

文章编号: 1000-7598 (2011) 10-3009-05

# 循环加载时围压对岩石动力特性的影响

刘恩龙<sup>1,2,3</sup>, 黄润秋<sup>3</sup>, 何思明<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 四川大学 水利水电学院, 成都 610065;  
3. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

**摘 要:** 针对砂岩岩样, 探讨了在不同围压作用下和轴向循环加载时岩样的动力力学性质, 研究围压对砂岩岩样的动力力学性质的影响。采用的试验设备是 MTS-815 岩石和混凝土试验系统, 5 组围压分别为 10、20、30、40、50 MPa。岩样为汶川地区的干砂岩, 轴向荷载施加的频率为 1 Hz。结果表明, (1) 随着围压的逐渐增加, 试样的残余轴向应变和体变逐渐增加, 且剪胀发生时的残余体变也逐渐增加; (2) 动力荷载作用时岩样在高围压比低围压下的初始刚度和强度高; (3) 不同围压作用下, 当应力比  $R_s$  较大时, 岩样在较小的循环次数下发生破坏; (4) 试样的破坏模式为剪切破坏, 动力荷载作用下试样形成的局部化破坏带更宽。

**关 键 词:** 动力特性; 循环荷载; 周围压力; 动力刚度

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

## Influence of confining pressure on dynamic properties of rock samples subjected to cyclic loading

LIU En-long<sup>1,2,3</sup>, HUANG Run-qi<sup>3</sup>, HE Si-ming<sup>1</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. School of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

3. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The dynamic properties of intact sandstone samples subjected to axially cyclic loading under confining pressures conditions in the laboratory are presented. Five sets of confining pressures, 10, 20, 30, 40, 50 MPa, were employed by MTS-815 Rock and Concrete Test System. Tests were conducted on dry sandstone samples obtained from areas near “5·12” 2008 Wenchuan Earthquake location with axial loading frequency of 1 Hz and different amplitudes corresponding to different confining pressures. Results demonstrate that: (1) With increased confining pressure, the residual axial and volumetric strain of the rock samples and the residual volumetric strain when dilatancy occurred both become larger. (2) The rock samples subjected to dynamic cyclic loading responded with a significantly higher initial strength and stiffness at higher confining pressures than at lower confining pressures; and the stiffness decreased more rapidly at lower confining pressures than at higher confining pressures. (3) When the stress ratio ( $R_s$ ) is larger, the sample failed after fewer cycles under confining pressure conditions. (4) The failure modes of the samples are shear failure and the localized band is wider upon dynamic loading.

**Key words:** dynamic properties; cyclic loading; confining pressure; dynamic stiffness

## 1 引 言

研究岩石的动力性质, 其目的是了解和掌握岩石在不同的加载历史和条件下的动力性质, 以便为岩石动力边坡及深部岩体工程的设计与开挖提供依据<sup>[1-3]</sup>。针对不同类型的岩样, 学者们已研究了加载和加载应变率对其强度和变形的影响<sup>[4-6]</sup>。同时,

也开展了循环荷载作用时岩样的疲劳弱化研究<sup>[7-13]</sup>。

以上进行的研究工作主要集中于研究加载速率或单向循环加载(侧向应力为 0, 侧向可以变形, 轴向施加动荷载)时的岩样的动力性质, 但很少涉及围压作用时岩样的动力性质方面的研究。实际岩石工程中的岩体处于一定的应力场作用和受周围压力作用, 因此, 有必要开展岩石在围压作用时循环

收稿日期: 2011-04-28

基金项目: 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金资助 (No. SKLGP2011K006); 国家自然科学基金资助项目 (No. 51009103); 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放研究基金资助项目 (2009 年)。

第一作者简介: 刘恩龙, 男, 1976 年生, 博士(后), 副教授, 主要从事岩土材料本构关系和数值分析方面的教学与科研工作。E-mail: liuenlong@scu.edu.cn

加载条件下的动力特性的研究,这也是本文所要开展的研究工作。

本次对砂岩岩样进行不同围压作用时的轴向循环加载试验,采用 5 组围压 (10、20、30、40、50 MPa), 频率为 1 Hz, 探讨围压对其动力力学性质的影响。最后分析了围压对砂岩岩样的变形和刚度的影响。

## 2 设备和试验方法

砂岩岩样的直径与高度之比为 1: 2, 平均直径为 48.9 mm, 平均密度为  $2.33 \text{ g/cm}^3$ 。试验设备为 MTS-815 岩石与混凝土试验系统, 该系统包括加载架、轴向加荷系统和数据处理系统, 可以进行三轴静力和动力岩样试验, 加载方式可采用轴向位移控制和应力控制。本次对围压为 10、20、30、40、50 MPa 进行了静力和轴向循环动力试验, 动力试验的波形为正弦波, 加载频率为 1 Hz, 加载路径见图 1。在动力加载过程中, 循环荷载的加载速率为  $60 \text{ kN/min}$ 。表 1 给出了试验方案。

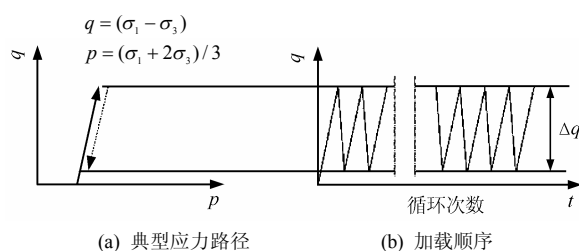


图 1 加载路径  
Fig.1 Loading path

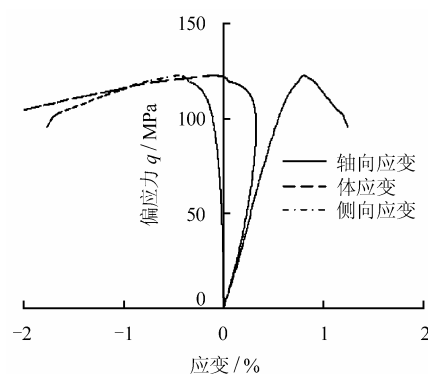
表 1 试验方案  
Table 1 Summary of the samples tested

| 试样号 | 围压 / MPa | 加载类型   | 加载条件                                                |
|-----|----------|--------|-----------------------------------------------------|
| S10 | 10       | 静力     | 三轴压缩                                                |
| D10 | 10       | 循环, 动力 | 三轴, 1 Hz, 应力路径为图 1 所示, 轴向动力荷载为 20~230 kN, 161 次循环破坏 |
| S20 | 20       | 静力     | 三轴压缩                                                |
| D20 | 20       | 循环, 动力 | 三轴, 1 Hz, 应力路径为图 1 所示, 轴向动力荷载为 20~280 kN, 257 次循环破坏 |
| S30 | 30       | 静力     | 三轴压缩                                                |
| D30 | 30       | 循环, 动力 | 三轴, 1 Hz, 应力路径为图 1 所示, 轴向动力荷载为 20~320 kN, 629 次循环破坏 |
| S40 | 40       | 静力     | 三轴压缩                                                |
| D40 | 40       | 循环, 动力 | 三轴, 1 Hz, 应力路径为图 1 所示, 轴向动力荷载为 20~350 kN, 241 次循环破坏 |
| S50 | 50       | 静力     | 三轴压缩                                                |
| D50 | 50       | 循环, 动力 | 三轴, 1 Hz, 应力路径为图 1 所示, 轴向动力荷载为 20~380 kN, 347 次循环破坏 |

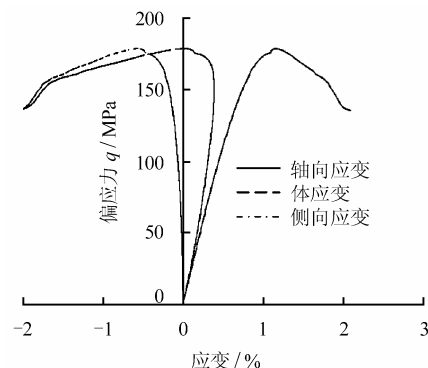
## 3 试验结果与讨论

### 3.1 三轴压缩试验

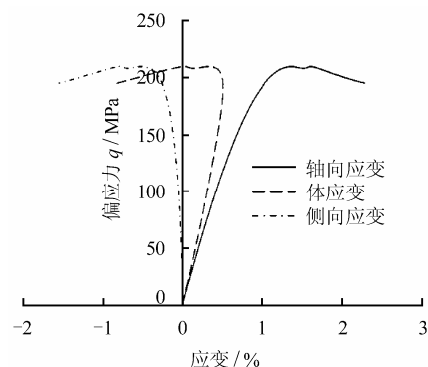
岩样的单轴抗压强度为 71.7 MPa。图 2 为不同围压时的应力-应变曲线。由图可以看出, 围压从 10 MPa 增大到 50 MPa 时, 砂岩岩样从脆性逐渐过渡到延性, 试验先体积收缩然后膨胀。围压越低, 剪胀越明显。表 2 为三轴压缩试验试样破坏时的应力状态。



(a) S10 围压为 10 MPa



(b) S30 围压为 30 MPa



(c) S50 围压为 50 MPa

图 2 三轴静力试验结果

Fig.2 Results of triaxial tests with static loadings

表 2 破坏时的应力状态  
Table 2 Summary of the stress state at failure

| 试样号 | 最大主应力<br>/ MPa | 最小主应力<br>/ MPa |
|-----|----------------|----------------|
| S10 | 132.8          | 10             |
| S20 | 173.4          | 20             |
| S30 | 208.9          | 30             |
| S40 | 228.7          | 40             |
| S50 | 259.6          | 50             |

### 3.2 循环动力试验

对于动力试验,可以得到围压为 10、20、30、40、50 MPa 时加载过程中偏应力、轴应变和侧向应变随时间的变化。图 3、4 分别为围压为 10 MPa 和 30 MPa 时的应力-体变和应变与体积应变试验结果(偏应力从峰值到谷值)。应力以压为正,应变以收缩为正。从试验结果可以看出,(1)在轴向循环荷载施加的初期,试样表现为近于弹性。随着循环次数的增加,试验表现为弹塑性并产生不可恢复的变形(包括轴向应变、体变和侧向应变),且其数值逐渐增加;(2)随着围压的增加,破坏时的轴向应变也增加。

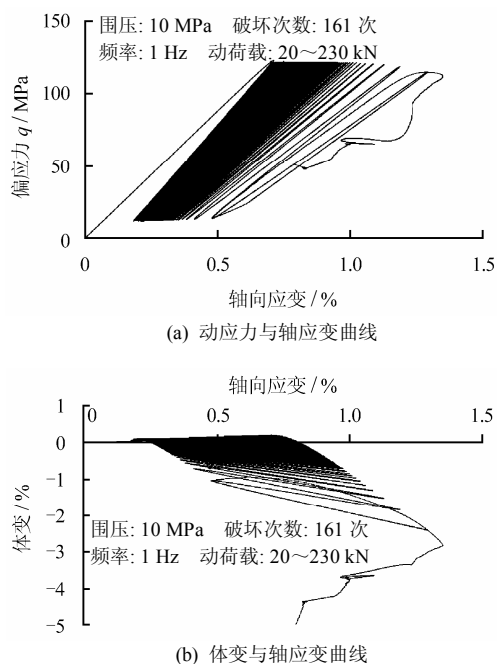


图 3 D10 试验结果  
Fig.3 Tested results of D10

表 3 为静力和动力试验中剪胀开始出现时的轴向应变和体应变。与静力试验相比,轴向循环试验发生剪胀时需要更大的轴向应变。当发生剪胀,围压为 10 MPa 和 20 MPa 时动力试验的体应变比静力试验小,而围压为 30、40、50 MPa 时,动力试验的体应变比静力试验大,其原因是:围压低时,动力加载的试样表现出的脆性抑制了剪缩的发展;围

压高时,动力加载的试样表现出的延性有助于剪缩的发展。

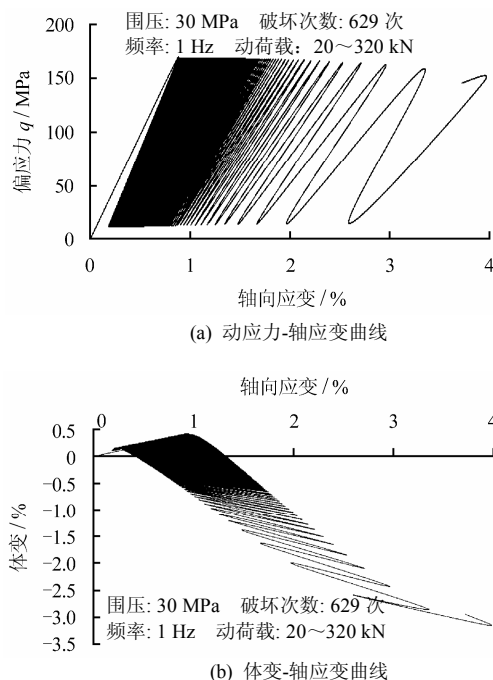


图 4 D30 试验结果  
Fig.4 Tested results of D30

表 3 剪胀开始时的轴应变和体应变  
Table 3 Summary of the axial strain and volumetric strain when dilatancy happening

| 试样号 | 轴向应变<br>/ %   | 体积应变<br>/ %   |
|-----|---------------|---------------|
| S10 | 0.517         | 0.323         |
| D10 | 0.707 (0.209) | 0.208 (0.094) |
| S20 | 0.640         | 0.359         |
| D20 | 0.832         | 0.284         |
| S30 | 0.751         | 0.387         |
| D30 | 0.935 (0.237) | 0.413 (0.162) |
| S40 | 0.880         | 0.447         |
| D40 | 1.137 (0.533) | 0.516 (0.229) |
| S50 | 0.987         | 0.507         |
| D50 | 1.230 (1.180) | 0.579 (0.309) |

注: 括号中的值为残余应变。

### 3.3 围压对动应变的影响

葛修润等<sup>[12-13]</sup>研究了频率较低时(频率为 0.25 Hz 和 0.06 Hz)有围压作用时岩样的不可逆变形规律。这里探讨轴向循环荷载以 1 Hz 频率施加时围压对岩样动应变的影响。图 5 为试样 D10、D30 和 D50 的循环次数  $N$  与残余轴应变和残余体应变的关系曲线。随着  $N$  增加,循环初期残余轴向应变逐渐增加,然后快速增加直到破坏。残余体应变在循环初期收缩,然后剪胀直到试样破坏。随着围压的增加,剪胀开始时的残余体变增加,见表 3,且残余轴应变和残余体变都增加。

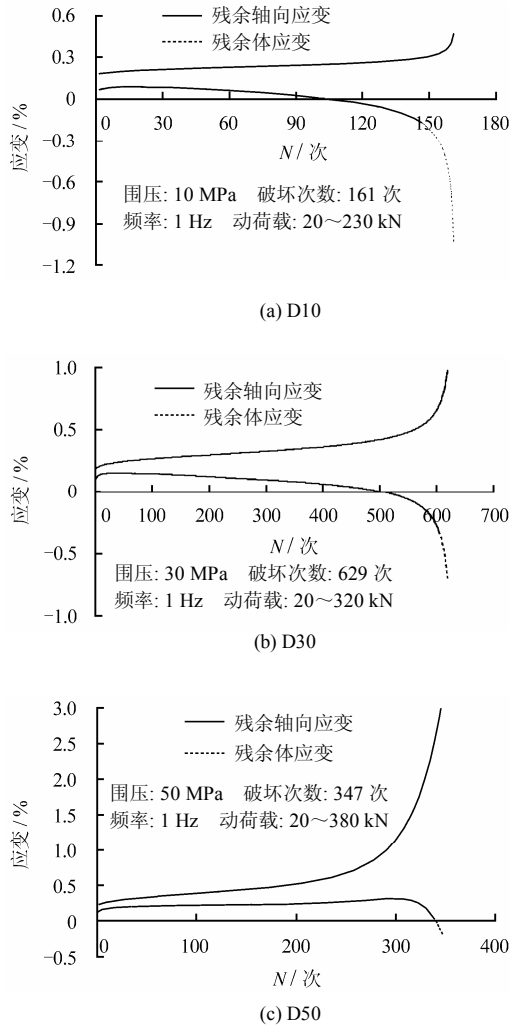


图 5 应变与循环次数关系曲线  
Fig.5 Strain vs. number of cycles curves

### 3.4 围压对动力学特性的影响

加载过程中的平均动刚度  $A_{sd}$  可用以下式计算:

$$A_{sd} = \frac{\Delta q}{\Delta \varepsilon_1} \quad (1)$$

式中:  $A_{sd}$  为平均动刚度 (GPa);  $\Delta q$  为应力差;  $\Delta \varepsilon_1$  为动力条件下相应的峰值与谷值的应变差。

图 6 为计算的动刚度与残余轴向应变的关系。从图可知,随着残余应变的增加,动力刚度则降低,这是由于试样中产生了微裂纹和疲劳。岩石的初始刚度很大,且围压高时刚度比围压低时大。围压越低,刚度降低的越快,原因是围压高时动载作用下增加了试样的强度和刚度。

定义  $R_s$  为应力比,且计算公式为

$$R_s = \frac{q_{\max, \text{dyn}}}{2\tau_{\text{stat}}} \quad (2)$$

式中:  $q_{\max, \text{dyn}}$  为轴向动力加载时的最大偏应力;  $\tau_{\text{stat}}$  为相同围压作用下静力强度。

图 7 为  $R_s$  与破坏时的循环次数  $N_f$  的关系曲线。当  $R_s$  大时,试样在很少的循环荷载作用下就破坏。

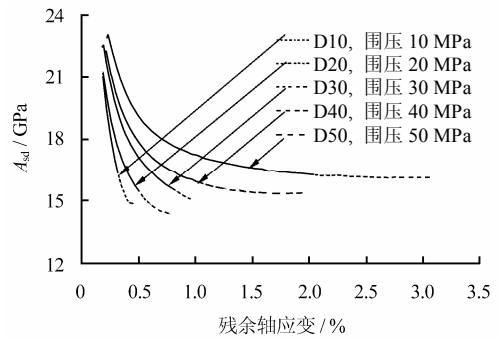


图 6 轴向刚度与残余轴应变曲线  
Fig.6 Axial stiffness vs. residual axial strain

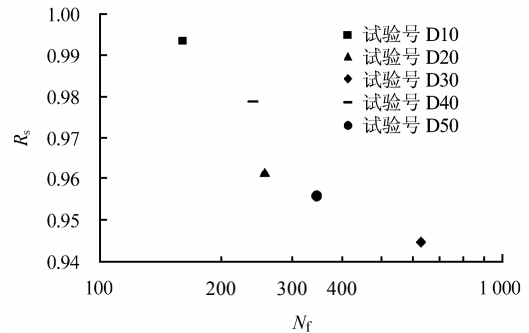


图 7  $R_s$ - $N_f$  曲线  
Fig.7  $R_s$ - $N_f$  curves

### 3.5 围压对动力破坏模式的影响

图 8 为岩样在动力荷载与静力荷载作用下的破坏模式。试样为剪切破坏,且存在局部化带,动力荷载作用下试样形成的局部化破坏带更宽。

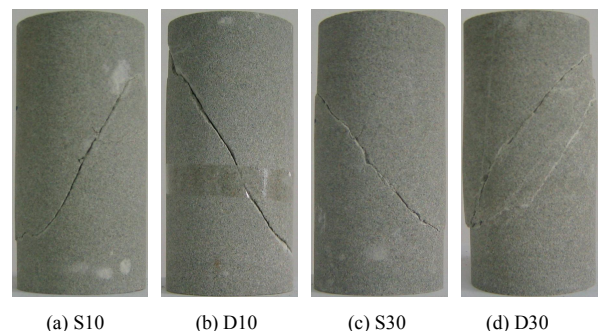


图 8 破坏模式  
Fig.8 Failure model

## 4 结 论

(1) 随着围压的逐渐增加,试样的残余轴向应变和体变逐渐增加,且剪胀发生时的残余体变也逐渐增加。

(2) 动力荷载作用时岩样在高围压比低围压下的初始刚度和强度高。

(3) 不同围压作用下, 当应力比  $R_s$  较大时, 岩样在较小的循环次数下发生破坏。

(4) 试样的破坏模式为剪切破坏, 动力荷载作用下试样形成的局部化破坏带更宽。

### 参 考 文 献

- [1] 黄理兴, 陈奕柏. 我国岩石动力学研究现状与发展[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1881—1886.  
HUANG Li-xing, CHEN Yi-bai. Rock dynamics in China: past, present and future[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(11): 1881—1886.
- [2] 单仁亮, 薛友松, 张欠. 岩石动态破坏的时效损伤本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1771—1776.  
SHAN Ren-liang, XUE You-song, ZHANG Qian. Time dependent damage model of rock under dynamic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(11): 1771—1776.
- [3] 李夕兵, 左宇军, 马春德. 中应变率下动静组合加载岩石的本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 865—874.  
LI Xi-bing, ZUO Yu-jun, MA Chun-de. Constitutive model of rock under coupled static-dynamic loading with intermediate strain rate[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(5): 865—874.
- [4] ZHAO J, LI H B, WU M B, et al. Dynamic uniaxial compression tests on a granite[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1999, 36(2): 273—277.
- [5] LEE M T, CHEN E P, JOEL S K. Microcrack-induced damage accumulation in brittle rock under dynamic loading[J]. **Computer methods in Applied Mechanics and Engineering**, 1986, 55: 301—320.
- [6] ZHANG Y Q, HAO Hong, LU Yong. Anisotropic dynamic damage and fragmentation of rock materials under explosive loading[J]. **International Journal of Engineering Science**, 2003, 41: 917—929.
- [7] LI N, CHEN W, ZHANG P, et al. The mechanical properties and a fatigue-damage model for jointed rock masses subjected to dynamic cyclical loading[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38: 1071—1079.
- [8] SONG J, KIM K. Micromechanical modeling of the dynamic fracture process during rock blasting[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1996, 33(4): 387—394.
- [9] CHO S H, OGATA Y, KANEKO K. A method for estimating the strength properties of a granite rock subjected to dynamic loading[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2005, 42: 561—568.
- [10] WANG Z, LI Y, WANG J G. A method for evaluating dynamic tensile damage of rock[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2008, 75: 2812—2825.
- [11] WANG Q Z, LI W, XIE H P. Dynamic split tensile test of Flattened Brazilian Disc of rock with SHPB setup[J]. **Mechanics of Materials**, 2009, 41: 252—260.
- [12] 葛修润. 周期荷载下岩石大型三轴试件的变形和强度特性研究[J]. 岩土力学, 1987, 8(2): 11—19.  
GE Xiu-run. Study on deformation and strength behavior of the large-sized triaxial rock samples under cyclic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1987, 8(2): 11—19.
- [13] 葛修润, 卢应发. 循环荷载作用下岩石疲劳破坏和不可逆变形问题的探讨[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 56—60.  
GE Xiu-run, LU Ying-fa. Investigation on fatigue failure and irreversible deformation of rocks subjected to cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1992, 14(3): 56—60.