

含两条节理岩样压缩破坏行为的颗粒流模拟^{*}

范祥^{1,2,3,4}, 谢永利¹, 来弘鹏¹, 陶建军⁵

(1. 长安大学 公路学院, 西安 710064; 2. 长沙理工大学 道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心, 长沙 410004; 3. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059; 4. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083; 5. 绍兴交通投资集团有限公司, 浙江 绍兴 312000)

摘 要: 利用颗粒流软件中平行粘结方式建立数值计算模型, 通过校核室内试验数据确定数值模型的细观参数值, 并采用 smooth-joint 在模型中设置两条断续节理, 通过改变岩桥倾角和节理倾角, 建立不同节理布置数值模型。从细观和宏观两方面, 研究单轴压缩荷载下节理试样内接触力、微裂隙数量和节理岩体的破坏行为发现, 峰值轴向应力之前, 微裂隙数量增加缓慢, 峰值轴向应力之后, 微裂隙数量迅速增加; 颗粒接触力易在节理端部和岩桥处聚集, 在节理中间段附近分布较为稀疏, 接触力较大的位置易产生裂纹; 峰值轴向应力时刻, 岩桥倾角为 15° 时, 岩桥均未贯通, 岩桥倾角为 45° 和 75° 时, 绝大部分试样的岩桥贯通了, 节理倾角为 90° 时, 岩桥全部没有贯通。

关键词: 断续节理; 数值模拟; 单轴压缩试验; 破坏行为; 裂隙

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)02-0461-09

Numerical Simulation of Failure Behavior of Specimens with Two Flaws under Compressive Loading Using PFC

Fan Xiang^{1,2,3,4}, Xie Yongli¹, Lai Hongpeng¹, Tao Jianjun⁵

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, P.R.China; 2. Engineering Research Center of Catastrophic Prophylaxis and Treatment of Road & Traffic Safety of Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, P.R.China; 3. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059 P.R.China; 4. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, P.R.China; 5. Shaoxing Transportation Investment Group Co. Ltd., Shaoxing Zhejiang 312000, P.R.China)

Abstract: Parallel-bond provided in Particle Flow Code was used to create the jointed models, the values of micro-parameters employed in the parallel-bonded particle model were obtained through calibrating the experimental results. Two intermittent joints were generated in the parallel-bonded particle model through smooth-joint contact. Different jointed blocks were created through changing rock-bridge angle and joint inclination angle. The contact force, micro-cracks and failure behavior of jointed blocks under uniaxial compressive loading were investigated. Some conclusions were obtained: The number of micro-cracks increases slowly before peak axial stress but rapidly after peak axial stress. Contact forces between particles easily concentrate around joint tips and rock bridge but distribute sparsely around the middle of joints. Cracks usually happen at the locations of contact forces concentration. At peak

^{*} 收稿日期: 2017-11-22(修改稿)

作者简介: 范祥(1986-), 男, 四川大竹人, 博士, 讲师, 主要从事岩体力学教学与科研工作。

E-mail: fanxiang224@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(51378071); 长沙理工大学道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心开放基金(kfj150405); 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金(SKLG2016K009); 浙江省交通运输厅科研项目(2016019); 中央高校基本科研业务费(310821161008)

axial stress, when rock bridge inclination angle is 15° , rock bridges of all jointed samples do not coalesce; when rock bridge inclination angles are 45° or 75° , rock bridge of most jointed samples coalesce; when joint inclination angle is 90° , rock bridges of the three cases of jointed samples do not coalesce.

Keywords: intermittent joint; numerical simulation; uniaxial compressive test; failure behavior

0 引言

岩石是一种非均质、不连续性材料,含有宏观与微观裂隙,含有裂隙的岩石材料被称为裂隙岩石。荷载作用下,裂隙的扩展与贯通导致岩石材料破坏。岩石的强度和变形性质与裂隙数量、分布状态相关,裂隙的分布状态由倾角、位置决定。

针对裂隙岩体力学行为的研究,大部分是通过室内相似模型试验进行的(以具有与岩石相似脆性特征材料制作含有裂隙的试样,如水泥砂浆、石膏、改性橡胶粉、PMMA 等^[1-5])。通常,研究者在浇筑试样过程中,以插入云母片、铁片、薄膜、纸片等^[6-9]方式在相似材料模型中生成裂隙,也有部分学者^[10]利用水力切割技术直接在岩石试样中切割裂缝。单轴压缩是最常见的加载方式,利用刚性伺服试验机,蒲成志等^[11]研究了 2 条贯通裂隙试样的断裂力学行为,发现了张拉、剪切及拉剪复合 3 种破坏方式。陈新等^[12]研究了多裂隙试样的起裂方式与破坏模型,发现了 7 种起裂方式与 7 种破坏模式。Yang 等^[13]在圆柱大理岩试样中切割 2 条非贯通裂隙,研究不同围压下试件的强度和破坏行为,发现在低围压时,裂隙试样易发生剪切破坏,在高围压时轴向承载力与裂隙几何参数关系较小,由颗粒摩擦力决定。张平等^[2]研究了动载下 2 条或 3 条裂隙试样的贯通机制,并对比动、静荷载下破坏行为差异,发现不同空间位置裂隙对动载响应不同,动载下易在预制裂隙内部直接贯通。Sagong 等^[13]、Prudencio 等^[14]以试验方法研究了多裂隙试样在单轴下的破坏模式,发现了 4 种破坏模式。

数值模拟作为试验方法的延伸,已广泛运用于岩土体工程的理论研究与工程设计。基于不同算法的数值方法较多,如有限差分法、有限单元法、边界单元法、离散单元法等。在数值模拟裂隙岩石扩展、贯通行为时,RFPA^{2D}和 PFC^{2D}是运用最为广泛的数值工具。Wong 等^[15]、Tang 等^[16]用 RFPA^{2D}分

别研究了 1 条、3 条及多条裂隙试样单轴压缩下的破坏,分析了裂隙位置、长度、倾角及试样宽度对裂纹扩展现象的影响。张晓平等^[17-18]利用离散法建立含有张开裂隙的颗粒模型,模拟石膏试样的断裂行为。Fan 等^[19-20]以颗粒流软件,建立含有较多节理的数值分析模型,分析不同节理连通率和不同倾角试样开裂时的轴向应力及相对应的轴向应变、起裂应力与节理连通率和倾角相关性。Wong 等^[21]系统模拟了压缩荷载下 2 条共面裂隙的起裂与贯通现象,并以累积损伤破坏准则模拟破裂过程。FROCK 是基于位移不连续法的一种数值算法,Bobet 等^[22]用 FROCK 模拟单轴压缩下裂隙岩石裂纹的起裂与贯通。蒲成志等^[23]以有限差分法模拟了含有 25 条裂隙试样的断裂行为,得到与试验相似的裂隙贯通现象。

本文基于试验数据,建立三维颗粒流模型,以 smooth-joint 接触方式在模型中生成裂隙,从细观角度分析压缩荷载下节理周围接触力变化、微裂隙增长,以及宏观裂纹扩展。

1 节理设置与数值模型

1.1 节理布置

本文中节理试样的尺寸为 $200\text{ mm}\times150\text{ mm}\times30\text{ mm}$ (高 \times 宽 \times 厚),岩桥长度为 30 mm ,岩桥的倾角用 α 表示,单条节理长度为 30 mm ,节理倾角用 β 表示。岩桥长度和节理长度保持不变,主要研究岩桥倾角和节理倾角变化对节理岩体在单轴压缩荷载下破坏行为的影响。岩桥过试样中心沿逆时针方向旋转,起始倾角为 15° ,每次旋转增加 30° 。 α 共设 3 种倾角,即 15° 、 45° 和 75° 。在确定岩桥倾角时,节理也沿逆时针方向旋转,初始角为 15° ,每次旋转增加 15° 。 β 共设置 6 种倾角,即 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° 。每个试样用 α - β 表示,45-75 即表示岩桥倾角 45° 且节理倾角 75° 试样,如图 1 所示,较粗黑色线段表示节理,较细黑色线段表示岩桥。

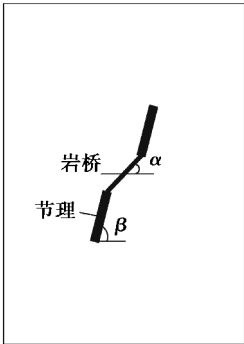


图 1 节理布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of joint arrangement

1.2 细观参数校核

PFC^{3D}是基于离散元思想开发的,用以模拟球形颗粒运动和相互作用,可以模拟静荷载或动荷载作用下材料的力学响应。颗粒流模型有墙、颗粒、墙与颗粒组合 3 种边界条件,有两种颗粒生成方式:Ball 命令和 Generate 命令。Ball 命令在指定位置生成颗粒,Generate 命令在指定空间按照设定颗粒尺度范围随机生成颗粒^[24]。

颗粒流模型的宏观力学行为由其细观参数值决定,不同黏结方式生成的颗粒流模型的细观参数数量不同。本文采用平行黏结(parallel-bond)建立颗粒流模型,主要由颗粒接触弹性模量、摩擦系数、颗粒接触法向刚度与切向刚度比、平行黏结法向强度、平行粘结切向强度、平行粘结弹性模量所决定。不同细观参数对模型的宏观力学性质影响不同,摩擦系数主要影响试样的峰后强度,抗压强度主要受平行黏结强度控制,弹性模量主要受接触弹性模量控制,接触刚度比对试样的弹性模量和破坏方式有一定影响。颗粒流模型细观参数的校核过程是不断调整细观参数值,使得颗粒流模型的宏观力学参数与室内物理力学参数相匹配。本文中的室内力学参数源于文献[11]。当采用表 1 中的细观参数值时,得到的宏观力学参数与室内试验力学参数匹配良好,如表 2 所示。单轴压缩强度和弹性模量差均在 1% 以内,泊松比误差在 5% 以内,因此,在后续模拟中采用表 1 中的参数值。

表 1 细观参数表

Table 1 Values of micro-parameters

参数名	参数值
颗粒刚度比 k_n/k_s	2.0
摩擦系数 μ	0.8
接触弹性模量 E_c/GPa	2.0

续表 1

参数名	参数值
平行粘结法向强度和标准差/MPa	15±3
平行粘结切向强度和标准差/MPa	30±6
平行粘结弹性模量/GPa	2.0
平行粘结刚度比	2.0

表 2 试验结果与数值模拟结果

Table 2 Experimental and numerical results

项目	试验结果	数值结果
单轴抗压强度/MPa	23.13	22.99
弹性模量/GPa	2.272	2.264
泊松比	0.225 1	0.215 4

1.3 断续节理数值模型

PFC 软件中生成节理有多种方式,较常用的是采用软件中的内置命令,改变节理上颗粒之间的黏结强度和接触刚度,即弱化颗粒之间的黏结,Kulatilake 等^[7]采用该方式生成节理。再者,可以删除节理面上的颗粒,以生成空隙而形成节理。后来,更常用的是改变节理面上颗粒间的接触方式,形成 smooth-joint 接触,能够避免颗粒在相互运动过程中产生内锁。

按照已设置的节理布置方式,本文运用 smooth-joint 在完整模型中生成的节理,节理模型如图 2 所示。数值模型中含有 2 条节理,在颗粒流模型中,颗粒之间相互接触,因而颗粒之间有一定的接触力,其接触力用力链表示,即图 2 中的黑色线条。由于本模型中含有 93 105 个颗粒,颗粒之间接触力链十分密集,图 2 所示的力链为放大之后的情况。在节理空隙内,没有接触力且节理周围接触力分布较为均匀。

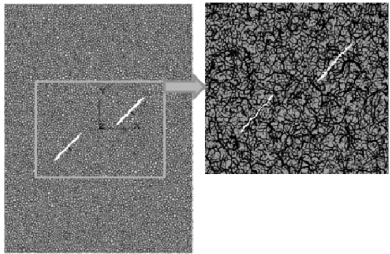


图 2 节理试样数值模型

Fig. 2 Numerical model of jointed specimen

2 节理岩体破坏行为分析

2.1 微裂隙分析

图 3 显示的是颗粒粘结示意图,图中仅显示了中间两个颗粒的黏结。当颗粒之间力大于建立模

型时所设定的切向强度或法向强度时,黏结即被破坏,如图 3 所示的黏结断开。每 1 个黏结破坏处用带颜色的六边形标记出来,形成 1 个微裂隙,试样加载过程中,微裂隙的数量将被记录,如图 4。微裂隙破坏位置和数量与模型内接触力分布及试样宏观强度有关。当黏结破坏后,颗粒之间仅存在摩擦作用,不再具有黏结强度。本模型中颗粒之间由 parallel-bond 相连,黏结破坏,即 parallel-bond 失去力的作用。

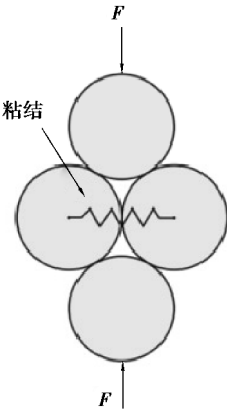


图 3 颗粒粘结示意图^[24]

Fig. 3 Schematic diagram of bond between particles^[24]

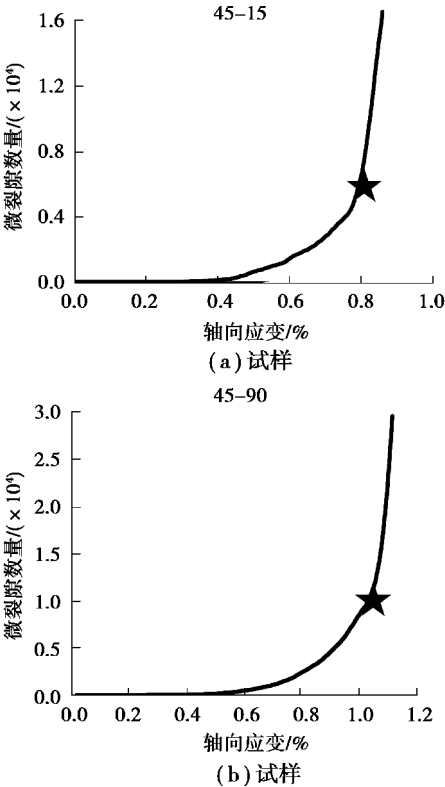


图 4 微裂隙数量

Fig. 4 Number of micro-cracks

2.2 加载过程模型内接触力分析

岩石试样在承受压缩荷载时,其内部会出现应力集中现象,尤其是节理周围。在颗粒流模型中,颗粒之间的接触力大小以力链的疏密程度表示。力链分布越密集,表示接触力越大,反之,表示接触力越小。当模型承受压缩荷载时,颗粒间与节理周围的接触力会发生变化,下面用 4 种情况说明压缩过程中,岩样内接触力的变化。

图 5 中(a)、(b)、(c)、(d)4 个图分别表示轴向应力达到峰值强度的 50%、90%和峰值强度时刻及峰值后试样内部接触力示意图(图 6~8 中各分图与图 5 相同)。图 2 显示了没有加载状态下,模型内颗粒间接触力链是均匀分布的,但是当受到外荷载时,颗粒运动导致接触力变化。对于完整试样来说,在峰值强度 50%与 90%时刻,试样内部接触力分布仍然比较均匀,但由于轴向压缩作用,相对于加载前,分布更为密集。从 90%时刻到峰值时刻,接触力分布变化明显,在峰值时刻,试样破坏,试样的顶部和底部有明显的破裂迹象。随后,试样破裂贯通(如图 5(d))。下面分析加载过程中节理试样接触力变化。

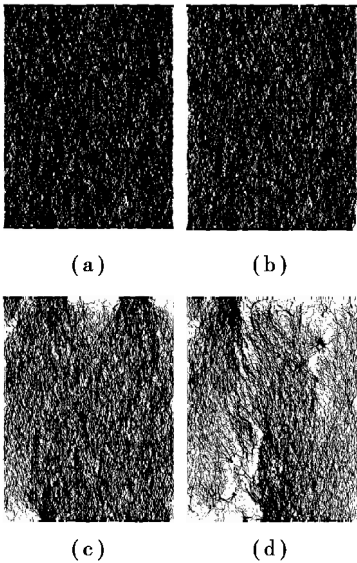


图 5 完整试样压缩过程接触力变化图

Fig. 5 Contact force of intact sample during compressive loading

图 6 显示了 15-15 试样在单轴压缩过程中接触力的变化情况,在轴向应力达到峰值强度的 50%时刻,在节理的中间段附近,接触力较小,力链分布稀疏,但是在节理两端,稍微出现接触力集中分布,即节理端部应力集中现象,这与节理试样未

受荷载时内接触力分布有所不同。当达到峰值强度的90%时刻,节理端部出现明显的应力集中现象,岩桥部分也出现应力集中现象。当达到峰值强度时刻,在节理端部产生了明显的裂纹,此时,岩桥并未贯通,但可以看出接触力较大,在峰值强度之后,裂纹扩展更为明显,且岩桥贯通。

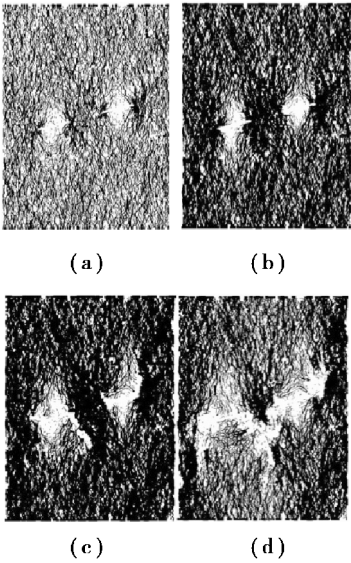


图6 15-15 试样压缩过程接触力变化图
Fig. 6 Contact force of sample 15-15 during compressive loading

如图7,在轴向应力为峰值应力的50%时,试件内接触力分布较为均匀,但达到90%时,上下两条节理周围接触力分布不同,下面一条节理周围接触力分布变得稀疏,这是因为有黏结受到破坏。在

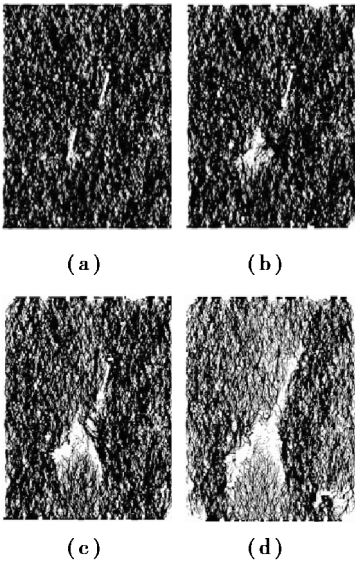


图7 45-75 试样压缩过程接触力变化
Fig. 7 Contact force of sample 45-75 during compressive loading

峰值应力时刻,左下侧节理周围接触力较小,出现明显的破坏迹象,在峰值后,上下节理已贯通。当节理倾角较大时(75°,90°),加载过程中,右上侧节理周围难得出现接触力集中,在左下侧节理周围出现接触力集中,因此破坏更加容易,左下侧节理出现明显的裂纹扩展现象。

如图8,在加载初始阶段,试件内接触力分布与图6相似,在节理的端部出现接触力集中现象,但节理的中间部分,接触力分布较为稀疏,同时,在岩桥位置,接触力也逐渐集中。随着加载继续,试样尺寸在加载方向(Y方向)有一定程度减小,即节理类岩试样轴向应变相对于前一加载阶段,整个模型内部,接触力更为集中。较为明显的依然是岩桥位置和节理端部。继续加载后发现,岩桥贯通,节理外端部接触力更为集中,在峰值强度之后,上侧节理沿节理面方向裂纹扩展,当节理试样完全破坏后,节理模型内的接触力分布又变得稀疏。对比图6(c)和图8(c),在峰值强度时刻,15-15 试样岩桥出接触力集中,但岩桥未贯通,75-15 试样岩桥已贯通,两条节理间形成贯穿裂纹。

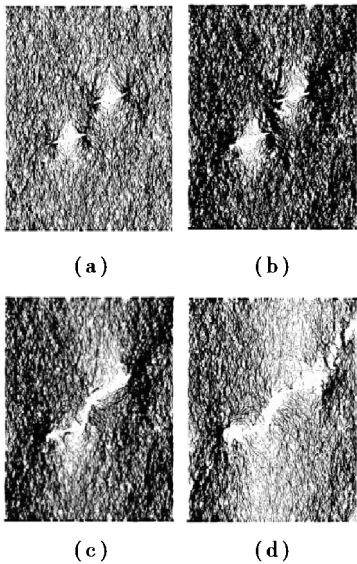


图8 75-15 试样压缩过程接触力变化
Fig. 8 Contact force of sample 75-15 during compressive loading

图6~8 分别显示了不同岩桥倾角试样在不同加载阶段试样内接触力分布状态。加载导致模型内颗粒运动,进而改变颗粒位置,颗粒密集处,接触力分布相应密集。加载过程中,在节理中间段少有接触力集中现象,颗粒接触力易在节理端部和岩桥处密集分布,进而导致颗粒间黏结破坏,形成裂纹,裂纹扩展导致岩桥贯通或试样

破坏,裂纹扩展将在后文叙述。加载过程中,节理周围接触力变化明显,这也是节理试样与完整试样最明显的差别。

2.3 破坏过程分析

由前文可知,平行黏结破坏后形成微裂隙。在 PFC 模型受到荷载时,宏观裂纹由微裂隙组成。在前文进行模型内接触力分析时,发现在节理的端部容易出现接触力集中现象。本节着重选取 3 组试样分析加载过程中裂纹的起裂与扩展。在室内加载过程中,裂纹起裂、扩展、贯通较快,需要高速摄像机记录该过程,在数值软件中,可将该过程记录成视频文件。图 9、图 10 和图 11 中,(a)、(b)、(c)、(d) 各图分别取自轴向应力为峰值强度的 50%、90%、峰值强度时刻和峰值后,以 4 个不同破坏阶段展示节理周围裂纹的出现、扩展和贯通。

如图 9 所示,在轴向应力为峰值强度的 50% 时,微裂隙较早期地出现在节理的端部,而在节理的中间段附近没有出现微裂隙,这与图 8(a) 显示的试件内接触力分布相一致。此时,接触力在节理两端分布密集,而中间段分布稀疏,图 9 中首先在节理端部观察到黏结破坏,在 90% 时刻,节理端部出现明显的裂纹,而岩桥因两条节理内端裂纹扩展而贯通,即岩桥贯通。岩桥贯通时,轴向应力并未达到峰值。在峰值时刻,两条节理外端观察到明显的翼形裂纹。翼形裂纹是一种拉伸裂纹,在较多的室内试验中得以观察到,如文献[9]和[13]。轴向应

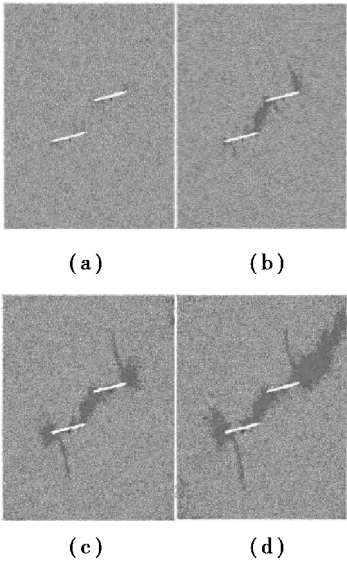


图 9 75-15 裂纹扩展过程

Fig. 9 Crack propagation process of sample 75-15

力达到峰值后,如继续加载,裂纹将继续扩展,节理外端会出现朝试件边角方向的裂纹,进而,试件失去残余抗压强度。对比图 9 与图 8 发现,接触力先在节理端部集中,而后因黏结破坏形成微裂隙而变得稀疏,在接触力分布稀疏的位置形成裂纹。

图 10 显示的是 15-75 试样在加载过程中裂纹扩展图。本试样岩桥倾角较小,但节理倾角较大,在 50% 峰值强度时刻,在两条节理的下端出现了微裂隙。在 90% 峰值时刻,下侧节理观察到明显的裂纹扩展现象,且裂纹并未沿节理平面扩展,而是沿与节理呈一定夹角方向扩展,但上侧节理没有明显的裂纹扩展。当达到峰值强度时,上侧节理开始沿节理平面出现裂纹,下侧节理裂纹持续扩展,但岩桥并未贯通。在峰值强度之后,上侧节理沿节理面裂纹与下侧节理形成的裂纹相搭接。当岩桥倾角较小时,即使节理倾角较大,岩桥也难以贯通。

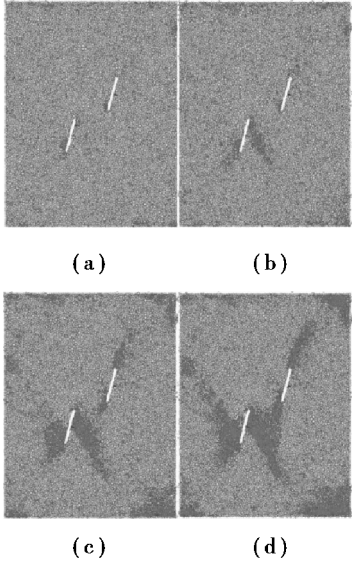


图 10 15-75 试样裂纹扩展过程

Fig. 10 Crack propagation process of sample 15-75

与图 9、图 10 相似,图 11 中在节理端部首先出现微裂隙,但在 90% 峰值强度时刻,节理两端裂纹扩展方向不同,两条节理内端裂纹沿与节理一定夹角方向扩展,外端沿节理方向扩展,在峰值时刻可更为明显地观察到这一现象,且在峰值时刻,岩桥未贯通。在峰值后,两条节理内端出现沿节理方向的裂纹,节理内端两条裂纹贯通,可形成“鱼眼状核”。此种现象与文献[13]和[14]的试验结果相似。

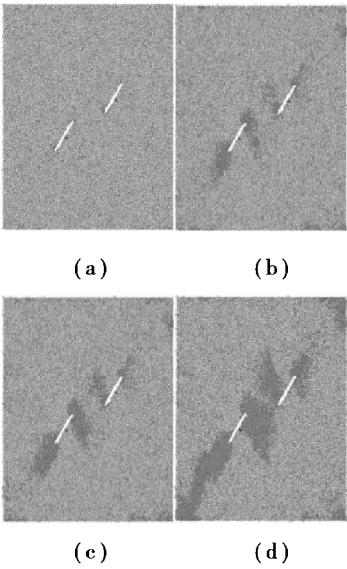


图 11 15-60 试样裂纹扩展过程

Fig. 11 Crack propagation process of sample 15-60

2.4 峰值时刻破坏状态

表 3 显示了所有试样在峰值轴向应力时刻破坏状态图。由表 3 可知,在达到峰值时刻,当岩桥倾角为 15°时,所有试样岩桥均未贯通;当岩桥倾角为 45°时,只有 $\beta=75^\circ$ 和 $\beta=90^\circ$ 两种情况岩桥未贯通,其余节理倾角试样岩桥均贯通;当岩桥倾角为 75°时,只有 $\beta=90^\circ$ 时,岩桥未贯通,其余节理倾角试样均贯通。另外,当 $\beta=90^\circ$ 时,所有不同岩桥倾角试样岩桥均未贯通。当节理倾角较大时,裂纹易沿节理面方向扩展,如果岩桥倾角也较大时,沿节理面方向扩展的裂纹易导致岩桥贯通。当节理倾角与岩桥倾角相等时,并未发现特殊的破坏情况。当岩桥倾角相对较大时,岩桥最容易贯通,反之,较难贯通。

表 3 峰值时刻破坏图
Table 3 Failure status at peak axial stress

$\theta/(^{\circ})$	$\beta/(^{\circ})$	$\alpha/(^{\circ})$		
		15	45	75
75	15			
30	60			

从 45-30、45-45、45-60、75-45、75-60、75-75 试样中发现,当岩桥倾角与节理倾角差较小时,两条节理之间贯通效果最好,但 75-90 试样例外,尽管该试样岩桥与节理倾角差较小,但岩桥并未贯通。在较多断续节理试样中观察到了翼形裂纹,其中 75-15、75-30 和 75-45 试件产生的翼形裂纹最为明显。节理倾角为 90°时,节理附近的裂纹扩展并不明显,在节理附近产生较少微裂隙时,试样轴向应力就达到峰值强度,在峰值强度之后,可观察到下侧节理附近有少量裂纹。

如前文所述,节理的布置直接控制试样的破坏特征。另外,加载方向与节理的夹角对岩样的破坏也有影响。加载方向与节理夹角用 θ 表示,实际上,可以得到 β 与 θ 为互余角,即两者之和为 90°。不同节理倾角所对应的破坏状态与其互余角(加载方向与节理夹角)所对应的破坏状态相同。因此,可以从表 3 中发现, θ 越大(即 β 越小时),加载过程中节理周围裂纹扩展越明显,更容易出现翼形裂纹,如 $\beta=15^\circ$ 时节理模型的破坏情况。当 θ 越小(即 β 越大时),加载过程中节理周围起裂现象越不明显,如 $\beta=0^\circ$ 时节理模型的破坏情况。

3 结论

(1)在加载起始阶段,没有微裂隙形成,在达到峰值强度之前,微裂隙增长较慢,在峰值强度之后,微裂隙迅速增加,说明峰值强度之后,裂纹扩展更为快速。

(2)在加载过程中,接触力较大的地方易导致黏结破坏,形成微裂隙。接触力易在节理的端部和岩桥处聚集,颗粒接触力较大的位置首先形成裂纹,节理中间段附近接触力分布较为稀疏,因此难产生裂纹。

(3)在轴向应力达到峰值强度时,岩桥倾角为 15°试样岩桥均未贯通,岩桥倾角为 45°和 75°且节理倾角为 15°~75°试样中,除了 45-75 试样外,其余试样岩桥均贯通,当节理倾角为 90°时,所有试样岩桥均未贯通。

参考文献(References)

[1] 蒲成志.单轴压缩下类岩体裂隙材料断裂破坏机制的试验研究[D].长沙:中南大学,2010.(Pu Chengzhi. Experimental study of fracture damage mechanism of

rock-like fissured materials under uniaxial compression[D]. Changsha: Central South University,2010.(in Chinese))

[2] 张平,李宁,贺若兰,等.动载下 3 条断续裂隙岩样的裂缝贯通机制[J].岩土力学,2006,27(9):1457-1465.(Zhang Ping, Li Ning, He Ruolan, et al. Fracture coalescence mechanism of three- intermittent-flaws rock specimen under dynamic loading[J]. Rock and Soil Mechanics,2006,27(9):1457-1465.(in Chinese))

[3] 陈新,廖志红,李德建,等.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 Zhihong, Li Dejian, et al. 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))

[4] 任伟中,王庚荪,白世伟,等.共面闭合断续节理岩体性直剪强度研究[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 Rock Engineering, 2003, 22 (10): 1667-1672. (in Chinese))

[5] Bobet A, Einstein H H. Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,1998,35(7):863-888.

[6] 蒲成志,曹平,陈瑜,等.不同裂隙相对张开度下类岩石材料断裂试验与破坏机理[J].中南大学学报(自然科学版),2011,42(8):2394-2399.(Pu Chengzhi, Cao Ping, Chen Yu, et al. Fracture test and failure mechanism of rock-like material of relatively different fracture apertures [J]. Journal of Central South University(Science and Technology Edition),2011,42(8):2394-2399.(in Chinese))

[7] Kulatilake P H S W, He W, Um J, et al. A physical model study of jointed rock mass strength under uniaxial compressive loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,1997,34(3):165-179.

[8] 范文臣,曹平,张科.压剪作用下节理倾角对类岩石材

- 料破坏模式的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(4):1237-1243.(Fan Wenchen, Cao Ping, Zhang Ke. Influence of joint inclination angle on failure style of rock-like material with compressive-shear[J]. Journal of Central South University (Science and Technology Edition), 2014, 45(4): 1237-1243. (in Chinese))
- [9] 范文臣,曹平,张科.不同压剪应力比作用下节理类岩石材料破坏模式的试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(3):926-932.(Fan Wenchen, Cao Ping, Zhang Ke. Experiment study on failure style of jointed rock-like material under different compressive-shear stress ratios [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(3): 926-932. (in Chinese))
- [10] Yang S Q, Jiang Y Z, Xu W Y, et al. Experimental investigation on strength and failure behavior of pre-cracked marble under conventional triaxial compression[J]. International Journal of Solids and structures, 2008,45(17):4796-4819.
- [11] 蒲成志,曹平,衣永亮.单轴压缩下预制2条贯通裂隙类岩材料断裂行为[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(7):2708-2716.(Pu Chengzhi, Cao Ping, Yi Yongliang. Fracture for rock-like materials with two transfixion fissures under uniaxial compression[J]. Journal of Central South University (Science and Technology Edition), 2012, 43(7): 2708-2716. (in Chinese))
- [12] Chen X, Liao Z, Peng X. Cracking process of rock mass models under uniaxial compression [J]. Journal of Central South University, 2013, 20(6): 1661-1678.
- [13] Sagong M, Bobet A. Coalescence of multiple flaws in a rock-model material in uniaxial compression [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(2): 229-241.
- [14] Prudencio M, Jan M V S. Strength and failure modes of rock mass models with non-persistent joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(6): 890-902.
- [15] 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.
- [16] Tang C A, Lin P, Wong R H C, et al. Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws-part II: numerical approach [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(7): 925-939.
- [17] Zhang X P, Wong L N Y. Cracking process in rock-like material containing a single flaw under uniaxial compression: a numerical study based on parallel bonded-particle model approach [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(5): 711-737.
- [18] Zhang X P, Wong R H C. Crack initiation, propagation and coalescence in rock-like material containing two flaws: a numerical study based on bonded-particle model approach [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, 46(5): 1001-1021.
- [19] Fan X, Kulatilake P H S W, Chen Xin. Mechanical behavior of rock-like jointed blocks with multi-non-persistent joints under uniaxial loading: A particle mechanics approach [J]. Engineering Geology, 2015, 190(5): 17-32.
- [20] Fan X, Kulatilake P H S W, Chen X. Crack initiation stress and strain of jointed rock containing multi-cracks under uniaxial compressive loading: A particle flow code approach[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(2): 638-645.
- [21] Wong L N Y, Li H Q. Numerical study on coalescence of two pre-existing coplanar flaws in rock [J]. International Journal of Solids and Structures, 2013, 50(22): 3685-3706.
- [22] Bobet A, Einstein H H. Numerical modeling of fracture coalescence in a model rock material[J]. International Journal of Fracture, 1998, 92(3): 221-252.
- [23] Pu C Z, Cao P. Failure characteristics and its influencing factors of rock-like material with multi-fissures under uniaxial compression [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(1): 185-191.
- [24] Itasca Consulting Group. PFC3D user's manual, version 4.0[R]. Minneapolis: Minnesota, USA, 2003.