

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.05.017

考虑不同节理倾角和贯通率的类岩材料单轴压缩试验

陈超^{1,2}, 王伟^{1,2}, 许高杰^{1,2}, 褚卫江³, 汪涛^{1,2}, 朱其志^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要: 为研究节理倾角与贯通率对类岩材料力学特性的影响, 选用预制贯通节理类岩材料作为研究对象, 对以节理倾角和贯通率为单一变量的两组砂浆试样进行单轴压缩试验。试验结果表明: 节理倾角为 0° 时, 随着节理贯通率的增大, 试样的峰值强度、峰值应变以及弹性模量均不断减小; 不同贯通率试样破坏时均呈现出整体张拉破坏的特征; 节理贯通率相同时, 随着节理倾角的增大, 试样峰值强度呈现 V 字形变化趋势; 试样峰值应变先减小后增大再减小, 弹性模量先增大后减小再增大, 二者呈现良好对应关系。通过对比节理贯通率和不同倾角对力学特性的影响, 发现节理贯通率在试样强度、变形破坏过程中起主要影响作用。

关键词: 类岩石材料; 节理倾角; 贯通率; 弹性模量; 破坏形式

中图分类号: TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2022)05-0124-07

Uniaxial compression test of rock-like material considering different joint inclinations and penetration rates

CHEN Chao^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, XU Gaojie^{1,2}, CHU Weijiang³, WANG Tao^{1,2}, ZHU Qizhi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: In order to study the influence of joint inclination and penetration rate on the mechanical properties of rock-like material, by selecting the prefabricated joint rock-like materials as the research object, a series of uniaxial compression tests on two sets of mortar samples considering different joint inclined angles and penetration rates were conducted. The results show that when the joint inclination angle is 0°, the peak strength, peak strain and elastic modulus of the specimens decrease with the increase of the joint penetration rate and the specimens with different penetration rates all show the overall tensile failure. When the joint penetration rate is the same, with the increase of the joint inclination angle, the peak strength of the sample shows a V-shaped change trend. The peak strain of the sample first decreases, then increases and then decreases, while the elastic modulus first increases, then decreases and then increases. The two deformation properties show a good corresponding relationship. Furthermore, the results show that the joint penetration rate plays a major role in the strength, deformation and failure of the specimen compared with the joint inclination angle.

Key words: rock-like material; joint inclined angle; penetration rate; elastic modulus; failure mode

节理作为一种非常重要的结构面,在岩体中常表现为成组出现的不同贯通率、倾角的裂隙。由于节理为代表的软弱面的存在而导致的工程事故屡见不鲜,因此研究节理岩石的力学性能十分重要。使用原岩结构面进行试验具有取样难、运输成本高、试样不规则等问题,而使用相似材料具有力学性能稳定、制作方便、成本低廉的优点,因此可用相似材料代替原岩结构面进行不同尺寸、可重复性试验^[1-5]。

此前,国内外学者通过对不同节理特性的预制砂浆类岩试样进行压缩试验,研究其力学特性。例如:李树枕等^[6]通过单轴压缩试验发现贯穿节理类岩试样随着节理倾角的增加,峰值强度与峰后残余强度逐渐减

基金项目: 国家自然科学基金(12072102); 江苏省六大高峰人才项目(JZ-008); 江苏高校“青蓝工程”项目(苏教师[2020]10号)
作者简介: 陈超(1997—),男,硕士研究生,主要从事岩石力学与工程研究。E-mail: c.chen_peace@foxmail.com
通信作者: 王伟(1978—),男,教授,博士,主要从事多场耦合岩石力学研究。E-mail: wwang@hhu.edu.cn
引用本文: 陈超,王伟,许高杰,等. 考虑不同节理倾角和贯通率的类岩材料单轴压缩试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 50(5): 124-130.
CHEN Chao, WANG Wei, XU Gaojie, et al. Uniaxial compression test of rock-like material considering different joint inclinations and penetration rates[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 50(5): 124-130.

小;崔激等^[7]结合声发射技术对含不同倾角初始缺陷的混凝土试样进行单轴压缩试验,发现节理倾角为 0°和 90°时,试样呈拉伸破坏,其余角度均呈剪切破坏;蒲诚等^[8]依托大南湖二号边坡工程,对类岩材料进行三轴压缩试验,发现围压对试样峰后塑性起决定性作用,节理倾角只在一定范围内产生影响;黄彦华等^[9]对含 2 条不平行张开贯穿型裂隙类砂岩试样进行不同围压下常规三轴压缩试验,发现随着围压的增大,试样峰值强度、裂纹损伤阈值等参数均呈线性增大;王卫华等^[10]通过单轴压缩试验,发现含裂隙类岩试样的峰值强度随裂隙倾角的逐渐增大呈 V 字形变化,当裂隙倾角 45°时,岩石的峰值强度最低;Mostafa 等^[11]结合 3D 打印技术研究节理粗糙度系数、岩桥长度、岩桥角度和节理角度 4 个参数对节理类岩材料单轴强度、变形模量和黏聚力的影响,结果表明对具有非连续粗糙节理的岩石,其单轴力学性能受节理倾角的影响较大。部分学者对节理类岩材料进行了其他试验研究^[12-15],分析了节理岩体在不同地应力条件下的剪切力学特性以及冲击荷载作用下的动态力学性能。另外利用数值分析的手段对节理材料进行数值计算也是必须的,Cao 等^[16]利用 PFC2D 对节理类岩材料在压剪荷载作用下裂纹开展模式进行研究。

综上所述,现有的试验成果大多只反映了节理单方面的属性特征,对节理的贯通率与倾角这 2 种不同属性的综合研究较少。故本文以云南红砂岩为研究对象,采用砂浆试样作为类岩材料,针对贯通率 $k=0\%$ 、 20% 、 40% 、 60% 和倾角 $\theta=0^\circ$ 、 30° 、 45° 、 60° 的节理砂浆试样开展单轴压缩试验,研究不同贯通率和倾角下的节理砂浆试样的强度特性、变形特性和破坏形式,以期对节理岩体的加固等工程提供参考。

1 试验材料与方案

1.1 试验仪器及试样制备

1.1.1 试验仪器

试验使用由中国科学院武汉岩土力学研究所与河海大学共同研制的岩石 THMC 多场耦合试验仪对节理砂浆试样进行单轴压缩试验。该设备主要由轴压控制系统、水压控制系统、围压控制系统、计算机控制系统、三轴压力室等 5 部分组成,可以完成岩石单轴压缩、三轴压缩、渗透试验、流变试验等。岩石的轴向应变由 2 个安装在压力室底座上的高精度 LVDT (linear variable differential transformer) 位移传感器测量,精度为 0.02 mm。围压施加范围为 0~58 MPa,轴压施加范围为 0~100 MPa。岩石在试验过程中应力应变全过程曲线可通过由应力应变传感器组成的采集系统进行记录。

1.1.2 试样制备

试验所涉及的节理贯通率 k 指节理在水平方向上的投影长度 l 与试样直径 Φ 之比;节理倾角 θ 指节理面与水平面之间的夹角(图 1)。

本文对云南红砂岩进行了大量的配比试验,最终确定类岩材料的配合比(525 号硅酸盐水泥、砂、水、硅灰、聚羧酸减水剂的质量比)为 1 : 0.5 : 0.244 : 0.08 : 0.01^[1-3]。原砂岩与类岩材料的参数对比数据误差均控制在 10% 以内,两者的应力-应变曲线及变形破坏形式如图 2 所示,两者变形曲线与变形破坏模式均较为吻合,较好地验证了类岩材料与原砂岩的相似性。

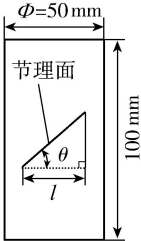


图 1 试样节理倾角与贯通率示意图

Fig.1 Schematic diagram of sample joint inclination and penetration rate

表 1 原砂岩与类岩材料参数对比
Table 1 Comparison of the parameters of primary rock and rock-like material

试样	密度/(g·m ⁻³)	峰值强度/MPa	弹性模量/GPa	峰值应变/10 ⁻³
原岩	2.378	79.43	17.73	6.38
类岩材料	2.182	82.15	19.31	6.16

试样制作步骤:①根据配比将砂浆搅拌均匀,倒入装有预制节理插片的模具中,如图 3 所示,并振捣密实;②待砂浆试样浇筑完成 24 h 后,拆模,取出试样,并在砂浆初凝之前拔出节理插片;③在标准条件下养护 28 d 后将试样(图 4)切割加工成直径 50 mm,高度 100 mm 的标准圆柱状试样。试验制备完成的砂浆

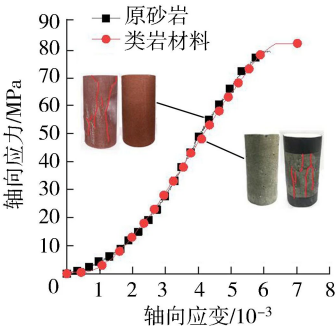


图 2 原砂岩与类岩材料应力-应变曲线对比
Fig.2 Stress-strain curves of primary sandstone and rock-like material

试样见图 5。



图 3 节理制作模具
Fig. 3 Joint making mold



图 4 未切割的脱模砂浆试样
Fig. 4 Uncut demolding mortar sample



(a) 完整砂浆试样 (b) $k=20\%, \theta=0^\circ$ (c) $k=40\%, \theta=0^\circ$ (d) $k=60\%, \theta=0^\circ$ (f) $k=40\%, \theta=30^\circ$ (g) $k=40\%, \theta=45^\circ$ (h) $k=40\%, \theta=60^\circ$

图 5 制备完成的节理砂浆试样
Fig. 5 Prepared joint mortar samples

1.2 试验方案与方法

1.2.1 试验方案

本文设置了 2 组对照试验：①以节理贯通率为单一变量的对照试验。其中,保持试样节理倾角不变,均为 0° ,对节理贯通率为 0%、20%、40%、60% 的试样进行单轴压缩试验,研究在节理倾角相同条件下,不同节理贯通率单轴压缩下试样的强度和破坏形式的规律。②以节理倾角为单一变量的对照试验。保持试样节理贯通率不变,均为 40%,对节理倾角为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 的试样进行单轴压缩试验,研究试样的强度和破坏形式随倾角改变的规律。

1.2.2 试验方法

a. 试样的质量测量和编号。对试样进行编号与称重。采用精度为 0.01g 的电子天平测量质量;利用游标卡尺分别测量试样的直径和高度,测量时分别沿 3 个不同位置进行测量,取 3 次测量数据的平均值作为试样的最终尺寸,试样各物理参数见表 2。

b. 装样与固定。将试样装入到高性能岩石橡胶套中,在试样两端贴上白色滤纸,并在滤纸外放置透水垫片。将套上橡胶套的试样放入压力室内,用不锈钢箍环将试样牢牢固定在加载平台上。最后安装并调试轴向 LVDT,落下三轴压力室,将螺丝拧紧和密闭三轴压力室。

c. 加载前的准备。打开加载缸进出油阀门,长按加载缸升按钮,将压力室快速升至刚好与压头接触的位置,完成加载前的接触准备。

d. 加载与卸载。关闭升降缸进出油阀门,打开轴压进出油阀门,打开参数记录程序,采用油量加载方式加载,排油速率为 3.0 mL/min,听到试样压碎声音后,立即停止加载,将油量控制模式调为吸液,待轴压卸载为零时停止工作,关闭轴压进出油阀门,打开加载缸进出油阀门,长按加载缸降按钮将围压室复位。

e. 数据处理与分析。试验结束后,将破坏的试样从压力室内小心取出,观察并对试样的主要破裂面进行拍照,拍照后用保鲜膜密封保存试样,最后进行试验数据处理和分析。

表 2 节理砂浆试样的物理参数
Table 2 Physical parameters of joint mortar samples

试样编号	贯通率/%	倾角/($^\circ$)	高度/mm	直径/mm	质量/g
SJ-1			101.32	49.49	425.36
SJ-2	20	0	101.30	49.50	426.64
SJ-3	40	0	101.06	49.65	416.43
SJ-4	60	0	100.66	49.66	416.82
SJ-5	40	30	100.80	49.91	422.01
SJ-6	40	45	101.47	49.25	411.75
SJ-7	40	60	101.48	50.07	425.98

2 不同节理贯通率试样单轴压缩试验

2.1 应力-应变曲线

对 SJ-1 ~ SJ-4 砂浆试样进行单轴压缩试验,得到不同节理贯通率砂浆试样的轴向应力-轴向应变试验曲线(图 6),并基于试验曲线,确定不同节理贯通率试样的弹性模量、峰值强度、峰值应变等主要岩石力学参数(表 3)。

2.2 强度特性

在相同的节理倾角(0°)条件下,节理砂浆试样单轴压缩峰值强度随着节理贯通率的增大而呈现线性减小的趋势,拟合结果为 $y = -1.250x + 80.507$ ($R^2 = 0.995$)。由表 3 可知,完整砂浆试样的峰值强度最高,60% 贯通率节理砂浆试样峰值强度最低,20%、40% 与 60% 节理贯通率试样的峰值强度较完整试样分别下降了 34.47%、64.82% 与 91.36%,节理贯通率为 60% 的试样强度下降十分明显。随着节理贯通率的增长,节理两侧连接试样上下两部分的岩桥面积逐渐减小,相同轴向力作用下,岩桥将承受更大的应力,故相比于贯通率较小试样更容易发生破坏,其峰值强度也越低。

2.3 变形特性

2.3.1 应力-应变曲线分析

由图 6 可知,相同节理倾角下,随着节理贯通率的变化,试样的峰值应变与峰值强度具有一定的差异性。完整砂浆试样的压密阶段最为明显,其他试样的压密阶段均不明显,60% 贯通率试样的压密阶段最不明显。随着节理贯通率逐渐增大,试样受到较小压力便产生贯通裂隙而发生破坏,破坏时试样内部的微裂隙来不及被压密,因而不能表现出明显的压密阶段。对于屈服阶段,40% 贯通率试样屈服阶段较为明显,完整砂浆试样及其他贯通率试样的屈服阶段均不明显,60% 贯通率试样的屈服阶段最不明显。屈服阶段是否明显与试样内部微裂隙发展为宏观裂隙的程度有关,40% 贯通率试样在加载过程中产生了发育较为充分的裂隙,具有较为明显的屈服阶段,而完整砂浆试样以及其他贯通率试样的裂隙发育相对不充分,没有明显的屈服阶段。

2.3.2 变形参数分析

由表 3 可知,随着节理贯通率的增长,节理砂浆试样峰值应变逐渐降低,完整砂浆试样的峰值应变以及弹性模量最高,60% 贯通率试样的峰值应变以及弹性模量最低,20%、40% 与 60% 节理贯通率的试样相较完整砂浆试样,其峰值应变分别下降了 24.14%、39.97% 与 73.82%,弹性模量分别下降了 10.04%、42.81% 与 76.31%。与峰值强度一样,60% 节理贯通率对试样变形参数影响最大,20% 和 40% 贯通率试样的峰值应变以及弹性模量介于两者之间。随着节理贯通率的逐渐增大,节理两侧的岩桥面积不断缩小,试样破坏时应力也逐渐减小,且峰值应变同样呈现逐渐降低的趋势;随着贯通率的增大,应力和应变都在减小,最终呈现出弹性模量也在不断减小的趋势。

2.4 破坏形式

由图 7 可知,不同的节理贯通率与完整砂浆试样的破坏形式主要表现为整体张拉破坏,出现几条纵向张拉宏观裂缝,有较多的劈裂现象。20% 贯通率试样在节理两侧各有一条连接至试样端部的张拉裂隙,40% 贯通率试样节理端部的一条裂隙贯通至试样一端,而节理中部另一条裂隙则贯通至试样另一端,60% 贯通率试样除了在节理两侧各有一条连接至试样端部的张拉裂隙外,还有一条环向连接节理的裂隙。观察到 20% 贯通率试样的节理被压密,而其他试样均没有出现节理被压密的情况,原因是不同贯通率下节理砂浆试样的破坏过程不同,在节理贯通率较小的情况下,节理一侧先产生一条贯通至试样端部的张拉裂隙,导致节理闭合,随后在单轴压力作用下在节理另一侧产生贯通至试样底部的张拉裂隙导致试样破坏;在节理贯通率较大的

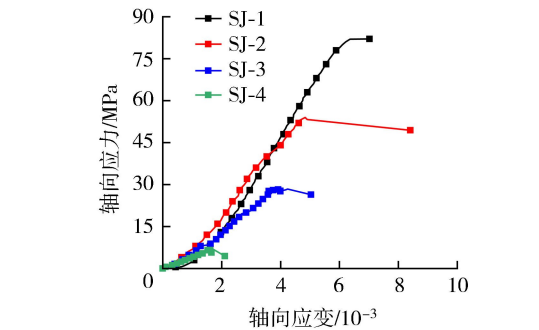


图 6 单轴压缩作用下不同节理贯通率砂浆试样的轴向应力-轴向应变曲线 ($\theta = 0^{\circ}$)

Fig. 6 Axial stress-axial strain curves of mortar specimens with different joint penetration rates under uniaxial compression ($\theta = 0^{\circ}$)

表 3 不同节理贯通率砂浆试样单轴压缩试验的主要力学参数

Table 3 Main mechanical parameters of mortar specimens with different joint penetration rate under uniaxial compression

试样编号	峰值强度/MPa	峰值应变/ 10^{-3}	弹性模量/GPa
SJ-1	82.15	6.38	17.73
SJ-2	53.83	4.84	15.95
SJ-3	28.90	3.83	10.14
SJ-4	7.10	1.67	4.20

情况下则没有单轴压力作用下节理闭合的阶段,即节理两侧裂缝同步开展并几乎同时发展到试样端部导致试样破坏。

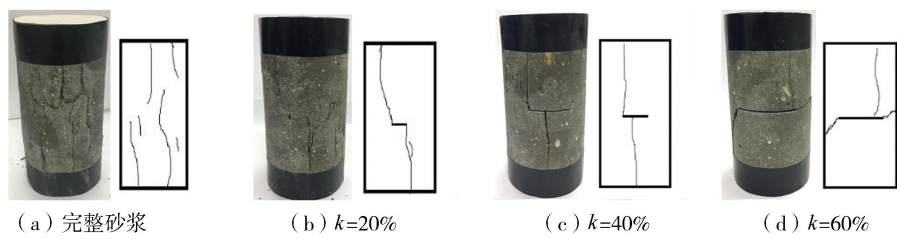


图 7 不同节理贯通率砂浆试样的单轴破坏照片和素描图

Fig. 7 Uniaxial failure photos and sketch maps of mortar specimens with different joint penetration rates under uniaxial compression

3 不同节理倾角试样单轴压缩试验

为研究不同节理倾角对砂浆试样的强度与变形的影响,对编号 SJ-3、SJ-5 ~ SJ-7 的试样进行单轴压缩试验,得到不同节理倾角下砂浆试样轴向应力-轴向应变曲线(图 8)。表 4 给出不同节理倾角试样单轴压缩试验主要的力学参数。

表 4 节理砂浆试样单轴压缩试验主要力学参数

Table 4 Main mechanical parameters of jointed mortar samples in uniaxial compression test

试样编号	峰值强度/MPa	峰值应变/ 10^{-3}	弹性模量 GPa
SJ-3	28.90	3.83	10.14
SJ-5	26.55	2.97	11.10
SJ-6	21.10	4.09	8.63
SJ-7	22.16	2.65	10.26

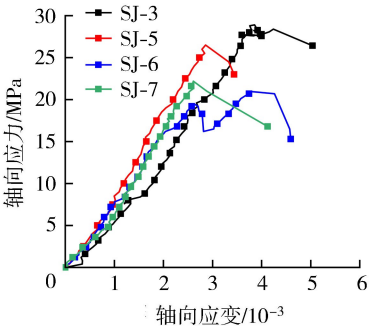


图 8 单轴压缩下不同节理倾角砂浆试样的轴向应力-轴向应变曲线($k=40\%$)

Fig. 8 Axial stress-axial strain curves of mortar specimens with different joint angle under uniaxial compression ($k=40\%$)

3.1 不同倾角强度特性

相同节理贯通率,不同节理倾角条件下,节理试样的单轴压缩峰值强度呈现出随着节理倾角的不同而出现较大的差异性变化,节理试样峰值强度呈现各向异性特征。节理倾角是引起试样呈现各向异性的主要原因,而峰值强度的变化正是试样各向异性的直观体现。

由表 4 可知,当节理贯通率均为 40% 时,试样的峰值强度随节理倾角的增加先降低后增长,呈现 V 字形变化趋势^[9]。0°倾角试样峰值强度最高,在 30°处强度有所下降,但下降趋势不大,相同节理贯通率下,相比 0°倾角试样,30°试样强度降低了 8%,而 45°和 60°则分别降低了 27%、23%,60°比 45°略微高一些,可见节理倾角的变化对强度影响很大,45°倾角试样强度最低,30°及 60°倾角试样峰值强度介于 0°与 45°倾角试样峰值强度之间。

3.2 不同倾角变形特性

相同节理贯通率下,对于不同倾角的节理试样,其弹性模量与峰值应变随倾角呈非线性变化(表 4)。随着节理倾角的增大,节理砂浆试样的峰值应变呈现先减小后增大再减小的趋势,与文献[15]所述趋势类似。45°倾角试样的峰值应变最高,60°倾角试样的峰值应变最低,30°倾角试样和完整砂浆试样的峰值应变处于两者之间。通过对破坏试样分析得知,45°倾角试样的裂隙发育最为充分,在相同荷载作用下应变比加载过程中裂隙发育相对不充分的试样的应变更大,因而峰值应变最大;而 0°倾角试样的应力-应变曲线也说明裂隙是在不同阶段产生的,但裂隙相对于 45°倾角试样发育不明显,因而峰值应变低于 45°倾角试样;30°、60°倾角试样破坏前裂隙发育不如 45°及 0°试样充分,因而峰值应变较小。

随着节理倾角的增大,节理砂浆试样的弹性模量呈现先增大后减小再增大的趋势。30°倾角试样的弹性模量最大,45°倾角试样的弹性模量最低,0°和 60°倾角试样的弹性模量介于两者之间,与文献[17]所述趋势有所不同。结合应力-应变曲线分析,发现加载过程中微裂隙发育较为充分的试样,如 45°倾角试样,具有较小的弹性模量,而微裂隙在稳定发展阶段发育不充分的试样,如 30°、60°试样,弹性模量则相应偏大。

3.3 破坏形式

试样的破坏形式与试样的应力历史、应力状态、加载路径和试样本身材料的性质等因素有关。在完整砂浆试样与不同节理贯通率砂浆试样的常规单轴压缩试验中,破坏形式大多为张拉破坏,但对于节理贯通率均为 40%,不同节理倾角的试样,节理倾角的不同使得试样的破坏形式具有一定的规律性。相同节理贯通率条件下不同节理倾角砂浆试样的单轴破坏形式如图 9 所示。

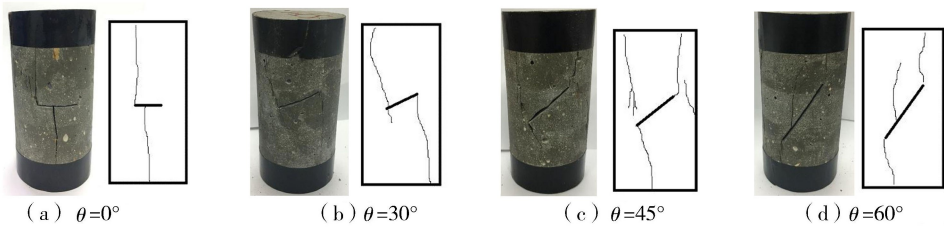


图 9 不同节理倾角砂浆试样的单轴破坏照片和素描图

Fig.9 Uniaxial failure photos and sketch maps of mortar samples with different joint angles under uniaxial compression

由图 9 可知,0°、30°倾角的试样总体裂隙数目水平较低,且没有贯通整个试样,可见试样在单轴压缩下脆性较强。0°倾角试样在节理一侧与中部各有一条连接至端部的裂隙,30°倾角试样在节理两侧也各有一条张拉裂隙连接至试样两端,且两条裂隙并不平行于节理方向,0°以及 30°倾角试样均具有张拉破坏的特征;45°倾角试样具有脆性剪切破坏的特征,45°倾角试样共有 4 条裂纹,分别对应应力-应变曲线中的 4 个阶梯,在单个裂纹充分发育后试样仍能继续承载直至试样破坏,45°倾角试样在加载过程中已经形成多条充分发育的裂隙,大大降低了试样的强度,其他试样的裂隙发育相对不充分,峰值强度相对 45°试样较高;而 60°倾角试样具有弱面剪切破坏的特征,60°倾角试样除了沿节理面发生剪切滑移的裂隙外^[18],在节理中部还有一条张拉裂隙,说明试样的破坏模式是弱面剪切破坏以及张拉破坏的结合。这些节理面的破坏形态在一定程度上改变了试样应力应变曲线特征、单轴峰值强度、变形参数等力学特性。

3.4 节理贯通率与倾角对比分析

为探究不同节理贯通率与不同倾角对试样各力学参数的影响程度,绘制了试样力学参数随不同节理贯通率与倾角变化的对比(图 10)。由图 10 可知,试样的力学特性受节理贯通率与倾角的共同影响,其中,相较于节理倾角,节理贯通率对峰值强度的影响程度最大,弹性模量次之,峰值应变最小。但总体而言,节理贯通率对试样力学参数的影响大于节理倾角,而节理倾角仅在一定范围内对其产生影响。

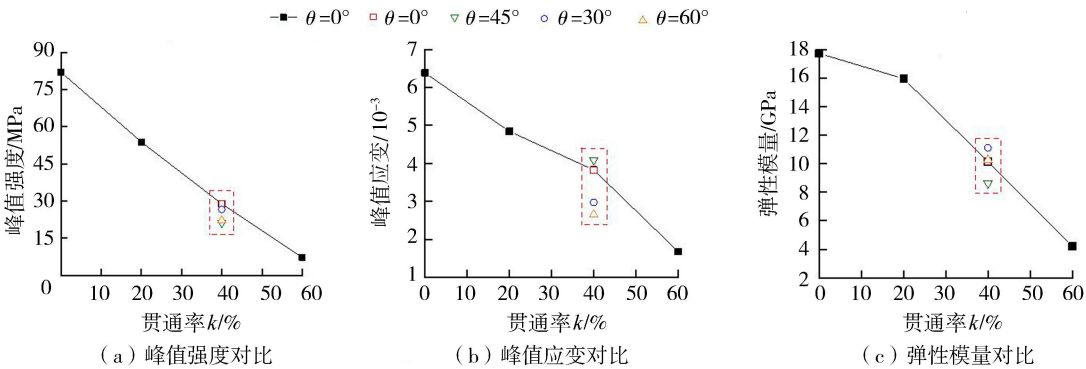


图 10 贯通率与倾角对试样力学参数影响的对比

Fig.10 Comparison of the influence of penetration rate and inclination on the mechanical parameters of specimens

4 结 论

- a. 相同节理倾角条件下,随着节理贯通率的增大,试样的单轴压缩强度、峰值应变以及弹性模量均不断减小,完整砂浆试样的单轴压缩强度、峰值应变以及弹性模量最大,60% 贯通率试样的单轴压缩强度、峰值应变以及弹性模量最小。
- b. 相同节理贯通率条件下,随着节理倾角的增大,试样峰值强度先降低后增长,呈现 V 字形变化趋势。

0°倾角试样峰值强度最高,45°倾角试样强度最低;峰值应变先减小后增大再减小。45°倾角试样的峰值应变最高,60°倾角试样的峰值应变最低;弹性模量先增大后减小再增大,30°倾角节理砂浆试样的弹性模量最大,45°倾角试样的弹性模量最低。

c. 以贯通率为单一变量的试样破坏时均呈现出整体张拉破坏的特征,20%以及40%贯通率试样破坏时有两条张拉裂缝,60%贯通率试样破坏时除了两条张拉裂缝之外还有一条环向连接节理的裂隙。以倾角为单一变量的试样破坏模式受节理倾角影响较大,0°以及30°倾角试样具有张拉破坏的特征,45°倾角节理砂浆试样具有脆性剪切破坏的特征,而60°倾角节理砂浆试样具有弱面剪切破坏的特征。

d. 节理贯通率与倾角均对试样力学参数有一定的影响,但节理贯通率对力学参数的影响大于节理倾角。

影响节理岩体力学特性的因素较多,本文主要集中研究节理倾角与贯通率对岩石力学特性的影响,后期可以对多个影响因素设计正交试验方案进行不同围压下的常规三轴试验,通过建立多轴本构进一步对试验结果进行模拟验证。

参考文献:

- [1] 杜时贵,黄曼,罗战友,等. 岩石结构面力学原型试验相似材料研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(11):2263-2270. (DU Shigui, HUANG Man, LUO Zhanyou, et al. Similar material study of mechanical prototype test of rock structural plane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(11): 2263-2270. (in Chinese))
- [2] 宁奕冰,唐辉明,张勃成,等. 基于正交设计的岩石相似材料配比研究及底摩擦物理模型试验应用[J]. 岩土力学,2020,41(6):2009-2020. (NING Yibing, TANG Huiming, ZHANG Bocheng, et al. Investigation of the rock similar material proportion based on orthogonal design and its application in base friction physical model tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 2009-2020. (in Chinese))
- [3] 刘永莉,周文佐,郭斌,等. 相似模型实验中泥灰岩相似材料研究[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(增刊1):2795-2803. (LIU Yongli, ZHOU Wenzuo, GUO Bin, et al. Study on marl similar materials in similar simulation test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(Sup1): 2795-2803. (in Chinese))
- [4] 江权,宋磊博. 3D打印技术在岩体物理模型力学试验研究中的应用研究与展望[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(1):23-37. (JIANG Quan, SONG Leibo. Application and prospect of 3D printing technology to physical modeling in rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(1): 23-37. (in Chinese))
- [5] WONG R, CHAU K T. Crack coalescence in a rock-like material containing two cracks[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 1998, 35(2): 147-164.
- [6] 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[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(增刊2):3391-3395. (LI Shuchen, WANG Lei, LI Shucan, et al. Post-peak deformation and failure experimental study of rock-like specimens with different inclination angles persistent joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Sup2): 3391-3395. (in Chinese))
- [7] 崔激,刘曼曼,宋慧芳,等. 基于声发射技术的含初始缺陷混凝土破坏分析[J]. 水力发电学报,2020,39(8):36-45. (CUI Wei, LIU Manman, SONG Huifang, et al. Failure analysis of concrete with initial defects based on acoustic emission technology[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(8): 36-45. (in Chinese))
- [8] 蒲诚,刘奉银,陈蕴生. 非贯通裂隙岩体试件峰后力学特性的研究[J]. 实验力学,2020,35(6):1121-1128. (PU Cheng, LIU Fengyin, CHEN Yunsheng. The study on post-peak mechanical properties of non-penetrating rock-like specimen[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(6): 1121-1128. (in Chinese))
- [9] 黄彦华,杨圣奇,鞠杨,等. 断续裂隙类岩石材料三轴压缩力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(7):1212-1220. (HUANG Yanhua, YANG Shengqi, JU Yang, et al. Experimental study on mechanical behavior of rock-like materials containing pre-existing intermittent fissures under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(7): 1212-1220. (in Chinese))
- [10] 王卫华,王小金,姜海涛,等. 单轴压缩作用下含不同倾角裂隙的类岩石试样力学特性[J]. 科技导报,2014,32(28/29):48-53. (WANG Weihua, WANG Xiaojin, JIANG Haitao, et al. Experimental research on mechanical properties of rocklike specimens containing single cracks of different Inclination angles under uniaxial compression[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(28/29): 48-53. (in Chinese))

[13] 孟斌,吴宏鑫.一类飞行器姿态动力学特征建模研究[J].中国科学,2010,40(8):898-903. (MENG Bin,WU Hongxin. On characteristic modeling of a class of flight vehicles' attitude dynamics[J]. Science in China,2010,40(8):898-903. (in Chinese))

[14] 吴宏鑫,王颖.非线性系统的特征建模方法[C]//第二十一届中国控制会议论文集.杭州:浙江大学出版社,2002.

[15] 吴宏鑫,王颖,解永春.非线性系统的特征建模与控制方法[J].控制工程,2002(6):1-7. (WU Hongxin,WANG Ying,XIE Yongchun. Characteristic modeling of nonlinear system and control method[J]. Control Engineering,2002(6):1-7. (in Chinese))

[16] 张虎,李正熙,童朝南.基于递推最小二乘算法的感应电动机参数离线辨识[J].中国电机工程学报,2011,31(18):79-86. (ZHANG Hu,LI Zhengxi,TONG Chaonan. Off-line parameter identification of induction motor based on recursive least-squares algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(18):79-86. (in Chinese))

[17] 鞠平.电力系统建模理论与方法[M].北京:科学出版社,2010.

[18] 徐佳琪,吕晖.基于PSASP的36节点电力系统暂态稳定分析[J].电子制作,2021(17):39-42. (XU Jiaqi,LYU Hui. Transient stability analysis of 36-node power system based on PSASP[J]. Electronic Production,2021(17):39-42. (in Chinese))

(收稿日期:2021-08-26 编辑:胡新宇)

+++++
(上接第117页)

[20] International Formulation Committee. A formulation of the thermodynamic properties of ordinary water substances[M]. Dusseldorf :IFC Secretariat,1967.

[21] PHILIP J R,DE VRIES D A. Moisture movement in porous material under temperature gradients[J]. Eos,Transactions American Geophysical Unio,1957,38(2):222-232.

[22] 钱丽鑫.高放废物深地质处置库缓冲材料-高庙子膨润土基本特性研究[D].上海:同济大学,2007.

[23] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal,1980,44(5):892-898.

[24] JAEA. H17:Development and Management of the Technical Knowledge Base for the Geological Disposal of HLW[R]. Ibaraki: Japan Atomic Energy Agency,2005.

[25] RUTQVIST J,ZHENG L,CHEN F. Modeling of coupled thermo-hydro-mechanical processes with links to geochemistry associated with bentonite-backfilled repository tunnels in clay formations [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2014,1(47):167-186.

(收稿日期:2021-09-07 编辑:刘晓艳)

+++++
(上接第130页)

[11] MOSTAFA A,MOHAMMAD F H,MAHDI M,et al. Mechanical characterisation of jointed rock-like material with non-persistent rough joints subjected to uniaxial compression[J]. Engineering Geology,2019,260:105224.

[12] BAN Y,XIE Q,FU X,et al. Shear failure mechanism and acoustic emission characteristics of jointed rock-like specimens[J]. Sains Malaysiana,2021,50(2):287-300.

[13] 盛金昌,高鹏,王珂,等.渗流侵蚀作用对岩石裂隙剪切特性的影响试验[J].水利水电科技进展,2021,41(2):42-48. (SHENG Jinchang,GAO Peng,WANG Ke,et al. Experiments of seepage erosion influence on shear characteristics of rock fracture[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(2):42-48. (in Chinese))

[14] SHARAFISAF A M,SHEN L. Experimental investigation of dynamic fracture patterns of 3D printed rock-like material under impact with digital image correlation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2020,53(7):3589-3607.

[15] 林豆,徐卫亚,王环玲,等.渗流作用下柱状节理岩体强度特性试验[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(2):151-155. (LIN Dou,XU Weiya,WANG Huanling,et al. Experimental study on strength characteristics of columnar jointed rock mass under the seepage[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(2):151-155. (in Chinese))

[16] CAO R H,CAO P,LIN H,et al. Failure characteristics of jointed rock-like material containing multi-joints under a compressive-shear test:Experimental and numerical analyses[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering,2018,18(3):784-798.

[17] 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.

[18] 柏俊磊.非贯通节理岩体各向异性力学特性试验研究[D].宜昌:三峡大学,2014.

(收稿日期:2021-10-24 编辑:刘晓艳)