

DOI:10.12170/20200428001

钱亚俊, 武颖利, 裴伟伟, 等. 不同卸荷速率下岩石强度变形特性 [J]. 水利水运工程学报, 2020(6): 48-54. (QIAN Yajun, WU Yingli, PEI Weiwei, et al. Rock strength and deformation characteristics under different unloading rates[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(6): 48-54. (in Chinese))

不同卸荷速率下岩石强度变形特性

钱亚俊¹, 武颖利¹, 裴伟伟², 朱玥妍¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 温州设计集团有限公司, 浙江 温州 325000)

摘要: 岩体工程的开挖本质上是岩体的卸荷过程, 不同的卸荷速率会显著影响岩体的强度变形特性, 开展相关研究对于岩体工程的安全稳定分析具有重要意义。针对岩石开挖卸荷中各种可能的应力路径, 开展了普通三轴压缩试验以及恒主应力差卸围压、恒轴压卸围压、升轴压卸围压的3种卸荷试验, 重点分析了不同卸荷速率对开挖卸荷岩体力学特性的影响规律。研究得出主要结论如下: (1) 不同卸荷方案、不同卸荷速率的岩样, 都具有典型的脆性破坏特征, 当围压降低到一定程度时, 岩样突然破坏, 轴压陡降, 环向应变显著增大。(2) 当围压卸荷速率较高, 岩样临近破坏时, 变形模量随围压卸荷比的变化曲线几乎成90°直线下降, 泊松比随围压卸荷比的变化曲线几乎成90°直线上升; 而卸荷速率较低时, 变形模量和泊松比下降/增长的趋势相对较缓。这说明围压卸荷速率越大, 岩样脆性破坏特征越显著。(3) 3种卸荷方案岩样在不同的卸荷速率下, 破坏时的应力状态基本都位于普通三轴压缩 Mogi-Coulomb 强度包络线的下方, 即围压卸荷时的岩样比普通三轴压缩状态的岩样更容易破坏。

关键词: 岩石; 卸荷速率; 强度; 变形特性; 卸围压

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2020)06-0048-07

岩体工程的建设大部分需要先对岩体进行开挖, 涉及到岩体的卸荷过程。随着大型资源开采、水利工程等项目的增多, 卸荷状态下的岩石强度变形特性一直是人们关注的焦点之一^[1-3]。天然状态下的岩体处于复杂的应力状态中, 现场试验开展难度较大, 所以通常将天然状态的岩体受力情况抽象为三向应力状态, 通过岩石室内单元试验来反映。

前人已针对岩石开展了多种卸荷应力路径下的试验^[1-4], 主要是三轴卸荷应力路径, 重点研究了卸荷状态下岩石的能量演化规律^[5-6]、破坏时的变形及强度特性^[7-9]。应力路径固然是影响岩石强度变形特性的重要因素, 但是, 在相同的应力路径下, 不同的加卸荷速率对岩石的特性也具有显著影响。事实上, 工程上不同的开挖速度对于围压的力学反应、稳定性等方面的影响早已引起了人们的重视; 在岩体开挖施工过程中, 通过调整开挖施工速度来控制岩体的卸荷进程。比如, 张凯等^[2]开展了多种应力路径下不同卸荷速率的三轴试验, 并指出在弹性阶段卸荷应力路径对岩石的强度特性影响不大。邓华锋等^[10]开展了恒主应力差卸围压的系列试验, 指出卸荷速率越大岩样脆性破坏特征越明显。Huang 等^[11]研究了岩石卸荷过程中的能量变化规律, Zong 等^[12]分析了砂岩在不同应力状态下的强度变形特性, Li 等^[13]对砂岩进行的加卸荷试验表明, 相比加载试验而言, 卸荷试验时水平层状砂岩的内摩擦角增加而黏聚力降低。综上可知, 已有研究多见于不同应力路径下的岩石力学特性分析^[14-15], 对于不同卸荷速率下的岩石强度变形特性研究虽有开展, 但并不成体系, 甚至某些方面的认知还存在较大差异^[1]。

收稿日期: 2020-04-28

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(Y318005)

作者简介: 钱亚俊(1981—), 男, 江苏海安人, 高级工程师, 硕士, 主要从事土工数值计算、岩土工程安全监测及除险方法等研究。E-mail: yjqian@nhri.cn 通信作者: 武颖利(E-mail: wuyingli@nhri.cn)

本文从模拟岩体不同卸荷应力路径的角度出发,开展了普通三轴压缩试验,以及不同卸荷速率下的多种卸围压试验,分析了不同的卸荷速率对岩体强度变形特性的影响规律,以期为岩体工程的安全稳定分析、支护设计等提供理论参考。

1 试验方案

本试验选取粉砂岩作为试验对象,试验在 MTS815.02 电液伺服岩石力学试验系统上进行,岩石试样为 $\Phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的圆柱体标准试件。根据加载应力路径,分为 4 个试验方案(见表 1)。各方案的第一步都是施加围压:用应力控制方式以 0.05 MPa/s 的速率逐步施加 $\sigma_2=\sigma_3$ 至预定值,同时,让轴向方向自由变形,应力保持为零,此后不再赘述。各方案后续加、卸荷步骤都为先以 0.25 MPa/s 的速率按照应力控制方式逐步加载 σ_1 至预定值,如表 1 所示,然后按照表 1 中设计的卸荷速率卸除围压 σ_3 。

表 1 试验加卸荷方案
Tab. 1 Test loading and unloading schemes

试验 方案	试样 编号	卸荷时初始 围压/MPa	卸荷时初始 轴压/MPa	围压卸荷速 率/(MPa·s ⁻¹)	轴压卸荷速 率/(MPa·s ⁻¹)	试验 方案	试样 编号	卸荷时初始 围压/MPa	卸荷时初始 轴压/MPa	围压卸荷速 率/(MPa·s ⁻¹)	轴压卸荷速 率/(MPa·s ⁻¹)
方案 I: 普通三 轴压缩试验	I-1	10	--	--	--	方案 III: 恒主应 力差卸围压	III-1	30	89.8	-0.05	-0.05
	I-2	20	--	--	--		III-2	30	90.2	-0.10	-0.10
	I-3	30	--	--	--		III-3	30	89.4	-0.25	-0.25
	I-4	40	--	--	--		III-4	30	89.8	-0.50	-0.50
							III-5	30	89.1	-0.85	-0.85
方案 II: 恒轴 压卸围压	II-1	30	88.7	-0.05	--	方案 IV: 升轴 压卸围压	IV-1	30	68.6	-0.05	0.25
	II-2	30	90.5	-0.10	--		IV-2	30	62.4	-0.10	0.25
	II-3	30	90.9	-0.25	--		IV-3	30	62.8	-0.25	0.25
	II-4	30	89.5	-0.50	--		IV-4	30	64.7	-0.50	0.25
	II-5	30	90.5	-0.85	--		IV-5	30	64.7	-0.85	0.25

图 1 为围压 10、20、30、40 MPa 时的普通三轴压缩试验轴向应力应变曲线。粉砂岩试件在峰后破坏阶段,呈现出明显的弹-塑性破坏特征,即应力有明显的降低段,但是并不会减低到 0,而是保持一定的残余应力。

研究表明,Mogi-Coulomb 强度理论能更好地描述岩石在卸荷状态下的破坏强度特征^[16-17]。因此,本文拟采用 Mogi-Coulomb 强度准则,首先对普通三轴压缩试验的强度参数进行分析。Mogi-Coulomb 强度理论主要考虑岩样破坏时的八面体剪应力 τ_{oct} 和有效中间主应力 $\sigma_{\text{m},2}$, τ_{oct} 和 $\sigma_{\text{m},2}$ 存在线性关系:

$$\tau_{\text{oct}} = a + b\sigma_{\text{m},2} \tag{1}$$

式中:参数 a 和 b 分别为拟合直线的截距和斜率。三轴试验中, a 和 b 与 Coulomb 强度参数黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的关系为 $a = \frac{2\sqrt{2}}{3}c\cos\varphi$, $b = \frac{2\sqrt{2}}{3}\sin\varphi$ 。

其中,剪应力 τ_{oct} 和有效中间主应力 $\sigma_{\text{m},2}$ 的表达式分别为:

$$\tau_{\text{oct}} = 1/3 \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \tag{2}$$

$$\sigma_{\text{m},2} = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 \tag{3}$$

三轴试验中, $\sigma_2=\sigma_3$, 则:

$$\tau_{\text{oct}} = \sqrt{2}/3(\sigma_1 - \sigma_3) \tag{4}$$

根据图 1 中各岩样破坏时的轴压 σ_1 和围压 σ_3 , 代入式(3)和(4)计算得到剪应力 τ_{oct} 和有效中间主应力 $\sigma_{m,2}$, 并绘制于图 2 中。图 2 中的拟合参数 $a=24.1$ MPa, $b=0.197$, $R^2=0.983$, 换算成 Coulomb 强度参数为 $c=26.1$ MPa, $\varphi=12.1^\circ$ 。

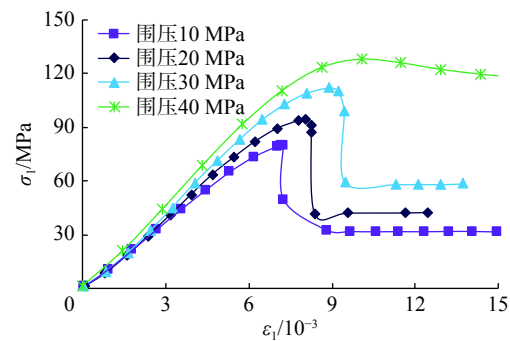


图 1 普通三轴压缩试验应力应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves in general triaxial compression test

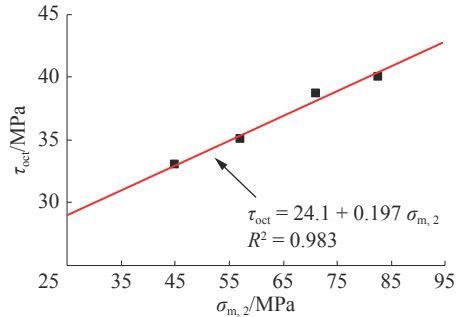


图 2 普通三轴压缩试验结果及拟合

Fig. 2 Test results and fitting in general triaxial compression test

2 卸荷变形特性分析

2.1 应力应变特征

图 3 为不同围压卸荷方式及卸荷速率时试样的轴向和环向应力应变曲线, 同时, 各卸围压试样与围压 30 MPa 时的普通三轴压缩试验应力应变曲线进行了对比。

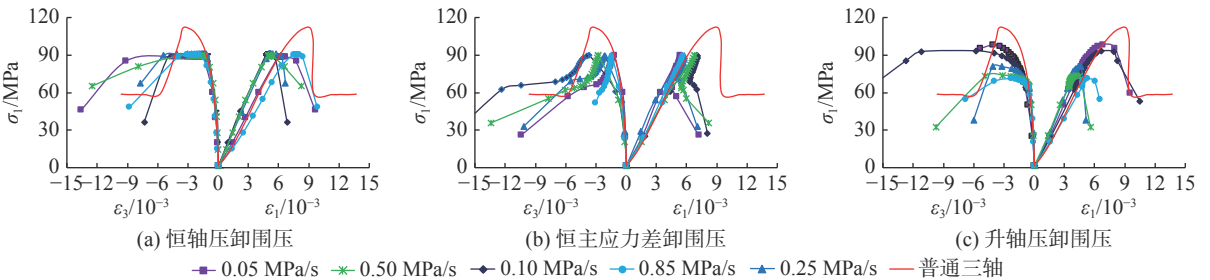


图 3 不同卸荷路径及卸荷速率下岩样的应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of rock samples under different unloading paths and different unloading rates

由图 3(a)和图 3(c)可见, 恒轴压卸围压和升轴压围压的岩样, 随着围压的减小, 轴向应变 ϵ_1 和环向应变 ϵ_3 都变大, 这是由于围压减小降低了对岩样环向的约束, ϵ_3 增大; 而同时轴向需要更大的位移来保持轴压不变或者升高, 则 ϵ_1 增大。岩样的破坏具有典型的脆性破坏特征, 当围压降低到一定程度时, 岩样突然破坏, 轴压陡降, 环向应变 ϵ_3 显著增大。

由图 3(b)可见, 恒主应力差卸围压的岩样, 随着围压的减小, 轴向应变 ϵ_1 的变化规律与恒轴压卸围压和升轴压卸围压的岩样不同, 在卸围压至岩样破坏这一过程中, 轴向应变 ϵ_1 减小, 这是由于围压减小的同时, 轴压也减小, 使得轴向有一定程度的回弹。环向应变 ϵ_3 则持续增大, 主要是围压的减小降低了对环向的约束作用。

2.2 变形模量

由于卸荷试验中围压都是减小的, 为了进行归一化分析, 现将围压卸荷比定义为:

$$H = (\sigma_3^0 - \sigma_3^T) / \sigma_3^0 \quad (5)$$

式中: H 为围压卸荷比; σ_3^0 为卸荷前围压; σ_3^T 为卸荷过程中的实时围压。

与常规加载方式不同, 三轴卸荷试验变形参数求解应考虑环向变形和围压的影响, 本文基于虎克定律, 采用以下计算公式^[18]:

$$\begin{cases} E = (\sigma_1 - 2\mu\sigma_3) / \varepsilon_1 \\ \mu = \frac{B\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_3(2B - 1) - \sigma_1} \\ B = \varepsilon_3 / \varepsilon_1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: E 为变形模量(GPa); μ 为泊松比; ε_1 和 ε_3 分别为轴向应变和环向应变。

根据式(6)计算得到各卸荷岩样的变形模量 E 和泊松比 μ , 图4给出了变形模量 E 与围压卸荷比 H 的关系曲线。

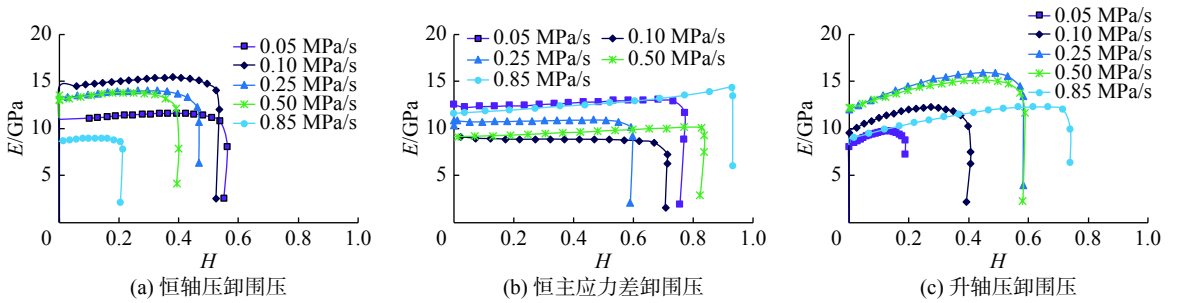


图4 不同卸荷路径及卸荷速率下岩样的变形模量

Fig. 4 Deformation modulus of rock samples under different unloading paths and different unloading rates

从图4可以看出: 在卸荷过程中, 变形模量 E 在破坏前变化不明显; 对于恒轴压卸围压和恒主应力差卸围压的岩样, 随着围压卸荷比 H 的增大, 变形模量 E 变化不明显; 而升轴压卸围压的岩样随着卸荷比 H 的增大, 变形模量 E 缓慢增大。

岩样发生破坏时, 变形模量 E 急剧减小。围压卸荷速率越大, 当岩样接近破坏时变形模量 E 急剧减小的程度越显著, 以恒轴压卸围压试验为例, 如图4(a)所示, 当卸荷速率为 0.85 MPa/s 时, 岩样临近破坏时, 变形模量 E 几乎成 90° 直线下降; 而卸荷速率为 0.05~0.50 MPa/s, 变形模量 E 由大减小的趋势相对更缓。这说明, 卸荷速率越大, 岩样的脆性破坏特征越显著。

2.3 泊松比

图5为卸荷过程中泊松比 μ 随围压卸荷比 H 的变化曲线。从图5中可以总结出关于泊松比 μ 的重要特征: 在围压卸荷的初始阶段, 泊松比 μ 缓慢增加, 当围压卸荷比 H 增加到一定程度, 试样接近破坏, 泊松比 μ 急剧增大, 直到超过 0.5 (弹塑性材料极限泊松比为 0.5), 此时岩样已破坏。围压卸荷速率越大, 当岩样接近破坏时泊松比 μ 急剧增大的程度越显著, 以升轴压卸围压试验为例 (见图5(c)), 当卸荷速率为 0.85 MPa/s 时, 岩样临近破坏时, 泊松比 μ 几乎成 90° 直线增加; 而卸荷速率为 0.05~0.50 MPa/s, 增长趋势相对更缓。这再次证明了卸荷速率越大, 岩样的脆性破坏特征越显著。

值得注意的是, 由于岩体内部存在裂隙, 使得制样后的各岩样本身性质不尽相同; 由于试验过程中的不确定性, 使得同一试验方案内, 各个岩样在卸荷前的应力状态并不完全相同, 特别是方案IV (升轴压卸围压) 各岩样的轴压都不相同, 范围为 62.4~68.6 MPa (表1)。因此, 将同一试验方案下不同卸荷速率之间的岩样进行比较会存在较大误差, 甚至做出错误的结论。所以, 本文只分析了各个岩样在卸荷过程中变形模量 E 和泊松比 μ 的变化趋势, 而未对具体的数值开展分析。

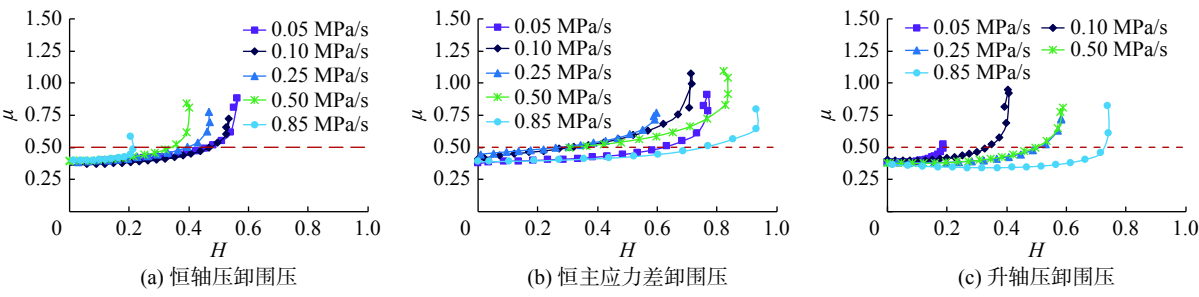


图 5 不同卸荷路径及卸荷速率下岩样的泊松比

Fig. 5 Poisson's ratio of rock samples under different unloading paths and different unloading rates

3 卸荷强度特性分析

根据各岩样的加卸荷应力路径,整理了 3 种应力路径试验在岩样破坏时的围压,如图 6 所示。其中,恒轴压卸围压试验,随着卸荷速率的增大,破坏时的围压越大,这说明卸荷速率越快,岩样破坏越快。由此可以推测,以不同的卸荷速率卸荷到相同围压,卸荷速率越快,岩样破坏的可能性越大,由此可以指导工程建设过程中,要适当降低卸荷速率。

升轴压卸围压的岩样,围压卸荷速率越大,岩样破坏时的围压越小。恒主应力差卸围压的岩样规律则更复杂,在围压卸荷速率为 0.25 MPa/s 时,岩样破坏时的围压最高;卸荷速率为 0.85 MPa/s 时,岩样破坏时的围压最低。这是由于这两种卸荷方案中,不仅围压降低,轴压也是变化的,而试样破坏时,不仅只有围压的作用,轴压的作用更大。因此,需要综合轴压和围压的实时状态来判断。

将 3 种卸荷应力路径下岩样破坏时的剪应力 τ_{oct} 和有效中间主应力 $\sigma_{m,2}$ 绘制在 τ_{oct} - $\sigma_{m,2}$ 平面,同时绘制普通三轴压缩试验得到的 Mogi-Coulomb 强度包线,如图 7 所示。

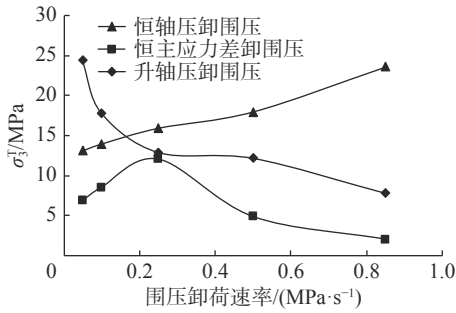


图 6 不同卸荷速率岩样破坏时的围压

Fig. 6 Confining pressure of rock samples at different unloading rates

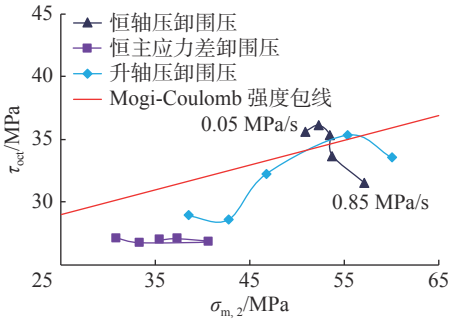


图 7 不同卸荷速率岩样破坏时的强度

Fig. 7 Strength of rock samples at different unloading rates

由图 7 可见: 3 种卸荷方案的岩样基本都位于普通三轴压缩 Mogi-Coulomb 强度包络线的下方。特别地,对于恒轴压卸围压的岩样,在较低速率卸围压的情况下,如 0.05 和 0.10 MPa/s 时,岩样破坏时位于普通三轴压缩 Mogi-Coulomb 强度包络线的上方,而当围压卸荷速率较大,如 0.85 MPa/s 时,则位于强度包络线的下方。围压卸荷的岩样,特别是卸荷速率越大的岩样基本都位于普通三轴压缩 Mogi-Coulomb 强度包络线的下方,意味着在相同的围压下,围压卸荷的岩样在比强度包络线上更小的剪应力下即已破坏。这说明,围压卸荷时的岩样,特别是卸荷速率越大的岩样比普通三轴压缩状态的岩样更容易破坏。

4 结 语

本文针对岩石开挖卸荷中各种可能的应力路径,开展了系列卸荷试验,重点分析了卸荷速率对岩体强度变形特性的影响规律,为深部高应力岩体工程开挖、支护设计等提供理论参考,主要结论如下:

(1)不同卸荷方案、不同卸荷速率的岩样,破坏都具有典型的脆性破坏特征,当围压降低到一定程度时,岩样突然破坏,轴压陡降,环向应变 ε_3 显著增大。

(2)当围压卸荷速率较高,岩样临近破坏时,变形模量 E 随围压卸荷比的变化曲线几乎成 90° 直线下降,泊松比 μ 随围压卸荷比的变化曲线几乎成 90° 直线上升;而卸荷速率较低时, E 和 μ 下降/增长的趋势相对较缓。这说明围压卸荷速率越大,岩样脆性破坏特征越显著。

(3)3种卸荷方案的岩样在不同的卸荷速率下,破坏时的应力状态基本都位于普通三轴压缩 Mogi-Coulomb 强度包络线的下方,这说明围压卸荷时的岩样比普通三轴压缩状态的岩样更容易破坏。

参 考 文 献:

- [1] 李地元,孙志,李夕兵,等.不同应力路径下花岗岩三轴加卸载力学响应及其破坏特征[J].岩石力学与工程学报,2016,35(增刊2):3449-3457. (LI Diyuan, SUN Zhi, LI Xibing, et al. Mechanical response and failure characteristics of granite under different stress paths in triaxial loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Suppl2): 3449-3457. (in Chinese))
- [2] 张凯,周辉,潘鹏志,等.不同卸荷速率下岩石强度特性研究[J].岩土力学,2010,31(7):2072-2078. (ZHANG Kai, ZHOU Hui, PAN Pengzhi, et al. Characteristics of strength of rocks under different unloading rates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2072-2078. (in Chinese))
- [3] 丛宇,王在泉,郑颖人,等.不同卸荷路径下大理岩破坏过程能量演化规律[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(9):3140-3147. (CONG Yu, WANG Zaiquan, ZHENG Yingren, et al. Energy evolution principle of fracture propagation of marble with different unloading stress paths[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(9): 3140-3147. (in Chinese))
- [4] 李地元,谢涛,李夕兵,等.Mogi-Coulomb强度准则应用于岩石三轴卸荷破坏试验的研究[J].科技导报,2015,33(19):84-90. (LI Diyuan, XIE Tao, LI Xibing, et al. On the Mogi-Coulomb strength criterion as applied to rock triaxial unloading test[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(19): 84-90. (in Chinese))
- [5] 姚吉康,王志亮.华山花岗岩力学特性及能量演化规律研究[J].水利水运工程学报,2018(3):78-85. (YAO Jikang, WANG Zhiliang. Study on mechanical property and energy evolution law of Huashan granite[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(3): 78-85. (in Chinese))
- [6] 杨圣奇,徐卫亚,苏承东.大理岩三轴压缩变形破坏与能量特征研究[J].工程力学,2007,24(1):136-142. (YANG Shengqi, XU Weiya, SU Chengdong. Study on the deformation failure and energy properties of marble specimen under triaxial compression[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(1): 136-142. (in Chinese))
- [7] 李新平,肖桃李,汪斌,等.锦屏二级水电站大理岩不同应力路径下加卸载试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(5):882-889. (LI Xinping, XIAO Taoli, WANG Bin, et al. Experimental study of Jinping II hydropower station marble under loading and unloading stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 882-889. (in Chinese))
- [8] 黄润秋,黄达.高地应力条件下卸荷速率对锦屏大理岩力学特性影响规律试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(1):21-33. (HUANG Runqiu, HUANG Da. Experimental research on affection laws of unloading rates on mechanical properties of Jinping marble under high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 21-33. (in Chinese))
- [9] 王乐华,牛草原,张冰伟,等.不同应力路径下深埋软岩力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(5):973-981. (WANG Lehua, NIU Caoyuan, ZHANG Bingyi, et al. Experimental study on mechanical properties of deep-buried soft rock under different stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(5): 973-981. (in Chinese))
- [10] 邓华锋,王哲,李建林,等.卸荷速率和孔隙水压力对砂岩卸荷特性影响研究[J].岩土工程学报,2017,39(11):1976-1983. (DENG Huafeng, WANG Zhe, LI Jianlin, et al. Effect of unloading rate and pore water pressure on mechanical properties of

sandstone[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(11): 1976-1983. (in Chinese))

- [11] HUANG D, LI Y R. Conversion of strain energy in triaxial unloading tests on marble[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 66: 160-168.
- [12] ZONG Y J, HAN L J, WEI J J, et al. Mechanical and damage evolution properties of sandstone under triaxial compression[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2016, 26(4): 601-607.
- [13] LI J L, WANG L H, WANG X X, et al. Research on unloading nonlinear mechanical characteristics of jointed rock masses[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2010, 2(4): 357-364.
- [14] 章航, 王志亮, 卢志堂, 等. 循环冲击荷载下花岗岩力学特性尺寸效应[J]. *水利水电工程学报*, 2020(2): 107-115. (ZHANG Hang, WANG Zhiliang, LU Zhitang, et al. Size effect of mechanical properties of granite under cyclic impact loading[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2020(2): 107-115. (in Chinese))
- [15] 黄佑鹏, 王志亮, 毕程程. 岩石爆破损伤范围及损伤分布特征模拟分析[J]. *水利水电工程学报*, 2018(5): 95-102. (HUANG Youpeng, WANG Zhiliang, BI Chengcheng. Simulation analysis of blast-induced damage scope and its distribution characteristics of rocks[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2018(5): 95-102. (in Chinese))
- [16] 吕颖慧, 刘泉声, 江浩. 基于高应力下花岗岩卸荷试验的力学变形特性研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(2): 337-344. (LÜ Yinghui, LIU Quansheng, JIANG Hao. Study of mechanical deformation characteristics of granite in unloading experiments of high stress[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(2): 337-344. (in Chinese))
- [17] 张黎明, 王在泉, 石磊. 硬质岩石卸荷破坏特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(10): 2012-2018. (ZHANG Liming, WANG Zaiquan, SHI Lei. Experimental study of hard rock failure characteristic under unloading condition[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(10): 2012-2018. (in Chinese))
- [18] 高春玉, 徐进, 何鹏, 等. 大理岩加卸载力学特性的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(3): 456-460. (GAO Chunyu, XU Jin, HE Peng, et al. Study on mechanical properties of marble under loading and unloading conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(3): 456-460. (in Chinese))

Rock strength and deformation characteristics under different unloading rates

QIAN Yajun¹, WU Yingli¹, PEI Weiwei², ZHU Yueyan¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Wenzhou Design Assembly Co., Ltd., Wenzhou 325000, China)

Abstract: The excavation of rock mass engineering is essentially the unloading process of rock mass, and different unloading rates will significantly affect the strength and deformation characteristics of rock mass, which is of great significance to the safety and stability analysis of rock mass engineering. For modeling various unloading stress paths in the rock mass excavation, the ordinary triaxial compression test, constant axial pressure unloading confining pressure test, loading axial pressure and unloading confining pressure test, and constant principal stress difference unloading confining pressure test were conducted in this research. The effects of different unloading rates on the mechanical properties of rock mass were analyzed. The main conclusions are as follows: (1) Rock shows typical brittle failure characteristics under different unloading paths and different unloading rates, when the confining pressure decreases to a certain value, the rock sample suddenly fails, the axial pressure drops sharply, and the circumferential strain ε_3 increases significantly. (2) If the confining pressure unloading rate is high, when the rock sample is near failure, the deformation modulus E decreases linearly almost at a 90° angle, and Poisson's ratio μ increases linearly almost at a 90° angle. If the unloading rate is low, the decreasing/increasing trend of E and μ is relatively slower. This shows that the brittle failure of rock sample is more obvious with the increasing unloading rate of confining pressure. (3) The stress state of rock samples under the three unloading paths are basically below the strength envelope of ordinary triaxial compression Mogi-Coulomb, which shows that the rock sample under confining pressure unloading is more easily damaged than that under normal triaxial compression.

Key words: rock; unloading rate; strength; deformation characteristics; unloading confining pressure