

DOI: 10.11779/CJGE201911020

三轴压缩作用下断续节理砂岩力学特性研究

邓华锋¹, 潘登¹, 许晓亮^{*1}, 支永艳¹, 段玲玲¹, 杨超¹, 张宇娜²

(1. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 2. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430015)

摘要: 节理岩体的力学特性直接影响工程岩体的安全。为了研究节理岩体的各向异性力学特性和破坏特征, 设计进行了 0°, 30°, 45°, 60°, 75° 和 90° 等 6 种角度断续节理砂岩的三轴压缩试验, 详细分析了节理倾角对断续节理岩体变形强度特征和破坏模式的影响。研究表明: ①在加载过程中, 随着围压增大, 断续节理砂岩应力-应变曲线的屈服阶段逐渐明显, 峰值强度和残余强度逐渐提高, 破坏时延性特征逐渐明显; ②随着节理倾角增大, 断续节理砂岩的变形模量、抗压强度、黏聚力和内摩擦角等力学参数均呈现先减小后增大的 U 型变化趋势; ③节理对岩样破坏裂纹的形成与开展具有明显的诱导和控制作用, 不同倾角岩样的破裂面均顺节理倾角方向发展, 当节理倾角与岩样计算破坏角接近的时候, 岩样的破裂面顺节理面开展, 变形和强度参数达到极小值; ④随着围压增大, 不同倾角断续节理岩体的变形和强度参数差别逐渐减小, 各向异性特征逐渐减弱; ⑤断续节理砂岩的破坏模式可分为张拉破坏、折线型的复合剪张破坏、沿节理面剪切破坏等 3 种类型, 节理倾角的分布决定了断续节理砂岩在加载作用下的变形破坏模式, 变形破坏模式的差异决定了断续节理砂岩变形和强度参数的各向异性特征。研究成果可为工程中节理岩体的各向异性特征分析提供较好的参考。

关键词: 断续节理; 节理倾角; 各向异性; 力学特性; 破坏模式

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)11-2133-09

作者简介: 邓华锋(1979—), 男, 博士, 教授, 主要从岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: dhf8010@ctgu.edu.cn。

Mechanical characteristics of intermittent jointed sandstone under triaxial compression

DENG Hua-feng¹, PAN Deng¹, XU Xiao-liang¹, ZHI Yong-yan¹, DUAN Ling-ling¹, YANG Chao¹, ZHANG Yu-na²

(1. Key Laboratory of Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area (China Three Gorges University), Ministry of Education, Yichang 443002, China; 2. Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430015, China)

Abstract: The mechanical properties of intermittent jointed rock mass directly affect the safety of engineering rock mass. In order to study its anisotropic mechanical properties and failure characteristics, the triaxial compression tests on the intermittent jointed sandstones with 6 joint inclination angles, 0°, 30°, 45°, 60°, 75° and 90°, are performed, and the effects of joint dip angle on the characteristics of deformation strength and failure modes of rock mass are analyzed. The results indicate that: (1) With the increase of confining pressure, the yield phase of stress-strain curve of intermittent jointed sandstone gradually becomes obvious, the peak and residual strengths gradually increase, and the characteristics of ductility are gradually obvious during destruction. (2) With the increase of joint dip, the deformation modulus, compressive strength, cohesion and internal friction angle of rock samples all present U-pattern change. (3) The joints have obvious induction and control effects on the formation and development of rock failure cracks. The fracture surfaces of the rock samples with different joint dip angles develop along the joint dip angle. When the joint dip angle is close to the calculated fracture one of the rock sample, the fracture surface of the rock sample is developed along the joint surface, and the deformation and strength parameters reach the minimum values. (4) With the increase of confining pressure, the difference of deformation and strength parameters of joints with different dip angles gradually decreases, and the anisotropy gradually weakens. (5) The failure modes of the intermittent jointed sandstone can be divided into three types: tensile failure, compound shear failure of fold line, and shear failure of joint surface, and the distribution of joint dip determines the deformation failure mode of sandstone under intermittent loading. The difference in deformation and failure modes determines the anisotropic characteristics of deformation and strength parameters of jointed sandstone. The research findings may

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679127, 51439003, 41602301); 三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学)开放研究基金项目(2018KDZ04)

收稿日期: 2019-01-29

***通讯作者** (E-mail: sichuan106@163.com)

provide a better reference for analyzing the anisotropic characteristics of jointed rock mass in engineering.

Key words: intermittent joint; joint angle; anisotropy; mechanical property; destructive mode

0 引言

自然界的岩体往往存在节理裂隙等大量微观或宏观的缺陷,这些缺陷直接影响岩体的变形稳定^[1]。在荷载作用下,节理裂隙是应力释放或应力集中的关键部位,往往决定了岩体结构的整体稳定^[2-3]。同时,节理的产状、间距、开度和切割度等直接影响节理岩体的力学特性,工程中岩体按贯通程度可以分为贯通节理和断续节理。

较多学者针对贯通节理岩体的变形特性、抗压强度、破坏模式等开展了大量研究。肖维民等^[4]基于单轴压缩试验将柱状节理岩体的破坏模式分为4种类型;孙旭曙等^[5-6]、李建林等^[7]开展了5种角度节理岩样的三轴加卸载试验,获得了节理岩体波速、变形和强度参数的各向异性特性,建立了节理岩体卸荷损伤等效力学模型;王芝银等^[8]等推导了弹性状态下节理岩体刚度系数解析解。总体而言,在贯通节理岩体各向异性力学特征、破坏模式等方面已经研究的比较深入。

工程岩体中不仅存在大量的贯通节理,也存在大量的断续节理(非贯通节理),随着工程岩体问题研究的深入,断续节理岩体的力学特性受到工程界和研究人员的重视。王乐华等^[9-10]进行了3种角度、3种切割度的断续节理砂岩加卸载试验,发现随着切割度增大,节理岩体加卸载力学特性降低趋势明显。由于成组断续节理岩体制样比较困难,较多学者采用相似材料模型试验和数值模拟方法进行了研究。Bobet等^[11-13]、陈洪凯等^[14]、张黎明等^[15]、蒲成志等^[16]、周辉等^[17]、陈新等^[18]、段国勇^[19]分别采用石膏、砂浆等相似材料制备了各种断续节理试样,分析了节理角度、贯通度、密度等对节理岩样变形破坏特征的影响机制;黄书岭等^[20]、葛云峰等^[21]、孟国涛等^[22]、梁正召等^[23]、卞康等^[24]采用多种软件分析了节理(包括成组节理)对岩体力学特性的影响,并提出了相关非贯通节理岩体的三维模拟技术。较多学者对断续节理的破坏模式及破坏机制也进行分析,徐靖南等^[25]基于模型试验,提出了共线节理岩体在压剪状态下的破坏模式;Lajtai^[26]基于断续节理石膏试样的直剪试验,将岩桥的破坏分为拉伸破坏、剪切破坏和极限破坏3种形式;Einstein等^[27]在Lajtai研究基础上,提出了节理岩体抗剪强度计算方法;杜景灿等^[28]在Lajtai理论模型基础上,提出了一个简化的岩桥破坏模型;刘远明等^[29]分析了剪切应力状态下共面闭合非贯通节理的受力特点,提出共面闭合非贯通节理岩体破坏机制。

大量相似材料模型试验和数值模拟分析为揭示断续节理岩体的力学特性和破坏机制奠定了较好的基础,但毕竟与真实的岩体材料有一定的差别,相关断续节理岩体变形、强度的各向异性力学特性,以及非贯通节理对节理岩体破坏的诱导作用和破坏模式影响规律有待进一步的研究完善。基于此,采用自主研发的节理切割设备,制备了多种倾角的断续节理岩样,通过三轴压缩试验分析其变形破坏特征。

1 试验方案

1.1 试样制备

试验用砂岩为绢云母中粒石英砂岩,微风化。按照《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)^[30]要求,制备直径50 mm、高度100 mm的标准圆柱形岩样。为了减少试样的离散性对试验结果的影响^[31],测定密度和超声波纵波波速对岩样进行筛选,选取密度 2.60 g/cm^3 左右,纵波波速 $(3000\pm 50)\text{ m/s}$ 的试样进行节理切割。在以往节理岩体试验和数值模拟分析中,节理切割的位置和尺寸存在多种情况,有的布置在试样的外侧,有的布置在试样的内部;在多种倾角节理岩样的制备中,为了便于试验结果的对比分析,有的控制岩桥的尺寸一致,有的控制节理的切割度(贯通度)一致。在本文试验中,主要分析节理倾角对断续节理岩体力学特性的影响,设定在岩样两侧切割节理,保持相同的节理切割深度。为了制备不同倾角的断续节理岩样,课题组自主研发了节理切割设备,如图1所示,切割机的主转轴上设有切割刀片,工作平盘可纵向和横向运动,工作平盘上方设有双向旋转平口钳,底座上设有读数盘,双向旋转平口钳带动被切割岩样可以在水平向 $0^\circ\sim 360^\circ$ 、竖向 $0^\circ\sim 90^\circ$ 旋转,可以实现不同角度、连通率成组节理的精确切割。



图1 自制的节理岩样切割机

Fig. 1 Self-developed cutting machine for jointed rock

为了较好地分析节理倾角对岩体力学特性的影响,断续节理倾角考虑了 0° (水平方向), 30° , 45° ,

60°, 75°, 90° (竖直方向) 6 种情况, 在试样两侧对称分布, 节理深度统一为 10 mm、宽度 1 mm, 如图 2 所示。制备好的典型岩样照片如图 3 所示, 每种倾角准备了 6 个试样。

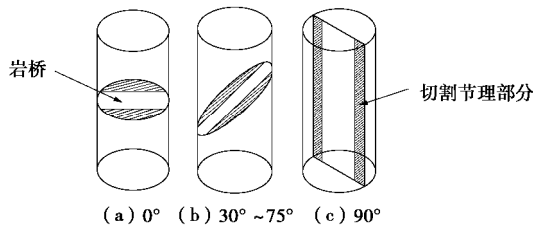


图 2 节理试样制备示意图

Fig. 2 Schematic diagram of preparation of jointed samples



图 3 断续节理砂岩试样照片

Fig. 3 Photo of jointed sandstone samples

1.2 试验方案

参考以往节理岩体的力学试验经验, 对制备好的不同倾角的断续节理岩样, 进行单轴压缩和三轴压缩试验 (围压考虑 5, 10, 20 MPa 3 种情况), 为了对比分析, 同时进行了一组完整岩样的三轴压缩试验, 力学试验在 RMT-150C 岩石力学试验系统上进行。

2 断续节理砂岩各向异性力学特性分析

2.1 应力 - 应变曲线特征分析

完整岩样和不同倾角、不同围压下断续节理砂岩的典型应力 - 应变曲线如图 4 所示。

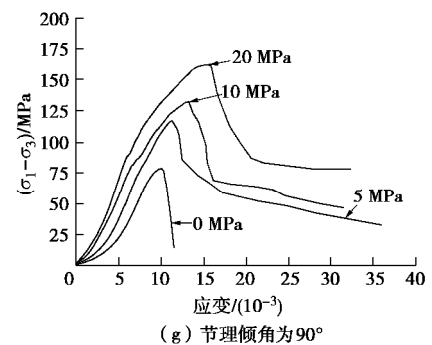
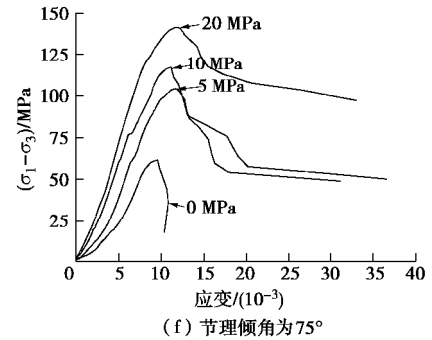
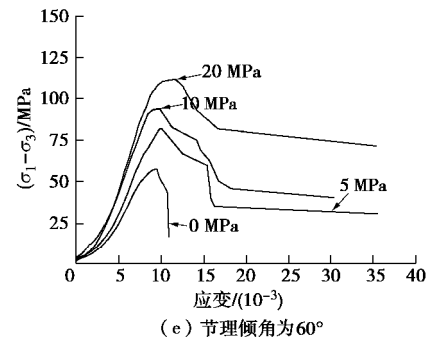
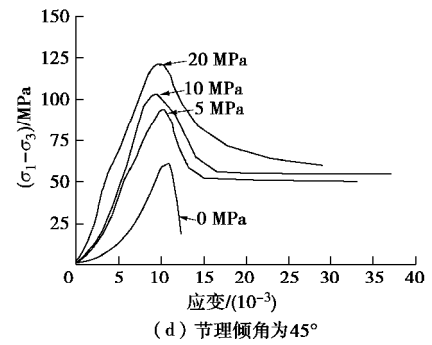
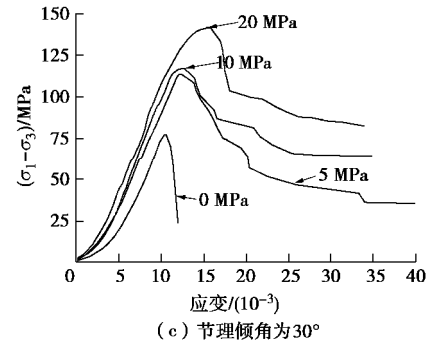
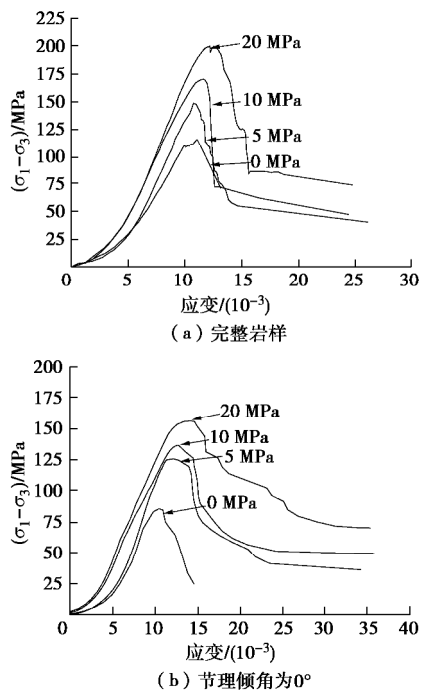


图 4 砂岩试样三轴压缩应力 - 应变曲线

Fig. 4 Triaxial compression stress-strain curves of samples

从图 4 可以看出:

(1) 不同围压下, 完整岩样和不同倾角断续节理

岩样的应力-应变曲线形态总体一致,均包括压密阶段、弹性阶段、屈服阶段和破坏阶段。节理倾角从 0° 增大到 90° ,岩样破坏时的峰值应力呈先减小后增大的变化趋势;围压从0增加到20 MPa,完整岩样和断续节理砂岩破坏时的峰值强度逐渐增大,比较而言,完整岩样的峰值强度明显高于断续节理岩样。

(2)围压对断续节理砂岩的变形破坏有明显的约束作用,在单轴压缩情况下,岩样应力-应变曲线的屈服阶段不明显,达到峰值强度时,应力-应变曲线迅速跌落,脆性破坏特征明显;随着围压逐渐增大,岩样屈服阶段逐渐明显,峰值强度和残余强度逐渐提高,破坏时应力-应变曲线下降的趋势也逐渐变缓,破坏由脆性向延性转化。

(3)在相同围压条件下,节理倾角对岩样在屈服阶段和破坏阶段的变形特征影响明显,例如,节理倾角为 0° , 90° 时,应力-应变曲线的屈服阶段相对不明显,破坏时的跌落趋势明显;而节理倾角为 60° , 75° 时,应力-应变曲线的屈服阶段比较明显,破坏时的跌落趋势明显较缓。

2.2 变形参数统计分析

对完整岩样和断续节理砂岩的变形模量(峰值应力50%对应的割线模量)进行统计,具体如图5所示。

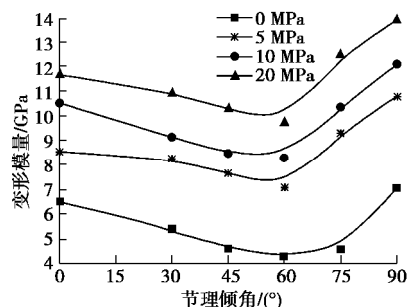


图5 变形模量与节理倾角关系曲线

Fig. 5 Curves of deformation modulus and joint dip angle

从图5可以看出:

(1)4种围压下,完整岩样的变形模量分别为10.57, 12.38, 13.69, 14.58 GPa,对应不同倾角断续节理岩样的变形模量分别为4.31~7.08, 7.07~10.83, 8.13~12.31, 9.74~13.91 GPa,比较而言,断续节理岩样的变形模量明显较小,而且围压越小时差别越明显。

(2)节理倾角从 0° 增加到 90° ,岩样的变形模量呈现先减小后增大的U型变化趋势,在节理倾角为 90° 时达到极大值, 0° 时次之,在 60° 左右达到极小值。不同围压下变形模量的极大值和极小值相差42.81%~64.27%,比较而言,围压越小,变形模量的变化幅度越大。这与以往贯通节理岩样得到的试验规

律是一致的,但变化幅度相对较小^[5-7];与非贯通节理岩体相似材料试验结果及数值模拟分析结果相比^[15-23],其变化趋势也是基本一致的,但变化幅度相对较小,主要是本文试验仅考虑两条对称的节理,切割度较小,而相似材料试验及数值模拟分析中考虑的多条节理的成组分布。节理倾角的大小对变形参数影响明显,在 0° 和 90° 时,节理对岩样的传力路径和变形破坏模式影响很小,加载过程中岩样的受力和变形主要受岩桥控制,模量较大;在 $30^\circ \sim 75^\circ$ 时,节理和大主应力斜交,直接影响岩样的传力路径和变形破坏模式,在 60° 左右,沿节理面产生剪切滑移变形破坏,对应的模量和强度达到最小。

(3)在围压增大过程中,不同倾角断续节理砂岩的变形模量均逐渐增大,其中,从单轴压缩到围压5 MPa的三轴压缩试验,断续节理砂岩的变形模量增幅尤为明显,而后,增大趋势逐渐趋于缓慢。比较而言,节理倾角为 $45^\circ \sim 75^\circ$ 时,变形模量变化幅度尤为明显。分析其原因主要是围压对岩样的侧向变形具有较好的约束效应。

(4)围压为0(单轴压缩)增加到20 MPa,不同倾角断续节理砂岩的变形模量极小值和极大值的差别从64.27%减小为42.81%,说明围压对断续节理砂岩变形参数的各向异性特性有比较明显的弱化作用。

2.3 强度参数统计分析

断续节理砂岩的抗压强度与节理倾角的关系曲线如图6所示。断续节理砂岩黏聚力、内摩擦角与节理倾角的关系曲线如图7所示。

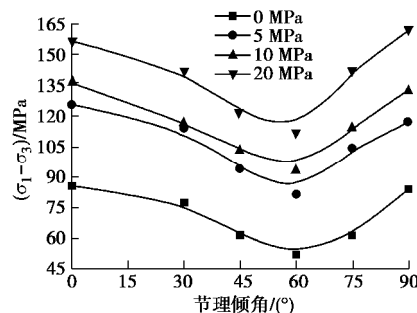


图6 抗压强度与节理倾角关系曲线

Fig. 6 Curves of compressive strength and joint dip angle

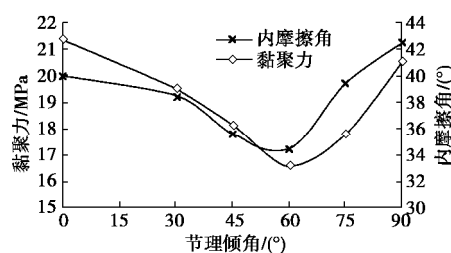


图7 抗剪强度参数与节理倾角关系曲线

Fig. 7 Curves of shear strength parameters and joint dip angle

综合图 6, 7 可以看出:

(1) 4 种围压下, 完整岩样抗压强度分别为 115.69, 148.50, 170.08, 199.64 MPa, 对应不同倾角节理岩样抗压强度分别为 56.95~85.70, 81.49~125.43, 93.30~136.46, 111.81~161.82 MPa, 比较而言, 节理岩样的抗压强度明显较小, 而且围压越小时差别越明显, 倾角在 60° 左右时, 差别达到最大, 说明围压对断续节理岩样侧向变形的抑制作用非常显著。

(2) 节理倾角从 0° 增加到 90°, 抗压强度也呈现先减小后增大的 U 型变化趋势, 在节理倾角为 0° 或 90° 时达到极大值, 在 60° 左右达到极小值, 其中, 在 0°~30° 时, 断续节理砂岩的强度较为缓慢的降低, 在 30°~60° 时和 90°~60° 时, 断续节理砂岩的强度较为快速的降低达到极小值。围压为 0 增加到 20 MPa, 不同倾角断续节理砂岩的抗压强度极小值和极大值的差别从 64.97%减小为 44.73%, 说明围压对断续节理砂岩抗压强度的各向异性特性也有比较明显的弱化作用。

(3) 随着节理倾角的增大, 断续节理砂岩的黏聚力和内摩擦角也呈现明显的 U 型变化趋势, 在 0° 或 90° 时取得极大值, 在 60° 左右取得极小值, 黏聚力、内摩擦角的极小值与极大值分别相差 28.93% 和 20.42%。主要与断续节理砂岩的破坏模式相关, 在倾角为 60° 时, 岩样的计算破坏角为 $(45^\circ + j/2 = 62^\circ)$, 二者非常接近, 岩样的破坏主要受节理控制, 而且从后面岩样的破坏照片来看, 节理倾角在 45°~75° 时, 岩样的破坏主要为顺节理面发展的剪切破坏。

2.4 各向异性力学特性分析

为了定量评价断续节理砂岩的各向异性特征, 采用各向异性度^[32]来衡量各力学参数各向异性:

$$R_E = \frac{E_{\max}}{E_{\min}}, \tag{1}$$

式中, R_E 为断续节理砂岩变形模量各向异性度, E_{\max} 和 E_{\min} 分别为相同围压下, 倾角 0°~90° 断续节理砂岩变形模量的极大值和极小值。

采用式 (1) 思路, 同理可计算得到断续节理岩体抗压强度的各向异性度参数 R_C 如表 1 所示。

表 1 不同围压下断续节理砂岩的各向异性度

Table 1 Anisotropy of jointed rock samples under different confining pressures

围压/MPa	各向异性度	
	R_E	R_C
0(单轴)	1.64	1.65
5	1.53	1.54
10	1.46	1.46
20	1.43	1.45

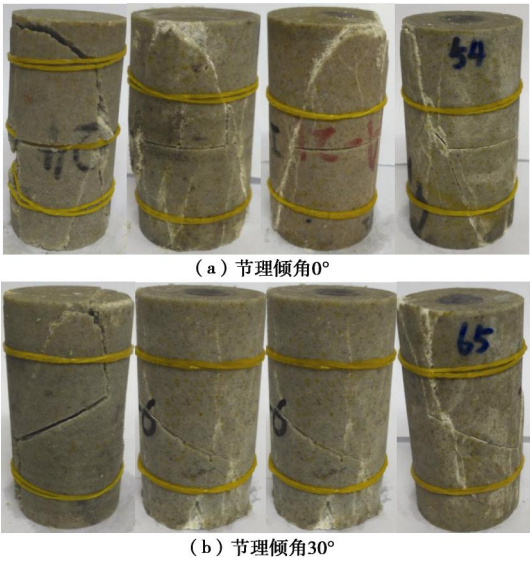
从表 1 可以看出, 从单轴压缩到围压 20 MPa 的

三轴压缩试验, 断续节理砂岩变形模量的各向异性度从 1.64 减小到 1.43, 抗压强度的各向异性度从 1.65 减小到 1.45。随着围压增大, 断续节理砂岩变形和强度参数的各向异性度总体变化趋势一致, 属于低各向异性^[27]。围压对断续节理砂岩的各向异性特性具有明显的弱化作用, 主要是由于侧向应力对顺节理面的剪切滑移破坏具有较好限制作用, 这从后面不同围压下断续节理砂岩的破坏特征也可以明显看出。

本文在断续节理砂岩制作过程中, 切割深度统一为 10 mm, 切割度为 0.3 左右, 得到的断续节理砂岩变形和强度参数的各向异性度为 1.43~1.65, 属于低各向异性; 文献[6]开展了 0°, 30°, 45°, 60°, 90° 贯通节理的三轴压缩试验, 得到节理岩样变形和强度参数的各向异性度在 1.60~5.01, 属于低各向异性~高各向异性; 文献[9, 10]进行了 0°, 45°, 90° 3 种角度, 0.25, 0.50, 0.75 三种切割度的断续节理岩样加卸载试验, 发现切割度对断续节理砂岩的变形和强度参数影响也非常显著, 但是由于考虑节理倾角分布情况较少, 没有得到不同切割度情况下断续节理砂岩变形和强度参数的各向异性度。通过上述比较分析可以看出, 对于断续节理岩体, 一方面节理倾角对其各向异性的影响非常显著, 另外, 随着节理切割度(贯通度)的增加, 其各向异性程度也逐渐增大, 因此, 对工程岩体而言, 在荷载和外界环境因素作用下, 随着节理裂隙的发育, 其切割度将逐渐变化, 对应的各向异性力学特性变化规律有待进一步深入的研究。

3 断续节理砂岩破坏模式分析

不同节理倾角岩样的变形、强度特性呈现明显的各向异性特征, 主要是由于节理倾角对其变形破坏模式的影响, 为此, 特将不同围压、不同倾角的断续节理砂岩的破坏照片进行对比分析。如图 8 所示, 从左至右, 围压分别为 0 (单轴), 5, 10, 20 MPa。



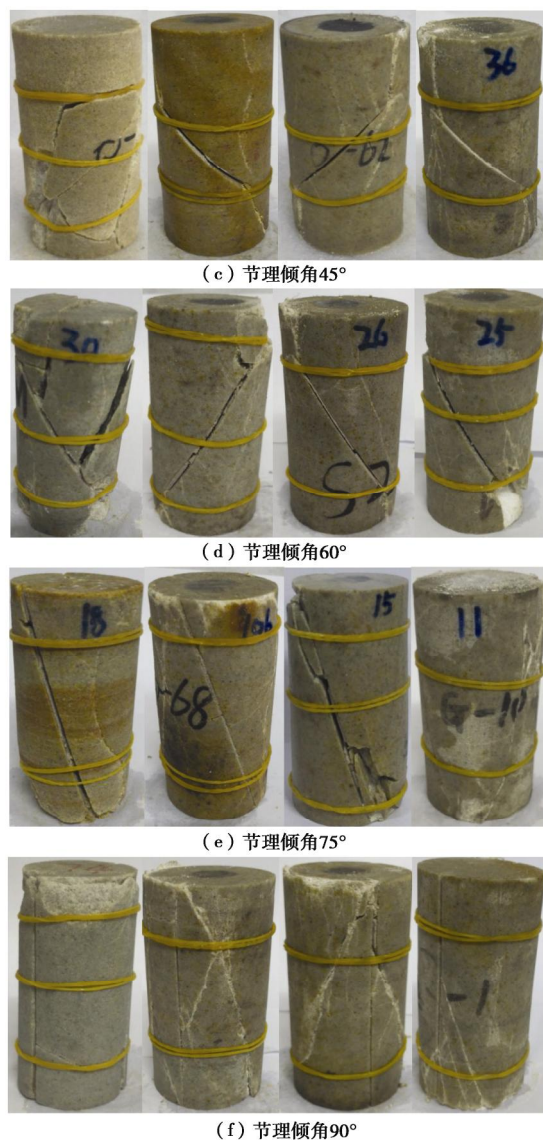


图8 典型断续节理砂岩破坏照片

Fig. 8 Typical destruction photos of jointed rock

综合图8对比分析可以发现:

(1) 节理倾角为 0° 时, 单轴压缩情况下, 岩样破坏的裂纹总体近轴向开展, 受端面摩擦效应影响, 试样端部出现圆锥形破坏, 轴向张拉裂纹发展到水平节理端部附近, 形成独立脱落的块体, 总体为张拉破坏。在三轴压缩作用下, 岩样的破裂面从节理端部向试样上下两端斜向发展, 角度较大, 并在节理端部次生部分近轴向张拉裂纹, 随着围压增大, 破裂面的角度逐渐减小, 断续节理砂岩由张拉破坏逐渐转变为张剪破坏。节理的存在对岩样的破坏模式影响较小, 岩样的强度主要受岩桥控制, 变形和强度参数较大。

(2) 节理倾角为 30° , 45° 时, 单轴压缩情况下, 岩样的破裂面从节理两端以较大角度向试样上下两端斜向发展, 节理端部次生部分近轴向的张拉裂纹, 形成独立的块体, 总体为张剪破坏。在三轴压缩作用下, 岩样破裂面从节理两端向试样上下两端斜向发展,

角度相对较大, 形成经过节理面的三段折线型破裂面, 在节理端部次生部分张剪裂纹, 随着围压增大, 剪切破坏特征逐渐明显。三轴压缩作用下, 节理对断续节理岩样破裂面的形成和发展有明显诱导作用, 节理面已经破坏面的一部分, 使得变形和强度参数逐渐降低。

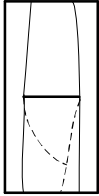
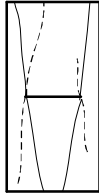
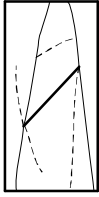

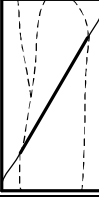
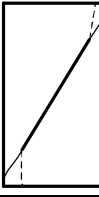
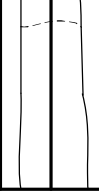
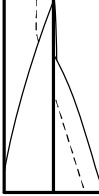
(3) 节理倾角为 60° , 75° 时, 根据莫尔-库仑准则计算的破坏面与轴向应力作用面的夹角为 $62^\circ \sim 65^\circ$, 与节理倾角比较接近。单轴压缩情况下, 岩样破裂面总体沿着节理方向发展, 岩桥被剪断, 节理端部次生少数几条近轴向的张拉裂纹, 导致岩样破裂成数块, 总体为剪张破坏。在三轴压缩作用下, 岩样的破裂面顺节理方向开展, 岩桥被剪断, 而且剪切错动迹象明显, 在节理端部形成局部破碎区域, 为明显剪切破坏。比较而言, 在节理倾角为 75° 时, 节理端部的破碎程度较为严重。断续节理岩样的变形破坏过程主要受节理控制, 在加载作用下, 产生顺节理方向的剪切破坏, 对应的变形和强度参数较小。

(4) 节理倾角为 90° 时, 在单轴压缩情况下, 破坏裂纹在节理两侧近轴向开展, 受试样端面摩擦效应的影响, 出现圆锥形破坏, 总体为劈裂张拉破坏, 节理的存在对岩样的张拉破坏裂纹有一定的诱导作用。在三轴压缩作用下, 由于节理面竖向贯通, 岩样的破裂面为始于节理面的斜向剪切面, 在围压较小时, 剪切面两侧次生了较多张拉和剪切裂纹, 与节理相交形成独立的块体, 随着围压增大, 破裂面的角度逐渐减小, 次生裂纹逐渐减少, 断续节理砂岩由张拉破坏逐渐转变为张剪破坏。节理的存在对断续节理岩样的破坏模式影响较小, 岩样的强度主要受岩桥控制, 变形和强度参数较大。

综合上述分析发现, 节理倾角和围压决定了断续节理岩样在单轴、三轴压缩时破坏模式的差异, 从而导致了断续节理砂岩破坏过程中变形强度参数的各向异性。根据上述破坏特征分析, 可将不同倾角断续节理砂岩的破坏模式分为张拉破坏、折线型的复合剪张破坏和顺节理面的剪切破坏等3种类型, 如表2所示。粗实线表示节理, 细实线表示控制性裂缝, 虚线表示次生裂缝。

断续节理砂岩的破坏模式受节理倾角和围压影响明显, 其中, 节理倾角为控制性因素, 单轴压缩条件下, 随节理倾角增大, 岩样的破坏模式由经过节理端部的张拉破坏 (0°)、张剪破坏 (30° , 45°), 逐步发展到总体顺节理面的剪切破坏 (60° , 75°), 然后发展为张拉破坏 (90°); 三轴压缩条件下, 随节理倾角增大, 岩样的破坏模式由经过节理端部的张剪破坏 (0°)、折线型复合剪张破坏 (30° , 45°), 逐步发展到顺节理面的剪切破坏 (60° , 75°), 然后发展为

表 2 断续节理砂岩破坏模式及控制因素
Table 2 Failure modes and controlling factors of intermittent jointed sandstone

节理倾角/(°)	单轴压缩	破坏模式	节理影响程度	三轴压缩	破坏模式	节理影响程度
0		经过节理端部的张拉破坏	较弱		经过节理端部的张剪破坏	较弱
30, 45		经过节理端部的张剪破坏, 节理端部次生张拉裂纹	诱导		经过节理端部的三段折线型复合剪张破坏, 岩桥剪断	诱导
60, 75		顺节理面的剪切破坏, 岩桥剪断, 节理端部次生张拉裂纹	控制		顺节理面的剪切破坏, 岩桥剪断	控制
90		张拉破坏	诱导		始于节理面的复合张剪破坏	较弱

始于节理面的复合张剪破坏(90°)。围压对断续节理砂岩的破坏模式的影响也比较显著,单轴压缩作用下,岩样的张拉破坏特征比较明显,即使在节理倾角为 60° 和 75° 的情况下,总体为顺节理面的剪切破坏,在节理端部仍次生了较多张拉裂纹,随着围压的增大,不同节理倾角岩样破坏时的次生张拉裂纹逐渐减少,剪切特征逐渐明显,说明围压对断续节理砂岩的侧向变形和剪切滑移破坏具有较好的抑制作用。

4 结 论

(1) 节理倾角从 0° 增加到 90°, 断续节理砂岩的变形模量、抗压强度、黏聚力和内摩擦角均呈现先减小后增大的 U 型变化趋势,节理倾角为 0° 或 90° 时达到极大值,60° 左右达到极小值,这与以往贯通的节理岩样得到的试验规律是一致的,但变化幅度相对较小。

(2) 由于节理的存在,断续节理砂岩受力和变形破坏特性发生明显改变,节理对岩样破坏裂纹的开展具有明显的诱导或控制作用,不同节理倾角情况下,岩样的破裂面均顺节理倾角方向发展,当节理倾角与岩样计算破坏角接近的时候,岩样的破裂面沿节理面开展,岩桥剪断,变形和强度参数达到极小值。

(3) 围压对岩样的侧向变形和剪切滑移破坏具有较好的抑制作用,随着围压增大,不同倾角断续节理砂岩的变形和强度参数差别逐渐减小,各向异性特征逐渐减弱。

(4) 在三轴压缩作用下,断续节理砂岩的破坏模式可分为 3 种类型:张拉破坏、折线型的复合剪张破坏、沿节理面的剪切破坏。节理倾角的分布和加载时的围压决定了断续节理砂岩在三轴压缩作用下的变形破坏模式,而其变形破坏模式的差异决定了断续节理砂岩变形和强度参数的各向异性特征。

参考文献:

[1] 王士天, 刘汉超, 张倬元. 大型水域水岩相互作用及其环境效应研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1997, 8(1): 69 - 88. (WANG Shi-tian, LIU Han-chao, ZHANG Zhuo-yuan. Study on interaction and environmental effects of water rocks in large water bodies[J]. Journal of Geological Hazard and Environmental Preservation, 1997, 8(1): 69 - 88. (in Chinese))

[2] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988. (SUN Guang-zhong. The foundation of mechanics on rock mass structure[M]. Beijing: Science Press, 1988. (in Chinese))

- [3] MÜLLER L. Rock mechanics[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1981.
- [4] 肖维民, 邓荣贵, 付小敏, 等. 单轴压缩条件下柱状节理岩体变形和强度各向异性模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(5): 957 - 963. (XIAO Wei-min, DENG Rong-gui, FU Xiao-min, et al. Model experiments on deformation and strength anisotropy of columnar jointed rock masses under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(5): 957 - 963. (in Chinese))
- [5] 孙旭曙, 李建林, 王乐华, 等. 节理岩体超声测试及单轴压缩试验研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(12): 3473 - 3478, 3488. (SUN Xu-shu, LI Jian-lin, WANG Le-hua, et al. Study of ultrasonic test and uniaxial compression test of jointed rock masses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(12): 3473 - 3478, 3488. (in Chinese))
- [6] 孙旭曙, 李建林, 王乐华, 等. 单一预制节理试件各向异性力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(增刊 1): 29 - 34, 41. (SUN Xu-shu, LI Jian-lin, WANG Le-hua, et al. Experimental research on anisotropic mechanical characteristic of samples with single prefabricated joint[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(S1): 29 - 34, 41. (in Chinese))
- [7] 李建林, 王乐华, 孙旭曙, 等. 节理岩体卸荷各向异性力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(5): 892 - 900. (LI Jian-lin, WANG Le-hua, SUN Xu-shu, et al. Experimental study on anisotropic mechanical characteristics of jointed rock masses under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(5): 892 - 900. (in Chinese))
- [8] 王芝银, 段品佳. 基于岩体三轴压缩试验的节理力学参数确定方法[J]. 岩土力学, 2011, **32**(11): 3219 - 3224. (WANG Zhi-yin, DUAN Pin-jia. A new method for determining mechanical parameters of joints based on triaxial compressive test for rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(11): 3219 - 3224. (in Chinese))
- [9] 王乐华, 柏俊磊, 李建林, 等. 非贯通节理岩体单轴压缩试验研究[J]. 水利学报, 2014, **45**(12): 1410 - 1418. (WANG Lei-hua, BAI Jun-lei, LI Jian-lin, et al. Experimental study on uniaxial compression of rocks with non-through joints[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, **45**(12): 1410 - 1418. (in Chinese))
- [10] 王乐华, 柏俊磊, 孙旭曙, 等. 不同连通率节理岩体三轴加卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(12): 2500 - 2508. (WANG Le-hua, BAI Jun-lei, SUN Xu-shu, et al. The triaxial loading and unloading mechanical properties of jointed rock masses with different joint connectivities[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(12): 2500 - 2508. (in Chinese))
- [11] BOBET A, EINSTEIN H H. Fracture coalescence in rock-type material under uniaxial and biaxial compressions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, **35**(7): 863 - 888.
- [12] WONG R H C, CHAU K T, TANG C A, et al. Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws: part I experimental approach[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, **38**(7): 909 - 924.
- [13] GEHLE C, KUTTER H K. Breakage and shear behaviour of intermittent rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, **40**(5): 687 - 700.
- [14] 陈洪凯, 唐红梅. 危岩主控结构面强度参数计算方法[J]. 工程地质学报, 2008, **16**(1): 37 - 41. (CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei. Method for calculating strength parameters of structural planes controlling the rock block stability[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, **16**(1): 37 - 41. (in Chinese))
- [15] 张黎明, 陈国庆, 李志波, 等. 共面断续岩桥直剪试验破坏过程研究[J]. 长江科学院院报, 2018, **35**(10): 120 - 125, 142. (ZHANG Li-ming, CHEN Guo-qing, LI Zhi-bo, et al. Failure process of coplanar discontinuous rock bridge in direct shear test[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, **35**(10): 120 - 125, 142. (in Chinese))
- [16] 蒲成志, 曹平, 赵延林, 等. 单轴压缩下多裂隙类岩石材料强度试验与数值分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(11): 3661 - 3666. (PU Cheng-zhi, CAO Ping, ZHAO Yan-lin, et al. Numerical analysis and strength experiment of rock-like materials with multi-fissures under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(11): 3661 - 3666. (in Chinese))
- [17] 周辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 不同位置和尺寸的裂隙对岩体破坏影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(增刊 1): 3018 - 3028. (ZHOU Hui, MENG Fan-zhen, ZHANG Chuan-qing, et al. Experimental study on effect of joints with different locations and sizes on rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(S1): 3018 - 3028. (in Chinese))
- [18] 陈新, 廖志红, 李德建. 节理倾角及连通率对岩体强度、变形影响的单轴压缩试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(4): 781 - 789. (CHEN Xin, LIAO Zhi-hong, LI

- De-jian. Experimental study of effects of joint inclination angle and connectivity rate on strength and deformation properties of rock masses under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(4): 781 – 789. (in Chinese))
- [19] 段国勇. 特定角度组合节理岩体卸荷力学特性试验研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2015. (DUAN Guo-yong, Experimental research on mechanical properties of specific combined angel jointed rock mass uder loading and unloading condition[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2015. (in Chinese))
- [20] 黄书岭, 丁秀丽, 邬爱清, 等. 层状岩体多节理本构模型与试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(8): 1627 – 1635. (HUAN Shu-ling, DING Xiu-li, WU Ai-qing, et al. Study of multi-joint constitutive model of layered rockmass and experimental verification[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **31**(8): 1627 – 1635. (in Chinese))
- [21] 葛云峰, 唐辉明, 王亮清, 等. 大数量非贯通节理岩体离散元数值模拟实现方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(增刊 2): 3760 – 3773. (GE Yu-feng, TANG Hui-ming, WANG Liang-qing, et al. Realization method of discrete element numerical simulation of large number of non-persistent jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(S2): 3760 – 3773. (in Chinese))
- [22] 孟国涛, 方 丹, 李良权, 等. 含优势断续节理组的工程岩体等效遍布节理模型强度参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(10): 2115 – 2121. (MENG Guo-tao, FANG Dan, LI Liang-quan, et al. Study of equivalent strength parameters of ubiquitous joint model for engineering rock mass with preferred intermittent joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(10): 2115 – 2121. (in Chinese))
- [23] 梁正召, 肖东坤, 李聪聪, 等. 断续节理岩体强度与破坏特征的数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(11): 2086 – 2095. (LIANG Zheng-zhao, XIAO Dong-kun, LI Cong-cong, et al. Numerical study on strength and failure modes of rock mass with discontinuous joints[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(11): 2086 – 2095. (in Chinese))
- [24] 卞 康, 刘 建, 胡训健, 等. 含顺层断续节理岩质边坡地震作用下的破坏模式与动力响应研究[J]. 岩土力学, 2018, **39**(8): 3029 – 3037. (BIAN Kang, LIU Jian, HU Xun-jian, et al. Study on failure mode and dynamic response of rock slope with non-persistent joint under earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(8): 3029 – 3037. (in Chinese))
- [25] 徐靖南, 朱维申. 压剪应力作用下共线裂纹的强度判定[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, **14**(4): 306 – 311. (XU Jing-nan, ZHU Wei-shen. The strength of collinear cracks failure under shearing-compressive stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, **14**(4): 306 – 311. (in Chinese))
- [26] LAJTAI E Z. Strength of discontinuous rocks in direct shear[J]. Géotechnique, 1969, **19**(2): 218 – 233.
- [27] EINSTEIN H E, BENIEZIANO D, BAECHER G B, et al. The effect of discontinuity persistence on rock slope stability[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1983, **20**(3): 227 – 236.
- [28] 杜景灿, 陈祖煜. 岩桥破坏的简化模型及在节理岩体模拟网络中的应用[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(4) : 421 – 426. (DU Jing-can, CHEN Zu-yu. A simplified discontinuity propagation model and its application in mechanics of rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(4): 421 – 426. (in Chinese))
- [29] 刘远明, 夏才初. 共面闭合非贯通节理岩体贯通机制和破坏强度准则研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(10): 2086 – 2091. (LIU Yuan-ming, XIA Cai-chu. Study on fracture mechanism and criteria of failure strength of rock mass containing coplanar close discontinuous joints under direct shear[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(10): 2086 – 2091. (in Chinese))
- [30] GB/T 50266—201 工程岩体试验方法标准[S]. 2013. (GB/T 50266—2013 Standard for test methods of engineering rock mass[S]. 2013. (in Chinese))
- [31] 邓华锋, 李建林, 邓成进, 等. 岩石力学试验中试样选择和抗压强度预测方法研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(11): 3399 – 3403. (DENG Hua-feng, LI Jian-lin, DENG Cheng-jin, et al. Analysis of sampling in rock mechanics test and compressive strength prediction methods[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(11): 3399 – 3403. (in Chinese))
- [32] SINGH J, RAMAMURTHY T, RAO G V. Strength anisotropies in rocks[J]. Indian Geotechnical Journal, 1989, **19**(2): 147 – 66.