

花岗片麻岩峰前围压卸荷条件下力学特性的实验研究

范永波¹, 伍法权² 和海芳³, 任爱武⁴

(1. 中国科学院力学研究所环境力学重点实验室, 北京 100015; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所
工程力学重点实验室, 北京 100029; 3. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100038;
4. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 对小湾水电站坝基花岗片麻岩试件进行了室内不同直径、不同峰前围压卸荷试验。结果表明: 相同围压下, 卸载同加载相比, 变形模量变化不大, 但泊松比大幅增加, 甚至超过 0.5; 在相同围压卸荷时, 不同尺寸的试样会呈现不同的破坏性状, 尺寸越大, 越容易产生张破坏; 岩块的峰值强度随着围压升高呈线性增加, 且尺寸越大受围压变化的影响越小, 存在明显的尺寸效应。

关键词: 花岗片麻岩; 峰前卸围压; 力学参数

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2011)03-0054-05

工程实践中, 经常遇到循环加、卸载荷的作用, 如坝基开挖后加固、大型地下洞室开挖后加固、边坡开挖后支护等。其中岩体卸荷后其力学特性的判断关系到后期的设计、开挖方式及支护等相关工作。岩体卸荷的本质是在外界条件变化后应力场发生了变化。岩石本身在加载和卸载条件下力学性质差别不大, 但在含有节理、裂隙等结构面的岩体中, 情况完全不同^[1], 加载时岩体仍有很好的力学性能, 但卸载时, 特别是由于卸荷产生拉张破坏时, 岩体中结构面将迅速劣化岩体质量, 对岩体强度将起控制性作用, 导致岩体卸载力学特征不再遵循加载时的规律。

岩石在不同围压下表现出不同的峰后特性, 较低围压下表现为脆性的岩石可以在高压下转化为延性^[2]。Karman^[3]首次用大理岩进行了不同围压下的压缩试验; Parterson^[4-5]在室温下也对大理岩进行了一系列实验研究, 发现随着围压增大, 岩石变形行为有脆性向延性转变的特性; Mogi^[6-7]发表过类似的实验结果, 并指出脆-延转化通常与岩石强度有关。周小平等(2005)^[8]根据损伤断裂力学讨论了岩石峰前围压卸荷条件下岩石的强度特性; 徐松林等(2001)^[9]讨

论了大理岩峰前、峰后卸围压条件下强度和变形特性进行较为全面的研究; 尤明庆等(1997)^[10]曾研究卸围压条件下岩石泊松比。

但针对峰前围压卸荷条件下力学各参数变化规律及影响因素问题开展试验研究的很少见有全面报道。因而, 本文针对工程实际情况, 通过在伺服试验机上对花岗片麻岩进行峰前卸围压试验, 研究它的强度和变形特性。

1 岩石特征及试验设备、试验方案

小湾水电站坝基岩体主要为黑云母花岗片麻岩、角闪斜长片麻岩。本试验样品为黑云母花岗片麻岩, 其主要矿物成分为石英、长石及少量云母。试验在 TAW-2000 微机控制电液伺服岩石三轴试验机上进行, 该岩石三轴试验机配置了德国 DOLI 公司原装进口的 EDC 全数字伺服控制器、美国进口 MOOG 公司的伺服阀、岩石引伸计、高低温系统、数字式声波分析系统、围压系统、孔隙水压系统以及计算机系统。

为了测定岩石的尺寸和卸载对岩石强度及力学性能的影响, 分别取试样直径为 25mm、50mm、75mm 的岩样, 结合工程实践, 坝基开挖造成的卸荷作用可通过控制轴压不变, 围压逐渐减小, 即首先将围压加到一定的值(一般比较高), 然后保持轴压不变, 慢慢卸掉围压, 直到试样破坏。试验中要使围压的降低速度和轴压的增加速度一致才可, 也就是说, 在降低围压的同时, 需根据试样横截面积等速率增加轴压, 弥补围压降低时造成的轴压损失。最初负荷以 1 000N/s 加压到指定荷载后, 对于 75mm 的岩样, 围压卸荷速度为

收稿日期: 2010-09-20; 修订日期: 2010-11-22

基金项目: 973 项目“重大工程地质灾害的预测理论及数值分析方法研究”(2010CB731502); 国家自然科学基金项目(10702072)

作者简介: 范永波(1980-)男, 助理研究员, 博士, 主要从事岩体力学相关科研工作。

E-mail: ybfan@imech.ac.cn

0.32MPa/s,同时轴压以13.756kN/s增加,其它尺寸岩样按截面积等效换算即可。

2 卸荷条件下试验结果及分析

图1、图2、图3分别为25mm、50mm、75mm试样峰前卸围压条件下的破坏实物图。

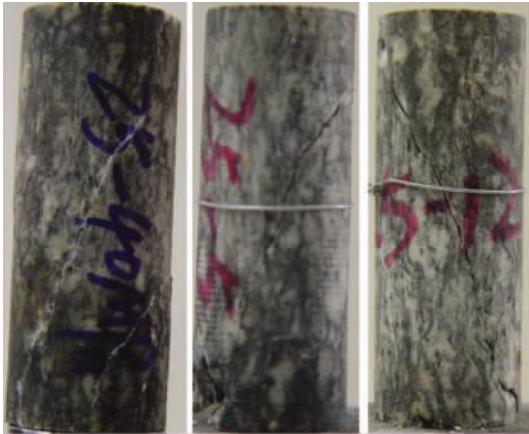


图1 25mm试样在40MPa、50MPa、60MPa时剪切破坏

Fig.1 Shear failure about 25mm sample under 40MPa, 50MPa and 60MPa

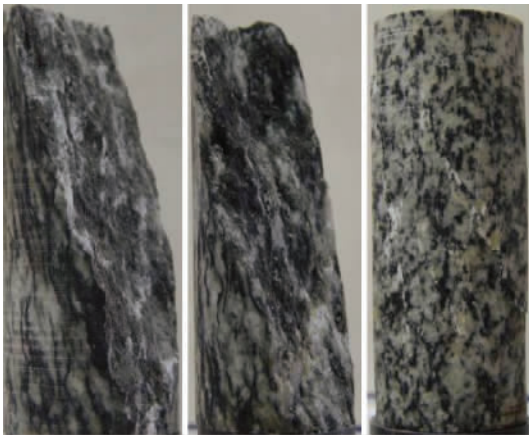


图2 50mm试样在40MPa、50MPa时剪切破坏和60MPa时张破坏

Fig.2 Shear failure about 50mm sample under 40MPa, 50MPa and tensile failure under 60MPa

2.1 不同围压卸荷时应力应变曲线差异

黑云母花岗片麻岩卸围压三轴压缩全过程试验,采用轴向冲程控制,加载速率为一定值。对直径25mm、50mm、75mm试样分别进行了围压为40MPa、50MPa、60MPa的应力应变全过程试验,试验结果见图4。通过在不同围压卸荷岩样破坏曲线可明显看出有如下特点:

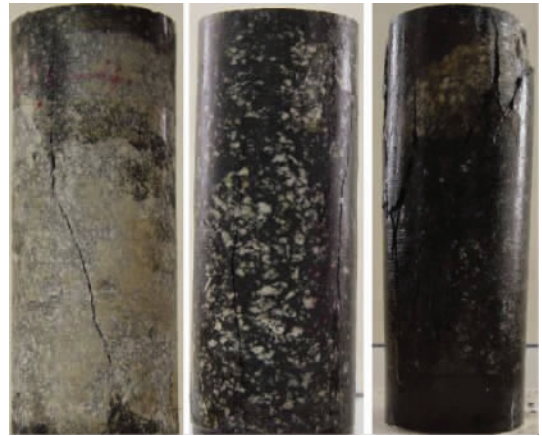


图3 75mm试样在40MPa时剪切破坏和50MPa、60MPa时张破坏

Fig.3 Shear failure about 75mm sample under 40MPa and tensile failure under 50MPa and 60MPa

(1) 随着围压升高,岩样破坏所需的轴向应力会相应提高,围压40MPa、50MPa、60MPa时,轴压分别在220MPa、240MPa、300MPa时,岩样进入塑性变形阶段;随围压升高,塑性变形历时所占比例逐渐变大。

(2) 由实物图可看出25mm试样在围压40MPa、50MPa、60MPa均以剪切破坏为主;50mm试样在围压40MPa、50MPa时均以剪切破坏为主,60MPa时出现羽状裂纹,以张破裂为主;75mm试样在围压40MPa时以剪切破坏为主,50MPa、60MPa均出现羽状裂纹,以张破裂为主,且60MPa围压下有一定的膨胀内鼓。

(3) 由图4可明显看出,随着围压的升高,岩样由低围压时的脆性剪切破坏转化为高围压时的柔性张破裂,并伴随有一定的体积膨胀。

2.2 不同尺寸样品的破坏特征及参数差异

由于生成条件及生成后亿万年地质构造作用及大气风化作用,在岩石内部形成各种类型的空隙、微裂隙及肉眼可见的各种缺陷,它们直接影响岩石的物理力学性质。因此,岩石样品大小的不同,常表现出其力学性质的差异,即所谓尺寸效应或比例尺效应。

本文挑选出围压40MPa时不同试样的应力-应变曲线如图5所示。由图看出,同等条件下,随着试样尺寸的逐步加大,试样的峰值强度逐渐降低。

(1) 同等条件下,随着围压的增加,岩石的强度近似直线增加。

(2) 同等条件下,尺寸越大,受围压的影响越小(图6) 25mm样斜率最大,50mm次之,75mm样最小;同时随着试样尺寸变大,峰值强度变低,尺寸效应明显(图7)。

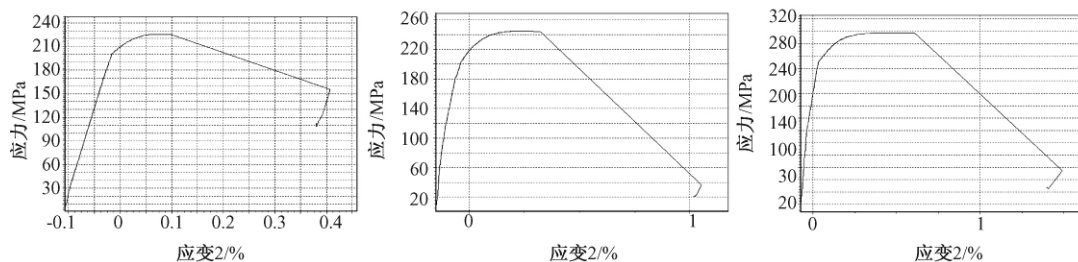


图 4 50mm 试样 40MPa、50MPa、60MPa 卸围压时应力 - 应变曲线

Fig. 4 The curve of stress - strain when unloading of 40MPa , 50MPa and 60MPa about 50mm sample

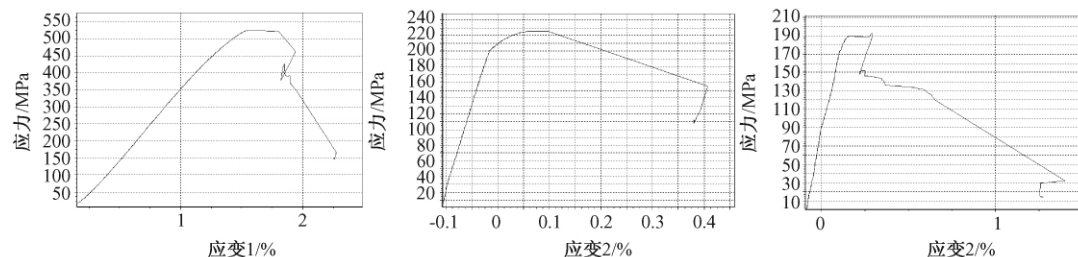


图 5 25mm、50mm、75mm 试样 40MPa 卸围压时应力 - 应变曲线

Fig. 5 The curve of stress - strain when unloading of 40MPa about 25mm , 50mm and 75mm sample

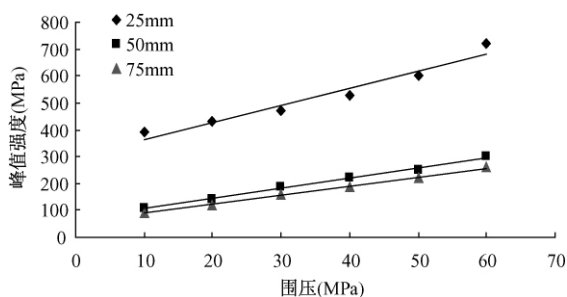


图 6 不同尺寸样品的峰值强度随围压变化曲线

Fig. 6 The curve of peak strength changing with confining pressure about different size sample

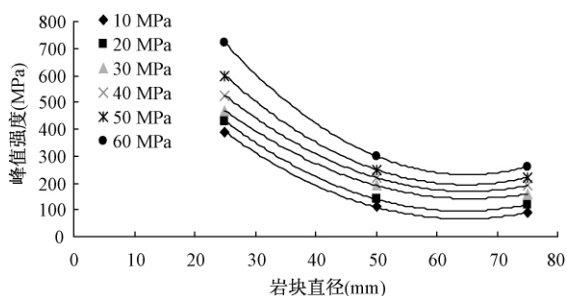


图 7 抗压强度尺寸效应

Fig. 7 Size effect about compressive strength

2.3 围压卸荷条件下岩块参数

由于围压卸荷与连续加载具有完全不同的应力路径,两者所引起的岩体变形和破坏特性,无论在力学机理还是在力学响应上都有很大差异,呈现出如下特点:

(1) 轴压不变,围压减小时,黑云母花岗片麻岩均呈脆性张剪性破坏。

(2) 对于脆性材料的岩石来说,随着围压的降低,弹性模量有所降低,但泊松比明显增大,由于存在大量的微裂隙等缺陷,在卸围压时,由于微裂隙本身抗拉能力小,出现明显的扩展、扩容现象,岩石体积明显增加,出现压缩体积小于扩容体积是可能的,故岩石泊松比在接近破坏的情况下可能出现大于 0.5 的情况,图 8 为卸载时泊松比随围压的变化曲线。

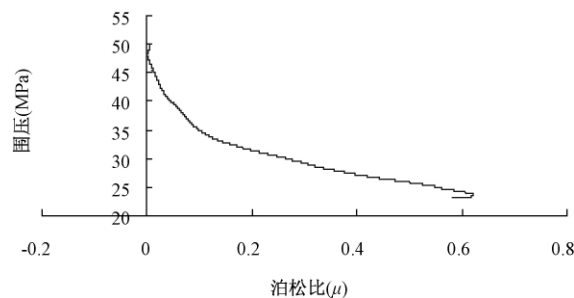


图 8 卸载时泊松比随围压变化曲线

Fig. 8 The curve of Poisson's ratio changing with confining pressure when unloading

对于岩体泊松比大于 0.5 的情况,伍法权等 (2001)^[11]理论上证明了岩体泊松比大于 0.5 的可能性;吴刚 (1997)^[12]在研究岩石的卸荷特征时指出:岩石在加、卸荷条件下的变形均随主差应力的增大而增大,但在相同的主差应力下,卸荷产生的扩容量比加荷

的扩容量大得多。

3 结论

(1) 同等围压下, 同加载条件比较, 变形模量变化不大, 但泊松比大幅增加, 甚至会大于 0.5。

(2) 随着围压升高, 岩样破坏所需的轴向应力会相应提高, 另外, 随围压升高, 塑性变形历时所占比例逐渐变大, 由脆性剪切破坏转化为延性张破坏。

(3) 同等条件下, 试样尺寸越大, 峰值强度越低, 受围压影响越小, 越容易出现张破坏。

参考文献:

- [1] 谢红强, 何江达, 徐进. 岩石加卸载变形特性及力学参数试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 336 - 338. [XIE H Q, HE J D, XU J. Deformation characters of rock under loading and unloading conditions and experimental study of mechanical parameters [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(3): 336 - 338. (in Chinese)]
- [2] 周宏伟, 谢和平, 左建平. 深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 91 - 99. [ZHOU H W, XIE H P, ZUO J P. Development in researches on mechanical behaviors of rocks under the condition of high ground pressure in the depths [J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(1): 91 - 99. (in Chinese)]
- [3] Karman, T von. Festigkeitsversuche unter all seitigem Druck[J]. Zeit d Ver Deutscher Ing, 1911, 55: 1749 - 1757.
- [4] M S Paterson. Experimental deformation and faulting in Wombeyan marble [J]. Bull Geol Soc Am, 1958, 69: 465 - 467.
- [5] M S Paterson. Experimental Rock Deformation-the Brittle Field[M]. Berlin: Springer, 1978.
- [6] K Mogi. Deformation and fracture of rocks under confining pressure: elasticity and plasticity of some rocks [J]. Bull Earthquake Res Inst Tokyo Univ, 1965, 43: 349 - 379.
- [7] K Mogi. Pressure dependence of rock strength and transition from brittle fracture to ductile flow [J]. Bull Earthquake Res inst Tokyo Univ, 1966, 44: 215 - 232.
- [8] 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): 3237 - 3244. [ZHOU X P, HA Q L, ZHANG Y X. Analysis of localization of deformation and complete stress-strain relation for mesoscopic heterogenous 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): 3237 - 3244. (in Chinese)]
- [9] 徐松林, 吴文, 王广印. 大理岩等围压三轴压缩全过程研究三轴压缩全过程和峰前、峰后卸围压全过程实验 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 764 - 766. [XU S L, WU W, WANG G Y. Study on complete procedures of marble under triaxial compression I: testing study on complete procedure of triaxial compression and the processes of unloading confining at the pre-peak and post-peak [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 764 - 766. (in Chinese)]
- [10] 尤明庆, 华安增. 卸围压法测量岩石材料的泊松比 [J]. 实验力学, 1997, 12(2): 274 - 277. [YOU M Q, HUA A Z. Determination of poisson's ratio for rock material by experiment of confining pressure reduction [J]. Journal of Experimental Mechanics, 1997, 12(2): 274 - 277. (in Chinese)]
- [11] Wu Fa-quan, Wang Si-jing. A stress-strain relation for jointed rock masses [J]. Int. J. Rock Mechanics. & Mining Sciences (SCI), 2001, 38: 591 - 598.
- [12] 吴刚. 岩石在加、卸载条件下破坏效应的对比分析 [J]. 岩土力学, 1997, 18(2): 13 - 16. [WU G. Comparison of failure effects of rock mass under loading and unloading conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, 18(2): 13 - 16. (in Chinese)]

Experiment research about mechanical characteristic of gneissic granite while confining pressure is unloaded

FAN Yong-bo¹, WU Fa-quan², HE Hai-fang³, REN Ai-wu⁴

(1. Key Laboratory of Environmental Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100150, China; 2. Key laboratory of Engineering Geo-mechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100038, China; 4. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Unloading confining pressure tests are conducted before different pre-peak confining pressure of gneissic granite obtained at the foundation of Xiaowan hydrodynamic station, the results show that the deformation modulus changes little, but poisson's ratio increases greatly compared with the loading conditions under the same confining pressure. Samples with different sizes will show different behaviors under the same unloading confining pressure, and the sample with a larger size will show tensile failure; The peak-stress of the sample will increase linearly with the confining pressure increasing, and size effect is obvious, namely, the larger the size of sample, the less the influence of the confining pressure change.

Key words: gneissic granite; pre-peak unloading confining pressure; mechanical parameter

责任编辑:张明霞

(上接第 53 页)

Research on prediction model of dynamic resilient modulus of subgrade soil based on matric suction

QIU Xin¹, QIAN Jin-song², ZHANG Shi-zhou³

(1. Engineering College, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China; 2. Key Lab. of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 2018042, China; 3. Liaoning Transportation Planning Design Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: Matric suctions of test specimens were surveyed by using the filter paper method, and parameters of soil-water characteristic curve (SWCC) equations were obtained by using regression analysis. For the sake of investigating factors which affect subgrade dynamic resilient modulus (M_R) and their laws, a series of resilient modulus tests were carried out with repeated load triaxial tests on reconstituted cylindrical specimens. Based on the corresponding relationship between moisture content and matric suction, an innovative model to predict dynamic resilient modulus of subgrade based on matric suction was established, which integrate the influence of stress state (confining pressure and circular deviator stress) and moisture condition (matric suction). The experimental results indicate that values parameters of SWCC are distinct for each specimens, M_R values increases with the increasing confining pressure, matric suction and compaction degree, and the circular deviator stress and moisture content decrease. Comparing to silty soil, the dynamic resilient modulus of clay is more sensitive to stress state and moisture content.

Key words: resilient modulus; prediction model; matric suction; soil-water characteristic curve

责任编辑:张明霞