

文章编号: 1000-7598 (2010) 07-2072-07

不同卸荷速率下岩石强度特性研究

张 凯¹, 周 辉¹, 潘鹏志¹, 申林方¹, 冯夏庭¹, 张元刚²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2. 兖州煤业股份有限公司, 山东 邹城 273500)

摘 要: 卸荷条件下的岩石强度特性研究对于分析开挖作用下岩石工程的安全性具有极为重要的意义。卸荷试验中影响岩石强度的因素很多, 包括岩性、卸荷点的位置、卸荷应力路径和卸荷速率等, 以锦屏大理岩为对象, 重点研究卸荷速率对强度的影响。提出用屈服接近速率来统一表征加荷和卸荷下的应力增加或减小的速率, 通过比较加荷和卸荷条件下的屈服接近速率表明, 当围压卸荷速率为常规试验轴向应力加荷速率的 0.2~0.3 倍时, 两种应力路径下接近破坏时的屈服接近速率相当。通过 2D 弹塑性细胞自动机的数值试验和大理岩的室内卸围压试验来验证理论分析的结果, 表明: 围压卸荷速率越大, 岩样的强度就越高; 当卸荷速率为常规轴向加荷速率的 0.2~0.3 倍时, 卸荷和加荷路径下的强度相当。从而得出结论: 对于各种卸荷应力路径, 如果卸荷点处于弹性范围内, 当接近破坏时的屈服接近速率一定时, 应力路径对强度的影响不明显。

关 键 词: 岩石材料; 卸荷速率; 卸荷试验; 强度特性; 试验研究

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Characteristics of strength of rocks under different unloading rates

ZHANG Kai¹, ZHOU Hui¹, PAN Peng-zhi¹, SHEN Lin-fang¹, FENG Xia-ting¹, ZHANG Yuan-gang²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Yanzhou Coal Mining Company Limited, Zoucheng, Shandong 273500, China)

Abstract: The study of strength characteristics of rocks under unloading condition is of very importance to the safety evaluation of the underground engineering. There are many factors affecting the strength in unloading test, such as lithology, initial unloading stress, unloading stress path and unloading rate, etc. Among these factors, the unloading rate is concerned in this study. Yield approach rate (YAR) is proposed to denote the stress varying rate under loading and unloading conditions. The YAR under loading and unloading conditions is almost equal when the unloading confining pressure rate is 0.2-0.3 of the loading axial stress rate in general triaxial tests. The simulation by EPCA^{2D} (Elasto-Plastic Cellular Automaton) and the unloading test on marble indicate that the strength of the rock will increase as the unloading rate is higher and the strength under loading and unloading conditions is equal when the unloading rate is 0.2-0.3 of the loading rate. Then the conclusion can be drawn that if the YAR is given and the initial unloading stress is in the elastic state, the unloading stress path has little influence on the strength.

Key words: rock material; unloading rate; unloading test; characteristics of strength; experimental research

1 引 言

岩体开挖扰动初始应力场, 从而引起应力的重新分布。在此过程中, 开挖岩体周围不再处于单纯的加荷状态, 而是某些方向处于加荷状态, 另一些方向处于卸荷状态。研究表明, 岩体在加荷和卸荷条件下的力学特性有本质的区别^[1], 卸荷条件下的岩石强度特性研究对于分析开挖作用下岩石工程的安全性具有极为重要的意义, 因而得到越来越多的

关注, 已有大量的学者开展了相关的试验和理论研究^[2-9]。

在卸荷条件下, 影响岩石强度的因素很多, 主要包括岩石的岩性、卸荷点的应力状态、卸荷应力路径以及卸荷速率等。许东俊等^[6]针对 3 种岩性的岩石试样采用若干种卸荷路径进行了卸荷试验, 结果表明, 当卸荷点的偏应力高于体积应变转弯点处的偏应力时, 卸荷对岩石的强度有影响, 但对不同岩石影响不同, 对较软的岩石如大理岩, 卸荷路径

收稿日期: 2009-11-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50979104, No. 10772190, No. 50709037, No. 50709036); 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室开放研究基金资助项目 (No. Z110804)。

第一作者简介: 张凯, 男, 1984 年生, 博士研究生, 主要从事流固耦合的理论和试验研究方面的工作。E-mail: zhangkai_84@126.com

下强度提高,而对较硬的岩石如辉长岩和花岗岩,卸荷路径下强度降低。陈颢等^[2]利用辉长岩进行了保持轴压不变而降低围压的试验,结果表明,卸荷条件下的强度偏低,但前提条件是卸荷点的偏应力接近体积应变转弯点处的偏应力,如果该条件不满足,卸荷对岩样的强度影响不大,这与许东俊等^[6]所得的结论一致。很多学者也进行了各种卸荷应力路径的试验,李宏哲^[4]、尤明庆^[7]和李天斌^[10]等的卸荷试验表明,卸荷对岩样的强度没有影响;陈卫忠等^[11]利用大理岩进行的峰前和峰后卸围压试验表明,卸荷试验对岩样的强度的影响不大,但卸荷条件下的强度普遍高于常规试验的强度。可见,不同学者所得结论是不同的,至今尚不明确卸荷对强度是否有影响以及影响程度如何。造成这种现状的一个重要原因是卸荷点应力和卸荷速率等条件的确定没有统一的标准,因此,需要首先研究这些条件对岩石强度的影响规律。

因为卸荷条件下影响岩石强度的因素很多,如果一次试验考虑的因素过多,势必影响对最终结果的解释。本文将在前人研究成果的基础上,以锦屏大理岩为对象,重点研究卸荷速率对岩石强度的影响。另外,需要说明的是,为了与力学上加载和卸载的概念相区分,本文采用加荷和卸荷来表述某个应力分量的提高和降低。

2 卸荷速率的确定

岩石的常规试验中,加载速率对强度是有影响的,一般随着加载速率的增加,岩石的强度提高^[12]。吴刚等^[5]进行的裂隙岩体真三轴卸荷试验表明,随着卸荷速率的增加,岩石的强度也是提高的。至于加载速率引起强度变化的原因,部分学者^[8,13]研究认为,加荷或卸荷的速度越快,试件来不及开展塑性变形,变形趋于局部化,表现出明显的脆性,强度也就相应提高。

对于常规加载试验,国内外岩石力学试验规程中对加载速率都有明确的限定,如国内规程限定加载速率为 0.5~0.8 MPa/s。由于卸荷试验开展得较少,国内外试验规程中未有明确卸荷速率的范围。在研究卸荷应力路径和初始卸荷点处的应力等对强度的影响时,就需要确定合理的卸荷速率,以便得到卸荷条件下合适的强度参数。

2.1 常规三轴加载试验的屈服接近速率

为了便于比较加荷和卸荷条件下的应力状态,需要提出表征当前应力状态与岩石强度关系的变量。本文引入张传庆^[14]提出的屈服接近度 YAI (yield

approach index) 的概念,它描述一点的现时状态与相对最安全状态的参量的比。在主应力空间中,一点 A 的应力状态可以表示为子午面上的一点,如图 1 所示,相对于该 A 点,离屈服面最远即最安全状态为 A_0 点。根据屈服接近度的定义,其计算公式为

$$YAI = \frac{d}{D} \quad (1)$$

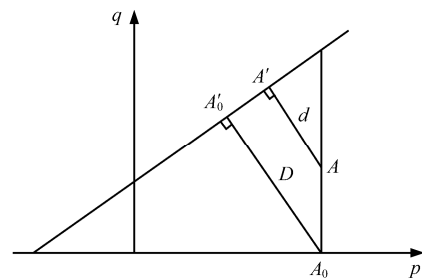


图1 子午面上一点的应力状态^[15]

Fig.1 Stress state of a point on the meridian plane

屈服接近度可以表征应力状态与屈服面的接近程度,则其随时间的变化率可表示一定的应力路径接近屈服的快慢。为了表述方便,下文中称屈服接近度的时间变化率的绝对值为屈服接近速率,用 YAR (yield approach rate) 表示。本文将分别从数值计算和试验室试验的角度研究岩石在加荷和卸荷破坏过程中 YAR 的变化规律。对于试验室试验,加荷或卸荷的时间可以用真实的时间,此时 YAR 的单位为 1/s; 对于数值计算,规定数值计算的每个计算步叫做一个加载步 (step), 则加荷或卸荷的时间长短与加载步 (step) 的多少是相对应的,因此,可以用加载步来表示加载的时间,此时 YAR 的单位为 1/加载步。从而给定强度参数后可以计算得到屈服接近速率 YAR 与加载步的关系,不同围压下的结果如图 2 所示。计算中采用的强度准则为 Mohr-Coulomb 强度准则,强度参数的取值为黏聚力 $c = 15 \text{ MPa}$, 摩擦角 $\varphi = 49^\circ$, 轴向应力加荷速率为 1 MPa/step 。从图 2 可以看出,围压越大,岩石需要更多的加载步才能达到破坏,即加载的时间历程更长,虽然初始加载时的屈服接近速率在各个围压下差别较大,但接近破坏时的屈服接近速率趋于一致。当前,常规试验的强度参数是通过拟合不同围压下的峰值轴向应力得到的,其离散型一般是不大的。从上述分析可知,不同围压下轴向应力接近峰值时,其相应的屈服接近速率趋于一致,因此,在屈服接近速率的意义上,当前拟合强度参数的方法是合适的。

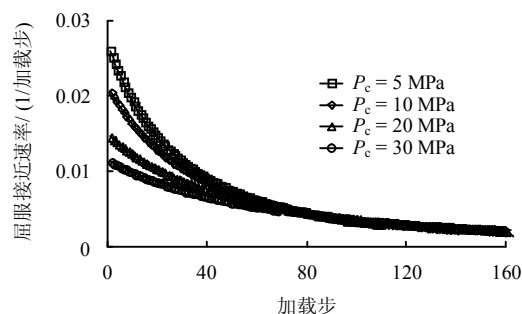


图2 常规三轴试验屈服接近速率与加载步的关系

Fig.2 Relation between the failure approach rate and the loading step in general triaxial experiment

2.2 卸荷试验的屈服接近速率

通常说的卸荷试验指降低最小主应力的试验, 对于常规三轴试验指降低围压的试验, 采用的方案主要有以下几种: (1) 保持轴压不变, 降低围压; (2) 保持偏应力不变 (降低围压的同时降低轴压), 降低围压; (3) 升高轴压, 降低围压; (4) 保持轴向位移不变, 降低围压。可以将上述应力路径在静水压力-广义剪应力平面上表示, 如图3所示。

图中, 静水压力为 $p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$; 广义剪应力为

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}, \text{ 其中}$$

$\sigma_i (i=1,2,3)$ 为3个主应力。 σ_0 表示初始卸荷应力, 线段 ab 为屈服面的子午线, 数字编号 (1) ~ (4) 为对应于上述4种卸荷应力路径, 而编号 (5) 对应于常规加荷的应力路径。

从图3可以看出, 对于各种卸载围压的路径, 虽然围压在降低, 应力状态仍然是在不断靠近屈服面, 即岩石试样仍然处于力学概念上的“加载”状态, 且不同的卸荷路径下应力路径的“长短”不同。因为常规加载和各种卸荷应力路径的长度不同, 相同的加荷和卸荷速度下, 如加载轴压和卸围压的速度都按照岩石力学试验规程中建议的 $0.5 \sim 0.8$ MPa/s, 不同的应力路径靠近强度线的速率明显会不同。

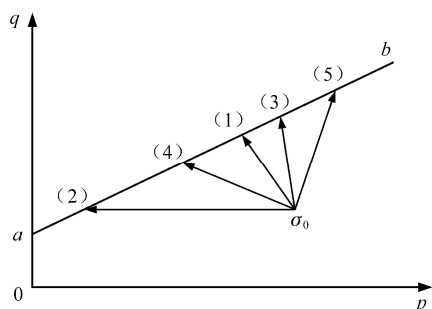


图3 卸荷试验应力路径图

Fig.3 Sketch map of stress path in the unloading test

岩土类材料与金属等材料在强度特性上的显著差别在于前者的强度与静水压力有关, 静水压力越大, 强度越高, 如图3所示。对于常规三轴加荷试验, 即图3中的路径 (5), 因为随着轴向应力的加载静水压力是逐渐提高的, 所以岩石的强度也在逐渐提高, 使得屈服接近速率会不断减小, 这点从图2中可以明显地看出; 但对于各种卸荷路径, 因为随着围压的卸载, 静水压力在逐步减小, 所以岩石的强度也在逐步降低, 使得屈服接近速率会不断增加。对于各卸荷路径可以计算得到屈服接近速率 YAR 与加载步的关系, 如图4所示, 计算中仍采用 Mohr-Coulomb 强度准则, 强度参数同 2.1 节, 围压卸荷速率为 1 MPa/step , 卸荷点的应力为 $\sigma_1 = 130 \text{ MPa}$ 和 $\sigma_2 = \sigma_3 = 20 \text{ MPa}$, 特别地, 对于卸荷路径 (4), 假设卸荷过程中岩石是弹性的且泊松比不变为 0.3 。从图4可以看出, 随着卸荷的进行, 各种卸荷路径下的屈服接近速率都是逐渐增大的, 虽然开始时各种路径下的屈服接近速率差别较大, 接近破坏时的各屈服接近速率相差不大。

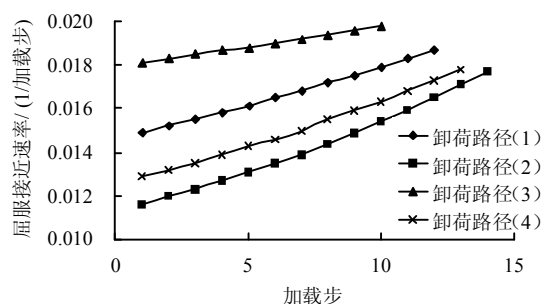


图4 卸荷条件下屈服接近速率与加载步的关系

Fig.4 Relation between the failure approach rate and the loading step in unloading condition

因为接近破坏时各个卸荷路径下的屈服接近速率比较接近, 限于篇幅, 以下将以卸荷路径 (1) 为例来分析加荷和卸荷条件下的屈服接近速率。为了选择合适的加荷和卸荷条件下的屈服接近速率进行对比, 首先需要研究两种条件下的屈服接近速率是否受围压的影响。从图3可以看出, 常规加荷条件下, 接近破坏时的屈服接近速率几乎不受围压的影响。改变卸荷点的位置, 可以计算得到不同围压条件下卸荷时的屈服接近速率, 见图5, 计算中采用 Mohr-Coulomb 强度准则, 强度参数同前, 卸荷时的初始轴向应力为 $\sigma_1 = 115.7 \text{ MPa}$, 围压如图5中所示。从图可以看出, 在不同的围压下卸荷时, 虽然初始时各屈服接近速率差别较大, 但接近破坏时的屈服接近速率相等, 即卸载围压速率一定的条

件下,接近破坏时的屈服接近速率与围压无关。

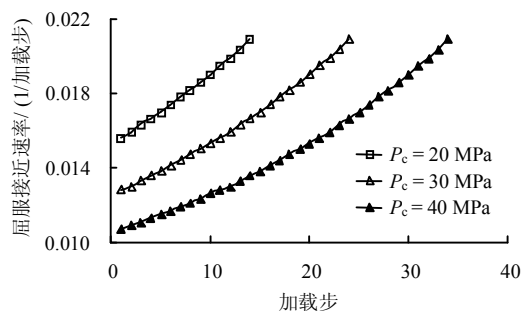


图5 卸荷点围压不同时的屈服接近速率
Fig.5 Failure approach rate under different confining pressures

既然加载和卸荷路径下的屈服接近速率与围压无关,就可以比较任意围压下的加荷和卸荷的屈服接近速率,见图6所示,计算中采用Mohr-Coulomb强度准则,强度参数同前,加荷的起始应力状态为 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 5$ MPa,卸荷的起始应力状态为 $\sigma_1 = 115.7$ MPa和 $\sigma_2 = \sigma_3 = 20$ MPa。图6中给出了4种卸荷速率和一种常规加荷速率下的屈服接近速率,从图中可以看出,当卸载围压速率是常规加载轴压速率的0.2~0.3倍时,加荷和卸荷的屈服接近速率在接近破坏时大小相当。下文将通过数值和室内试验证明,当在临近破坏条件下的屈服接近速率相当时,加荷和卸荷条件下的强度也比较接近。

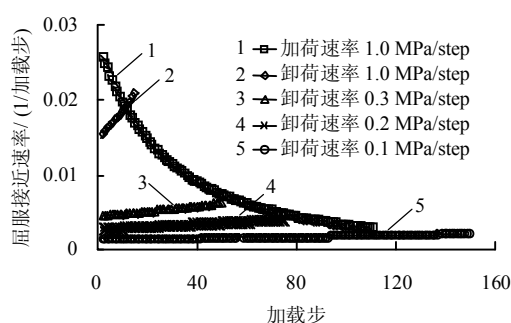


图6 不同速率时加荷和卸荷条件下屈服接近速率
Fig.6 Failure approach rate of loading and unloading conditions under different loading/unloading rates

3 不同卸载围压速率试验

为了验证第2节的分析结果,利用岩石破裂过程分析的弹塑性细胞自动机模拟系统(EPCA^{2D})进行数值试验和试验室试验来研究不同卸荷速率下的岩石的强度特性。卸荷路径采用2.2节中的路径(1),即保持轴向应力不变,降低围压。

3.1 2D 弹塑性细胞自动机模拟卸围压试验

本部分采用自行开发的岩石破裂过程分析的弹塑性细胞自动机模拟系统EPCA^{2D}[16-17]对卸围压试验进行模拟。模拟采用平面应变模型,模型大小为50 mm×100 mm。设置细胞自动机迭代精度为 1×10^{-10} ,容许误差为1%,非线性最大迭代次数为400。元胞单元服从弹脆塑性本构关系,采用摩尔-库仑强度准则和塑性关联流动法则,岩样的力学参数如表1所示。在EPCA^{2D}中岩样的非均质性是通过非均质系数反映的,此处取值为2,参数含义参考文献[18]。

表1 岩样力学参数

Table 1 Mechanical properties of rock specimens

弹性模量均值 / GPa	泊松比	初始黏聚力均值 / MPa	随机种子数	残余黏聚力强度 / MPa	内摩擦角 / (°)	均质度系数	软化因子
50	0.4	15	10	1	49	2	0.1

为了得到岩样的变形和强度特性,首先进行了3组常规三轴压缩数值试验,围压分别为5、15、30 MPa。试验中轴向应力的加载速率为1 MPa/step。所得的轴向应力与轴向应变的关系如图7所示,由于岩样的非均质性,在达到峰值前已有单元破坏,使得应力-应变关系曲线上出现明显的初始屈服点。

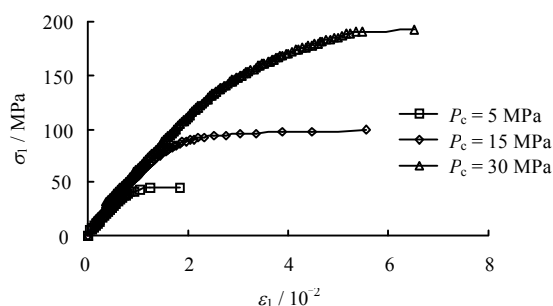


图7 轴向应力与轴向应变的关系(EPCA^{2D}模拟结果)
Fig.7 Relations between axial strain and axial stress(EPCA^{2D} modeling results)

本数值试验的目的是研究卸荷速率对岩样强度的影响,为了排除其他因素对岩样强度的影响,在进行卸围压模拟时,首先要选择合适的初始卸荷应力,使该应力状态下岩样处于弹性状态。根据图7中各种围压下初始屈服时的应力,确定卸荷数值试验的初始应力点为 $\sigma_1 = 55$ MPa和 $\sigma_2 = \sigma_3 = 10$ MPa。确定初始应力点后,进行了4组卸围压模拟,卸荷速率分别为0.1、0.5、1、5 MPa/step。卸荷过程中侧向应变的变化较为明显,图8中给出

了围压与侧向应变的关系,可以看出,随着围压的卸荷,不同卸荷速率下的试样都是经历了一段弹性变形以后,开始发生塑性变形,之后,侧向变形迅速膨胀。从图 8 还可以看出,卸荷围压的速率越快,岩样破坏时的围压越低。

为了对比分析常规加载和卸荷条件下的强度,将图 7、8 中破坏时的轴向应力和围压绘于图 9。图中同时给出了图 7 中初始屈服对应的应力以及初始卸荷应力点,可以看出,该应力状态下,岩样处于弹性状态。图 9 中的卸荷强度为卸围压至破坏时的应力状态,从右至左卸荷速率依次增加,图中用数字给出了卸荷围压的速率。从图 9 中可以看出,随着卸荷速率的增加,岩样的强度逐渐提高,EPSCA^{2D}模拟结果和吴刚等^[5]试验所得结论一致。当卸荷速率为常规加载试验加载速率的 0.5 倍时,卸荷条件下的强度高于常规加载的强度。从图 9 还可以得出以下结论:当卸围压速率是常规加载轴压速率的 0.2~0.3 倍时,加载和卸荷条件下的强度比较接近。由 2.2 节的讨论可知,此时加载和卸荷条件下的接近破坏时的屈服接近速率相当,这说明在卸荷试验中,如果卸荷点处于弹性范围内,只要各种应力路径下的屈服接近速率差别不大,应力路径对强度的影响不显著。

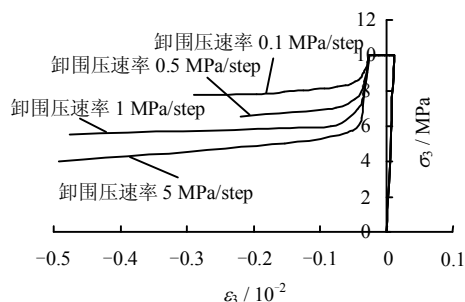


图 8 不同卸荷速率下围压与侧向应变的关系

Fig.8 Relations between the confining pressure and lateral strain under different unloading rates

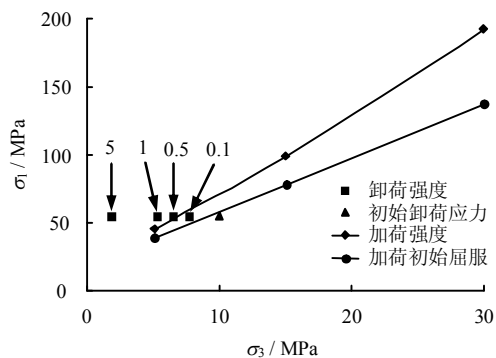


图 9 轴向应力与围压的关系(数字为卸荷速率,单位: MPa/step)

Fig.9 Relations between the axial stress and confining pressure (The num is unloading rate, the unit is MPa/step)

3.2 锦屏大理岩的卸荷围压试验

为了进一步验证第 2 节,以及 3.1 节的结论,利用锦屏 II 级深埋长大引水隧洞的深部大理岩进行了卸围压试验。此种岩石由碳酸盐矿物成分组成,变晶结构,致密块状构造,宏观均匀性好,矿物成分主要为方解石。岩样尺寸为 $\phi 50 \times 100$ mm,试件的加工精度包括平行度、平直度和垂直度均控制在《水利水电工程岩石试验规程》(SL264-2001)规定范围之内。

与 3.1 节相同,首先进行常规试验确定大理岩的强度,然后根据初始屈服点确定初始卸荷围压的应力点,对于该大理岩,卸荷点定为 $\sigma_1 = 125$ MPa 和 $\sigma_2 = \sigma_3 = 25$ MPa。常规试验采用轴向位移控制,通过弹性参数可计算得到轴向应力的加载速率约为 0.15 MPa/s。卸围压试验共进行了 4 组,4 组的卸围压速率分别为常规加轴压速率的 1/9、1/3、1 和 4/3 倍,即 0.016、0.049、0.1、0.20 MPa/s。各种卸围压速率下,围压与横向应变的关系如图 10 所示,该关系和弹塑性细胞自动机模拟的结果,即图 8 在趋势上是一致的。

同样,为了对比分析常规试验和卸荷试验下的强度,将两种路径下的强度绘于图 11,图中常规试

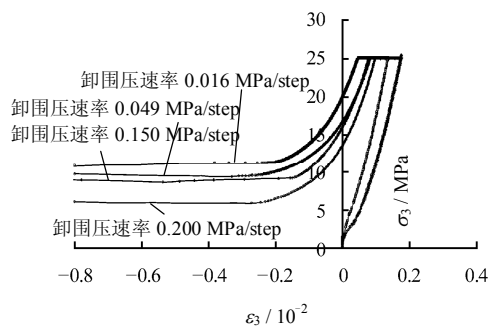


图 10 不同卸荷速率下围压与侧向变形的关系

Fig.10 Relations between the confining pressure and lateral strain under different unloading rates

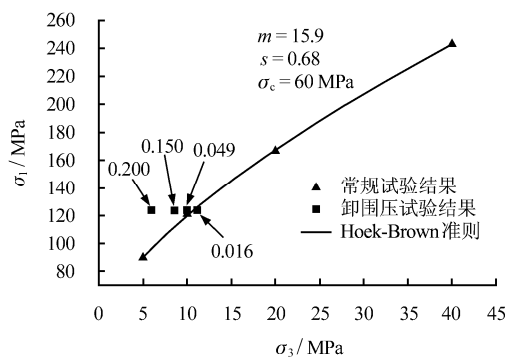


图 11 轴向应力与围压的关系(数字为卸荷速率,单位: MPa/s)

Fig.11 Relation between the axial stress and confining pressure (The num is unloading rate, the unit is MPa/s)

验的强度利用 Hoek-Brown 准则进行了拟合。从图可以看出,随着卸荷速率的增加,大理岩的强度提高,这与 3.1 节中的模拟结果也是一致的。当卸荷速率为常规加载速率的 1/3 时,卸荷条件下的强度已经大于常规试验的强度。与 3.1 节中的结论相似,当卸荷围压速率是常规加载轴压速率的 0.2~0.3 倍时,加载和卸荷条件下的强度比较接近。

4 结 论

首先提出用屈服接近速率表征各种应力路径下岩石接近屈服的快慢,并分析了常规加载和各种卸荷路径下的屈服接近速率,结果表明:给定强度参数,接近破坏时,(1)各个路径下的屈服接近速率几乎和围压无关;(2)各种卸荷路径下的屈服接近速率相差不大;(3)当卸荷速率为加载速率的 0.2~0.3 倍时,加载和卸荷路径下的屈服接近速率基本一致。

通过弹塑性细胞自动机模拟和大理岩的卸围压试验得到以下结论:(1)随着卸荷速率的增加,岩石的强度逐渐提高;(2)当卸荷速率为常规轴向加载速率的 0.2~0.3 倍时,卸荷和加载路径下的强度相当,即应力路径对强度没有影响。从而表明,卸荷试验中,当卸荷点在弹性范围内时,在屈服接近速率相等的条件下,应力路径对强度没有影响。

根据本文的研究结果,研究卸荷点和应力路径等对强度的影响时,为了去除不同路径下加载速率的影响,应首先根据屈服接近速率选择合适的加荷和卸荷速率,使各种应力路径下接近破坏时的屈服接近速率相当。

本文中的数值模拟及室内卸荷试验都是针对脆性岩石的,至于对软岩和土等材料,本文的结论还需要进一步试验验证。

参 考 文 献

- [1] 哈秋龄. 加载岩体力学与卸荷岩体力学[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 114.
HA Qiu-ling. Loading and unloading rock masses mechanics[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(1): 114.
- [2] 陈颢, 姚孝新, 耿乃光. 应力途径, 岩石的强度和体积膨胀[J]. 中国科学, 1979, (11): 1093—1100.
CHEN Yong, YAO Xiao-xin, GENG Nai-guang. Strength and volume dilatancy of rock under various stress paths[J]. **Science in China**, 1979, (11): 1093—1100.
- [3] 黄润秋, 黄达. 卸荷条件下花岗岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2205—2213.
HUANG Run-qiu, HUANG Da. Experimental research on mechanical properties of granites under unloading condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(11): 2205—2213.
- [4] 李宏哲, 夏才初, 闫子舰, 等. 锦屏水电站大理岩在高应力条件下的卸荷力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007: 2104—2109.
LI Hong-zhe, XIA Cai-chu, YAN Zi-jian, et al. Study on marble unloading mechanical properties of Jinping hydropower station under high geostress condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007: 2104—2109.
- [5] 吴刚, 孙钧. 卸荷应力状态下裂隙岩体的变形和强度特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 615—621.
WU Gang, SUN Jun. Deformation and strength characters of jointed rock mass under unloading stress states[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1998, 17(6): 615—621.
- [6] 许东俊, 耿乃光. 岩体变形和破坏的各种应力路径[J]. 岩土力学, 1986, 7(2): 17—25.
XU Dong-jun, GENG Nai-guang. The various stress paths causing deformation and failure in rocks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1986, 7(2): 17—25.
- [7] 尤明庆, 华安增. 岩石试样的三轴卸围压试验[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(1): 24—29.
YOU Ming-qing, HUA An-zeng. Triaxial confining pressure test of rock sample[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1998, 17(1): 24—29.
- [8] 周济芳, 李建林, 陈兴周. 卸荷岩体力学特性研究的试验条件[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2004, 26(6): 514—516.
ZHOU Ji-fang, LI Jian-lin, CHEN Xing-zhou. Experimental conditions for researching mechanical characteristics of unloading rock[J]. **Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences)**, 2004, 26(6): 514—516.
- [9] 周小平, 哈秋龄, 张永兴, 等. 峰前围压卸荷条件下岩石的应力-应变全过程分析和变形局部化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3236—3245.
ZHOU Xiao-ping, HA Qiu-ling, ZHANG Yong-xing, et al.

- Analysis of localization of deformation and complete stress-strain relation for mesoscopic heterogeneous brittle rock materials when axial stress is held constant while lateral confinement is reduced[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(18): 3236—3245.
- [10] 李天斌, 王兰生. 卸荷应力状态下玄武岩变形破坏特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(4): 321—327.
- LI Tian-bin, WANG Lan-sheng. An experimental study on the deformation and failure features of a basalt under unloading condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1993, 12(4): 321—327.
- [11] 陈卫忠, 刘豆豆, 杨建平, 等. 大理岩卸围压幂函数型 Mohr 强度特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2214—2220.
- CHEN Wei-zhong, LIU Dou-dou, YANG Jian-ping, et al. Power function based Mohr strength criterion for marble with unloading confining pressures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(11): 2214—2220.
- [12] 杨仕教, 曾晟, 王和龙. 加载速率对石灰岩力学效应的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 786—788.
- YANG Shi-jiao, ZENG Sheng, WANG He-long. Experimental analysis of mechanical effects of loading rates on limestone[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(7): 786—788.
- [13] 袁瑞甫, 李元辉, 赵兴东, 等. 围压卸荷对矿柱破坏模式影响分析[J]. 矿业研究与开发, 2006, 26(2): 24—26.
- YUAN Rui-fu, LI Yuan-hui, ZHAO Xing-dong, et al. Analyses of influence of unloading confining pressure on failure modes of pillar[J]. **Mining Research and Development**, 2006, 26(2): 24—26.
- [14] 张传庆. 基于破坏接近度的岩石工程安全性评价方法的研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006.
- [15] 周辉, 张传庆, 冯夏庭, 等. 隧道及地下工程围岩的屈服接近度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3083—3087.
- ZHOU Hui, ZHANG Chuan-qing, FENG Xia-ting, et al. Analysis of rock mass stability in tunnel and underground engineering based on yield approach index[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(17): 3083—3087.
- [16] FENG Xia-ting, PAN Peng-zhi, ZHOU Hui. Simulation of the rock microfracturing process under uniaxial compression using an elasto-plastic cellular automaton[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2006, 43(7): 1091—1108.
- [17] PAN Peng-zhi, FENG Xia-ting, HUDSON J A. Numerical simulations of class I and class II uniaxial compression curves using an elasto-plastic cellular automaton and a linear combination of stress and strain as the control method[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2006, 43(7): 1109—1117.
- [18] 潘鹏志, 周辉, 冯夏庭. 加载条件对不同尺寸岩石单轴压缩破裂过程的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008: 3636—3642.
- PAN Peng-zhi, ZHOU Hui, FENG Xia-ting. Research on effect of loading conditions on failure processes of rocks with different sizes under uniaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008: 3636—3642.

污水厂设计

建筑科学类/张辰主编/国际 16 开/920 千字/804 页/精装/2010 年 6 月出版

ISBN: 978—7—112—12035—2

本书主要阐述污水厂设计的基本理论和实践经验。全书共 16 章: 绪言、处理工艺选择、进水泵房和预处理、一级处理和一级强化处理、生物处理之活性污泥法、生物处理之生物膜法、消毒、污泥浓缩、污泥厌氧消化、污泥脱水、污泥运输和储存、配电和自控设计、机械设计、污水厂总体布置、污水厂科学运行控制设计和技术经济设计等, 各章中均附有工程实例。

读者对象: 给排水、市政工程、环境工程等工程建设、设计和管理技术人员、施工人员、管理人员, 相关专业大专院校师生。

(摘自 新华书目报)