得岩桥承担更多的压应力, 从而提高了岩桥的抗剪强度。对断续节理岩体在直剪加载条件下的破坏机制进行讨论, 将整个剪切过程分为线弹性阶段、初裂阶段、峰值阶段、峰后阶段及残余阶段 5 个阶段。

关键词: 岩石力学; 断续节理; 连通率; PFC^{2D}; 直剪; 抗剪强度峰值; 数值模拟; 岩桥

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2008)09-1828-09

DIRECT SHEAR TESTS AND PFC^{2D} NUMERICAL SIMULATION OF INTERMITTENT JOINTS

LIU Shungui^{1,2}, LIU Haining³, WANG Sijing¹, HU Bo¹, ZHANG Xiaoping¹

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Fujian Provincial Department of Land and Resources, Fuzhou, Fujian 350001, China; 3. North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou, Henan 450011, China)

Abstracts: The research results of model tests and numerical simulation in two different loading conditions, triaxial and direct shear, are summarized. By conducting model tests on integrated samples and intermittent joints samples, shear strengths under different normal stresses are obtained. Also, the changing trends of shear strength under various connectivity rates are analyzed. The entire process of direct shear test is numerically simulated using particle flow code in 2 dimensions(PFC^{2D}). In order to make the stress-strain curve of numerical simulation accord with experimental one about both integrated samples and through samples, the mechanical parameters between particles are adjusted. Through adopting the same particle geometric parameter, the numerical models of intermittent joints under different connective conditions are rebuilt. At the same time, the rock bridges and joints in testing samples with the fixed particle contacting parameters are endowed, and a series of direct shear tests are conducted. Then the failure process and mechanical parameters in both micro-prospective and macro-prospective are obtained. By synthesizing the numerical and testing results and analyzing the evolutionary process of stress and strain on intermittent joints plane, it is concluded that the shear strength of rock bridges is increased due to the centralization of compressive stress on it. At last, the failure mechanism of intermittent joints rock under direct shear condition is discussed, meanwhile, the whole shear process is divided into five phases, i.e. linear elastic phase, fracture initiation phase, peak value phase, after-peak phase and residual phase.

收稿日期: 2008-02-28; **修回日期:** 2008-04-16

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412702)

作者简介: 刘顺桂(1980-), 男, 2001年于济南大学城镇建设专业, 现为博士研究生, 主要从事岩体质量评价及力学参数方面的研究工作。E-mail: yetis@tom.com

Key words: rock mechanics; intermittent joints; connectivity rate; particle flow code in 2 dimensions(PFC^{2D}); direct shear; peak shear strength; numerical simulation; rock bridges

1 引言

岩体露头调查表明,天然岩体中长大、贯通的节理只占节理总数的很小部分,更多的是短小、断续的节理。如图1所示,雅砻江锦屏一级水电站左岸PD16平硐洞壁0.4 m×0.3 m的大理岩统计窗口内,方解石脉羽状发育,形成一组断续节理。如何分析断续节理岩体的破坏机制,评估其强度是岩体力学研究中的一大难题^[1]。

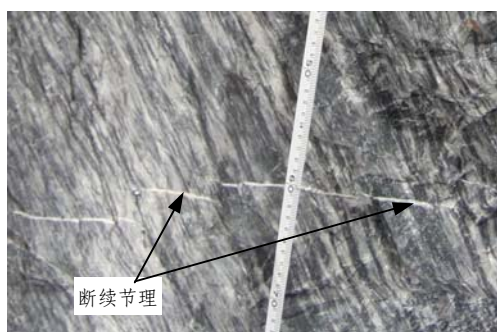


图1 含断续节理的大理岩体

Fig.1 Rock mass of marble with intermittent joints

模型试验一直是研究断续节理岩体力学行为的主要手段。综合已有的文献可知,断续节理模型试验加载方式主要有两种:一种为准三轴加载,另一种为直剪加载。准三轴试样中断续节理一般为雁形分布,而直剪试样一般则采用共面分布。

何江达和范景伟^[2]认为断续节理岩体的破坏主要是尖端应力集中造成的撕裂破坏,断续节理岩体的强度具有初裂和峰值两个特征值,实用时应根据不同的计算要求选取相应强度值。范景伟和何江达^[3]在试验的基础上,将模型从加荷到破坏的过程分为线弹性阶段、初裂阶段、峰值阶段及残余阶段。刘东燕等^[4]从分析断续节理岩体中岩桥的破坏模式出发,建立计算断续节理岩体极限强度的理论公式。朱维申等^[5]参照何江达和范景伟^[2]的试验方法研究后认为,节理岩体的破坏是从裂纹尖端区域局部拉伸破坏开始,雁形裂纹的起裂、扩展、贯通具有明显的阶段性。周小平等^[6]利用裂纹孤立原理结合裂纹线场理论,研究了压应力作用下断续节理线尖端的弹性区应力场和脆断区应力场,从理论上分析了

断续节理产生劈裂破坏的贯通机制,并且确定了断续节理岩体发生劈裂破坏的强度。

白世伟等^[7]通过直剪加载条件下的模型试验,研究了不同连通率断续节理的变形和强度特性及其相应的变化规律,初步探讨了岩桥的破坏机制。任伟中等^[8]在白世伟等^[7]模型试验研究基础上,建立共面闭合断续节理的初裂强度和贯通破坏强度准则。C. Gehle 和 H. K. Kutter^[9]为了方便观察断续节理在剪切过程中裂隙的发育情况,专门制作了一套不带剪切盒的模型材料直剪设备,试样尺寸最大可以达到1.0 m×1.0 m×0.3 m。他们在对不同角度雁形排列的断续节理模型材料试样进行大变形直剪试验后认为,断续节理的直剪过程可以分成三个阶段:第一阶段为节理端部裂隙发育,并将岩桥贯通阶段;第二阶段为剪破区的节理摩擦及剪胀阶段;第三阶段为大剪切位移后剪破面的滑移阶段。与其他试验相比,C. Gehle 和 H. K. Kutter^[9]的研究更注重对残余阶段的分析。刘远明和夏才初^[10]对断续节理岩体直剪试验研究进展进行了综述,认为已建立的强度准则所包含的重要参数还需深入研究,断续节理岩体节理闭合和剪切的本构关系有待建立。

由于试验条件所限,模型及现场试验过程往往难以全面观察到岩桥中裂隙的发育情况,尤其是微裂隙的发育情况。而数值模拟通过在计算机上的模拟计算,能全面再现试样在各种受力情况下的各方面力学行为,并能通过改变计算条件,获得一些新的认识,具有快捷、方便、经济、可重复性强等特点。

数值模拟断续节理力学行为的做法有两种:一种为针对某个问题采用某种力学理论编程实现;另一种为采用多用途商业软件模拟,如 RFPA, Itasca 公司的 PFC^{2D}, PFC^{3D} 等。

黄建安和王思敬^[11]用岩体工程中断裂力学数值分析原理,阐明了在含断续节理的岩体中进行数值模拟分析的基本方法和一般步骤。黄梦宏和唐礼忠^[12]采用岩石破裂过程分析(RFPA^{2D})系统,对岩石断续节理在压剪荷载作用下的声发射和位移特性进行分析,将断续节理岩石的变形和破坏过程分为线弹性阶段、节理面错动、节理尖端应力集中开裂、

岩桥应力集中和开裂 5 个阶段。刘刚等^[13]运用 RFPA^{2D} 研究了准三轴加载条件下断续节理岩体中裂纹的产生与扩展机制,认为共线节理的裂纹产生并不相互影响,裂纹扩展是各自独立地平行于压应力方向;当节理在压应力作用下产生的次生裂纹扩展到相邻节理后,岩体就会产生贯通裂纹面的破坏。杨成伟等^[14]采用 PFC^{2D} 模拟了剪切破坏、拉剪复合破坏和翼裂纹扩展破坏 3 种贯通破坏模式,认为岩桥的贯通破坏模式与岩桥倾角相关。

已有的研究从模型试验和数值模拟角度反复研究了断续节理在不同荷载条件下的裂纹扩展形式及破坏机制。但在数值试验对模型试验的仿真方法和模拟真实度方面的研究、剪切过程中微裂隙的数量随剪切变形的变化状况、剪切过程中预剪面上各点的应力分布及其在剪切过程中的演化情况 3 个方面却是鲜有涉及。

本文在总结已有研究成果的基础上,设计不同连通情况、不同法向应力的断续节理模型材料直剪试验,并采用颗粒流离散元软件 PFC^{2D} 对试验进行全真模拟。以贯通节理、完整试样的剪应力-应变数值曲线和试验曲线吻合作为 PFC 贯通节理、完整试样细观力学参数的选取准则,使参数具有确定性。利用它们的细观力学参数重构共面断续节理数值试样,对比分析数值模拟曲线和试验曲线,研究节理贯通的力学机制。

2 断续节理模型材料直剪试验

2.1 试样制作及试验仪器

模型材料选用冀特牌 52.5R 快硬硫铝酸盐水泥和河北三河市的细砂,质量比为水泥:砂:水 = 5:5:2。模型尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm。先将混合料倒入模具中捣实,按设计位置插入薄钢片,初凝后(捣实约 2 h)抽出,混合料在气凝过程中发热膨胀使裂隙面闭合。制作完成后的试样如图 2 所示。



图 2 连通率为 40% 的试样

Fig.2 Samples with connectivity rate of 40%

试验设备选用 RMT-150C 刚性双向伺服压力机。试验过程中,将试样装入预定位置,安装好相应传感器;以 0.5 kN/s 的速率向剪切盒施加预设法向荷载,伺服控制稳定法向力,以 0.005 mm/s 的变形速率施加水平剪切力。

2.2 试验工况

设计 4 组试验对完整试样、断续节理和贯通节理岩体进行研究。节理分布形态如图 3 所示,试验工况如表 1 所示。

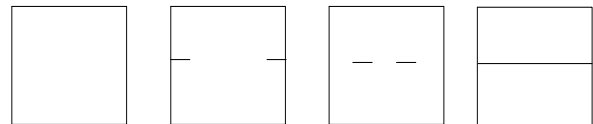


图 3 节理的 4 种分布形态

Fig.3 Four types of joints distribution

表 1 试样直剪试验工况

Table 1 Cases of direct shear tests on samples

试样编号	连通率 $\eta/\%$	备注
1~5	0	不同的节理连通情况均加
6~10	40(LB)	载 5 级,法向应力分别为
11~15	40(ZJ)	0.89, 1.78, 2.67, 3.56, 4.40
16~20	100	MPa

注: LB 表示节理分布在试样两边, ZJ 表示节理分布在试样中间。下同。

2.3 完整试样及节理面力学参数

由完整试样剪切数据确定的物理力学指标如表 2 所示。

表 2 完整试样物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of integrated sample

$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	σ_0/MPa	σ_t/MPa	E_t/GPa	ν	c_0/MPa	f
20.2	51.3	3.3	9.6	0.3	5.2	1.5

采用最小二乘法拟合各级法向应力下的剪力峰值得到贯通节理的摩擦因数 $f = 0.83$, 黏聚力 $c = 0.19 \text{ MPa}$ 。

2.4 断续节理力学参数

拟合各级法向应力下的剪力峰值得到不同节理分布形式的断续节理抗剪强度参数如表 3 所示。

由表 3 可以得到,随着连通率的增大,断续节理抗剪强度参数有所减小,其中黏聚力下降更为显著。同样的连通率,不同的节理分布形态有不同的抗剪强度参数,差异在 10% 左右。

表 3 不同连通率下断续节理的抗剪强度参数

Table 3 Shear strength parameters of intermittent joints with different connectivity rates

连通率/%	f	c/MPa
0	1.5	5.2
40(LB)	1.4	3.0
40(ZJ)	1.3	3.4
100	0.8	0.2

3 直剪试验的数值模型

3.1 颗粒元程序 PFC^{2D} 简介

PFC^{2D}(particle flow code in 2 dimensions)既可直接模拟圆形颗粒的运动与相互作用问题,也可以通过两个或多个颗粒与其直接相邻的颗粒连接形成任意形状的组合体来模拟块体结构问题^[15]。颗粒之间相互作用的本构模型有 3 种:接触刚度模型、滑动模型和连接模型^[16]。接触刚度模型的接触力和相应的变形之间呈线弹性关系,主要用来模拟松散颗粒体材料,用两个基本参数 kn , ks 来量度接触情况, kn 为两颗粒间的法向刚度, ks 为切向刚度;滑动模型不能承受法向拉力,但允许颗粒在受剪的情况下重叠、滑移,能模拟材料间的摩擦行为,用摩擦因数 $fric$ 来表征两颗粒间滑动摩擦状况;连接模型使颗粒集合体表现出高强材料的性质,能够提供抗拉、抗弯等力学响应。当某一集合内颗粒的平行连接力学参数(即 pb_kn , pb_ks , pb_nstren , pb_sstren)设为 0,集合的上、下接触面将表现出裂隙面的摩擦力学特性。

需要注意的是, PFC^{2D} 中涉及的 kn , ks , $fric$ 等细观力学参量表征的是颗粒间的力学行为,当颗粒按照这些参数组合后,集合体的宏观力学参数与细观力学参数有一定程度的相关性,但力学含义迥然不同。

通过程序自带的 FISH 语言, PFC^{2D} 程序在细观方面可以监测试验过程中试样内部各点的接触力、应力 - 应变及微裂隙数量等物理量的变化,宏观方面可以观察到试样表面裂隙的发育情况、试样整体的位移及试样宏观的应力 - 应变关系等。如果参数调整合理,其细观方面的功能能够弥补模型试验中的缺陷,最大限度地还原某种力学行为的本源现象。

本次数值试验在颗粒装配产生初始应力时采用接触刚度模型;直剪加载过程中采用滑动模型和平行连接模型,以模拟岩石材料;设定节理面范围内颗粒间的平行连接参数为 0,以模拟节理摩擦的力学行为。

3.2 直剪计算模型

按实际试样尺寸,建立 0.15 m×0.15 m 的二维计算模型,如图 4 所示。一共生成颗粒 3 941 个,粒径为 0.001 0~0.001 5 m,服从均匀分布,颗粒集合孔隙率为 0.14。

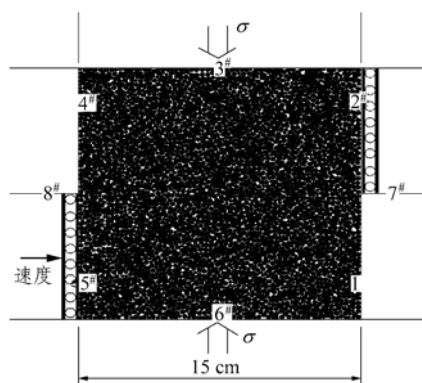


图 4 数值试验模型及加载边界条件

Fig.4 Model of numerical test and loading boundary conditions

参照 Y. R. Fu^[17]的 PFC^{3D} 直剪模型,在二维的计算模型中,以程序中定义的墙(wall)来替代剪切盒,其中下部 1#, 5#, 6#, 8#墙体组成下剪切盒,作为主动剪切盒,剪切加载过程中向右运动;2#, 3#, 4#, 7#墙体组成上剪切盒,剪切过程中保持位移不变;通过控制 3#, 6#墙体之间的位移伺服控制法向应力为预设值。记录每 100 时步 1#和 5#墙体所受的水平力之和为剪力,记录 1#墙体的位移为剪切位移,记录 6#体墙的位移为法向位移。装配颗粒后的数值试样及加载边界条件如图 4 所示。

根据试样尺寸、加载条件确定数值试样尺寸及荷载边界条件后,以数值模拟的剪应力 - 剪应变曲线与试验曲线最为吻合作为调参目标进行参数选取。反复试调后,选取粒子微力学参数如表 4 所示。

根据贯通节理、完整试样的细观力学参数重构的断续节理数值试验工况见表 5。

4 数值模拟和模型试验对比分析

4.1 完整试样及贯通节理的模拟

表4 PFC^{2D} 粒子微力学参数取值一览表
Table 4 Micromechanical parameters of PFC^{2D} particles

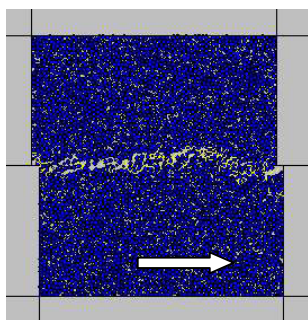
结构	kn /(N·m ⁻¹)	ks /(N·m ⁻¹)	W_{kn} /(N·m ⁻¹)	$fric$	pb_{kn} /(N·m ⁻¹)	pb_{ks} /(N·m ⁻¹)	pb_{nstren} /MPa	pb_{sstren} /MPa	$joint_dis$ /(10 ⁻³ m)
完整试样	1×10 ¹⁰	1×10 ¹⁰	1×10 ¹²	2.0	7×10 ¹²	7×10 ¹²	280	280	-
贯通节理面	1×10 ¹⁰	1×10 ¹⁰	1×10 ¹²	0.2	0	0	0	0	1.5

表5 直剪试验数值模拟工况

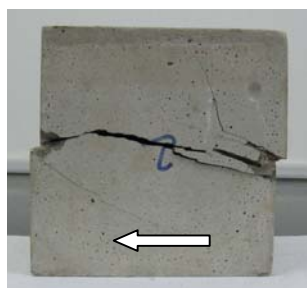
Table 5 Cases of numerical simulation of direct shear tests

试样编号	连通率 η /%	备注
1~5	0	
8~12	40(LB)	不同的节理连通情况均加载5级, 法向应力分别为0.89, 1.78, 2.67, 3.56, 4.40 MPa
13~17	40(ZJ)	
22~26	100	

采用表4的粒子微力学参数, 数值模拟得到法向应力为 2.7 MPa 时完整试样剪切后的破裂面与模型试验破裂面的比较, 如图5所示, 其破裂面型式基本一致, 均为略带弧形。



(a) 数值试验



(b) 模型试验

图5 法向应力为 2.7 MPa 时完整试样剪切后破裂面数值模拟与模型试验的比较

Fig.5 Comparison of fracture planes of integrated sample after shear obtained by numerical simulation and model test under normal stress of 2.7 MPa

数值模拟法向应力 2.7 MPa 作用下完整试样

的剪应力 - 剪应变曲线与模型试验曲线的比较见图6, 数值模拟法向应力 1.8 MPa 作用下贯通节理试样的剪应力 - 剪应变曲线与模型试验曲线比较见图7。模型试验曲线和数值模拟结果基本吻合。

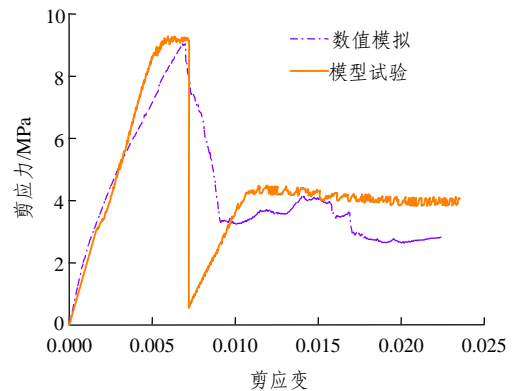


图6 法向应力为 2.7 MPa 时完整试样剪应力 - 剪应变曲线比较

Fig.6 Comparison of shear stress-shear strain curves of integrated samples obtained by numerical simulation and model test respectively under normal stress of 2.7 MPa

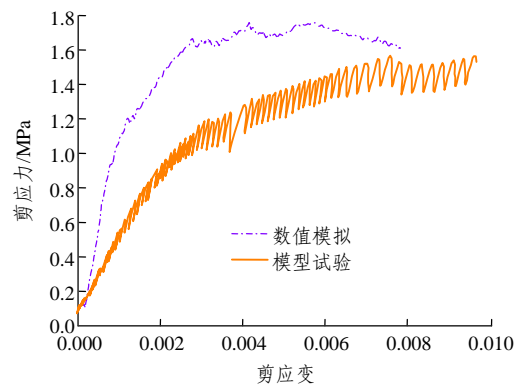


图7 法向应力为 1.8 MPa 时贯通节理试样剪应力 - 剪应变曲线比较

Fig.7 Comparison of shear stress-shear strain curves of sample with through joints obtained by model and numerical simulation under normal stress of 1.8 MPa

不同法向应力作用下模型试验剪切峰值与数值模拟

剪切峰值的比较如图 8, 9 所示。从图中可以看出, 完整试样、贯通节理试样数值模拟剪切峰值处于模型试验值的误差范围内。

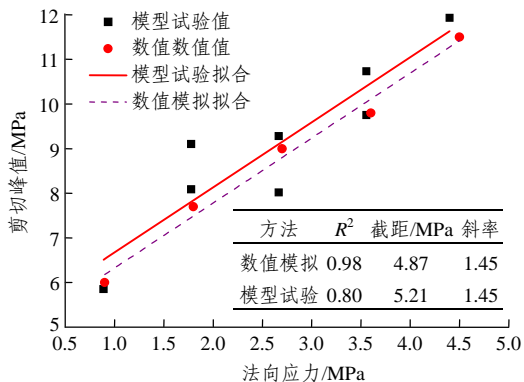


图 8 完整试样法向应力与剪切峰值拟合曲线

Fig.8 Fitting curves of integrated samples between normal stress and peak shear stress

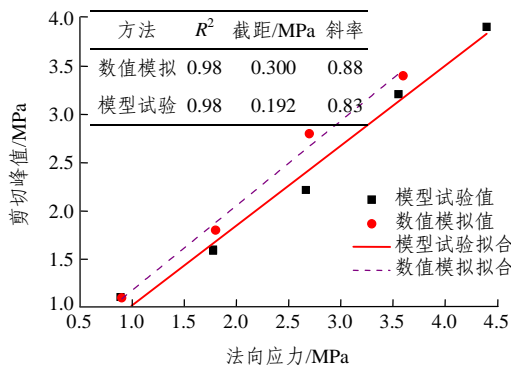


图 9 贯通节理试样法向应力与剪切峰值拟合曲线

Fig.9 Fitting curves of normal stress vs. peak shear stress of sample with through joints

对比分析表明, 采用表 4 中的粒子微力学参数完全可以模拟完整试样和贯通节理试样在直剪加载条件下的力学响应。因此, 利用同样的颗粒力学参数重构不同连通情况的断续节理数值试样, 对数值试样中的岩桥和节理分别赋予选定的颗粒接触参数进行一系列直剪试验, 应该可以获得断续节理试样的破坏过程及宏观力学参数。

4.2 断续节理的 PFC 数值模拟

利用完整试样和贯通试样的粒子微力学参数重构连通率为 40%(LB)的断续节理试样在法向应力为 2.7 MPa 时破坏后形态如图 10 所示。

对比分析表明, 与完整试样破坏后的弧形形态有所区别的是, 不管节理分布在试样中间还是在两边, 断续节理试样剪断后在岩桥上形成剪切核, 剪破区域呈“纺锤状”。

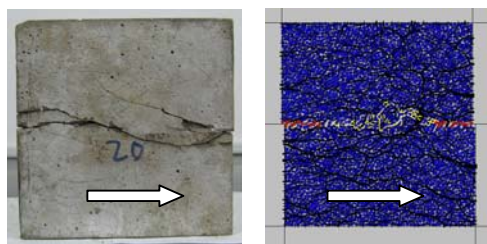


图 10 连通率为 40%(节理在两侧)的断续节理试样在法向应力为 2.7 MPa 时的破坏形态

Fig.10 Failure shape of sample with intermittent joints at two sides with connectivity rate of 40% under normal stress of 2.7 MPa

连通率为 40%(LB)的断续节理试样剪切过程中试样内发育微裂隙的数量、剪应力 - 剪应变关系曲线如图 11 所示。当剪应变为 0.002 时, 岩桥端部发生初裂, 随后裂隙数量有一个平缓增长阶段; 当剪应变为 0.006 时, 剪应力达到峰值, 峰值过后, 微裂隙数量急剧增加, 岩桥内已发育的裂隙贯通, 进入残余剪切阶段。

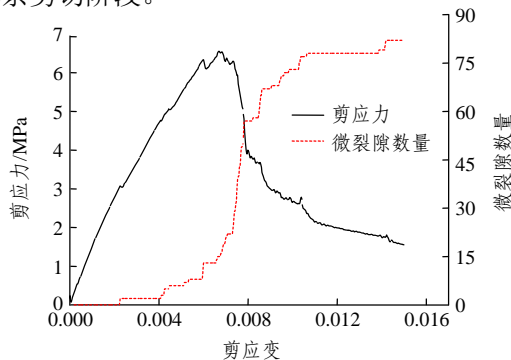


图 11 连通率为 40%(节理在两侧)的断续节理试样在法向应力为 2.7 MPa 时微裂隙数量、剪应力随剪应变的变化曲线

Fig.11 Variable curves of microcrack number and shear stress with shear strain of sample with intermittent joints at two sides with connectivity rate of 40% under normal stress of 2.7 MPa

不同法向应力下连通率为 40%(LB), 40%(ZJ)的断续节理试样数值模拟的剪切峰值与模型试验成果的比较如图 12, 13 所示。以完整试样和贯通节理的粒子微力学参数按照断续节理的几何形态重构的断续节理数值试样不同法向应力下的抗剪强度峰值与模型试验基本吻合。

5 断续节理预剪面上应力探讨

断续节理预剪面上剪应力随剪应变的变化情况是断续节理研究的核心问题之一, 通过研究断续节

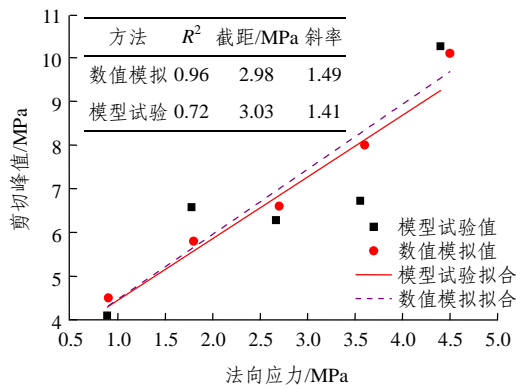


图 12 连通率为 40%(节理在两侧)的断续节理试样在各级法向应力下的剪切峰值拟合曲线

Fig.12 Fitting curves of peak shear stress of sample with intermittent joints at two sides with connectivity rate of 40% under different normal stresses

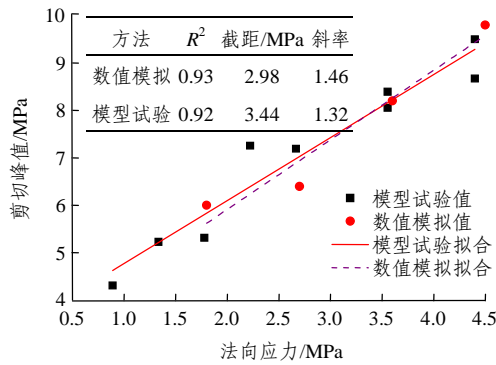


图 13 连通率为 40%(节理在中间)的断续节理试样在各级法向应力下的剪切峰值拟合曲线

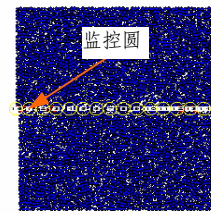
Fig.13 Fitting curves of peak shear stress of sample with intermittent joints at center with connectivity rate of 40% under different normal stresses

理预剪面上的剪应力演变,可以揭示断续节理的破坏机制。

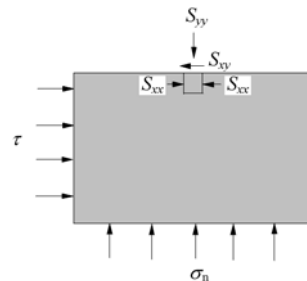
本文前几节对比分析表明,采用 PFC 软件可以高度仿真地对断续节理模型试验进行模拟,因此采用 PFC 软件可以还原断续节理剪切过程中的应力状态,借助软件的监控圆功能能够实时记录断续节理预剪面上的应力演化过程。

在数值试样预剪面上均匀布置 16 个监控圆,如图 14(a)所示,从左到右编号依次为 0~15,监控剪切过程中预剪面上各点应力状况。

图 15 为剪切过程中预剪面上剪应力 S_{xy} 分布曲线。在剪切过程中剪应力分布始终是不均匀的,随着剪应变的增长,预剪面上应力不断地进行重分布,在剪应变达到 0.67% 时,试样整体抗剪能力达到峰值,此时剪应力主要由岩桥承担,节理部分位置承担少量剪应力。



(a) 监控圆位置图



(b) 单元体受力分析图

图 14 监控圆位置及预剪面单元体受力分析图

Fig.14 Position of monitoring cycle and force diagram of cell cube in shear plane

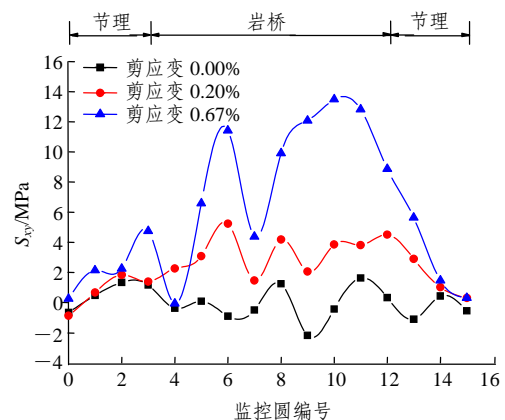


图 15 剪切过程中预剪面上剪应力 S_{xy} 分布曲线

Fig.15 Distribution curves of shear stress S_{xy} on pre-shearing plane during shear process

图 16, 17 表明,在剪切过程中岩桥上的水平压应力比法向压应力的集中程度更高。就岩桥和节理面上的压应力状态而言,无论是在水平方向还是法向,岩桥上的压应力平均值均比节理面高。随着压应力的提高,岩桥的抗剪能力得到增强。

6 断续节理直剪条件下破坏机制

综合数值模拟和模型试验成果,分析不同连通率的剪应力 - 剪应变曲线(见图 15)、微裂隙数量随剪应变变化曲线及法向变形随剪应变变化曲线,将断续节理剪切破坏过程分为如下几个过程:

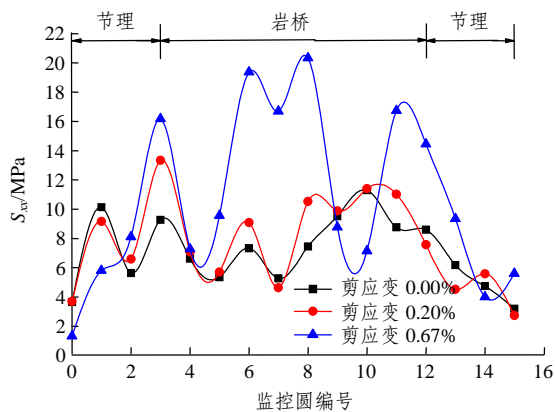


图 16 剪切过程中预剪面上水平压应力 S_{xx} 分布曲线
Fig.16 Distribution curves of horizontal compressive stress S_{xx} on pre-shearing plane during shear process

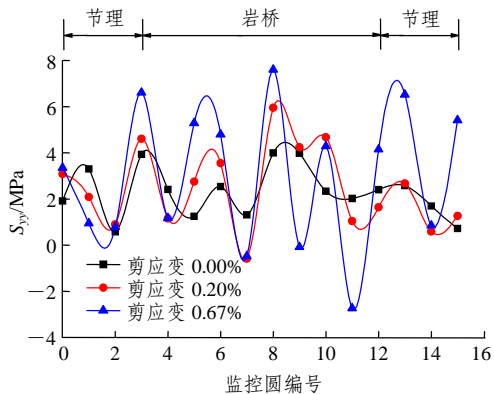


图 17 剪切过程中预剪面上法向压应力 S_{yy} 分布曲线
Fig.17 Distribution curves of normal compressive stress S_{yy} on pre-shearing plane during shear process

(1) 线弹性阶段。本阶段剪力增长相对较快。在一定的法向正应力下，由于剪力不足以克服节理面上的静摩擦力，预制节理面上、下无相对错动，剪切方向上的变形主要由上、下剪切盒中试件线弹性变形引起。随着剪切变形的增加，剪切面上应力在节理端部逐渐集中。本阶段节理面有闭合趋势。

(2) 初裂阶段。与岩桥连接的节理端部发生初裂后进入本阶段。发生初裂后，节理端部集中的应力得到部分释放，岩桥允许应变继续积累而微裂隙不发育。当应变能积累到一定程度后，岩桥再次发生连续微观脆断破裂，本阶段结束。

(3) 峰值阶段。在本阶段剪力急剧增长。材料自身在剪力的作用下找到最佳贯通裂隙，这时试件达到峰值强度，并发生脆断现象；在该阶段不时能听到由于试件局部微脆断而发出的轻微“啪”声，

微裂隙数量与剪应变曲线常呈锯齿状。随着剪应变的增加，试样本身找到能耗最小的破坏通道，裂隙贯通，同时剪力达到峰值。

(4) 峰后阶段。裂隙贯通后，上、下节理面重新契合，重新契合完成后，抵抗剪切荷载的能力逐渐增长，直至剪断面锯齿破坏。

(5) 残余阶段。上、下剪切面在法向应力的作用下由剪切破裂面提供残余剪切强度。

7 结 论

综上所述，可以得到以下几个方面的结论：

(1) 随着连通率的增大，断续节理抗剪强度参数有所减小，其中黏聚力下降更为显著。

(2) 同样的连通率，不同的节理分布形态有不同的抗剪强度参数，差异在 10% 左右。

(3) 采用 PFC 程序可以对断续节理直剪试验进行仿真模拟。选取适当的微粒子力学参数可以全面模拟断续节理直剪条件下的各种力学响应。

(4) 无论是节理面还是岩桥，在直剪过程中其剪应力、压应力分布并不均匀。总体而言，岩桥上的剪应力和压应力要远高于节理面上的应力状况。

(5) 断续节理岩体的抗剪强度主要由岩桥提供。在剪切过程中，岩桥和节理面上的应力发生重分布，岩桥上的压应力不断提高，从而提高了岩桥抗剪能力。

(6) 结合模型试验和数值模拟成果，断续节理岩体的剪切破坏过程可以分为 5 个阶段，分别为线弹性阶段、初裂阶段、峰值阶段、峰后阶段、残余强度阶段。

参考文献(References):

[1] 王思敬, 胡波, 刘顺桂, 等. 高拱坝坝基裂隙岩体精细结构与工程力学特性参数研究[R]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2007.(WANG Sijing, HU Bo, LIU Shungui, et al. Research on engineering mechanical parameters and fine structure for jointed rock mass of high arch dam base[R]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2007.(in Chinese))

[2] 何江达, 范景伟. 含一组未闭合断续节理脆性岩体强度特性[J]. 四川大学学报(工程科学版), 1990, 22(6): 57 - 64.(HE Jianga, Fan Jingwei. Strength characteristics of brittle rock mass containing a set of unsealed discontinuous joints[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 1990, 22(6): 57 - 64.)

- FAN Jingwei. The strength behavior of rock mass with a group of open intermittent joints[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science), 1990, 22(6): 57 - 64.(in Chinese))
- [3] 范景伟, 何江达. 含定向闭合断续节理岩体的强度特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1992, 11(2): 190 - 199.(FAN Jingwei, HE Jiangda. The strength behavior of rock masses containing oriented and closed intermittent joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1992, 11(2): 190 - 199.(in Chinese))
- [4] 刘东燕, 叶晓明, 朱凡. 断续节理岩体强度评价及承载力预测[J]. 重庆建筑大学学报, 1997, 19(2): 21 - 30.(LIU Dongyan, YE Xiaoming, ZHU Fan. The ultimate strength evaluation of rock mass containing intermittent joints[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1997, 19(2): 21 - 30.(in Chinese))
- [5] 朱维申, 陈卫忠, 申晋. 雁形裂纹扩展的模型试验及断裂力学机制研究[J]. 固体力学学报, 1998, 19(4): 355 - 360.(ZHU Weishen, CHEN Weizhong, SHEN Jin. Simulation experiment and fracture mechanism study on propagation of echelon pattern cracks[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1998, 19(4): 355 - 360.(in Chinese))
- [6] 周小平, 张永兴, 王建华, 等. 断续节理岩体劈裂破坏的贯通机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 8 - 12.(ZHOU Xiaoping, ZHANG Yongxing, WANG Jianhua, et al. Study on coalescence mechanism of splitting failure of rock masses with intermittent joints under compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 8 - 12.(in Chinese))
- [7] 白世伟, 任伟中, 丰定祥, 等. 平面应力条件下闭合断续节理岩体破坏机制及强度特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 635 - 640.(BAI Shiwei, REN Weizhong, FENG Dingxiang, et al. Failure mechanism and strength properties of rock mass containing close intermittent joints under plane stress condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(6): 635 - 640.(in Chinese))
- [8] 任伟中, 王庚荔, 白世伟, 等. 共面闭合断续节理岩体的直剪强度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1667 - 1672.(REN Weizhong, WANG Gengsun, BAI Shiwei, et al. Strength behavior of rock mass containing coplanar close intermittent joints under direct shear condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1667 - 1672.(in Chinese))
- [9] GEHLE C, KUTTER H K. Breakage and shear behavior of intermittent rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(5): 687 - 700.
- [10] 刘远明, 夏才初. 非贯通节理岩体直剪试验研究进展[J]. 岩石力学, 2007, 28(8): 1719 - 1724.(LIU Yuanming, XIA Caichu. Advances in research of rock masses containing discontinuous joints in direct shear test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1719 - 1724.(in Chinese))
- [11] 黄建安, 王思敬. 含断续节理岩体的断裂力学数值分析[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(3): 39 - 52.(HUANG Jian'an, WANG Sijing. Numerical analysis of fracture mechanics for rock mass with discrete joints[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 5(3): 39 - 52.(in Chinese))
- [12] 黄梦宏, 唐礼忠. 继续节理岩石破坏过程数值模拟研究[J]. 西部探矿工程, 2003, (4): 10 - 12.(HUANG Menghong, TANG Lizhong. Failure process of intermittent joints rock by means of numerical simulation[J]. West-China Exploration Engineering, 2003, (4): 10 - 12.(in Chinese))
- [13] 刘刚, 龙景奎, 王照华. 断续节理相互作用的数值模拟[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(2): 155 - 159.(LIU Gang, LONG Jingkui, WANG Zhaohua. Numerical simulation of interaction among intermittent joints[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2007, 24(2): 155 - 159.(in Chinese))
- [14] 杨成伟, 张文杰, 曾远. 节理岩体岩桥断裂扩展机制细观模拟[J]. 广东水利水电, 2007, (2): 18 - 20.(YANG Chengwei, ZHANG Wenjie, ZENG Yuan. Numerical simulation of the micro-mechanism about crack growth of rock bridge in jointed rock mass[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2007, (2): 18 - 20.(in Chinese))
- [15] 周健, 池永, 池毓蔚, 等. 颗粒流方法及 PFC^{2D} 程序[J]. 岩石力学, 2000, 21(3): 271 - 274.(ZHOU Jian, CHI Yong, CHI Yuwei, et al. The method of particle flow and PFC^{2D}[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(3): 271 - 274.(in Chinese))
- [16] Itasca Consulting Group Inc.. PFC^{2D}(particle flow code in 2 dimensions) theory and background[R]. Minnesota, USA: Itasca Consulting Group Inc., 2002.
- [17] FU Y R. Experiment quantification and DEM simulation of micro-macro behaviors of granular materials using X-ray tomography imaging[Ph. D. Thesis][D]. Baton Rouge, USA: Louisiana State University, 2005.