

# 分级加载条件下岩石流变特性的试验研究

范庆忠<sup>1,2</sup>, 高延法<sup>1,3</sup>

(1. 山东科技大学 资源与环境工程学院, 山东 泰安 271019; 2. 山东农业大学水利学院, 山东 泰安 271018;

3. 中国矿业大学(北京校区)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

**摘要:**以红砂岩为例,采用重力加载式流变仪,在分级加载条件下对岩石的蠕变特性进行了单轴压缩蠕变试验研究,重点观察和分析了蠕变条件下岩石的弹性模量和泊松比的变形效应,同时对其他时效变形特点进行了分析。试验结果表明,侧向稳定蠕变阶段的应力门槛值低于轴向稳定蠕变的应力门槛值;侧向蠕变有明显的加速蠕变阶段,且比轴向加速蠕变阶段出现得早,而轴向蠕变的第三阶段则不太明显,一经出现试样随即破坏。在单体分级加载条件下,受蠕变的影响,随应力水平和变形量的增加,岩石的瞬时弹性模量有明显的增大,泊松比的变化则更为显著。

**关键词:**岩石试验;蠕变;弹性模量;变形效应;试验研究

中图分类号: TU 313

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2005)11-1273-04

**作者简介:**范庆忠(1966-),男,山东海阳人,副教授,山东科技大学在读博士,主要研究方向为矿山岩体力学。

## Experimental study on creep properties of rocks under stepwise loading

FAN Qing-zhong<sup>1,2</sup>, GAO Yan-fa<sup>1,3</sup>

(1. College of Resources & Environmental Engineering, Shandong University of Science & Technology, Tai'an 271019, China; 2. College

of Hydraulic and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China; 3. School of Mechanics and Civil

Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The creep behavior of rocks was investigated by many researchers. The time dependent behavior and strain-rate effect of elastic modulus were also studied by some authors. The lateral creep properties of rocks and deformation effect of elastic modulus of rocks, under creep condition however, were important for constitutive model and still have not been paid enough attention. In this paper, the lateral creep properties and strain effect of modulus under creep condition were experimentally studied using specimens made of red sandstone rock under step load with the developed gravitation style rock creep test machine. The test results showed that the lateral stress threshold of the second period was less than that of the axial stress threshold, the third period of lateral creep was obvious but not for axial one. The turning point of the third period of lateral creep appeared earlier than that of axial creep. Due to creep deformation, the instantaneous elastic modulus and the Poisson's ratio increased obviously with deformation.

**Key words:** rock test; creep; modulus of elasticity; strain effect; experimental study

## 0 引言

流变性质和时效特征是岩石材料的固有力学属性,已有的研究表明<sup>[1~8]</sup>,在许多岩石中都存在流变特征,甚至坚硬的岩石如大理岩和花岗岩等也具有流变特征。流变性质和时效特征也是用以解释和分析地质构造运动现象和进行岩体工程长期稳定性预测的重要依据。随着岩体工程规模的扩大以及采矿工程向深部的推进,岩石的流变性质的研究与工程应用越来越得到重视,有关岩石材料流变性的资料和成果也日渐丰富和完善。但是,单轴压缩条件下已有的岩石蠕变的研究结果大部分是关于轴向的,虽然在单轴压缩情况下岩石的侧向蠕变比轴向更显著,侧向蠕变速

率随应力的增加也比轴向更迅速<sup>[2]</sup>,却少有关于侧向效应的详细研究成果。另外,弹性模量和泊松比是岩石材料的两个重要参数,对两参数的时间效应和应变率效应的研究很多,而其变形效应则研究得较少。本文选择了红砂岩作为岩石试样,采用自行研制的重力加载式流变试验仪进行了单轴压缩条件下岩石蠕变的室内实验,以尝试研究这个问题。

## 1 岩石试验方法<sup>[9]</sup>

本次试验岩石试样为采自山东东部的红砂岩,褐

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50474029)

收稿日期: 2005-01-11

红色, 细粒结构, 质地细腻均匀, 无层理、条纹和裂纹, 表现完整性及均匀性良好。单轴抗压强度为 59 MPa, 相对应的应变值为 0.43%。岩样加工成直径 50 mm, 高 100 mm 的标准试件 20 块。经声波仪测试, 其纵波波速在 74~79  $\mu\text{s}$  之间, 横波波速在 33~35  $\mu\text{s}$  之间。从中选取波速相近的 6 块试件。试验仪器为 MTS 伺服刚性材料试验机和自行研制的重力加载式流变仪。该流变仪基于杠杆原理设计, 扩力比为 60、120 倍; 配有 5、10、20 kg 三种加载砝码若干个。加载时先将机构锁住, 以防动力扰动。将拟加的砝码安放稳定后再按一定速度缓慢释放荷载。首先在伺服试验机上按常规压缩试验测得岩样的单轴抗压强度和极限应变, 作为蠕变试验分级加载的依据。蠕变试验在重力加载式流变仪上进行。试验采用单体分级加载方式, 该方式对研究岩石的长期力学性质是非常有效的。将拟施加的最大荷载按单轴抗压强度分为若干级, 然后在同一试件上由小到大逐级施加荷载。每级荷载的加载速率取为每秒 0.5~1.0 MPa, 各级荷载持续的时间约为两天, 之后施加下一级荷载。

采用电阻应变片法测量试件的形变。选择 2.8 mm×15 mm 的电阻应变片, 在试件的中部选定互相垂直的两对面, 以相对面为一组, 分别粘贴纵、横向应变片。在接触荷载和第一级荷载范围内调平试件, 使两纵向应变片的应变值尽可能接近, 保证试件的受力均匀。每级加载完成后, 立即读取应变数, 作为该级荷载的瞬时应变。之后 1 h 内, 按 5、10、15、30 min 的时间间隔记录应变值, 再后则大致按 1、2、4、8 h 的时间间隔记录应变值。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 破坏形态

图 1 所示为岩石试件的典型破坏形态, 从图中可以看出, 岩石试件的最终破坏面方位介于劈裂破坏和剪切破坏之间。从破坏过程看, 最终破坏之前出现的宏观裂纹基本上都是纵向裂纹, 应属劈裂破坏。一段时间之后发生的宏观破裂面有所倾斜, 且在破坏时产生大量的石粉, 表明破坏时发生了剧烈的剪切摩擦, 这可能是由于试件的受力不均匀而导致的承压板滚动造成的。宏观破裂面的各局部仍然是劈裂形态。因此, 单轴压缩荷载下的蠕变破坏为劈裂破坏。

### 2.2 纵向蠕变

为了后面将侧向蠕变与纵向蠕变进行比较, 先对纵向蠕变加以分析。

图 2 和图 3 为岩样纵、侧向的分级加载蠕变曲线和应力应变曲线。从图中曲线可见:

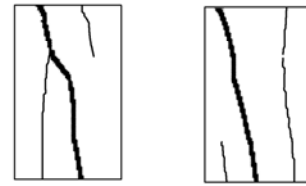


图 1 红砂岩破坏方式

Fig. 1 Mode of failure for red sandstone

(1) 每级荷载都有瞬时形变, 其后为蠕变形变。

(2) 存在一个蠕变应力阈值, 当应力值少于该阈值时, 蠕变很快衰减趋于零, 即只有第一阶段蠕变; 当应力值大于该阈值时, 蠕变趋于稳定, 即产生第二阶段蠕变。该阶段的蠕变速率在同级荷载下几乎为常数, 不同级荷载下的蠕变速率也很接近, 与荷载增量没有明显的比例关系。蠕变应力阈值约为瞬时单轴抗压强度的 45%~55%。

(3) 最后一级荷载虽然出现加速蠕变阶段, 但是不很明显, 曲线稍上翘后试件即发生破坏。

(4) 随着荷载的增大, 单位荷载下的蠕变变形量与瞬时变形量相比逐渐增大, 图 4 中的曲线表明了这种趋势。

(5) 值得注意的是, 随着荷载的增大, 每单位荷载下的瞬时变形量呈减少趋势。若将每级荷载下的瞬时应力增量与瞬时应变增量的比值定义为瞬时弹性模量, 则瞬时弹性模量有随应力增加而增加的趋势, 如图 5 所示。

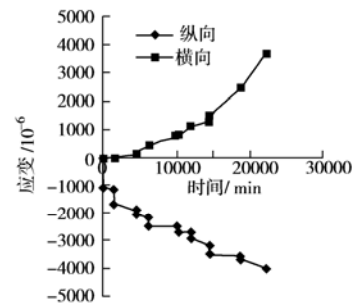


图 2 分级荷载下红砂岩轴向、侧向流变曲线

Fig. 2 Axial and lateral rheological curves of red sandstone under stepwise loading

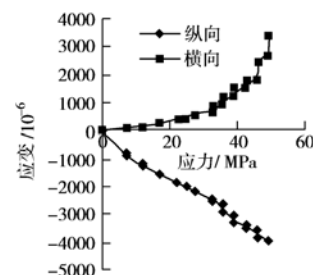


图 3 分级荷载下红砂岩应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of red sandstone under step load

初始阶段应力较小时, 对应着岩石全应力-应变

曲线的下凹阶段, 弹性模量增加较快; 之后的各级应力对应着岩石全应力 - 应变曲线的弹塑性阶段, 虽然弹性模量的增长趋缓, 但其变化还是相当明显。另按常规试验取岩石的弹性模量  $E_0$  为 18 GPa, 各级荷载下的瞬时模量与  $E_0$  的比值曲线如图 6 所示, 最大比值为 1.8 左右。所以在建立流变本构方程时应考虑弹模的变化。

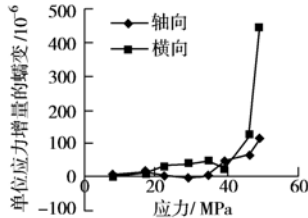


图 4 单位应力增量下的蠕变应变

Fig. 4 Creep strain under unit stress increment

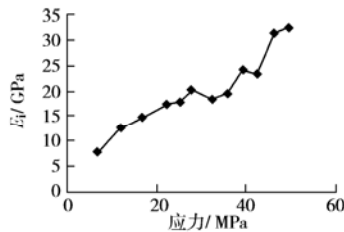


图 5 瞬时弹性模量变化曲线

Fig. 5 Curve of the instantaneous elastic modulus

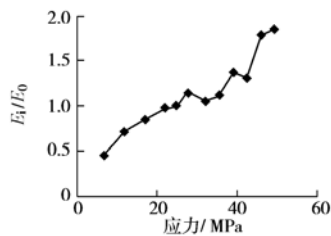


图 6 瞬时弹性模量与弹性模量的比值曲线

Fig. 6 Relation between instantaneous modulus and elastic modulus

### 2.3 侧向蠕变

侧向蠕变规律既有与轴向蠕变规律相似之处, 也有其自身的特点。

(1) 与轴向蠕变相同, 每级荷载下的变形都可分为瞬时形变和蠕变形两部分。

(2) 侧向瞬时变形与轴向瞬时变形特点相反, 随着荷载的增大, 每单位荷载下的瞬时变形量呈增大趋势, 如图 7 所示。

如将单位应力增量下的侧向应变与轴向应变的比值定义为瞬时泊松比, 则瞬时泊松比随应力的增加的变化规律如图 8 所示。由图可以看出, 第一级荷载所对应的瞬时泊松比只有 0.0006, 几乎为零; 第二级荷载下的瞬时泊松比也只有 0.12。这两级荷载对应着

全应力应变曲线的第一阶段, 即压密阶段, 横向变形很小。之后瞬时泊松比随应力增加而增大, 至宏观裂纹产生时达到 0.776, 为常规实验所测泊松比 0.2 的 3.88 倍。

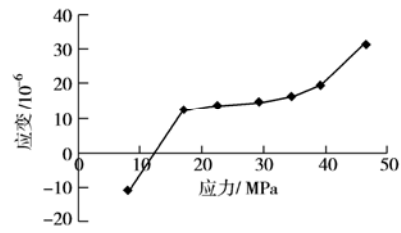


图 7 单位应力增量下侧向瞬时应变曲线

Fig. 7 Lateral instantaneous strain curve under unit stress

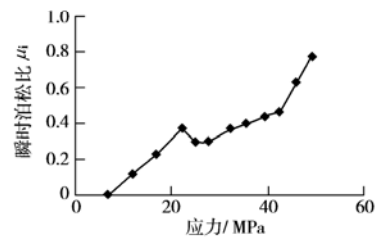


图 8 瞬时泊松比随应力变化曲线

Fig. 8 Relation between stress and instantaneous Poisson's ratio

(3) 横向蠕变变形较轴向蠕变变形的规律性更好、更明显。图 9 是单位应力增量的横向蠕变应变随应力的增加而增加的变化曲线。

(4) 侧向蠕变也存在一个应力阈值, 但是低于轴向的, 约为轴向蠕变应力阈值的 60%~80%。这表明侧向稳定蠕变阶段的出现比轴向更早。同时, 每一级荷载下的侧向蠕变速率均大于轴向蠕变速率。在最后一级荷载下, 侧向蠕变先进入加速蠕变, 蠕变曲线上有明显的加速蠕变阶段。该阶段经过一段时间的发展后, 试件侧向变形的极不均匀, 其中一片应变片的读数变得不稳定, 呈波动下降形态; 而另一片得读数则上升较快, 当应变超过约 0.6% 左右时, 蠕变速率迅速上升, 试件表面出现几条轴向裂纹。此时试件并未发生宏观破坏, 轴向蠕变仍处于稳定蠕变状态。之后一段时间, 从几个小时到十几小时不等, 轴向蠕变才进入加速阶段, 如前所述, 轴向蠕变加速阶段不很明显, 曲线稍上翘后试件即发生破坏。

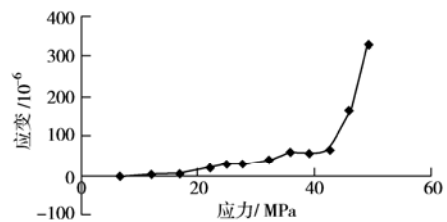


图 9 单位应力增量的横向蠕变变化曲线

Fig. 9 Relation between lateral creep strain and stress

## 2.4 极限应变

表1为各试件的最后宏观破坏所对应的应力、轴向平均应变、破坏时间 $t_1$ 和最后一级荷载的持续时间 $t_2$ ,以及侧向最大应变值。因在破坏之前侧向变形不均匀,两侧向应变片的应变值相差悬殊,平均值已无意义,因此表中只列出侧向最大应变值,该应变值与纵向裂纹的产生相对应。

表1 岩石破坏的极限应变和时间

Table 1 Limit strain and creep time of rock

试件	破坏应力/MPa	轴向应变/%	侧向应变/%	$t_1$ /min	$t_2$ /min
1	49.3	0.399	0.62	23225	3375
2	49.3	0.413	0.67	22122	137
3	46.5	0.412	0.69	22758	1376
4	49.3	0.407	0.63	22367	823
5	49.3	0.416	0.63	23014	192
6	49.3	0.388	0.61	22909	113

从表中可以看出,在蠕变状态下,虽然岩石试件的破坏应力和破坏时间有所差异,但破坏时的轴向平均应变和侧向最大应变值基本一致,即纵向裂纹产生时的侧向应变一般为0.63%左右,宏观破坏时的轴向平均应变为0.4%左右,是常规试验中极限应变的93%。这一结果可为基于应变的破坏准则的建立提供依据,同时也表明流变状态下的破坏准则以基于应变的准则为宜。

## 3 结 论

通过对红砂岩的室内蠕变试验研究,得出以下主要结论:

(1) 侧向稳定蠕变阶段的应力门槛值低于轴向稳定蠕变的应力门槛值,约为轴向蠕变应力阈值的60%~80%;

(2) 侧向蠕变有明显的加速蠕变阶段,且比轴向加速蠕变阶段出现的早,而轴向蠕变的第三阶段则不

太明显,一经出现试样随即破坏。

(3) 在单体分级加载条件下,受蠕变的影响,随应力水平的增加,岩石的瞬时弹性模量有明显的增大,最大瞬时弹性模量为常规实验所测弹性模量的1.8倍左右。

(4) 瞬时泊松比的变化显著,为常规实验所测泊松比0.33的2.35倍。

(5) 蠕变条件下的轴向极限应变较为稳定,约为常规试验极限应变的93%左右;宏观裂纹产生时的侧向应变值也较稳定,约为0.63%左右。

## 参考文献:

- [1] 李永盛. 单轴压缩条件下四种岩石的蠕变和松弛试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(3): 39 - 47.
- [2] 孙 钧. 岩土材料流变及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [3] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [4] 王贵君. 一种盐岩流变损伤模型[J]. 岩土力学, 2003, (S2): 81 - 84.
- [5] 陈沅江, 潘长良, 曹 平, 等. 软岩流变的一种新力学模型[J]. 岩土力学, 2003, (2): 209 - 214.
- [6] 金丰年. 岩石拉压特征的相似性[J]. 岩土工程学报, 1998, (2): 31 - 33.
- [7] 刘光廷, 胡 昱, 陈凤岐, 等. 软岩多轴流变特性及其对拱坝的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1237 - 1241.
- [8] 张向东, 李永靖, 张树光, 等. 软岩蠕变理论及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1635 - 1639.
- [9] SL264—2001, 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.