

# 实验研究砂岩的三轴流变特性及其本构

诸 斌<sup>1</sup>, 王志亮<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;

2. 同济大学岩土与地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 本文对取自雅砻江锦屏二级电站的砂岩开展三轴压缩流变实验, 并分析了实验数据, 得到不同偏应力条件下砂岩轴向应变、侧向应变、轴向应变率和侧向应变率随时间的变化规律。并用 Burgers 体系来反映瞬态蠕变阶段、稳态蠕变阶段的蠕变, 进行了参数辨识, 为工程围岩长期稳定性分析提供理论基础。

关键词: 砂岩; 流变; 三轴实验; 应力水平; 本构模型

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2011)04-0054-04

岩石的流变性是指岩石在外界荷载、温度等条件下呈现出与时间有关的变形、流动和破坏等性质, 主要表现在弹性后效、蠕变、松弛、应变率效应、时效强度和流变损伤断裂等方面<sup>[1]</sup>。岩石流变是岩石力学性能之一, 也是岩石地下工程、构筑物基础、边坡及滑坡产生大变形乃至失稳的重要原因之一<sup>[2]</sup>。近来西部大开发过程中许多大型工程都遇到了复杂的岩体地质条件, 比如深部岩体工程的高地应力、高温、高渗透压, 使得岩石流变特性更加显著, 特别是在应力水平比较低的情况下通常不表现流变特性的硬岩也表现出比较显著的流变特性。因此, 开展岩石流变特性研究, 深入了解岩石流变变形及破坏规律, 对于岩石工程建设具有较大意义。

## 1 实验条件

### 1.1 实验岩样

实验所用岩样为锦屏交通辅助洞内 K3+300~K4+500m 处所取的上三迭统 (T<sub>3</sub>) 青灰色砂岩。所有实验岩样均是在现场简单切割, 然后在室内精细加工而成, 样品加工均经过钻取岩芯、切割、端面精磨等工序。实验所用砂岩试样为圆柱形, 直径  $\Phi 50\text{mm}$ , 高 100mm, 符合国际岩石力学学会 (ISRM) 规定的高径比不小于 2.0 的要求。试件加工精度按《水利水电工程

岩石试验规程》<sup>[3]</sup> 执行, 端面不平整度允许偏差为  $\pm 0.05\text{mm}$ , 端面应垂直于试件轴线, 允许偏差为  $\pm 0.25^\circ$ 。岩样制备完成后, 对其进行外观筛选, 首先剔除外观上有缺陷、有明显层理或颜色明显不一致的岩样, 再通过声波仪测定每块试件的纵波波速  $V_p$  及横波波速  $V_s$ 。根据测试结果, 实验所用岩样在天然状态下纵波波速为  $2\ 820\text{m/s} \sim 3\ 540\text{m/s}$ 、横波波速为  $1\ 650\text{m/s} \sim 2\ 210\text{m/s}$ , 孔隙率为 8.10%, 颗粒密度为  $2.63\text{g/cm}^3$ , 块体密度  $2.56\text{g/cm}^3$ 。

### 1.2 实验仪器

流变实验是在长江科学院岩土力学与工程重点实验室 TLW-2000 型岩石流变仪上进行的。该设备创新性地采用先进的伺服控制、滚珠丝杠和液压等技术组合, 达到了良好的稳压效果。岩石流变实验仪可进行单轴压缩实验、单轴流变实验、三轴压缩实验、三轴流变实验、三轴程序破坏实验和带孔隙水压三轴实验等。主要由机架、轴向稳压系统、侧向稳压系统、数字控制系统及微机系统等五部分组成。

该设备的主要技术参数如下: (1) 最大轴向实验力 2 000kN; 最大轴向变形量 8mm; 最大径向变形量 5.0mm; 最大活塞位移量 100mm。(2) 最大侧向压力 70MPa, 测量精度 0.1%。适合试样尺寸直径  $\Phi 50\text{mm} \sim \Phi 100\text{mm}$ , 高度 100~200mm。(3) 双位微机控制, 控制界面直观, 智能化程度高, 设置灵活, 操作简便, 后期数据处理能力强, 各项数据由微机自动采集, 并可在电脑屏幕上实时生成曲线(可自定义), 便于实时分析和操控。

## 2 三轴蠕变实验结果分析

### 2.1 轴向蠕变与侧向蠕变规律

收稿日期: 2010-09-30; 修订日期: 2010-11-26

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-08-0525);  
上海市重点学科建设项目 (B308)

作者简介: 诸斌 (1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩石动力与土工材料特性。

E-mail: blakezhu@yahoo.cn

本次流变实验为恒轴压逐级卸围压的三轴卸荷流变实验,采用分级加载方法。轴压取 60MPa,围压分别取 40MPa、20MPa 和 10MPa。

一般而言,典型的蠕变曲线根据应变速率不同,其蠕变过程可分为瞬态蠕变阶段、稳态蠕变阶段和加速蠕变阶段<sup>[4]</sup>。图 1(a)~(c) 分别表示轴压 60MPa、侧压分别为 40MPa、20MPa 和 10MPa 时,轴向应变、侧向应变随时间的变化规律。如图 1(a) 所示,岩样在偏应力 20MPa 作用下,加载经过大约 3.85h,岩样完成了瞬时弹性变形,此时轴向应变为  $7.179 \times 10^{-4}$ 。虽然变形不是在某一瞬间完成,但是考虑到特定应力水平下岩样从开始实验到蠕变稳定或者发生破坏的时间是瞬时弹性变形所需要时间的很多倍,因此还是可以把这 3.85h 的变形视为瞬时弹性变形。然后,岩样经历了瞬态蠕变阶段,到加载后 51h,蠕变并未停止,岩样出现稳态蠕变阶段,其轴向应变为  $8.355 \times 10^{-4}$ 。如图 1(b) 所示,在偏应力水平 40MPa 下,岩样瞬时弹性变形为轴向应变  $5.111 \times 10^{-4}$ ,侧向应变  $-2.205 \times 10^{-4}$ 。与偏应力为 20MPa 时类似,岩样加载后 9.02h,完成了

瞬态蠕变阶段,加载 45h 后,蠕变同样未停止,岩样出现稳态蠕变阶段。

在轴压 60MPa,侧压 10MPa 下得到了岩石典型蠕变全程曲线(图 1c)。(1) 瞬时弹性变形阶段 OA,加载后在岩样中瞬时产生弹性变形,轴向应变为  $5.415 \times 10^{-4}$ ,侧向应变为  $-2.934 \times 10^{-4}$ ;(2) 初期蠕变或瞬态蠕变阶段 AB,经过 13.32h,蠕变速率逐渐衰减为一非零的恒定值,轴向应变为  $6.219 \times 10^{-4}$ ,侧向应变为  $-3.241 \times 10^{-4}$ 。大量蠕变全过程的微裂隙发展研究资料表明,该蠕变阶段过程中,由于活化能的作用使裂隙稳定发展,裂隙扩展后,裂隙尖端的应力集中将调整,这种调整使内部应力场逐步趋于均匀,导致蠕变速率逐步下降<sup>[5]</sup>;(3) 稳态蠕变段 BC,从瞬时时刻 13.32h 到瞬时时刻 39.00h,轴向应变达  $6.403 \times 10^{-4}$ ,侧向应变达  $-3.42 \times 10^{-4}$ ,此时裂隙非稳定扩展,蠕变速率基本保持不变,这个阶段历时长短主要取决于应力水平;(4) 加速蠕变段 CD,从瞬时时刻 39.00h 到瞬时时刻 60.14h,蠕变速率迅速增大,直至岩石发生破坏。

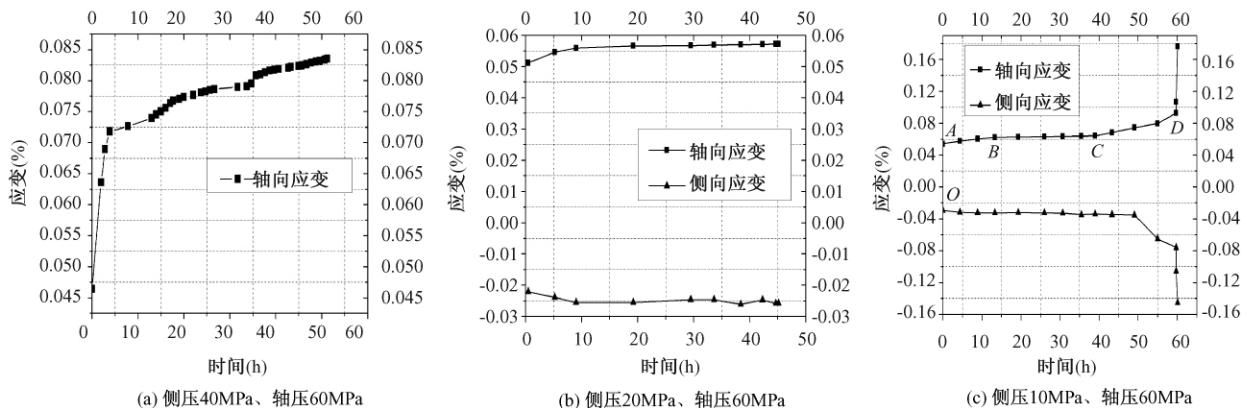


图 1 应变随时间的变化规律

Fig. 1 Plot of strain versus time

## 2.2 蠕变速率规律

根据蠕变曲线各时刻对应点的斜率即可得到砂岩在蠕变过程中蠕变速率与时间的关系曲线。图 2(a) 给出了轴向应力 60MPa、侧向应力为 40MPa 时蠕变过程中岩样的轴向应变率。图 2(b) 给出了轴向应力为 60MPa、侧向应力为 20MPa 的轴向应变率和侧向应变率。随着侧向应力的减小,轴向应变和侧向应变的稳态蠕变速率均有不同程度的增长。从蠕变速率还可以看出,随侧向应力的减小,其初始段流变的速率变化越大,其到达的稳定流变速率也大。即岩样在卸围压过程中,轴向流变速率与横向流变速率均表现出了两个

阶段,即初始流变速率阶段:流变速率随着时间增长,很快衰减至一个大于零的常量;稳态蠕变速率阶段:流变速率随着时间的增长,基本保持不变。

## 3 岩石流变特性的力学描述

元件模型理论是采用一些基本元件来代表物体的某些性质,如用“弹簧”来模拟物体的弹性、“粘壶”模拟物体的粘滞性、“滑块”模拟物体的塑性,通过这些基本元件的组合来反映物体的粘弹塑性特性<sup>[6]</sup>。本文采用 Burgers 体来描述砂岩瞬态蠕变、稳态蠕变阶段轴向应变和横向应变随时间变化规律,该流变模型由

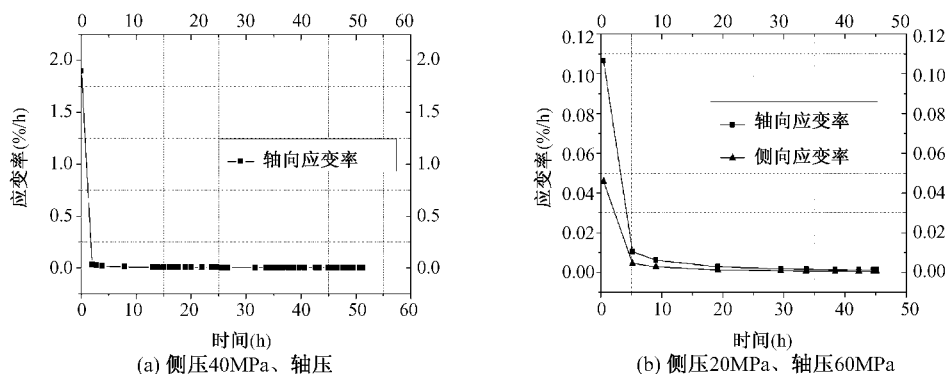


图 2 应变率随时间的变化规律

Fig. 2 Plot of strain rate versus time

Voigt 和 Maxwell 模型串联而成,共有 4 个参数,能较好地描述材料第三期蠕变以前的粘弹性规律<sup>[4]</sup>,已经被许多学者用来描述岩石的流变特性。熊良宵等<sup>[7]</sup>采用 Burgers 模型拟合锦屏二级水电站绿片岩双轴压缩蠕变试验曲线;石振明等<sup>[8]</sup>利用一维 Burgers 模型求取锦屏绿片岩平行片理方向的流变参数,与试样在侧向流变数据可较好拟合;Guro Grøneng 等<sup>[9]</sup>将 Burgers 模型用于挪威西部 Åknes 一不稳定岩质边坡的蠕变效应,用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 进行数值计算。Burgers 模型蠕变方程如下<sup>[4]</sup>:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_2} + \frac{\sigma_0}{\eta_2}t + \frac{\sigma_0}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1}t}\right) \quad (1)$$

由 Burgers 体的蠕变方程,根据岩样三轴压缩流变

实验数据,用数据处理软件 Origin 确定流变参数。Origin 操作简单、容易掌握,其强大的绘图功能可绘制各种图形,同时它还提供了强大的曲线拟合功能,可方便地实现用户自己定义函数的拟合<sup>[10]</sup>。

Burgers 体元件模型流变参数拟合结果及其参数见表 1,拟合曲线与实验数据对比如图 3 所示。其中侧压 10MPa 的情况只取实验结果中瞬态蠕变和稳态蠕变阶段的数据作曲线拟合。因为 Burgers 体只是粘弹性元件模型,不能反映岩样进入加速破坏阶段后的流变特性。尽管侧压 10MPa 这种情况最后岩样加速破坏了,本文还是给出了拟合蠕变参数,并作出了拟合曲线与实验数据的比较。图 3 表明实验数据和拟合曲线两者吻合较好,确定系数后的 Burgers 蠕变方程可较

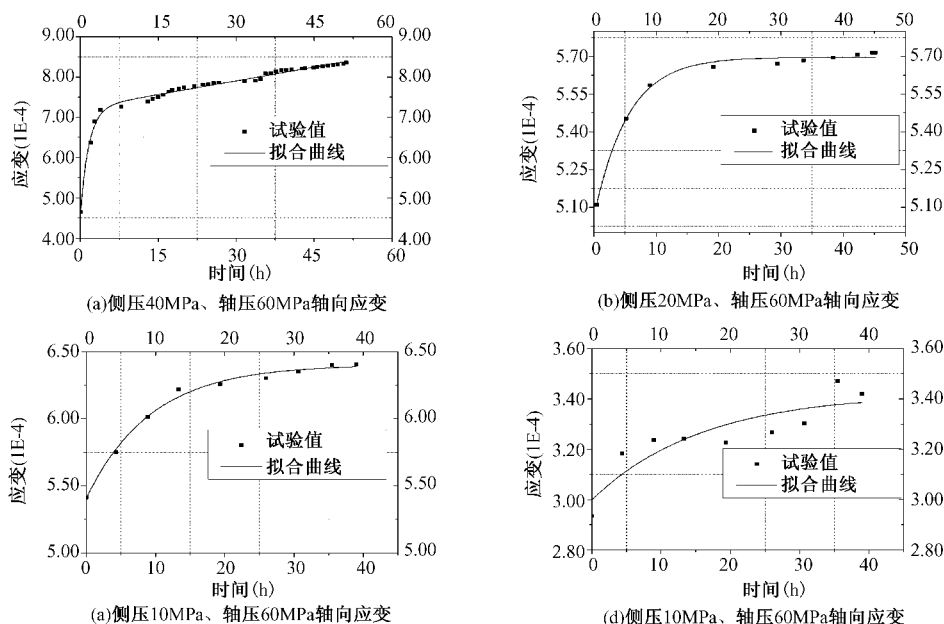


图 3 实验曲线和拟合曲线比较

Fig. 3 Comparison between test data and fitted curve

好地反映实验砂岩长期流变特性。

表1 流变参数

Table 1 Rheological parameters

侧向应力 (MPa)	应变 类别	$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$\eta_1$ (GPa·h)	$\eta_2$ (GPa·h)
40	轴向	76.005	43.578	123.675	8763.69
	侧向	625.894	790.895	3376.17	1.62E+25
20	轴向	1059.08	185.528	4145.91	9.85E+27
	侧向	501.995	92.4874	4688.33	4.84E+25
10	轴向	1180.8	166.744	1.87E+04	1.43E+27
	侧向				

## 4 结论

(1) 通过砂岩三轴压缩流变实验,发现砂岩在较高应力水平下与软岩一样有明显的蠕变现象,只是与软岩相比,砂岩蠕变变形占变形总量的比例没有软岩蠕变变形占变形总量的比例大,研究砂岩的蠕变变形对工程实践来说具有十分重要的意义。

(2) 随着偏应力水平的增大,轴向应变和侧向应变的稳态蠕变速率均呈增长趋势。轴向与侧向应变率经过一段时间的瞬态蠕变可以稳定,超过一定的应力水平岩样会出现加速破坏的情况。

(3) 用 Burgers 粘弹性本构模型描述砂岩流变力学行为,通过确定蠕变参数,可以比较好地模拟实验岩样瞬态蠕变、稳态蠕变阶段的蠕变曲线,能够为工程围岩长期稳定性分析提供理论基础。

### 参考文献:

- [1] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. [SUN J. Rheological behavior of geomaterials and engineering applications [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999. (in Chinese)]
- [2] 丁秀丽. 岩体流变特性的试验研究及模型参数辨识[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2005. [DING X L. Experimental study on rock mass rheological properties and identification for the constitutive model and parameters [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)]
- [3] SL264-2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. [SL264-2001 Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering [S]. (in Chinese)]
- [4] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. [CAI M F. Rock mechanics and engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)]
- [5] 齐明山, 徐正良, 崔勤, 等. 风化破碎类花岗岩三轴流变试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(5): 914-917. [QI M S, XU Z L, CUI Q, et al. Study on rotten and cracked granite by triaxial rheological experiment [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(5): 914-917. (in Chinese)]
- [6] 齐明山. 大变形软岩流变性状及其在隧道工程结构中的应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2006. [QI M S. Study on rheological properties of soft rock with large deformation and its application in tunnel engineering [D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese)]
- [7] 熊良宵, 杨林德, 张尧, 等. 锦屏二级水电站绿片岩双轴压缩蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 3928-3934. [XIONG L X, YANG L D, ZHANG Y, et al. Experimental study on creep behaviors of greenschist specimen from JINPING II Hydropower Station under biaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 3928-3934. (in Chinese)]
- [8] 石振明, 张力. 锦屏绿片岩分级卸荷流变规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(4): 756-762. [SHI Z M, ZHANG L. Study on rheological rules of greenschist in Jinping Hydropower Station under condition of step unloading [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(4): 756-762. (in Chinese)]
- [9] Guro Grøneng, Ming Lu, Bjørn Nilsen, et al. Modelling of time-dependent behavior of the basal sliding surface of the Åknes rockslide area in western Norway [J]. Engineering Geology, 2010, 114(3-4): 414-422.
- [10] 封志军, 周德培, 周应华. Origin 软件在岩土流变试验数据整理中的应用[J]. 路基工程, 2005(6): 4-6. [FENG Z J, ZHOU D P, ZHOU Y H. Application of origin in rheological experiment data reduction of rock and soil [J]. Subgrade Construction, 2005(6): 4-6. (in Chinese)]

(下转第68页)

## A study of the measuring and strength size effect of the surface shape of structure plane

JI Feng ,SHI Yu-chuan

( *State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection ,  
Chengdu University of technology ,Chengdu 610059 ,China* )

**Abstract:** The surface shape of structure plane is closely related to its mechanics property. At present , the accurate measurement of structure plane surface shape is the foundation of the mechanism of studying the deformation and strength of structure plane. On the basis of examining the advantages and disadvantages of the measuring instrument , a kind of portable measuring instruments , a contact punching device , is innovatively developed , which has realized the mechanization that is finely measured the rigid structure plane , and has improved open – air working efficiency greatly. The size effect of rigid structure plane is also analyzed. The results indicate that the statistical variance of the undulating roughness of the structure surface decays gradually with length of the sample , and the limit length of the undulating roughness is obtained when the influence of shearing intensity of the structure is dispelled. Finally , it is proved through the embodiment of different rocks and different weathering rocks , indicating that this method can instruct the project well , and can be used in further popularizing.

**Key words:** structural plane; surface shape; measurement instrument; contact punching device; strength size effect

责任编辑: 张明霞

( 上接第 57 页 )

## Experimental study on triaxial rheology property and constitutive model for sandstone

ZHU Bin<sup>1</sup> , WANG Zhi-liang<sup>1,2</sup>

( 1. *Department of Geotechnical Engineering ,Tongji University ,Shanghai 200092 ,China;*

2. *Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering  
of Ministry of Education , Tongji University , Shanghai 200092 ,China* )

**Abstract:** Triaxial compression rheology tests for the sandstone from Jinping II Hydropower Station on Yalong River are conducted in this paper. Based on the recorded data , the change laws of axial strain , lateral strain , axial strain rate and lateral strain rate with time under different stress levels are obtained. Then , by using the Burgers constitutive model , the transient and steady creep of the sandstone can be reflected , and the related parameters are identified. This study may provide theoretical basis for analysis of long-term stability of surrounding rock in engineering.

**Key words:** sandstone; rheology; triaxial test; stress level; constitutive model

责任编辑: 张明霞