

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2014.03.004

# 茅口灰岩单轴压缩条件下的流变特性试验研究

王兴宏, 万 文, 王超林

(湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘 要:** 取重庆北碚车站隧道茅口灰岩, 根据现场岩层覆盖厚度及其茅口灰岩容重, 取单轴压缩应力为 6 MPa, 采用 MTS815 多功能岩石试验机对岩样进行 24 h 单轴压缩蠕变试验, 得到岩石轴向应变-时间曲线。分析岩石应变-时间曲线, 发现茅口灰岩具有弹性-弹粘性之流变特性, 与 Poyting-Thomson model 相似。用 Origin 软件对流变试验数据用 Poyting-Thomson model 方程进行拟合, 得到低应力下流变拟合曲线, 该拟合曲线能较好反应试验数据。因此, Poyting-Thomson model 能较好反应茅口灰岩流变特性。最后求出了茅口灰岩低应力作用下流变模型各项参数。

**关键词:** 蠕变; Poyting-Thomson model; 流变

**中图分类号:** TU452

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2014)03-0016-04

## Experimental Study on the Rheological Properties of Maokou Limestone under Uniaxial Compression

Wang Xinghong, Wan Wen, Wang Chaolin

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China)

**Abstract:** Maokou limestone is taken from the tunnel in Chongqing BeiBei Station, and according to the rock cover thickness and Maokou limestone bulk density, uniaxial compression creep test of Maokou limestone sample is conducted by MTS815 multi-function rock testing machine under 6 MPa for 24 h, and the strain-time curve is obtained. The strain-time curve is analyzed, and it is found that the limestone has the rheological characteristics of elastic-elasticoviscosity, which is similar to Poyting-Thomson model. The rheological experimental data is fitted through Poyting-Thomson model equation by Origin software, and the rheological fitting curve under low stress level is obtained, which better reflects the test data. It is concluded that Poyting-Thomson model can reflect the rheological properties of Maokou limestone. Finally the parameters of rheological models of Maokou limestone under low stress level are found out.

**Keywords:** creep; Poyting-Thomson model; rheological

## 0 引言

岩石流变性质就是材料应力-应变关系与时间相关性质, 岩石材料变形过程中所具有的时间效应现象就是流变现象<sup>[1]</sup>。岩石流变不仅表现出弹性和

塑性, 也表现出流变性质。岩石流变是由蠕变、松弛和弹性后效组成, 当作用荷载达到岩石破坏荷载的 12.5%~80%, 岩石就会发生蠕变<sup>[2]</sup>。研究岩石所具有的蠕变性质对工程稳定性研究具有重要意义。岩石工程流变分析就是在试验分析的基础上, 对岩体

收稿日期: 2014-02-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51174088)

作者简介: 王兴宏(1988-), 男, 湖南永州人, 湖南科技大学硕士生, 主要研究方向为岩土工程,

E-mail: 254565538@qq.com

变形随时间增长,应力-应变关系进行分析,为岩体工程的稳定性作出评价<sup>[3]</sup>。许多研究者从流变试验特性研究入手,建立了诸多流变模型<sup>[4-6]</sup>来分析流变试验数据。在隧道的开挖过程中,随着工程向前掘进,不断产生应力重分布。对于已开挖好的隧道会产生流变特性,通过监控量测围岩岩石的变形,能较好地掌握围岩的变形趋势。

2012年6月8日,重庆轻轨6号线北碚车站发生部分坍塌。主要由于上部岩层受到不断增加的围岩压力长期恒定作用,使围岩发生流变变形,上部围岩变形长期恒定的作用,使隧道围岩发生大变形,从而发生坍塌。这种破坏形式是典型的蠕变失稳破坏。国内外许多学者对岩体工程的岩石进行了流变试验研究,例如张治亮等人<sup>[7]</sup>对向家坝水电站左岸坝基挤压带含弱面砂岩进行了剪切流变下砂岩蠕变特性研究;王敏等人<sup>[8]</sup>对牛马司水井头煤矿粉砂岩进行了分级加载条件下流变特性研究。本文取重庆轨道交通6号线北碚车站隧道茅口灰岩制作成岩样,采用美国MTS公司生产的MTS815多功能岩石试验机,研究单轴低应力作用下岩石流变特性。

## 1 试验方案

### 1.1 试样的制取与试验系统

试样取自重庆北碚车站隧道围岩,试样为茅口灰岩,见图1。使用工程钻机、岩石切片机和打磨机将岩样加工成:高为100 mm,直径为50 mm圆柱体试件。要求试件平整光滑,避免试样加载过程中发生应力集中现象,影响试验结果。采用MTS815岩石多功能试验机(见图2)进行单轴压缩蠕变试验,该试验系统为刚性伺服试验机,试验全程采用电脑软件控制,维持试验的稳定性,能得到可靠试验结果。

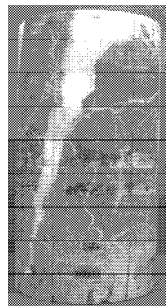


图1 岩样

Fig. 1 Rock sample

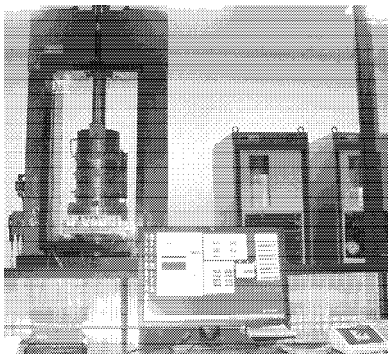


图2 MTS815多功能岩石试验系统

Fig. 2 MTS815 multi-functional rock testing system

### 1.2 试验方案

本文通过研究低应力作用下茅口灰岩蠕变特性来反应隧道内茅口灰岩蠕变特性。保持室内恒温25℃,加载速率控制为500 N/s,施加轴向应力6 MPa(11.7 kN),保持恒定应力水平,并对试样应变-时间数据进行24 h采集。取3个试件进行同一条件下蠕变试验,选取其中典型试验数据进行分析。

## 2 试验流变特性分析

### 2.1 岩石典型蠕变曲线

不同应力( $\sigma_A > \sigma_B > \sigma_C$ )水平条件下,可以得到3种典型蠕变特性曲线,如图3所示。

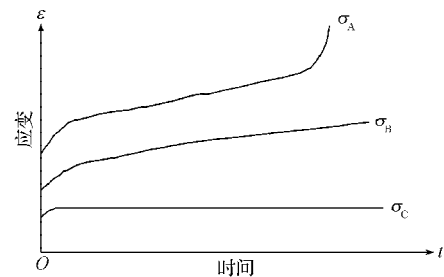


图3 典型蠕变曲线

Fig. 3 Typical creep curve

由图3可知,当岩石处于较低恒定应力 $\sigma_C$ 作用时,随时间增长岩石变形量虽然不断增加,但变形的速率却不断减小,这种现象称为初始蠕变阶段;最终变形量趋于一个稳定值,这种蠕变称为稳定蠕变。当岩石处于恒定应力 $\sigma_B$ 作用时,岩石变形量不断增加,进入初始蠕变阶段,随后变形速度保持不变,进入等速蠕变阶段,最终变形量不能趋于某一极限值,而是无限增加,直到岩石发生破坏,这种蠕变称为不稳定蠕变。当岩石处于高应力 $\sigma_A$ 作用时,对应蠕变曲线为蠕变全过程曲线,其包括初始蠕变阶段、等速蠕变阶段和加速蠕变阶段,这种蠕变也称为不稳定蠕变。因而一种岩石既可以发生稳定蠕变也可以发生不稳定蠕变,这要取决于岩石所受应力的的大小。

### 2.2 蠕变特性分析

基于蠕变组合模型和试验应变-时间曲线(如图4所示),对茅口灰岩蠕变本构模型中可能含有的组合模型及其基本元件进行分析,发现有如下基本特征:

- 1) 茅口灰岩在应力加载瞬间,会产生瞬时弹性变形,说明模型存在弹性元件。
- 2) 应力加载过程中,只出现了初始蠕变阶段,说明该模型中不含独立塑性元件。
- 3) 应力加载过程中,应变增加速率不断减小,并趋于某一稳定值。

4) 由图4的应变-时间曲线可知,茅口灰岩蠕变是处于低应力作用下的稳定蠕变。

根据上述特征1)~4),对不含独立塑性元件和存在弹性元件且稳定蠕变的特性,可用Poyting-Thomson model来描述其低应力下的蠕变特征。

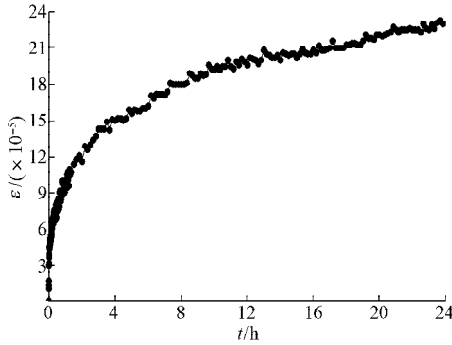


图4 试验应变-时间曲线

Fig. 4 Strain-time curve of the test

### 3 Poyting-Thomson model

#### 3.1 Poyting-Thomson model本构方程

Poyting-Thomson model由一个马克斯威尔模型和一个弹簧并联而成,其力学模型见图5。

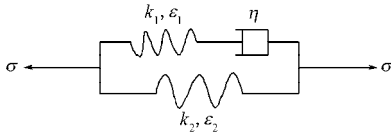


图5 Poyting-Thomson 力学模型

Fig. 5 The mechanical model of Poyting-Thomson

Poyting-Thomson model的本构方程为

$$\dot{\sigma} + \frac{k_1}{\eta} \sigma = (k_1 + k_2) \dot{\varepsilon} + \frac{k_1 k_2}{\eta} \varepsilon,$$

式中:  $\sigma$ 为应力;

$\varepsilon$ 为应变;

$k_1, k_2$ 为弹性系数;

$\eta$ 为牛顿粘性系数。

Poyting-Thomson model在恒定应力 $\sigma_0$ 下的蠕变方程为

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{k_2} \left( 1 - \frac{k_1}{k_1 + k_2} e^{\frac{-k_1 k_2}{(k_1 + k_2) \eta} t} \right). \quad (1)$$

#### 3.2 Poyting-Thomson model蠕变特性分析

当施加一恒定应力 $\sigma_0$ ,弹性体1和弹性体2将会共同产生一个瞬时应变,应变大小为 $\frac{\sigma_0}{k_1 + k_2}$ ,随时间增长,粘性体产生等速蠕变。

在 $t=t_1$ 时卸载,有

$$\sigma = \dot{\sigma} = 0, (k_1 + k_2) \dot{\varepsilon} + \frac{k_1 k_2}{\eta} \varepsilon = 0,$$

可得

$$\varepsilon = \varepsilon_1 e^{\frac{-k_1 k_2}{(k_1 + k_2) \eta} t},$$

这说明Poyting-Thomson model具有弹性后效现象。

当 $t \rightarrow \infty$ 时,  $\varepsilon \rightarrow \frac{\sigma_0}{k_2}$ ,因此Poyting-Thomson model属于稳定蠕变。

图6所描述的Poyting-Thomson model蠕变曲线,属于稳定蠕变,与试验应变-时间曲线相吻合。

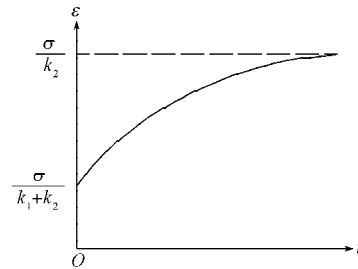


图6 Poyting-Thomson model蠕变曲线

Fig. 6 The creep curve of Poyting-Thomson model

### 4 Poyting-Thomson model参数确定

#### 4.1 确定拟合参数

采用Origin软件,对试验数据进行拟合,拟合时相关参数的初值全部设定为1。设Poyting-Thomson model的拟合方程为

$$\varepsilon = a(1 - be^{ct}), \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon$ 为应变;  $a, b, c$ 为拟合参数;  $t$ 为时间。

对茅口灰岩应力为 $\sigma_0=6$  MPa下的试验数据进行拟合,结果如图7所示。

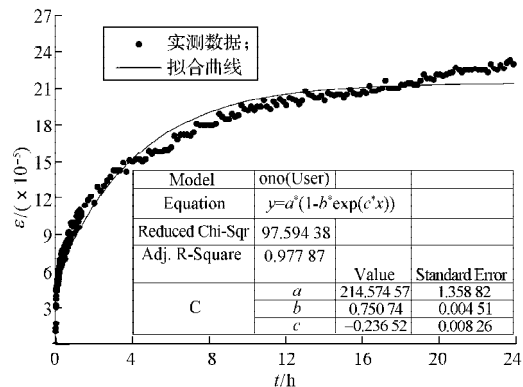


图7 试验数据及其拟合曲线

Fig. 7 The test data and fitting curve

从图7可知,Poyting-Thomson model能较好地描述拟合试验数据,其拟合度达0.97以上。这说明Poyting-Thomson model能较准确地描述低应力下的茅口灰岩蠕变特性。其拟合参数为 $a=214.574 57, b=0.750 74, c=-0.236 52$ 。

#### 4.2 确定Poyting-Thomson model参数

根据式(1)可得:

$$\frac{\sigma_0}{k_2} = a, \quad \frac{k_1}{k_1 + k_2} = b, \quad -\frac{k_1 k_2}{(k_1 + k_2)\eta} = c。$$

由 $\sigma_0=6$  MPa,  $a=214.574\ 57$ ,  $b=0.750\ 74$ ,  $c=-0.235\ 52$ , 可得Poyting-Thomson model参数,  $k_1=8.421\ 91 \times 10^4$  MPa·h,  $k_2=2.796\ 23 \times 10^4$  MPa·h,  $\eta=8.443\ 65 \times 10^4$  MPa。

## 5 结论

1) 通过试验可得低应力下茅口灰岩应变-时间曲线。

2) 试验发现茅口灰岩首先表现为弹性, 然后表现为粘-弹性, 这与Poyting-Thomson model的蠕变特性非常相似。

3) 通过使用Poyting-Thomson model拟合方程对试验数据进行拟合, 能较好地拟合低应力水平下的试验数据, 说明Poyting-Thomson model能准确反应茅口灰岩的蠕变特性, 使用Origin拟合可以获取拟合方程参数, 并通过相关关系转化, 计算出在 $\sigma_0=6$  MPa作用下3个元件参数。

## 参考文献:

- [1] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 198-210.  
Cai Meifeng, He Manchao, Liu Dongyan. Rock Mechanics and Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002: 198-210.
- [2] 张忠亭, 王宏, 陶振宇. 岩石蠕变特性研究进展概况[J]. 长江科学院院报, 1996, 13(增刊1): 1-5.  
Zhang Zhongting, Wang Hong, Tao Zhenyu. Development of Research on Creeping Characteristics of Rock[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1996, 13(S1): 1-5.
- [3] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J].

岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1081-1106.

Sun Jun. Rock Rheological Mechanics and Its Advance in Engineering Applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1081-1106.

- [4] 袁林, 高召宁, 孟祥瑞. 岩石的非线性西原流变模型及其应用[J]. 西北地震学报, 2012, 34(4): 331-334.  
Yuan Lin, Gao Zhaoning, Meng Xiangrui. The Nonlinear Improvement of Nishihara Rheological Model in Petrology and Its Analysis[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(4): 331-334.
- [5] 杨圣奇, 倪红梅, 于世海. 一种岩石非线性流变模型[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2007, 35(4): 388-392.  
Yang Shengqi, Ni Hongmei, Yu Shihai. A Kind of Nonlinear Rheological Model for Rocks[J]. Journal of Hohai University: Natural Science, 2007, 35(4): 388-392.
- [6] 杨彩虹, 毛君, 李剑光. 改进的蠕变模型及其稳定性[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2008, 38(1): 92-97.  
Yang Caihong, Mao Jun, Li Jianguang. Modified Creep Model and Its Stability[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2008, 38(1): 92-97.
- [7] 张治亮, 徐卫亚, 王如宾, 等. 含弱面砂岩非线性黏弹塑性流变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊1): 2634-2639.  
Zhang Zhiliang, Xu Weiya, Wang Rubin, et al. Study of Nonlinear Viscoelasto-Plastic Rheological Model of Sandstone with Weak Plane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 2634-2639.
- [8] 王敏, 万文, 赵延林. 牛马司水井头矿粉砂岩分级加载条件下的流变特性[J]. 矿业工程研究, 2012, 27(3): 39-43.  
Wang Min, Wan Wen, Zhao Yanlin. Rheological Characteristics of Siltstone from Niumasu Shuijingtou Coal Mine Under Multi-Stage Loading[J]. Mineral Engineering Research, 2012, 27(3): 39-43.

(责任编辑: 邓光辉)

