

单压下节理密度及倾角对类岩石试件强度及变形的影响

王佩新¹⁾, 曹平¹⁾✉, 蒲成志²⁾, 范祥³⁾, 陈瑜¹⁾, 王聪聪¹⁾

1) 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083 2) 南华大学核资源工程学院, 衡阳 421001

3) 长安大学公路学院, 西安 710064

✉通信作者, E-mail: pcao_csu@sina.com

摘要 通过预制张开节理类岩石试件, 在单轴压缩条件下, 研究节理密度及倾角的组合作用对试件强度和变形特征的影响。试验结果表明: (1) 随着节理倾角的增大, 应力-应变曲线由多峰值转变为单峰值, 试件脆性增强, 延性减弱; (2) 节理密度对当量峰值强度的影响与节理倾角大小有关, 对当量弹模的影响呈“V”形变化, 即当量弹模随着节理密度的增大呈现先减小后增大的变化规律; (3) 当量弹模随节理倾角的增大而增大, 在节理倾角为 90° 的时候达到最大值, 为完整试件弹性模量的70%~80%; (4) 节理倾角对多节理类岩石试件当量峰值强度和当量弹性模量的影响大于节理密度的影响。对试验结果进一步分析发现: 节理密度及节理倾角与应力-应变曲线、当量峰值强度及当量弹性模量之间的关系, 其变化规律与试件的破坏过程息息相关, 其破坏模式可分为张拉破坏、剪切破坏和复合破坏。

关键词 类岩石试件; 岩石节理; 倾角; 密度; 单轴压缩; 峰值强度; 弹性模量; 破坏模式

分类号 TU452

Effect of the density and inclination of joints on the strength and deformation properties of rock-like specimens under uniaxial compression

WANG Pei-xin¹⁾, CAO Ping¹⁾✉, PU Cheng-zhi²⁾, FAN Xiang³⁾, CHEN Yu¹⁾, WANG Cong-cong¹⁾

1) School of Resources and Safety Engineering, University of Central South, Changsha 410083, China

2) School of Nuclear Resources Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China

3) School of Highway, University of Chang'an, Xi'an 710064, China

✉Corresponding author, E-mail: pcao_csu@sina.com

ABSTRACT The effects of the combination of joint density and inclination on the strength and deformation characteristics of rock-like specimens containing open joints were studied by using uniaxial compression tests. The following conclusions were made: with the increase of joint inclination, the stress-strain curve changes from a multi-peak value to a single peak value and the brittleness of the specimen enhances, whereas the ductility of the specimen weakens. The influence of joint density on the unified peak strength is related to the size of joint inclination, and the effect of joint density on the unified modulus shows a “V” shape, namely, the unified elastic modulus first decreases and then increases with the increase of joint density. With the increase of joint inclination, the unified elastic modulus increases gradually and its maximum value, which achieves 70%–80% of the complete specimens' elastic modulus, appears at 90° of joint inclination. The joint inclination is the major influencing factor on the unified peak strength and the unified elastic modulus of the rock-like specimens containing many joints. Further analysis on the test results demonstrates that the transformation law of the relationship between the joint density or joint inclination and the stress-strain curve, as well as the unified peak strength and the unified elastic modulus, is related to the failure process of the specimen. The failure mode of the specimen can be classified into three

收稿日期: 2016-07-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10972238); 中南大学硕士生自主探索创新项目(2016zzts448)

categories: tension failure, shear failure, and mixed failure.

KEY WORDS rock-like specimens; rockjoints; inclination angle; density; uniaxial compression; peak strength; elastic modulus; failure modes

天然岩体和工程岩体中均普遍存在成因不同的节理、层理、裂隙、断层等多种软弱结构面, 这些软弱结构面的存在对岩体的力学特征及变形破坏机制起到了不同程度的影响。在土木、采矿、交通等岩体工程中, 为了保证这些工程得到安全、经济及合理的设计与施工, 工程师对节理岩体的力学特性及破坏机制有一个正确的认识至关重要。

目前, 考虑到现场大型原位试验成本高, 难度大, 国内外学者主要采用室内实验和数值模拟对节理岩体的力学性质及破坏机制进行了大量的研究^[1-12]。Lajitai^[1-2]利用含2条节理的石膏试件进行直剪试验研究节理岩体的剪切破坏形式; Bobet和Einstein^[3]通过预制两条张开或闭合节理的石膏试件研究其在单轴及双轴压缩条件下的裂纹萌生、扩展和贯通行为; 在前人的基础上, Yang等^[4]采用预制节理的大理岩研究节理的倾角对岩体的强度、弹性模量和峰值应变的影响; 蒲成志等^[5]通过预制2条贯通裂隙的类岩石试件研究单轴压缩条件下不同裂隙倾角的材料破坏模式; 李树忱等^[6]采用预制贯通节理的水泥砂浆试件研究节理倾角对峰后变形破坏的影响; 张伟等^[7]利用水泥砂浆试件进一步研究在动、静载荷作用下不同节理倾角对其力学特性的影响; 而陈新等^[8]则利用预制节理石膏试件研究节理倾角及连通率的组合作用对岩体强度和变形的影响。

在室内类岩石试验中, 主要研究节理倾角在不同试验条件下对预制节理试件的力学性质、破坏模式、裂

纹扩展与贯通模式的影响, 对节理的其他变量如粗糙度、密度、张开度、连通率及这些变量组合条件下的力学特性和变形破坏规律的研究较少, 而天然岩体是复杂的多相材料, 其节理的几何分布条件不一, 节理的变量复杂, 会对岩体的力学特性产生较大影响。为此, 本文通过预制张开的多节理类岩石试件进行单轴压缩试验, 系统研究在节理分布密度与节理倾角双重因素影响下岩石强度及变形破坏规律。

1 试验概况

1.1 试件制备

将C42.5的白水泥、水及砂子(粒径小于1.05 mm)按体积比2:1:1在室温下制作, 试件外形尺寸为200 mm × 150 mm × 30 mm。采用预埋0.4 mm厚度的铝合金薄片的方法, 预制节理为贯通厚度的对齐排列裂隙, 裂隙长度均为20 mm, 在试件初凝未凝之前拔出铝合金薄片, 并于室温下养护24 h拆模, 再养护28 d。

节理倾角 α 的值分别设为25°、45°、75°和90°, 每组预制的有序节理数量分别有5、10、15、20和30条, 每5条设一行, 每个类型试件各制作3个。为减少端面效应对节理破坏的影响, 节理与上下端面要有一定的间隔, 并保证节理尽量均衡分布, 综合考量下, 试件节理分布方式如图1所示(以25°为例), 其节理中心水平间距不变, 均为30 mm, 调节其节理中间的行间距, 分别为0、100、50、40和32 mm。

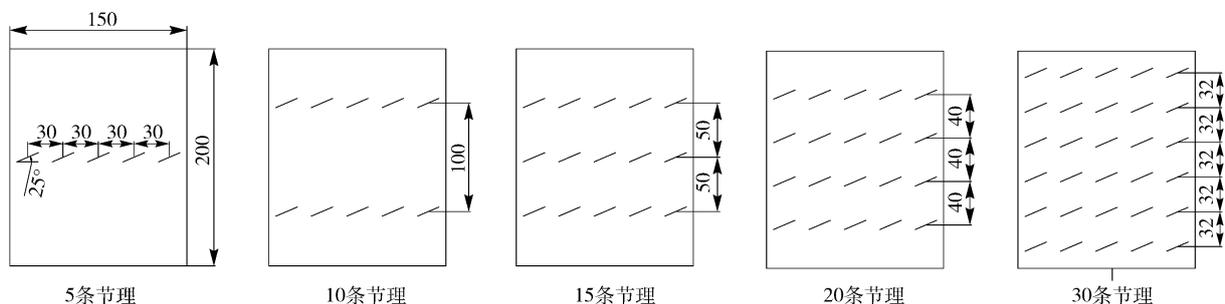


图1 试件节理分布方式(单元: mm)

Fig. 1 Distribution pattern of joints within the specimen (unit: mm)

1.2 试验设备及加载条件

单轴压缩试验在高精度微机控制电液伺服试验机(见图2)上完成。试验中, 主轴采用力控加载方式, 速度为 $200 \text{ N} \cdot \text{s}^{-1}$, 并于试件中部横向放置千分表, 用来观测试件在受压过程中的横向变形状况。在试验进行之前, 为减弱端部效应对试验结果的影响, 预先在试件

端部与刚性承压板之间涂抹黄油。在试验过程中, 采用高清数码相机记录试件表面破坏过程以便于后期对试件破坏过程进行分析。

在此试验条件下, 对完整模型材料试件进行巴西劈裂试验、单轴压缩试验等, 测得完整类岩石试件的物理力学参数(如表1所示)。



图 2 电液伺服控制试验机

Fig. 2 Electro-hydraulic servo control testing machine

表 1 试件的物理力学参数

Table 1 Mechanical parameters of the samples

平均密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E / GPa	单轴抗压强度 σ_c / MPa	单轴抗拉强度 σ_t / MPa	泊松比 ν	黏聚力 c / MPa	内摩擦角 $\phi / (^\circ)$
2019	2.27	23.13	2.75	0.23	5.0	34

2.1 同倾角不同节理密度的全应力-应变曲线

各节理倾角下,不同节理密度的类岩石试件的轴向应力-应变曲线见图 3 所示.随着节理倾角的增大,其应力-应变曲线由多峰曲线变为单峰曲线,其中在

2 试验结果及分析

对于相同节理布置的试件,进行完全相同的 3 次重复试验.在同一类型试件试验中,剔除试验强度离散性较大的试件,选取中间值作为该类型试件的代表性试验结果.其中,本文曲线的编号规则,第一个数字代表节理条数,第二个数字代表节理倾角的度数,如:5-25 表示 5 条节理,其倾角的度数为 25°.

在节理长度一致的情况下,可采用单位体积内节理的条数来表征节理密度^[13].本文为便于表达及描述,采用试件节理条数直接表征节理密度,在相同尺寸试件中,节理条数越多,节理密度越大.

25°和 45°的多峰表现得尤为明显,并且在峰值周边曲线形状表现出随倾角的增大越来越尖锐的现象,反映多节理类岩石随倾角增大,破坏时表现为延性减弱,脆性增强.

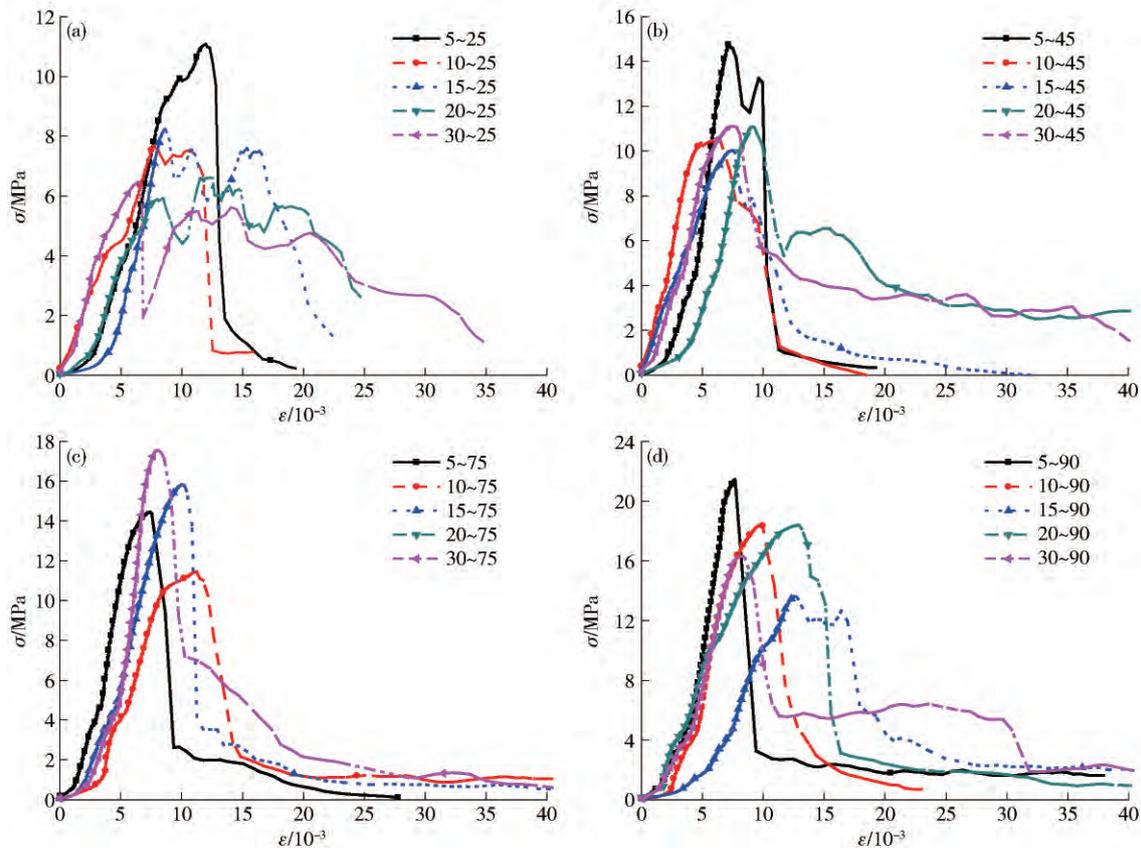


图 3 同倾角不同节理密度应力-应变曲线. (a) 节理倾角 25°; (b) 节理倾角 45°; (c) 节理倾角 75°; (d) 节理倾角 90°

Fig. 3 Axial stress-strain curves for specimens with different joint densities and inclination angles: (a) joint inclination 25°; (b) joint inclination 45°; (c) joint inclination 75°; (d) joint inclination 90°

2.2 节理密度及节理倾角对单轴压缩强度的影响

为便于度量节理密度及节理倾角对节理岩体强度的影响, 将含节理的类型岩石试件的单轴压缩峰值强度与完整模型试件的单轴压缩峰值强度的比值 σ_{jc}/σ_c 作为当量峰值强度^[12]. 本文对各个类型试件的单轴峰值强度进行整理和统计, 并分别绘出图 4 和图 5. 其中图 4 反映了不同节理密度的当量峰值强度随节理条数的变化规律, 图 5 反映了不同节理倾角的当量峰值强度随节理倾角的变化规律. 从这两幅图都可以看出, 当量峰值强度都小于 1, 说明节理的存在弱化了岩石的强度.

从图 4 可见, 节理岩体的模拟试件的节理密度对当量峰值强度的影响与节理倾角的大小有关: 节理条数从 5 条到 10 条时, 当量峰值强度随节理条数的增加而减小, 减少的幅度与节理倾角有关: 节理倾角越小, 下降速度越快; 节理条数从 10 条到 30 条时, 节理倾角为 25°和 90°时, 随节理条数的增加而缓慢下降; 而节理倾角为 45°和 75°时, 其当量峰值强度随节理密度的增加而缓慢上升.

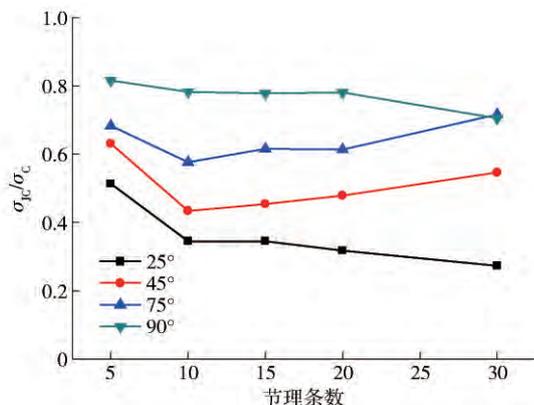


图 4 当量峰值强度随节理密度的变化曲线

Fig. 4 Variation of unified peak strength with joint density

从图 5 可见, 当量峰值强度随节理倾角的增大而增大. 从图中可以看出当量峰值强度随倾角变化的曲线线性关系明显, 因此对其进行线性拟合, 得到的拟合曲线参数如表 2.

表 2 试件当量强度与节理倾角的拟合参数

Table 2 Fitting parameters of the function between unified peak strength and joint inclination angle under different joint densities

节理条数	斜率 $a/10^{-3}$	截距 b	R^2
5	4.13	0.418	0.890
10	6.31	0.164	0.903
15	6.27	0.182	0.961
20	6.64	0.157	0.962
30	6.59	0.173	0.810

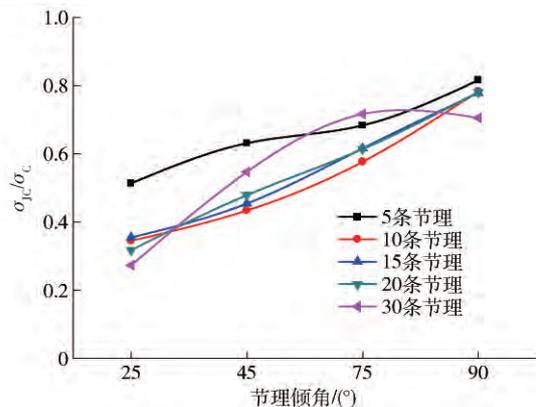


图 5 当量峰值强度随节理倾角的变化曲线

Fig. 5 Variation of unified peak strength with joint inclination angle

拟合曲线的斜率随节理条数(即节理密度)的变化见图 6, 可以发现拟合曲线的斜率随节理密度的增大基本上是增大的, 反映出随节理密度的增加, 当量峰值强度的变化速率加快. 特别是在节理条数从 5 条增加到 10 条时, 变化速率加快了 52.78%, 其后, 在 10 到 20 条时, 变化速率较为缓慢, 在 20 条时当量峰值强度增长速率达到最大, 随后变化速率基本持平. 这也反映出节理密度的增加, 加快了当量峰值强度的响应速度, 但当节理密度提高到一定程度时(15 条), 其响应速度变化不大.

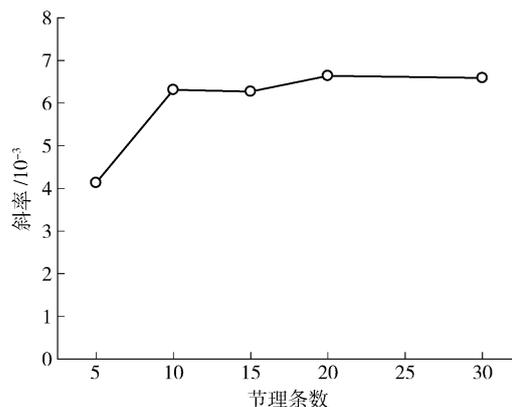


图 6 拟合曲线斜率随节理密度变化曲线

Fig. 6 Variation of the slope of the fitting line with joint density

从图 4 可以看出节理条数从 5 条增加到 10 条时, 25°、45°及 75°倾角试件当量峰值强度分别降低了 0.168、0.197 和 0.107. 但当节理条数从 10 条增长到 30 条时, 其当量峰值强度在节理倾角为 25°的试件中降低了 0.0718, 即节理条数从 10 条增长到 30 条时, 其强度削弱了 7.18%; 在节理倾角为 45°和 75°时, 其强度分别增强了 11.3% 和 13.9%. 说明节理密度在刚开始增加时对试件峰值强度影响较大, 节理密度的继续增加对峰值强度的降低(或增加)将趋于平缓, 试件强度趋于稳定. 从图 5 可以看出在节理密度一致的情况下, 节理倾角从 25°增大到 90°时其当量峰值强度增

长了 30% ~ 55%。从图 4 和图 5 的对比中可以发现其节理倾角对试件强度的影响大于节理密度。

2.3 节理密度及节理倾角对弹性模量的影响规律

本文的弹性模量选取的是峰值强度 σ_c 的 50% 与应力-应变曲线原点连线的斜率。为了便于衡量节理密度及节理倾角对节理岩体的影响,将含节理试件的弹性模量与完整试件的弹性模量的比值 E_{JR}/E_R 作为当量弹性模量^[14]。

在节理倾角不变的情况下,当量弹性模量随节理密度的变化见图 7。从图 7 可以看出,随着节理倾角的增大,其当量弹性模量逐渐增大,在 90° 的时候最大,达到完整试件弹性模量 80% 左右。随着节理密度的增大,试件的当量弹性模量总体上呈现先减小后增大的现象,即“V”形变化,在节理倾角为 25° 和 45°,其当量弹性模量在 15 条节理时取得最小值。

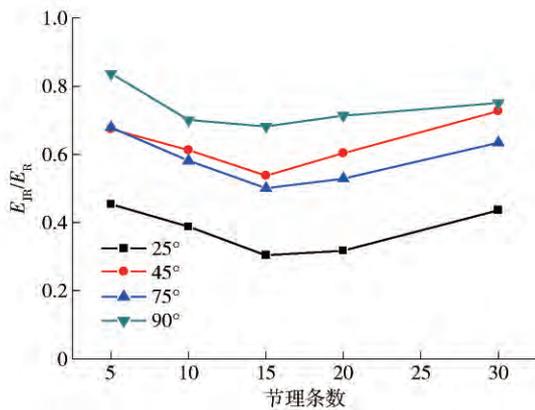


图 7 当量弹性模量随节理密度的变化曲线

Fig. 7 Variation of unified elastic modulus with joint density

在节理密度不变的情况下,当量弹性模量随节理倾角的变化见图 8。由图 8 可以看出,当量弹性模量都是小于 1,说明节理的存在使弹性模量降低,原因是节理的存在使岩石压密阶段变长,从而使割线弹模的斜率变小。从图中可以发现,总体上,当量弹性模量随节理倾角的增大而增大,且在 25° 到 45° 上升最为明显,当量弹性模量都增加了 0.2 以上,在 45° 到 75° 趋于平缓,部分曲线(节理条数为 20 条至 30 条)有缓慢下降的趋势,其下降的原因是其破坏方式由张拉破坏转变为剪切破坏引起的,从 75° 到 90° 区间,总体上上升趋势明显。

从图 7 可以看出在节理倾角为 25° 和 45° 的试件中,节理条数从 15 条增长到 30 条时,其当量弹性模量分别从 0.304 和 0.537 增长到 0.436 和 0.726,其弹性模量分别增长了 13.2% 和 18.9%;在节理倾角为 75° 的试件中,节理条数从 20 条增长到 30 条时,其弹性模量增长了 10.57%。从图 8 可以看出在节理密度一定的情况下,节理倾角从 25° 增长到 90° 时,其当量弹性

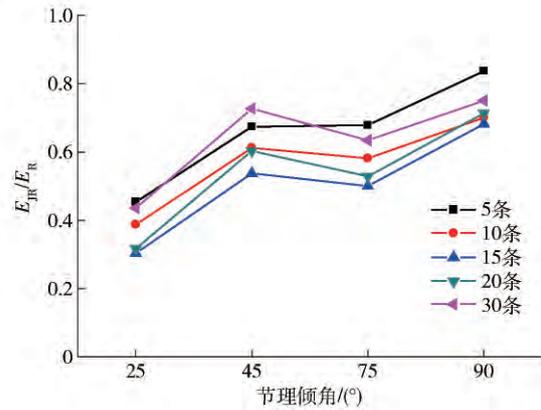


图 8 当量弹性模量随节理倾角的变化曲线

Fig. 8 Variation of unified elastic modulus with joint inclination angle

模量增长了 30% ~ 50%。对比图 7 和图 8 可以发现节理倾角对弹性模量的影响大于节理密度的影响。

2.4 结果分析

上述模拟节理岩体的类岩石试件单轴压缩试验探究了节理密度及节理倾角与应力-应变曲线、当量峰值强度及当量弹性模量之间的关系,其变化规律与试件的破坏过程息息相关。

节理密度对类岩石试件峰值强度及弹性模量的影响相对节理倾角对其的影响较小。在节理条数从 5 条增长到 10 条及节理倾角为 25° 的试件中,其峰值强度随节理密度的增大而减小,这与赵伟等^[15]的观点一致。

但在 45° 和 75° 倾角的试验中,节理条数从 10 条增长到 30 条的试件出现其峰值强度随节理密度的增大而缓慢上升的趋势。原因有两点:(1) 由于节理密度的增大,导致裂纹的产生从互不影响到相互抑制,同时其试件裂纹的贯通破坏方式也出现了变化,从而提高了峰值强度;(2) 节理密度的增大,导致节理相对分布位置和几何排布发生了变化,节理与优势破坏面(局部剪切带)走向越一致,越容易沿节理贯通面剪切破坏^[15]。

根据试件的破坏时受力的不同可将破坏模式分成三种:张拉破坏、剪切破坏和复合破坏。类岩石试件在单轴压缩条件下,可能产生剪切及张拉两类裂纹。依据试验现象,选取较为典型的裂纹扩展方式(如图 9 所示),建立裂纹扩展模型如图 10 所示(红色表示张拉裂纹,蓝色表示剪切裂纹, τ 为剪切应力, σ_1 为拉伸应力, P 为垂直压力, α 为节理倾角),裂纹产生的条件及时段见下文。

本文对试件不同形式的破坏次数做了统计,研究节理密度及节理倾角与试件破坏形式的关系,如表 3 与表 4 所示。从表 3 可以发现节理倾角对其破坏形式的影响主要是:当节理倾角较小时(25°),主要发生张

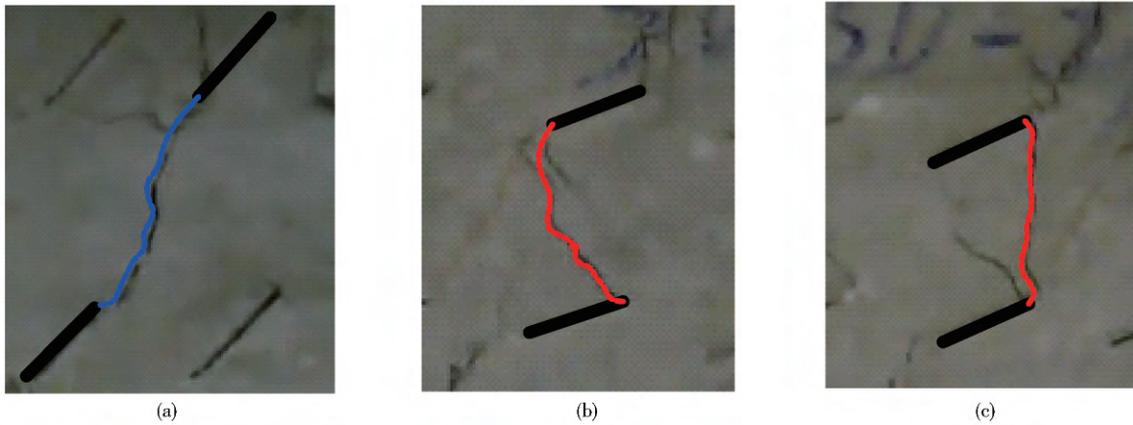


图9 典型节理扩展方式. (a) 沿倾角方向扩展的剪切裂纹; (b) 垂直倾角方向扩展的拉伸裂纹; (c) 平行加压方向扩展的拉伸裂纹
 Fig.9 Typical failure modes of joints: (a) shear failure in the inclination direction; (b) tensile failure perpendicular to the inclination direction; (c) tensile failure parallel to the direction of pressure

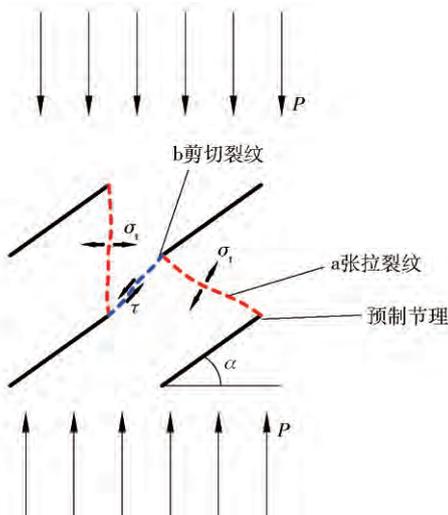


图10 预制节理表面应力状态及破坏特征

Fig.10 Stress distribution state of prefabricated joints and failure characteristic

拉破坏 随着节理倾角的继续增大(45°~75°) 转变为以剪切破坏和复合破坏为主,当节理倾角增大为90°时 破坏形式全部为张拉破坏. 从表4 可以发现节理密度对其破坏形式的影响主要是: 随着节理条数的增多,试件的破坏形式由单纯的张拉破坏和剪切破坏逐渐转变为复合破坏.

表3 不同节理倾角试件破坏形式

Table 3 Failure forms of rock-like specimens with different joint inclination angles

节理倾角/(°)	破坏次数		
	张拉破坏	剪切破坏	复合破坏
25	8	—	2
45	4	2	4
75	2	2	6
90	10	—	—

表4 不同节理密度试件破坏形式

Table 4 Failure forms of rock-like specimens with different joint densities

节理条数	破坏次数		
	张拉破坏	剪切破坏	复合破坏
5	6	2	—
10	7	1	—
15	7	1	—
20	2	—	6
30	2	—	6

图11 给出了节理条数为20条,节理倾角分别为25°、45°、75°和90°的试件破坏图. 图11(a)为复合破坏,以张拉破坏为主. 该试件首先在两侧的节理尖端产生与节理垂直的拉伸裂纹,与相近节理搭接、贯通,当此拉伸裂纹发育受到阻碍时,试件中部的节理开始产生沿对角线倾斜的剪切裂纹,此裂纹相互搭接、贯通,直至试件完全破坏. 图11(b)为复合破坏,剪切破坏为主. 该试件首先由中部产生沿对角线倾斜的剪切裂纹,相互搭接、贯通后,当此裂纹发育受限时,两侧开始产生平行加压方向和垂直节理方向的拉伸裂纹,与附近节理相互搭接、贯通,直至试件完全破坏. 图11(c)为复合破坏,以张拉破坏为主. 该试件一开始在两侧同时产生垂直节理或平行加压方向的拉伸裂纹,与附近节理或附近翼形裂纹相互搭接贯通,当此裂纹发展到一定程度时,试件内部开始产生沿节理方向的倾斜剪切裂纹,与附近节理搭接、贯通,直至试件完全破坏. 图11(d)为张拉破坏. 该试件节理尖端产生平行加压方向的拉伸裂纹,同时向上和向下发展,与附近节理贯通,开裂直至完全破坏.

张拉破坏, 主要发生在缓倾角节理(25°)及垂直倾角节理上. 发生在缓倾角节理的主要原因是由于缓倾角节理的有效剪力 τ 不足于驱动平行于节理方向的剪切破坏, 而受节理面间的摩擦阻力作用, 侧边岩桥承受超过其抗拉强度的横向拉应力, 此时就会发生张拉破坏, 出现劈裂现象, 每裂开一层, 试件达到一个峰值, 由于受到轴向应力的挤压, 内部受到破坏, 峰值越来越小, 直至完全破坏, 应力-应变曲线表现为多峰值曲线. 由于岩石的抗拉强度较小, 其曲线峰值强度相对较小. 因为弹性变形时, 预制张开节理出现闭合, 应变相对较大, 其弹性模量相对较小, 其试件性质表现为延性. 而发生在垂直倾角节理的张拉破坏, 主要是由于侧边岩桥端部垂直轴向应力的支裂纹的产生及相互贯通导致的整体张拉破坏. 其峰值强度相对于完整试件变化较小是由于密集短柱的受压承载力与平板受压承载力相差不大. 在弹性变形阶段时, 其轴向应力方向不存在节理闭合现象, 对应变稍小, 弹性模量较大, 其试件表现为脆性破坏, 这与 Jaeger 等^[16-17]研究成果一致.

对于剪切破坏, 主要发生在倾角为 45°和 75°的节理试件上. 根据完整岩石试件破坏的剪切面倾角 β 一般等于 $45^\circ + \psi/2$ 左右(该完整试件的剪切面倾角 β 约

为 $45^\circ + 34^\circ/2 = 62^\circ$), 位于 45°与 75°中间. 此时的剪切面与节理面接近平行, 沿节理面剪切滑移破坏, 其抗压峰值强度尽管不高, 但比张拉破坏峰值强度更高, 弹性变形时节理也出现闭合, 应变较大, 其弹性模量更高. 由于受贯通面及节理面摩擦作用影响, 往往具有较大的残余强度.

对于复合破坏, 主要发生在倾角为 45°和 75°的节理试件和节理条数较多 (≥ 15 条) 的缓倾角节理试件上(25°). 复合破坏存在 3 种情况: 第一种是以张拉破坏为主, 出现剪切裂纹, 见图 11(a) 和图 (c), 由于节理密度较大, 使得其分支裂纹达到极限长度 $l_m = h/\sin \alpha$ (α 为节理倾角 h 为上下两节理中心的间距) 变小, 缓倾角的有效剪力可以驱动沿节理面的剪切破坏, 但由于有效剪力较小, 主要以张拉破坏为主; 第二种是以剪切破坏为主, 见图 11(b), 此时的破坏形式先产生剪切裂纹, 贯穿整个试件, 但由于节理面和不贯通面的不平整使得剪切面摩擦力过大, 在剪切面附近形成纵向拉伸裂纹, 发生张拉破坏, 张拉破坏的发生又推动了剪切面的滑移, 直至试件最终破坏; 第三种是张拉破坏及剪切破坏共同作用, 二者破坏作用不分主次. 对于复合破坏, 其峰值强度相对较高, 弹性变形时节理出现闭合, 应变较大, 弹性模量较大.

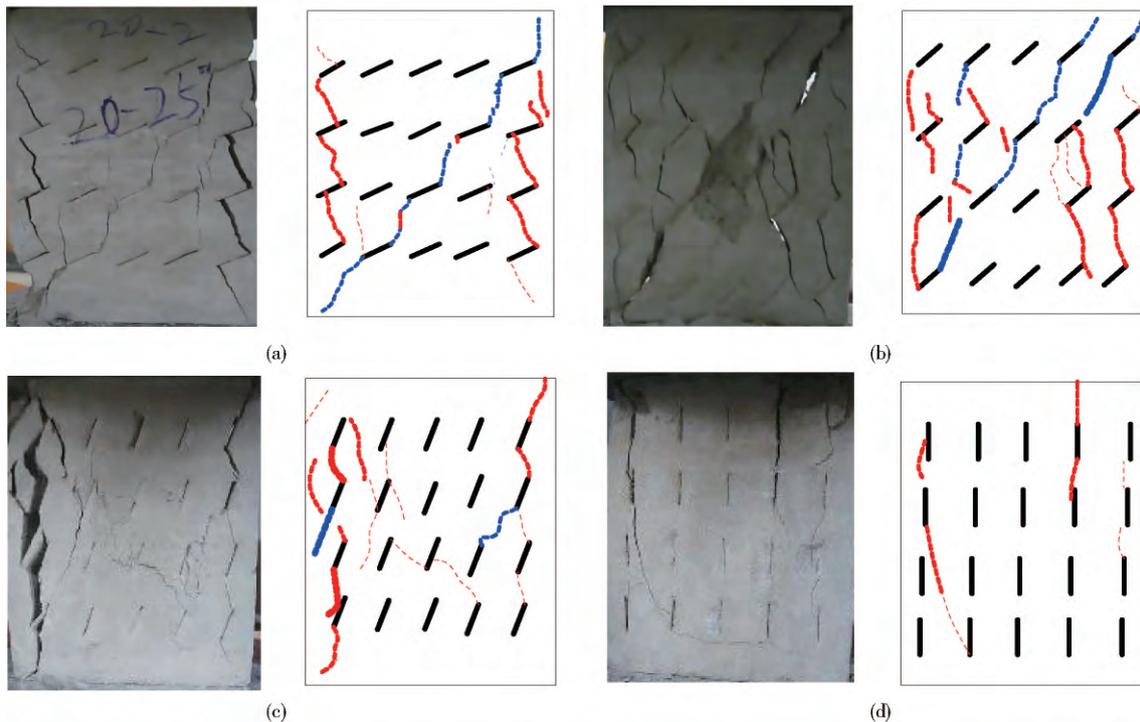


图 11 节理条数为 20 时试件不同节理倾角的破坏图. (a) 25°; (b) 45°; (c) 75°; (d) 90°

Fig. 11 Failure of specimens with 20 joints with different joint inclination angles: (a) 25°; (b) 45°; (c) 75°; (d) 90°

3 结论

通过预制张开节理类岩石试件的单轴压缩试验,

系统研究了节理密度与节理倾角的双重因素共同作用下对应力-应变曲线及单轴压缩强度和弹性模量的影响. 从试验结果可以得到以下几点结论.

(1) 随着节理倾角的增大, 应力-应变曲线由多峰曲线转变为单峰曲线, 试件由延性破坏逐渐转变为脆性破坏。

(2) 节理密度对当量峰值强度的影响与节理倾角大小有关: 当节理密度较小时(5~10条), 当量峰值强度随节理密度的增大而减小, 减小幅度的大小与节理倾角成反比; 当节理密度继续增大时(10~30条), 缓倾角(25°)节理当量峰值强度随节理密度增大而缓慢下降, 而节理倾角为 45° ~ 75° 时, 当量峰值强度缓慢上升。在节理密度一定的情况下, 当量峰值强度随节理倾角的增大而增大。随节理密度增加, 试件当量峰值强度增长速率加快。

(3) 随着节理倾角的增大, 当量弹性模量逐渐增大, 在 90° 的时候最大, 达到完整试件弹性模量70%~80%。随着节理密度的增大, 试件的当量弹性模量总体上呈现先减小后增大的现象, 即“V”形变化: 在节理倾角为 25° 和 45° , 其当量弹性模量在15条节理时取得最小值。

(4) 节理倾角对于多节理类岩石试件峰值强度及弹性模量的影响大于节理密度的影响。

(5) 试件的破坏模式主要可分为: 张拉破坏、剪切破坏和复合破坏。当节理倾角为 25° 和 90° 时, 主要发生张拉破坏, 当节理倾角为 45° 和 75° 时, 主要发生剪切破坏和复合破坏, 而节理密度越大, 越容易出现复合破坏。

参 考 文 献

- [1] Lajtai E Z. Shear strength of weakness planes in rock. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 1969, 6(5): 499
- [2] Lajtai E Z. Strength of discontinuous rocks in direct shear. *Géotechnique*, 1969, 19(2): 218
- [3] Bobet A, Einstein H H. Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1998, 35(7): 863
- [4] Yang S Q, Dai Y H, Han L J, et al. Experimental study on mechanical behavior of brittle marble samples containing different flaws under uniaxial compression. *Eng Fract Mech*, 2009, 76(12): 1833
- [5] Pu C Z, Cao P, Yi Y L. Fracture for rock-like materials with two transfixion fissures under uniaxial compression. *J Cent South Univ Sci Technol*, 2012, 43(7): 2708
(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. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(7): 2708)
- [6] Li S C, Wang L, Li S C, et al. Post-peak deformation and failure experimental study of rock-like specimens with different inclination angles persistent joints. *Chin J Rock Mech Eng*, 2013, 32(Suppl 2): 3391
(李树忱, 汪雷, 李术才, 等. 不同倾角贯穿节理类岩石试件峰后变形破坏试验研究. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊2): 3391)
- [7] Zhang W, Zhou G Q, Zhang H B, et al. Experimental research on the influence of obliquity on the mechanical characteristics of a fractured rock mass. *J China Univ Min Technol*, 2009, 38(1): 30
(张伟, 周国庆, 张海波, 等. 倾角对裂隙岩体力学特性影响试验模拟研究. 中国矿业大学学报, 2009, 38(1): 30)
- [8] Chen X, Liao Z H, Li D J. Experimental study of effects of joint inclination angle and connectivity rate on strength and deformation properties of rock masses under uniaxial compression. *Chin J Rock Mech Eng*, 2011, 30(4): 781
(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. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 781)
- [9] Wong R H C, Chau K T. The coalescence of frictional cracks and the shear zone formation in brittle solids under compressive stresses. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1997, 34(3): 335
- [10] 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. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2001, 38(7): 909
- [11] Fan X, Kulatilake P H S W, Chen X, et al. Crack initiation stress and strain of jointed rock containing multi-cracks under uniaxial compressive loading: a particle flow code approach. *J Cent South Univ*, 2015, 22(2): 638
- [12] Fan X, Kulatilake P H S W, Chen X. Mechanical behavior of rock-like jointed blocks with multi-non-persistent joints under uniaxial loading: a particle mechanics approach. *Eng Geol*, 2015, 190: 17
- [13] Wang J C, Chang L S, Chen Y J, et al. 3D network simulation and probability damage tensor analysis of joint rock mass in open iron mines. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2005, 27(1): 1
(王家臣, 常来山, 陈亚军, 等. 露天矿节理岩体三维网络模拟与概率损伤分析. 北京科技大学学报, 2005, 27(1): 1)
- [14] Chen X, Liao Z H, Peng X. Deformability characteristics of jointed rock masses under uniaxial compression. *Int J Min Sci Technol*, 2012, 22(2): 213
- [15] Zhao W, Wu S C, Cao Y T, et al. Numerical modeling and mechanical parameters determination of jointed rock mass. *Chin J Eng*, 2015, 37(12): 1542
(赵伟, 吴顺川, 高永涛, 等. 节理岩体数值模拟及力学参数确定. 工程科学学报, 2015, 37(12): 1542)
- [16] Jaeger J C, Cook N G W, Zimmerman R W. *Fundamentals of Rock Mechanics*. 4th Ed. Malden: Blackwell Publishing Ltd., 2002
- [17] Nasser M H B, Rao K S, Ramamurthy T. Anisotropic strength and deformational behavior of Himalayan schists. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2003, 40(1): 3