

DOI: 10.11779/CJGE201411015

断续节理岩体强度与破坏特征的数值模拟研究

梁正召^{1,2}, 肖东坤¹, 李聪聪¹, 吴宪锴¹, 龚斌¹

(1. 大连理工大学土木工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 武汉大学岩土与结构工程安全湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 基于细观统计损伤数值模型, 通过改变包含单组节理岩体的节理倾角 β 、节理台阶角 γ 、层距 d 和岩桥长度 l_r , 建立不同节理分布的断续节理岩体数值试样, 展开系列数值试验, 模拟了节理岩体的破坏过程, 探讨了节理结构几何参数和应力水平对破坏模式以及岩体力学参数的影响规律。研究表明, 断续节理岩体破坏模式共分为4种: 沿节理面破坏、转动块体破坏、台阶状破坏和混合破坏。沿节理面破坏与台阶状破坏的岩体峰值强度高、破坏应变大, 转动破坏的岩体峰值强度低、破坏应变小。随着节理倾角的增大, 岩体力学行为表现出脆性破坏—渐进破坏—脆性破坏的循环过程。随着应力水平的提高, 岩体破坏区域由中间向端部扩展, 并且对于强度的提高有显著作用, 但提高水平随围压增加而降低。节理台阶角 γ 对于 $\beta=90^\circ$ 时的破坏形式影响较大, 由台阶状破坏转变为转动块体破坏, 层距 d 对阶梯状破坏模式影响较小, 对转动破坏模式影响较大, 岩桥长度 l_r 不影响破坏模式, 但对面破坏与台阶状破坏模式的峰值强度、破坏应变影响较大。通过对比, 模拟结果与物理试验规律一致, 但数值模拟结果可以清晰获得节理岩体中应力场分布、裂纹起裂点与扩展方向、破坏图像等, 有利于分析其内在破坏规律与机理。

关键词: 破坏模式; 节理倾角; 节理台阶角; 层距; 岩桥长度

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)11-2086-10

作者简介: 梁正召(1977-), 男, 教授, 主要从事岩石破坏机制及其数值模拟研究工作。E-mail: liangzz@dlut.edu.cn。

Numerical study on strength and failure modes of rock mass with discontinuous joints

LIANG Zheng-zhao^{1,2}, XIAO Dong-kun¹, LI Cong-cong¹, WU Xian-kai¹, GONG Bin¹

(1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2 Key Laboratory of Safety for Geotechnical and Structural Engineering of Hubei Province, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Based on a microscopic statistical damage model, different failure criteria are introduced into a numerical code to simulate tensile breaking and compression shear failure of jointed rock subjected to uniaxial compression and biaxial compression. Influences of geometrical parameters of the joints and lateral stress on fracture patterns and mechanical behaviors are investigated. The results show that the whole failure modes consist of four types: planar failure, stepped failure, rotating-block failure and mixed failure. The planar failure and stepped failure are associated with high strengths and strains, whereas the rotational failure is associated with low strengths and strains. As the joint inclination increases, the peak strength and elastic modulus increase and then decrease. As the lateral stress increases, the failure areas expand from the middle to both ends and appreciably improve the strength, but the increasing level will reduce when the lateral stress continues to increase. The step angle of joints γ has great influence on the failure modes when $\beta=90^\circ$, and the failure mode changes from stepped failure to the rotational failure. The layer distance d has slight influence on the stepped failure and great influence on the rotational failure. The rock bridge length l_r does not affect the transition of the failure mode, but it affects the peak strength and failure strain of both the planar failure and stepper failure. The results may provide guidance and reference to jointed rock engineering.

Key words: failure mode; joint orientation; joint step angle; layer distance; rock bridge length

0 引言

在复杂的地质作用下, 岩石受到各种各样的构造作用, 导致在其内部产生了形态各异的各种尺度的节理。节理遍布于表层与深层岩体, 根据其发育程度及

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2014CB047100, 2011CB013500); 国家自然科学基金项目(51274053); 湖北省岩土与结构工程安全湖北省重点实验室开放基金项目

收稿日期: 2014-03-04

对岩体强度的控制作用, 可以划分为贯通节理、遍布节理、断续节理、隐闭节理。如果岩体中某组节理断续发育, 或者相互交错时未将岩体完全割离, 则称其为断续节理面。当岩体的强度、破坏形式主要受断续节理面控制时, 则将该岩体称为断续节理岩体。断续节理岩体遍布于自然界, 与人类的工程活动息息相关, 如水电或交通隧道、大坝基础、人造边坡、采矿洞室等, 为达到对这些岩体工程系统进行安全、经济的设计, 正确理解断续节理岩体强度与破坏形式就显得格外重要。不仅可以完善岩体力学理论, 同时也可以指导工程实际, 建立推断岩体强度的分析方法, 对于提高岩体工程设计、施工的合理性、可靠性和安全性, 具有重要意义。

随着数值模拟方法的发展, 数值分析方法将起到万能材料试验机的作用^[1], 运用相应的力学模型根据具体的岩石试样参数建立数值模型, 模拟各种加载条件, 研究岩石的变形、强度、应力-应变关系特性与各种节理结构几何参数下岩体试样本构关系。数值模拟试验相对于模型试验更省时, 投资小, 试验具有可再现性。

国内外学者对节理岩体力学特性开展了大量研究工作。理论研究方面, Jeager 等^[2]提出了单弱面理论, 基于莫尔库仑准则建立了节理岩体强度模型。Ramamurthy 等^[3]对大量试验数据进行了分析, 建立了另一种形式的岩石非线性破坏准则, 提出了单节理岩体强度的经验公式。物理试验方面, Lajtai^[4]进行了节理岩体的压缩试验, 试验结果表明在单轴压缩试验中共产生 2 种裂纹: 拉裂纹与剪切裂纹。拉裂纹萌生于节理尖端并沿着最大主应力方向扩展。Tiwari^[5]通过真假三轴试验得到了岩体的应变硬化、软化和塑性行为取决于节理几何特征和应力水平的结论。对于多裂纹模型试验的研究由于模型制作的困难导致起步较晚。1994 年 Germanovich 等^[6]对多裂隙岩体试样的模型破坏模式进行了研究, 发现二维与三维条件下裂纹的扩展与诱发裂纹的不同。Lin 等^[7]对多裂隙岩体试样单轴、双轴应力下的岩桥贯通模式与峰值强度进行了研究, 发现节理数量、节理长度、岩桥长度影响着岩石的破坏模式与极限强度。Sagong 等^[8]学者对多裂隙岩体试样的贯通模式进行了研究, 发现多裂隙岩块的破坏模式上与双裂隙的岩块类似。Prudencio 等^[9]通过对预制节理试样的压缩试验, 得到并归纳出 4 种破坏模式, 并建立与应力应变曲线相对应关系。

国内方面, 张志刚等^[10]对单节理岩体进行轴向压缩试验, 研究结果表明节理的存在降低了岩体强度, 同时改变了岩体的延性。蒲成志等^[11]运用伺服控制单轴加载系统对预制多裂隙水泥砂浆试样进行加载试

验, 试验结果表明裂隙分布密度相同时, 裂隙倾角对破坏强度的影响比较显著。陈新等^[12]进行了含张开裂隙的石膏试件的单轴压缩试验, 试验结果表明当连通率不大时, 岩体的峰值强度和弹性模量随节理倾角的变化规律大致相同。汤明高等^[13]用 3DEC 呈现进行了少量贯通、等间距节理岩体边坡分析, 分析结果表明, 高边坡的变形主要是结构面的滑移造成的, 并会继续沿着节理面发生累进性变形。朱道建等^[14]基于 FLAC^{3D} 对柱状节理进行单轴、三轴压缩试验, 研究了节理倾角对破坏过程的影响, 得出了各种情况下破裂面的分布和破坏形态。

对于节理岩体而言, 其力学特性受诸多因素影响。地下工程中岩体破坏可分为两类: 一类是应力控制型破坏, 主要发生在初始地应力水平相对较高的岩体中; 另一类是块体控制型破坏, 也称为结构面控制型破坏或重力型破坏, 主要发生在地表及浅埋岩体中。由此看来, 结构面特征分布和应力水平是影响岩体力学特性的重要因素。

目前的研究大多限于物理试验和数值模拟。由于节理岩体较为破碎, 试验试块进行现场采集难度较大, 对于试验室内制作多组节理面切割的试验试块同样困难重重。数值计算的发展使研究节理岩体的压缩破坏过程及破坏机制成为可能。传统的计算模型难以模拟裂纹的开裂形成过程, 而通常用来模拟节理岩体问题的是离散元模型和颗粒流模型, 虽然能够很好模拟节理的开裂, 但对于完整岩块的开裂问题考虑不足。此外, 颗粒流模型中计算单元有限, 精细模拟断续节理岩体渐进破坏的力学过程有一定限制。离散元软件能考虑贯通节理的开裂与块体的运动, 而对于岩石的开裂模拟不是很理想。本文所使用的 RFPA 软件是基于有限元的模拟方法, 采用退化的单元考虑结构面来模拟非连续问题, 可以很好地模拟岩石内部节理的扩展和贯通过程。

本文使用 RFPA 软件对节理岩体在不同围压下的破坏特性进行数值模拟研究。数值模型不仅可以考虑节理与岩石的开裂破坏问题, 还可以真实的模拟节理岩体的非均匀特性, 可以系统地研究不同节理结构几何参数下岩体的破碎模式, 并探讨节理倾向和应力水平对岩体力学参数的影响。

1 数值试验模型

在很多情况下节理面的力学性质很弱, 它的存在使岩体性质产生不连续性, 这种不连续性降低了岩体的变形模量和强度参数, 并使岩体在力学性质上的各向异性更加增强, 表现出明显的非均匀特性。为了描

述材料这种非均匀特性，假定材料细观单元的力学性质满足 Weibull 分布，采用修正后的 Coulomb 破坏准则^[15]。节理岩体材料参数：单轴抗压强度为 27 MPa，内摩擦角 φ 为 37° ，弹性模量为 2.5 GPa，泊松比 ν 为 0.16。节理设置为孔隙单元。因为节理分布区域会发生变化，很难保证每个试样的边界完全一致，否则只有改变试样尺寸，但又会导致尺寸效应。在模拟中，每个试样的边界都与节理相交，尽量保证同样情况下包含节理的长度一致，这样不同试样的边界影响相差不大。

模型尺寸为 150 mm×300 mm，网格划分为 300×600 共 18 万单元。岩体节理结构几何参数如图 1。测试过程中节理采用多种方式布置，分别模拟研究节理倾角 β 、节理台阶角 γ 、层距 d 和岩桥长度 l_r 的影响。数值模拟中，不仅模拟了单轴压缩破坏过程，还考虑到不同围压的影响。

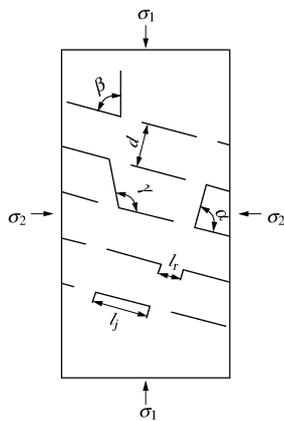
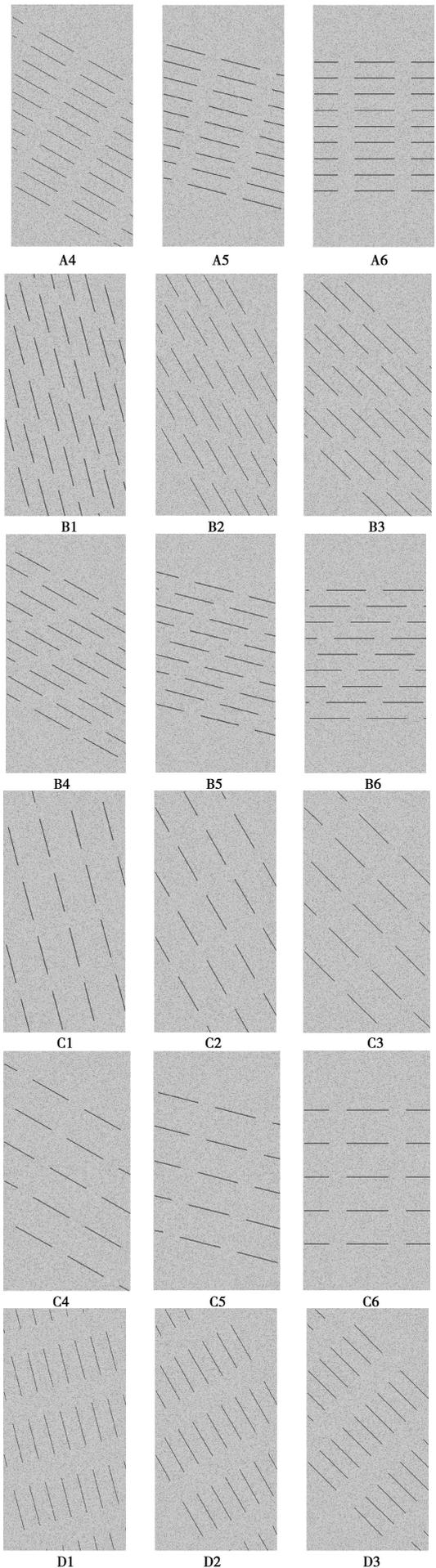
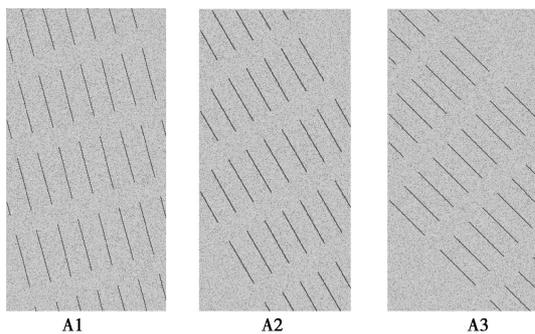


图 1 岩体节理结构几何参数

Fig. 1 Geometric parameters for rock joints

整个试验共分为 A、B、C、D 四组，其中：A1~A6 试样为基本组，考虑了不同围压的影响；B1~B6 相对于 A1~A6 改变了节理台阶角；C1~C6 试样相对于 A1~A6 改变了层距（节理密度）；D1~D6 相对于 A1~A6 改变了岩桥长度。

加载过程中采用位移加载方式，位移约束在模型底部，上部位移加载，每步加载 0.007 mm，数值模型素描简图如图 2 所示。本文模拟的节理结构几何参数与所施加围压见表 2。



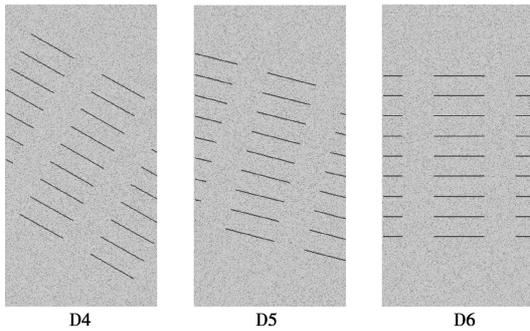


图 2 节理岩体试样加载数值模型图

Fig. 2 Joint layout for the numerical specimens

表 1 试件节理结构几何参数及围压

Table 1 Parameters for joint layout and lateral pressures

组别	L_j/cm	d/cm	$\gamma/(^\circ)$	σ_2/σ_c
A	2	2	135	0.00, 0.05, 0.10, 0.15
B	2	2	90	0.00
C	2	4	117	0.00
D	3	2	127	0.00

注: 各组节理长度均为 5 cm, 节理倾角 β 为 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 。

2 数值模拟结果及分析

2.1 不同条件下的破坏模式

通过对试验过程中不同试件组破坏过程的研究发现, 共观察到 4 种破坏模式: 沿节理面破坏、转动块体破坏、台阶状破坏和混合破坏。这与 Prudencio 等^[9]的物理试验(图 3~6)结果具有较好的一致性。

面破坏: 破坏从两相邻共线节理尖端的翼裂纹萌生开始, 随竖向荷载的增加, 岩桥中出现新的破坏点, 并逐渐扩展为次生裂纹, 与共线节理尖端次生共面裂纹贯通, 形成剪切破坏, 最后宏观形成沿节理面的共线破坏, 节理端部翼裂纹在萌生后仅有小幅度的扩展, 在随后的过程中, 岩桥中破坏点形成的次生裂纹与节理尖端的次生共面裂纹萌生显著, 控制着试件的破坏形式, 破坏形式见图 3。此种破坏模式会造成岩体整体强度与破坏应变变大, 并产生脆性破坏。

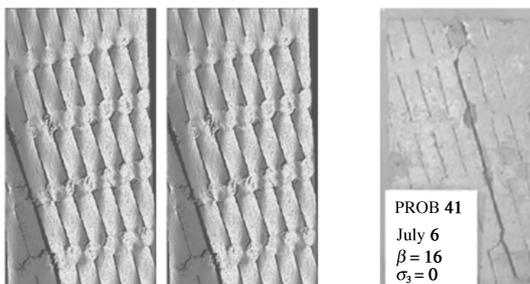


图 3 沿节理面破坏模式对比图

Fig. 3 Comparison between the numerical and laboratory results of planar failure mode

转动块体破坏: 最初裂纹的萌生始于节理尖端, 随荷载增大, 翼裂纹沿垂直于节理方向扩展, 与节理层间空隙中出现的破坏点连通, 当外荷载增大到一定程度时, 裂纹贯通层间空隙并与平行的同排节理连通, 形成独立转动的块体, 造成试样破坏。节理下端部的翼裂纹沿垂直节理方向向下扩展, 节理上端部的翼裂纹沿垂直节理方向向上扩展, 节理尖端沿节理方向的次生共面裂纹与次生倾斜裂纹萌生不明显, 破坏形式如图 4。此种破坏模式的岩体峰值强度与破坏应变水平平均较低。

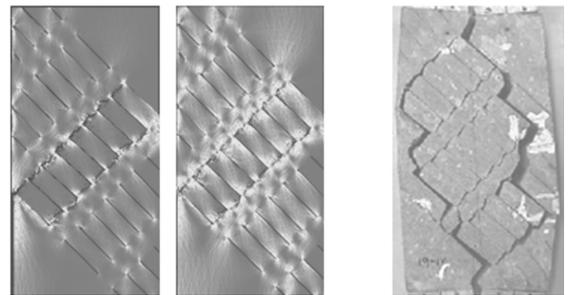


图 4 转动块体破坏模式对比图

Fig. 4 Comparison between the numerical and laboratory results of rotational failure mode

台阶状破坏: 整体表现为应力集中于岩桥中, 随荷载增大, 在岩桥中部破坏点, 与此同时, 节理尖端萌生出并不明显的翼裂纹, 当荷载继续增大, 破坏点之间扩展贯通形成裂纹, 与节理尖端的翼裂纹贯通, 造成台阶状破坏, 此种破坏模式主要发生在节理水平布置的情况下, 其中翼裂纹、次生共面裂纹、次生倾斜裂纹的萌生都不明显, 岩桥中部的破坏点形成的次生裂纹控制着岩体的整体破坏。破坏形式如图 5。此种破坏模式的岩体整体峰值强度与破坏应变较大。

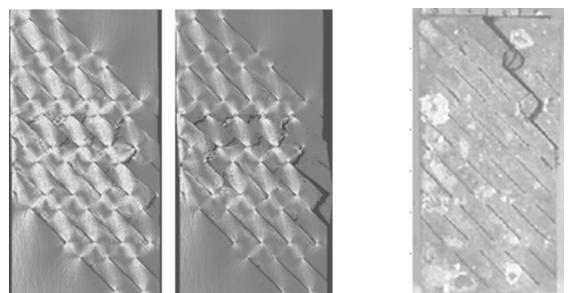


图 5 台阶状破坏模式对比图

Fig. 5 Comparison between the numerical and laboratory results of stepped failure mode

混合破坏: 该种破坏模式混合了台阶状破坏与转动破坏 2 种形式, 在台阶破坏的同时出现了大小不一的转动块体。主要破坏形式见图 6。

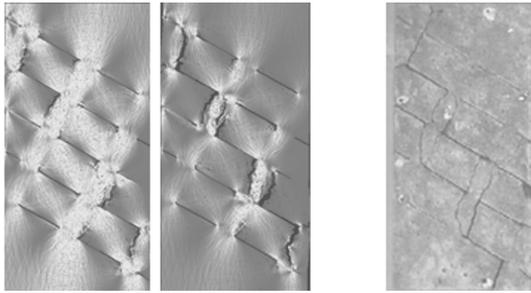


图6 混合破坏模式对比图

Fig. 6 Comparison between the numerical and laboratory results of the mixed failure mode

2.2 节理倾角对破坏模式的影响

表2所示为A组试样在单轴压缩下的破坏过程。在加载过程中预置节理尖端最先形成剪应力集中并产生翼型裂纹，向垂直于节理方向扩展。试样A1随着荷载增大裂纹扩展转向最大主应力方向，同时在岩桥中萌生出新的破坏点，逐渐发展为次生裂纹，节理尖端的裂纹与次生裂纹在岩桥中集中，最终导致岩桥剪破坏，试件发生沿节理面破坏的宏观破坏模式；试件A2~A5在加载初期，岩体的应力分布与试件A1相似，节理尖端形成应力集中，随荷载步的增加萌生翼型裂纹，与沿节理面破坏形式不同的是岩桥中并未出现新的破坏点，破坏点的出现位置集中在相邻节理间，随即节理尖端翼裂纹与次生裂纹贯通，形成新的转动块体，导致试件产生转动块体破坏；试件A6为节理倾角 $\beta=90^\circ$ ，由于节理水平布置导致开始时应力集中于岩桥，与其他组不同的是初始破坏点萌生于岩桥，并发展为次生裂纹，控制试样的破坏，随荷载步增加，拉-剪裂纹贯通岩桥，产生沿异列不共线节理的台阶状破坏。A1~A4的破坏模式与Prudencio等^[9]的物理试验结果一致，但物理试验并未涉及A5，A6的节理布置情况。

观察图7可以发现，在初始阶段，不同节理倾角下试样的竖向应力都随着荷载步的增加线性增长，岩体处于线弹性变化阶段。当应力继续增长达到峰值之后岩体进入破坏后期阶段，岩体的力学行为可以分为2种情况。第1种：弹性模量与强度突然下降，即脆性破坏行为，如 $\beta=15^\circ, 30^\circ, 90^\circ$ ；第2种：弹性模量与强度逐渐下降，即渐进破坏行为，如 $\beta=45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 。岩体宏观破坏后具有一定的残余强度，应力变化趋于平缓。试件A1，A6强度峰值与破坏应变明显大于试件A2，A3，A4，A5，具体为 $15^\circ > 90^\circ > 30^\circ > 75^\circ > 60^\circ > 45^\circ$ ，与Prudencio等^[9]物理试验结果相同，即 $\beta=15^\circ$ 时的强度峰值明显大于其余具体顺序为 $90^\circ > 15^\circ > 30^\circ = 60^\circ = 75^\circ > 45^\circ$ ，节理倾角 $\beta=45^\circ$ 时岩体强度与破坏应变均为最低，此时相邻层的节理的翼型裂纹容易贯通，切断试样形成角

度。破坏应变最大为 $\beta=90^\circ$ 时，最小为 $\beta=45^\circ$ ，转动破坏。对应破坏模式可以得到：剪切面破坏（ $\beta=15^\circ$ ）与台阶状破坏（ $\beta=90^\circ$ ）峰值强度高、破坏应变大，皆为脆性破坏，转动破坏（ $\beta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ ）峰值强度低、破坏应变小，皆为渐进破坏。

表2 单轴压缩下A组试件的破坏过程

Table 2 Failure process of the specimens in Group A under uniaxial compression

破坏形式	应力集中	裂纹萌生	裂纹扩展	贯通破坏
A1 沿节理面破坏				
A2 转动块体破坏				
A3 转动块体破坏				
A4 转动块体破坏				
A5 转动块体破坏				
A6 台阶状破坏				

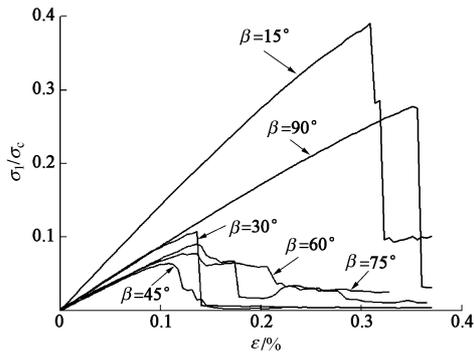


图 7 $\sigma_2/\sigma_c=0$ 时试验组 A 应力 - 应变曲线

Fig. 7 Complete stress-strain curves for the specimens in Group A under uniaxial compression

2.3 围压对破坏模式的影响

图 8 为试件 A1~A6 不同围压下的破坏模式与破坏示意图。通过对比可以得出, 随着围压的增大, 破坏不在局限于中间 1/3 处, 而是向上下部扩展到整个岩体, 翼裂纹的萌生处从原来的节理尖端向节理中部移动并且随节理倾角 β 的增大越来越明显。试件 A1 在 $\sigma_2/\sigma_c=0.05$ 时仍为面破坏, 但当围压继续增大时, 原沿节理面破坏转变为局部的材料破坏, 与 Prudencio 等^[9]的试件 3 的破坏模式和转变趋势基本相同, 仅在引起破坏模式转变的围压大小上有较小的差别。试件 A2, A3, A4, A5 组随着围压增大, 可以明显地观察到应力集中于岩桥部分, 并随围压应力水平的提高越来越显著, 使得原本不会破坏的岩桥出现破坏点, 导致岩体的破坏模式有向台阶状破坏转变的趋势, 并在高倾角高压 ($\beta=75^\circ, \sigma_2/\sigma_c=0.15$) 时, 彻底转变为台阶状破坏。由图 5 可以得到, 在决定破坏模式方面, 角度的影响依然大于围压的影响, 但是随围压的增高, 破坏模式有沿着面破坏—转动破坏—台阶状破坏转变的趋势。在 Prudencio 等^[9]的试验中并未涉及 $\beta=75^\circ, 90^\circ$ 的情况, 但通过试验结果的对比仍可以发现由转动破坏向台阶破坏转变的趋势。

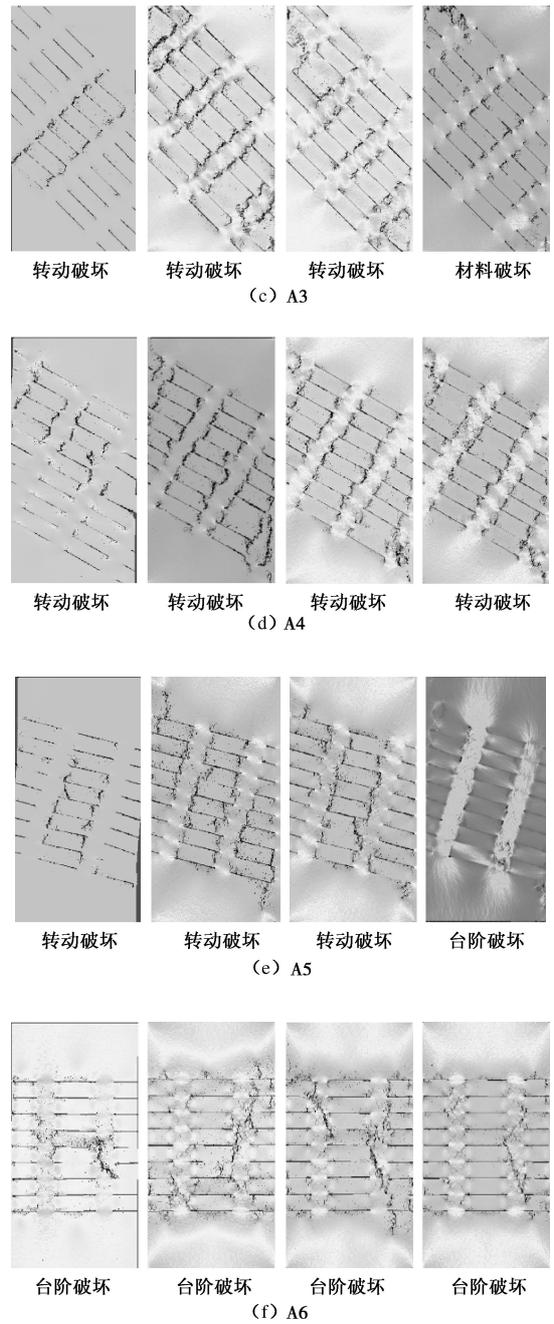
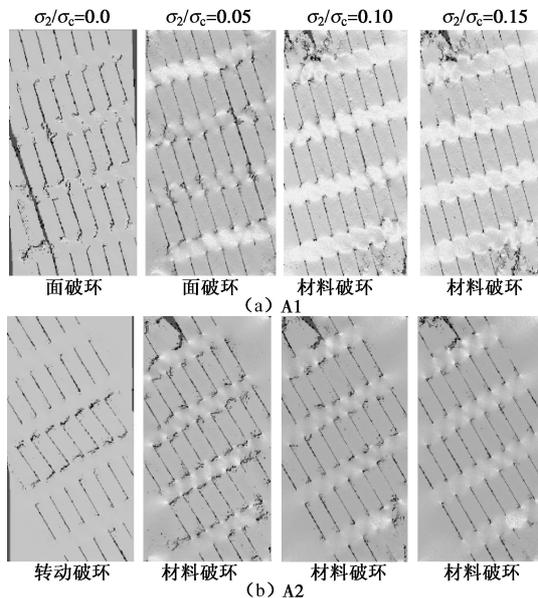


图 8 不同围压下 A 组破坏模式

Fig. 8 Failure process of the specimens in Group A under different lateral stresses

2.4 节理台阶角对破坏模式的影响

图 9 为试件 B1~B6 组破坏模式, 图 10 为相应的应力 - 应变曲线。当节理台阶角 $\gamma=90^\circ$ 时, $\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 试件组较 $\gamma=135^\circ$ 时的峰值强度有小幅提高, $\beta=60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 时的峰值强度下降, 其中 $\beta=90^\circ$ 时下降明显, 峰值强度关系为 $15^\circ > 30^\circ > 45^\circ > 60^\circ > 75^\circ > 90^\circ$, 破坏应变关系为 $15^\circ > 30^\circ > 60^\circ = 90^\circ > 45^\circ > 75^\circ$ 。其中, $\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 时为脆性破坏行为, $\beta=90^\circ$ 时为渐进破坏行为。与试件 A1~A6 组的破坏模式对比得到, $\beta=90^\circ$ 时破坏模式变化明显, 由台阶状破坏

转变为转动块体破坏,节理尖端产生的拉裂纹贯通层间空隙与下一层节理连通产生破坏,破坏点不在萌生于岩桥,不会产生台阶破坏,造成峰值强度降低,破坏应变变小。

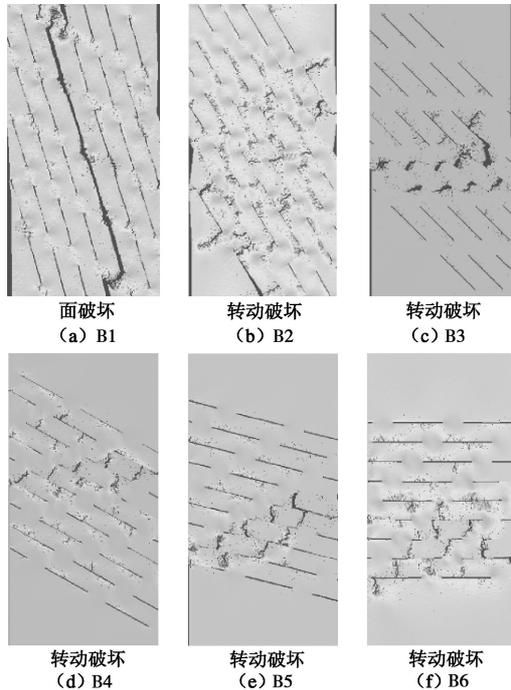


图9 单轴压缩下B组破坏模式

Fig. 9 Failure process of the specimens in Group B under uniaxial compression

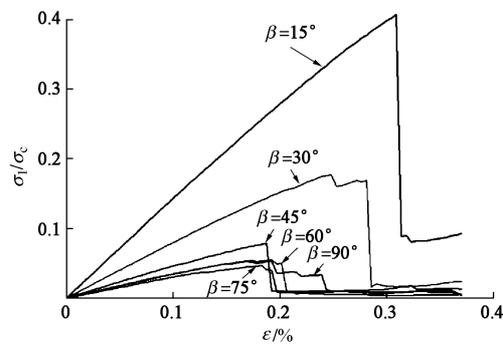


图10 单轴压缩下B组应力-应变曲线

Fig. 10 Complete stress-strain curves for specimens in Group B under uniaxial compression

2.5 层距对破坏模式的影响

图 11, 12 分别为单轴压缩下 C 组破坏图片与应力-应变曲线。当层距 $d=40\text{ mm}$ 时, 除 $\beta=90^\circ$ 的试件组外, 其余各组的峰值强度均有大幅提高, 其中 $\beta=30^\circ$ 时最为明显, 但当节理倾角 $\beta=90^\circ$ 时, 此组的峰值强度略低于 $d=20\text{ mm}$ 时的试件组, 峰值强度关系为 $15^\circ > 30^\circ > 90^\circ > 75^\circ > 45^\circ > 60^\circ$, 破坏应变 $90^\circ > 30^\circ > 15^\circ > 75^\circ > 60^\circ > 45^\circ$ 。图 13 为层距 $d=40\text{ mm}$ 时应力应变曲线, 其中试件 C1~C6 组的岩体的力学行为皆为脆性破坏行为, 破坏阶段弹性模量与强度下降突然。与试件 A1~A6 组的破坏模式

进行对比, 其中 $\beta=30^\circ$ 时破坏模式不同, 节理尖端同样有翼裂纹的萌生, 但随荷载增加, 新的破坏点并未出现在层间空隙, 而是产生于岩桥, 逐渐演化为主生裂纹, 与裂纹尖端的次生共面裂纹贯通, 产生剪切破坏, 破坏形式为面破坏, 提高了试件的峰值强度与破坏应变。试件 C4 为一种台阶-转动块体的混合破坏模式。节理倾角 $\beta=90^\circ$ 时, 破坏过程和模式与试件 A6 大体相同, 裂纹贯通岩桥产生阶梯破坏, 由于峰值强度略低于 $d=20\text{ mm}$ 时的试件组, 可见层距 d 对阶梯状破坏模式的影响较小, 对转动破坏模式影响较大, 因为随着层距 d 的增大, 裂纹难以贯通整个岩桥。整体而言, 层距 d 的提高减弱了节理倾角 β 对于岩体强度的影响, 使得整体力学行为更接近无节理岩体。

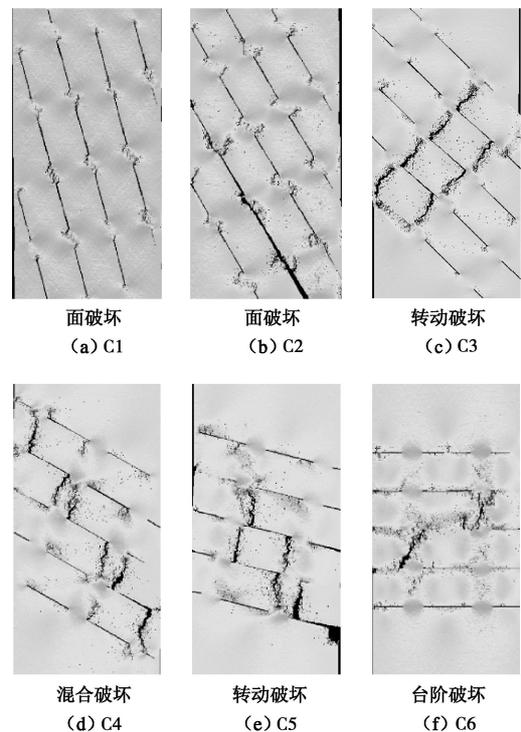


图11 单轴压缩下C组破坏模式

Fig. 11 Failure process of the specimens in Group C under uniaxial compression

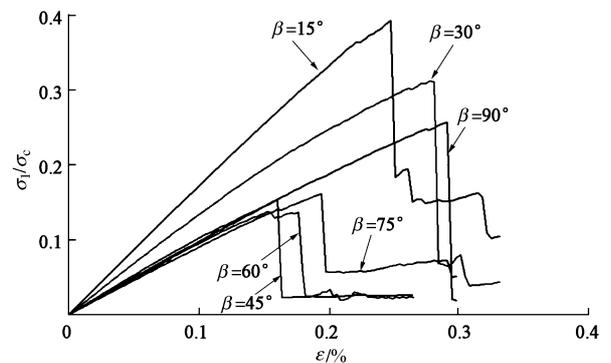


图12 单轴压缩下C组应力-应变曲线

Fig. 12 Complete stress-strain curves for the specimens in Group C under uniaxial compression

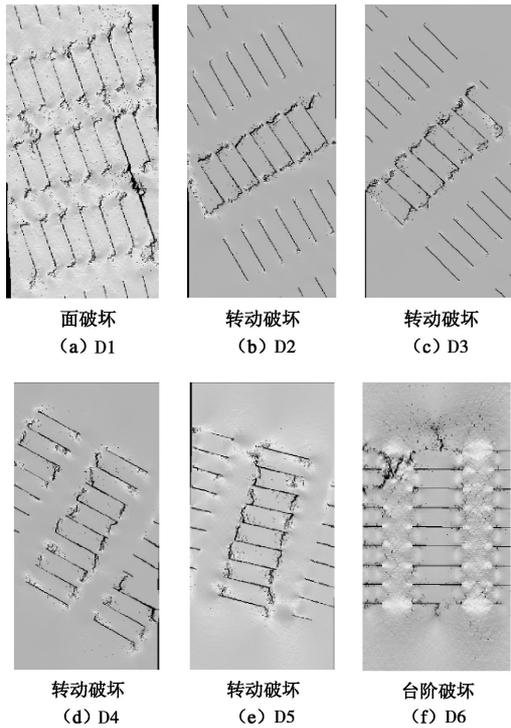


图 13 单轴压缩下 D 组破坏模式

Fig. 13 Failure process of the specimens in Group D under uniaxial compression

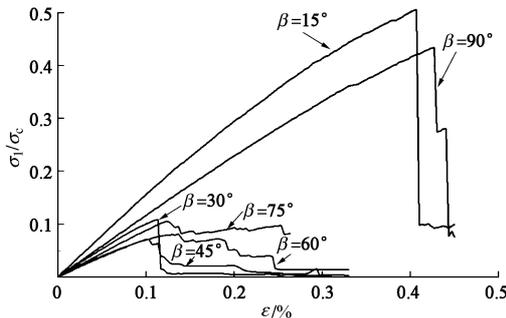


图 14 单轴压缩下 D 组应力 - 应变曲线

Fig. 14 Complete stress-strain curves for the specimens in Group D under uniaxial compression

2.6 岩桥长度对破坏模式的影响

图 13, 14 分别为单轴压缩下 D 组试样的破坏模式与应力 - 应变曲线。当岩桥长度增大至 30 mm 时, 由图 16 可得, $\beta = 15^\circ, 90^\circ$ 时峰值强度大幅提高, 破坏应变变大, 其余各组提高并不明显, 峰值强度关系为 $15^\circ > 90^\circ > 30^\circ > 75^\circ > 60^\circ > 45^\circ$, 破坏应变关系为 $90^\circ > 15^\circ > 60^\circ > 75^\circ > 30^\circ > 45^\circ$, $\beta = 45^\circ$ 时峰值强度、破坏应变皆为最小。破坏模式与岩体力学行为与 $l_r = 20$ mm 时类似, 可见岩桥长度对于破坏模式的影响并不大, 由于剪切面破坏与台阶状破坏裂纹的扩展、贯通是发生在岩桥中, 所以岩桥长度的增加导致了峰值强度、破坏应变增大, 而对转动破坏的 D2、D3、D4、D5 试件影响较小。

2.7 几何参数与围压对节理岩体各向异性的影响

图 15 是在改变节理倾角下, 不同层距、岩桥长度

和台阶角的岩体各向异性特征曲线。从图 15 中可以看出, 层距 d 和岩桥长度 l_r 的变化, 对于节理岩体的各向异性变化规律影响不大。随着倾角的增大, 峰值强度都有一个减小—增大的变化趋势, 但节理台阶角 $\gamma = 90^\circ$ 时, 峰值强度是单调降低。节理台阶角对于 $\gamma = 90^\circ$ 时的破坏形式影响较大, 继而造成峰值强度、破坏应变变小, 但对其他各角度的破坏模式、峰值强度、破坏应变影响不大, 仅改变了岩体的力学行为。

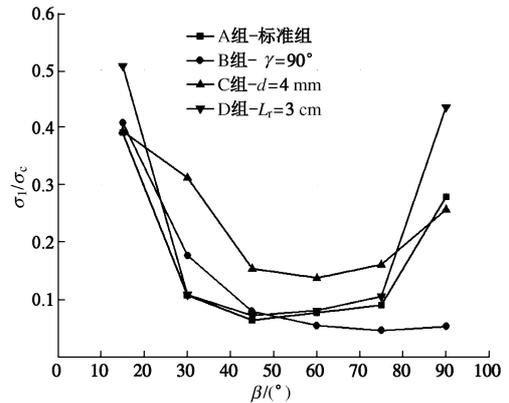


图 15 节理几何参数对各向异性影响

Fig. 15 Influence of the joint geometry and distribution on anisotropic behaviors of the rock specimens

图 16 为不同应力水平下岩体的各向异性, 由图 16 可知, 围压对强度的提高有很大影响, 从 $\sigma_2/\sigma_c = 0$ 提高至 $\sigma_2/\sigma_c = 0.05$ 时, 各角度峰值强度提高约 50%, 但从 $\sigma_2/\sigma_c = 0.05$ 提高至 $\sigma_2/\sigma_c = 0.10$ 时, 仅提高约为 25%, 并随着围压的增大, 峰值强度提高水平逐渐降低。由于 $\beta = 15^\circ$ 时高围压状态 ($\sigma_2/\sigma_c = 0.1, 0.15$) 的两组试件均为局部的材料破坏, 所以在曲线上表现为强度值相同。对于不同围压, $\beta = 45^\circ$ 时均为强度最小值, 基本规律为 $15^\circ > 90^\circ > 30^\circ > 75^\circ > 60^\circ > 45^\circ$, 其中 $\beta = 45^\circ$ 与 $\beta = 75^\circ$ 时强度值很接近。从图 17 观察可得, 除 $\sigma_2/\sigma_c = 0.15$ 外, $\beta = 45^\circ$ 时为破坏应变最小值, 对于 $\sigma_2/\sigma_c = 0.15$ 时, 由于 $\beta = 15^\circ$ 与 30° 时皆为局部的材料破坏, 所以实际上限制的破坏的继续增大, 导致破坏应变与 $\sigma_2/\sigma_c = 0.1$ 时数据很接近, 在 $\beta = 60^\circ$ 时破坏应变出现峰值。

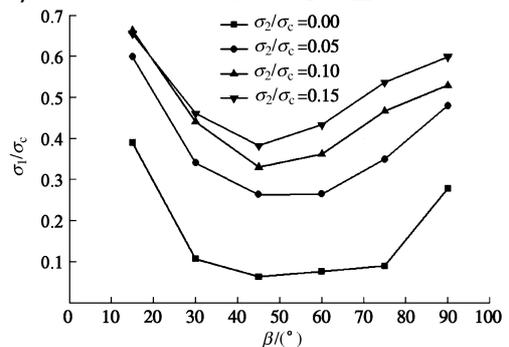


图 16 不同围压下 A 组岩体的各向异性

Fig. 16 Anisotropic behaviors of the specimens in Group A under different lateral stress

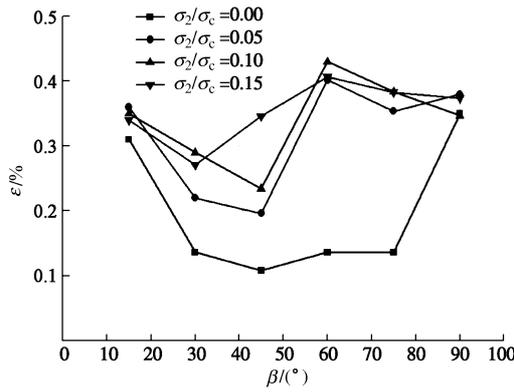


图 17 不同围压下 A 组的破坏应变

Fig. 17 Strains at the peak points of the specimens in Group A under different lateral stresses

由图 18 可知, $\gamma=90^\circ$ 时破坏应变的变化趋于平缓, 整体呈下降趋势, 但幅度不大, $\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 时, 破坏应变大于试件 A1~A5 组, $\beta=90^\circ$ 时, 破坏应变明显小于试件 A6, $\beta=60^\circ$ 时出现反弹。 d 的增大导致除 $\beta=15^\circ, 90^\circ$ 以外的破坏应变增大, 整体关系为 $30^\circ > 90^\circ > 15^\circ > 75^\circ > 45^\circ > 60^\circ$ 。当 $l_r=30\text{ mm}$ 时, 整体破坏应变的各向异性影响与试件 A1~A6 组类似, 其中 $\beta=15^\circ, 90^\circ$ 时破坏应变大于试件 A1, A6, 与图 13 对比发现, 破坏应变的提升伴随着强度峰值的提高, 说明 l_r 仅影响沿节理面破坏与台阶状破坏模式, 且为线性提高。

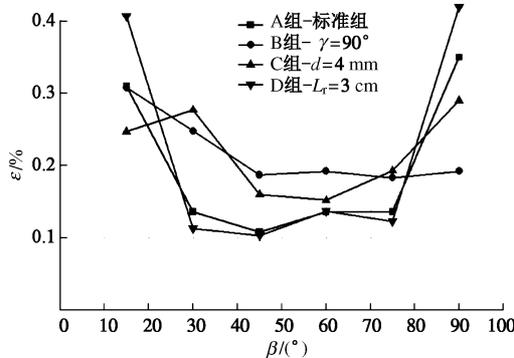


图 18 节理几何参数对应变的影响

Fig. 18 Influences of the geometric parameters of joints on strain at peak points

2.8 破坏模式与围压、节理角度关系

通过对本论文中 A 组试验现象的归纳总结, 可以得到图 19 中所示结论。岩体的破坏模式可以大致的根据节理角度划分为 5 个区域, 依次为沿节理面破坏、节理面-转动复合破坏、转动破坏、转动-台阶复合破坏、台阶状破坏。在当围压增大时, 低角度会出现岩体材料破坏。图 20 为 Prudencio 等^[9]得到的结论, 对比可以看出本文的数值试验结果与物理试验有较好的一致性, 并在物理试验的基础上做了补充与完善, 得到了当节理角度大于 60° 时的试验结果。当 $\beta=75^\circ$ 时岩体的破坏模式仍为转动破坏, 所以在图 20 中, 发

生转动破坏的区域不尽准确, 至少应包含 $\beta=75^\circ$ 的区域。围压施加后, 试件的破坏模式由转动块体破坏转变为材料破坏, 此时模型的极限强度由岩石材料所控制, 限制了试件强度的继续增大。

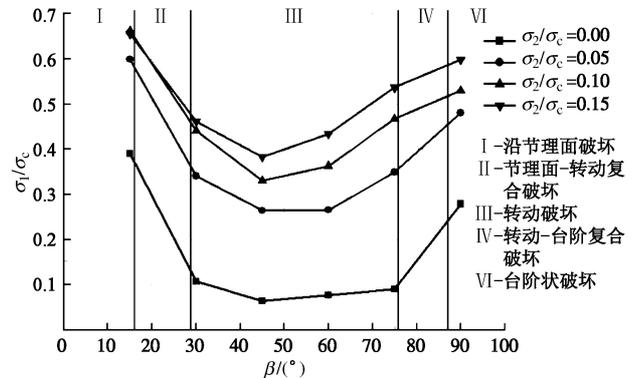


图 19 A 组破坏模式与围压、节理角度关系

Fig. 19 Influence of the lateral stress and joint angle on failure modes for the specimens in Group A by numerical simulation

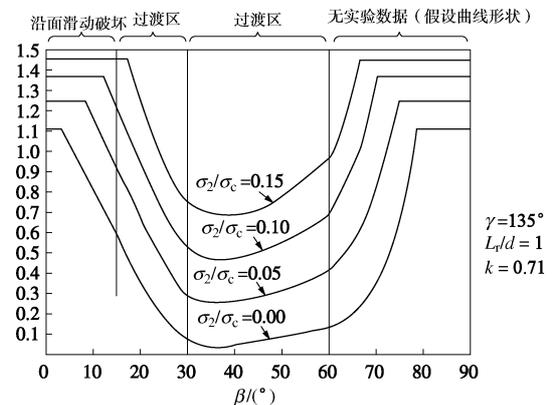


图 20 A 组破坏模式与围压、节理角度关系的物理试验结果^[9]

Fig. 20 Laboratory results of influence of the lateral stress and joint angle on failure modes for specimens in Group A^[9]

3 结 论

本文基于细观力学的数值模拟方法, 建立了针对节理岩体的计算模型和破裂准则, 从数值模拟角度来分析节理岩体在单轴压缩下的破坏机理与基本规律, 数值模拟结果与物理试验一致, 得到以下 7 点结论。

(1) 随着节理倾向的改变, 岩体破坏表现出 4 种破坏形式: 沿面破坏、转动块体破坏、台阶状破坏和混合破坏。沿面破坏与台阶状破坏峰值强度高、破坏应变大, 转动破坏峰值强度低、破坏应变小。

(2) 岩体进入破坏后期阶段其力学行为表现为渐进破坏和脆性 2 种行为模式。随着节理倾角的增大, 岩体力学行为表现出脆性破坏—渐进破坏—脆性破坏的循环过程。

(3) 随着应力水平的提高, 岩体的破坏区域由中部上端部扩展, 破坏模式发生转变, 高围压下发生局

部的材料破坏。

(4) 节理台阶角 γ 对于 $\beta=90^\circ$ 时的破坏形式影响较大, 由台阶状破坏转变为转动块体破坏, 造成峰值强度、破坏应变变小, 但对其他各角度的破坏模式、峰值强度、破坏应变影响不大, 仅改变了岩体的力学行为。

(5) 层距 d 对阶梯状破坏模式影响较小, 对转动破坏模式影响较大, 层距增大键入了节理倾角对于岩体强度的影响。

(6) 岩桥长度 l_r 不影响破坏模式的转变, 但对面破坏与台阶状破坏模式的峰值强度、破坏应变影响较大。

(7) 围压对于强度的提高有显著作用, 但当 $\sigma_2/\sigma_c > 0.05$ 时, 提高水平随围压的继续增加而降低。

本文从数值计算的角度对节理岩体破坏规律进行了探讨。通过对比发现, 模拟结果与物理试验规律一致, 但数值模拟结果可以清晰获得节理岩体中应力场分布、裂纹起裂点与扩展方向、破坏图像等, 有利于其内在破坏规律与机理。

参考文献:

- [1] 李 宁, SWOBODA G. 当前岩石力学数值方法的几点思考[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, **16**(5): 502 - 505. (LI Ning, SWOBODA G. Discussion on the application of numerical methods to rock mechanics and engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering, 1997, **16**(5): 502 - 505. (in Chinese))
- [2] JAEGER J, COOK N. Fundamentals of rock mechanics[M]. London: Chapman and Hall LTD, 1969: 53 - 108.
- [3] RAMAMURTHY T, ARORA V. Strength predictions for jointed rocks in confined and unconfined states[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1994, **31**(1): 9 - 22.
- [4] LAJTAI E Z. Brittle fracture in compression[J]. International Journal of Fracture, 1974, **10**(4): 525 - 536.
- [5] TIWARI R P. Point failure behavior of a rock mass under the influence of triaxial and true triaxial confinement[J]. Engineering Geology, 2006, **84**(3/4): 112 - 129.
- [6] GERMANOVICH L N, SALGANIK R L, DYSKIN A V, et al. Mechanisms of brittle fracture of rocks with multiple pre-existing cracks in compression[J]. Pure Appl Geophys, 1994, **143**(1/2/3): 117 - 149.
- [7] LIN P, ROBINA H C, WONG K T, et al. Multi-crack coalescence in rock-like material under uniaxial and biaxial loading[J]. Key Engineering Materials, 2000, **183**(1): 809 - 814.
- [8] 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.
- [9] PRUDENCIO M, VAN SINT JAN M. 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.
- [10] 张志刚, 乔春生, 李 晓. 单节理岩体强度试验研究[J]. 中国铁道科学, 2007, **28**(4): 34 - 39. (ZHANG Zhi-gang, QIAO Chun-sheng, LI Xiao. Experimental study on the strength of single joint rock mass[J]. China Railway Science, 2007, **28**(4): 34 - 39. (in Chinese))
- [11] 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))
- [12] 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))
- [13] 汤明高, 许 强, 黄润秋, 等. 小湾水电工程 6#山梁节理岩体高边坡 3DEC 分析[J]. 水文地质工程地质, 2006(3): 57 - 60. (TANG Ming-gao, XU Qiang, HUANG Run-qiu. 3DEC analysis on 6# high rock slope with joints in Xiaowan Hydropower Projec[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006(3): 57 - 60. (in Chinese))
- [14] 朱道建, 杨林德, 蔡永昌. 柱状节理岩体压缩破坏过程模拟及机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(4): 716 - 724. (ZHU Dao-jian, YANG De-lin, CAI Yong-chang. Simulation of compressive failure process of columnar jointed rock mass and its failure mechanism analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(4): 716 - 724. (in Chinese))
- [15] 唐春安, 王述红, 傅宇方. 岩石破裂过程数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003. (TANG Chun-an, WANG Shu-hong, FU Yu-fang. Numerical tests of rock failure process[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese))