

# 分级加载条件下红层软岩蠕变特性试验研究

谌文武<sup>1, 2</sup>, 原鹏博<sup>1, 2</sup>, 刘小伟<sup>1, 2</sup>

(1. 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 岩石的蠕变特性是岩石类材料的重要力学性质之一, 很大程度上控制着岩体工程的稳定性。本文采用 CSS-44100 型电子伺服万能试验机在分级加载条件下对甘肃引洮输水工程 7# 试验平硐红层软岩进行了一系列单轴压缩蠕变试验。通过对试验数据的整理与分析, 发现红层软岩存在显著的蠕变特性, 符合伯格模型(Burgers model), 并求取了不同应力水平下的蠕变参数。通过测定试样含水率, 研究含水率对红层软岩强度和蠕变特性的影响。发现含水率越高, 抗压强度越低, 蠕变量越大, 蠕变率也越大, 达到稳定的时间也越长。试验结果表明, 红层软岩蠕变试验曲线与理论曲线基本吻合, 伯格模型(Burgers model)能较好的描述红层软岩的蠕变特性。

**关键词:** 岩石力学; 红层软岩; 蠕变; 分级加载; 伯格模型; 含水率

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2009)增 1-3076-06

## STUDY ON CREEP PROPERTIES OF RED-BED SOFT ROCK UNDER STEP LOAD

CHEN Wenwu<sup>1, 2</sup>, YUAN Pengbo<sup>1, 2</sup>, LIU Xiaowei<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Mechanics on Western Disaster and Environment, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. School of Civil engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** Creep characteristic is one of the most important mechanical characteristics of rock. It controls the stability of rock engineering. Under step load condition, the creep test of red-bed soft rock which was collected in the seventh tunnel of Yintao water transmission engineering in Gansu is performed by using the CSS-44100 electronic servo testing machine. Based on scientific interpretation and analysis of test data, red-bed soft rock has remarkable creep characteristics and Burgers creep model can be applied to characterize the creep of red-bed soft rock. The effect of water content upon strength and creep characteristic are studied it shows that instantaneous strength decreases with increasing of water content. The higher the water content is, the more creep deformation and the time that need reaching steady state and the bigger the rate of creep are. The test results show that the creep testing curves of red-bed soft rock are coincident well with the theoretic curves and the Burgers creep model can be applied to characterize the creep properties of red-bed soft rock.

**Key words:** rock mechanics; red-bed soft rock; creep; step load; Burgers model; water content

## 1 引言

红层在我国的西南、西北、华中及华南地区有

着广泛的分布, 形成于侏罗纪~第三纪湿热环境, 为内陆碎屑沉积建造, 其物质成分变化很大, 以泥质胶结为主, 也有钙质和铁质胶结, 以红色、棕红色、砖红色为显著特征。红层成岩时间短, 成岩作

**收稿日期:** 2007-11-25; **修回日期:** 2008-02-20

**基金项目:** 西部交通科技建设项目(200231800026); 西部交通科技建设项目(200231800036)

**作者简介:** 谌文武(1966-), 男, 博士, 1989年毕业于兰州大学水文地质工程地质专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩土工程、地质工程方面的研究工作。E-mail: sungp@lzu.edu.cn

用差, 易风化、易软化崩解, 具有明显的蠕变特性<sup>[1]</sup>。岩石的蠕变特性是岩石材料的重要力学性质, 与岩石的长期强度和岩体工程的长期稳定有着密切关联。因此, 在边坡工程、地下工程及其他岩体工程中, 研究其蠕变现象, 揭示蠕变过程及其规律, 对于工程的设计、施工、维护有着十分重要的现实意义。很多岩体工程, 包括地下洞室、岩石边坡及岩基等工程中, 岩体受到的荷载或围岩应力的改变一般是随着施工进度或程序逐级增加(或减少)的, 这种逐级加荷条件下的岩石蠕变是工程岩体重要的物理力学特性和工程现象<sup>[2~4]</sup>, 因此, 采用分级加载对红层软岩的蠕变特性进行试验研究是具有重要的理论和实践意义。本文通过对红层软岩试样进行一系列的单轴压缩蠕变试验, 在分析试验资料的基础上, 建立了红层软岩的蠕变模型并确定其参数。本文的研究无论对于红层软岩岩体力学理论, 还是实际的软岩工程应用都具有一定的参考意义。

## 2 红层软岩蠕变试验技术

### 2.1 试验方法

首先根据常规压缩试验所获得的单轴抗压强度  $R_c$  的 75%~85% 将拟施加的最大荷载分成 5 级, 然后在同一试样上由小到大逐级施加荷载, 各级荷载所持续的时间根据试样的应变速率来确定<sup>[5]</sup>。本文试验采用的稳定标准为当位移增量  $< 0.001$  mm/h 时, 施加下一级荷载。由于分级加载方法可以在同一试样上观测到不同应力水平的变形规律, 大大节省了试验研究所需的试样和试验仪器的数量, 同时还可以避免因为试验性质不均匀性导致的试验数据离散性等<sup>[6, 7]</sup>, 因此, 采用这一试验方案是合理的。

### 2.2 试验设备

红层软岩单轴蠕变试验在兰州大学土木工程与力学学院工程试验中心和西部灾害与环境力学教育部重点实验室进行, 采用长春试验机械研究所生产的 CSS-44100 型电子万能试验机(图 1)。该试验机具有高性能的负荷机架, 先进的机械传动机构, 负荷范围: 400 N~100 kN, 其 EDC-100 数字控制器性能优良, 工作时只需将 EDC 置于 PC-Control 状态, 即可将全部操作纳入计算机控制。可对试验数据实时采集、运算处理、实时显示并打印结果报告。本次试验岩样取自甘肃引洮工程 7# 隧道试验平洞, 加工后的试样尺寸为: 50 mm×50 mm×100 mm。



图 1 试验设备

Fig.1 Testing device

## 3 试验结果整理及分析

岩石的蠕变一般可以分为 3 个阶段, 其第 I 阶段为减速蠕变, 第 II 阶段为等速蠕变, 第 III 阶段为加速蠕变(图 2)。本次蠕变试验曲线如图 3 所示, 这里仅列出 T12, T13, T21, T22 四组单轴蠕变试验  $\varepsilon-t$  曲线。表 1 为红层软岩瞬时抗压强度试验结果。考虑到红层软岩具有弹性、塑性和黏性共存特性, 其蠕变方程<sup>[3]</sup>:

$$\varepsilon = \varepsilon_{me} + \varepsilon_{mp} + \varepsilon_{ce} + \varepsilon_{cp} \quad (1)$$

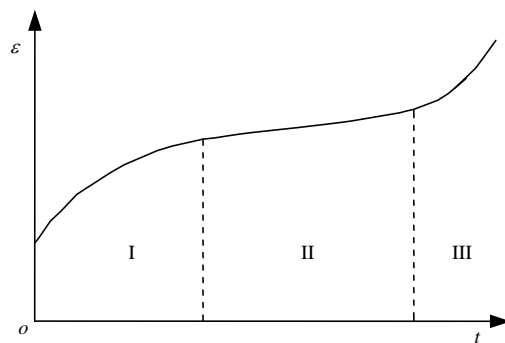
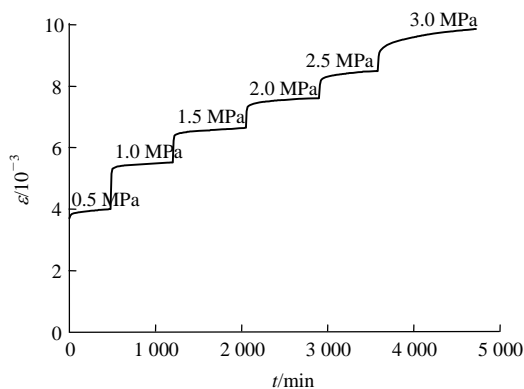
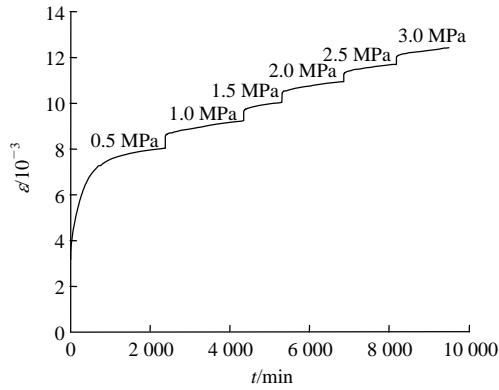


图 2 岩石蠕变曲线

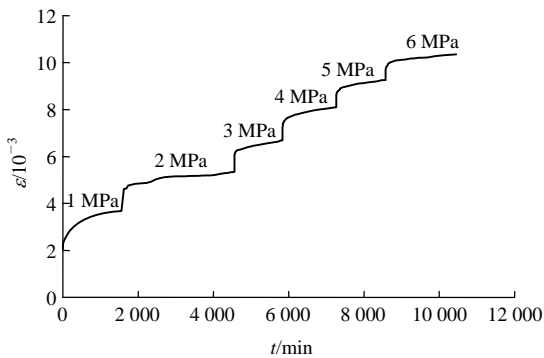
Fig.2 Creep curves



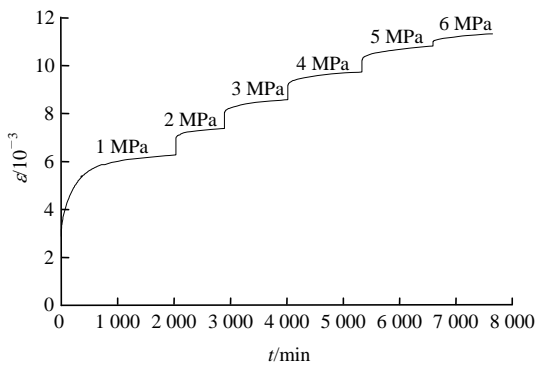
(a) 红层软岩 T12 单轴蠕变试验曲线



(b) 红层软岩 T13 单轴蠕变试验曲线



(c) 红层软岩 T21 单轴蠕变试验曲线



(d) 红层软岩 T22 单轴蠕变试验曲线

图 3 红层软岩单轴蠕变试验

Fig.3 Creep test of red-bed soft rock

式中： $\epsilon_{me}$  为可恢复的瞬时弹性应变， $\epsilon_{mp}$  为不可恢复的瞬时塑性应变， $\epsilon_{ce}$  为黏弹性应变， $\epsilon_{cp}$  为黏塑性应变。

由图 3 可知，加载瞬间，红层软岩发生瞬时弹性响应，随后产生随时间而逐渐增长的蠕变变形。当应力水平比较低时，蠕变变形的速率随时间的增长而逐渐缓慢，当达到一定时间后，变形不再增长，软岩的最终变形趋于一个稳定值。当应力水平比较高时，虽然蠕变变形的速率随时间的增长而逐渐缓慢，但是衰减到某一值时，保持不变。本次试验试

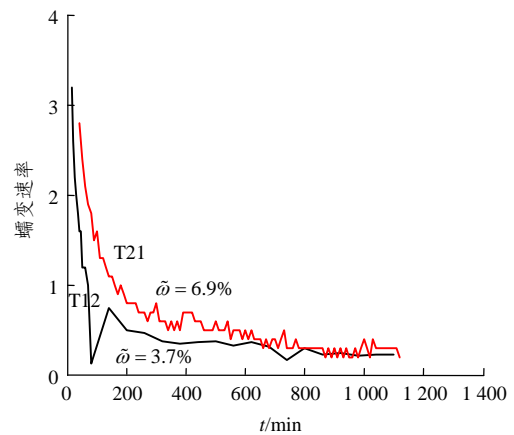
表 1 红层软岩瞬时抗压强度试验结果

Table 1 Instantaneous uniaxial compressive strength test results of red-bed soft rock

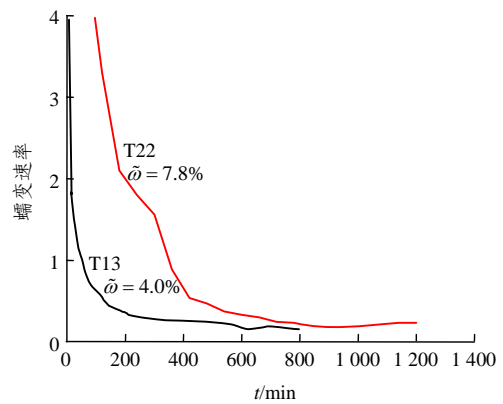
试样编号	$R_c$ /MPa	平均值/MPa
T12-1	4.2	4.00
T12-2	3.8	
T13-1	3.9	3.50
T13-2	3.1	
T21-1	7.9	7.25
T21-2	6.6	
T22-1	8.3	8.75
T22-2	9.2	

样均在最后一级荷载破坏，其破坏应力水平大约为单轴抗压强度的 75%~85%。

由于红层软岩中的黏土矿物遇水软化，因此软岩的含水量对其变形和强度有很大的影响(图 4~6)。含水量  $\tilde{\omega}$  越大，抗压强度  $R_c$  越低，蠕变量  $\epsilon_c$ 、



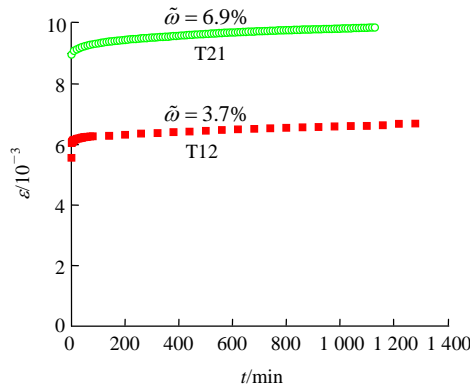
(a) 试样 T12, T21 在  $\sigma = 2.0$  MPa 下的蠕变速率



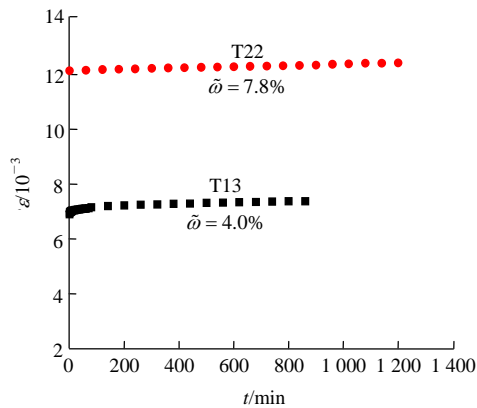
(b) 试样 T13, T22 在  $\sigma = 3.0$  MPa 下的蠕变速率

图 4 相同应力水平下不同含水率试样蠕变速率对比

Fig.4 Comparison between creep ratio of different water content under the same stress



(a) 试样 T12, T21 在  $\sigma = 2.0$  MPa 下的蠕变曲线



(b) 试样 T13, T22 在  $\sigma = 3.0$  MPa 下的蠕变曲线

图 5 相同应力水平下不同含水率蠕变曲线对比

Fig.5 Comparison between creep deformations of different water content under the same stress

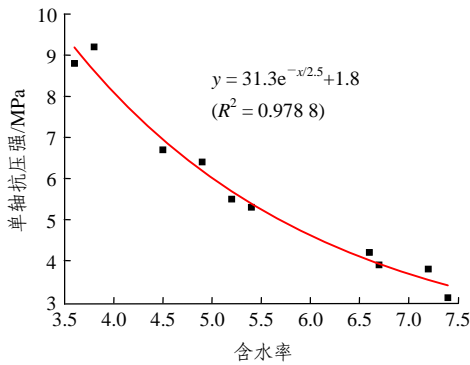


图 6 含水率 - 单轴抗压强度关系曲线

Fig.6 Curves of water content- compressive strength relation

蠕变速率  $\dot{\epsilon}$  越大, 达到稳定的时间  $t$  也越长。蠕变速率的变化大致呈指数衰减规律, 随着时间的增长, 最终趋于一个稳定值。

试样在各级荷载作用的瞬时轴向应变与轴向荷载大小成比例增长(图 7), 进入蠕变阶段后, 变形均随时间不断增长(图 3)。在蠕变初期, 各分级变形均较明显, 在轴向应力为 4 MPa, 即载荷为 10 kN 作用下, 蠕变经过 1 315 min 后, 总应变值为  $6.9 \times 10^{-3}$ ,

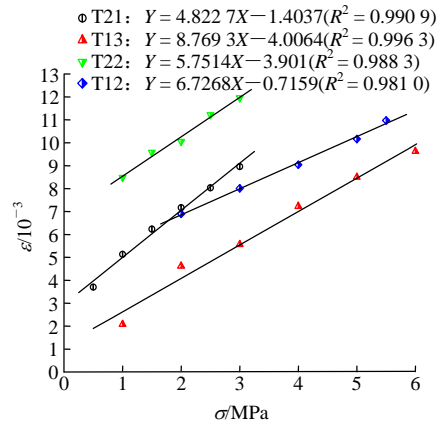


图 7 应力 - 瞬时应变关系曲线

Fig.7 Curves of stress-instantaneous strain relation

约为瞬时轴向应变的 6.1%, 然后变形趋于稳态状态。

### 4 蠕变模型及参数确定

通过对蠕变试验数据整理分析, 认为红层软岩蠕变曲线有以下两方面的特点: (1) 红层软岩蠕变曲线前期特征与开尔文(Kelvin)相吻合, 可以用开尔文(Kelvin)来表示; (2) 红层软岩蠕变曲线后期特征与马克斯威尔(Maxwell)相吻合, 可以用马克斯威尔(Maxwell)来表示。综上所述, 作者认为: 由马克斯威尔(Maxwell)与开尔文(Kelvin)串联而成的伯格模型(Burgers model)是一种黏弹性体(图 8), 具有 4 个可调的参数, 即  $E_M$ ,  $\eta_M$ ,  $E_K$ ,  $\eta_K$ 。伯格模型(Burgers model)可以很好地描述加速蠕变阶段以前的蠕变曲线, 简单实用, 已获得较广泛的应用<sup>[8~13]</sup>。

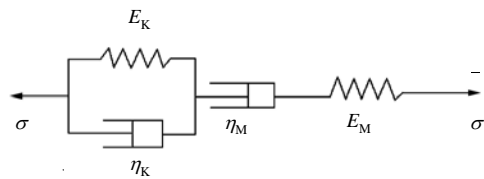


图 8 伯格模型

Fig.8 Burgers model

下面确定蠕变参数。根据沈振中和徐志英<sup>[14]</sup>的研究成果, 试样在受到轴向应力  $\sigma_1$  作用下的轴向应变  $\epsilon_1(t)$  为

$$\epsilon_1(t) = \frac{2\sigma_1}{9k} + \frac{\sigma_1}{3E_K} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_K}{\eta_K} t\right) \right] + \frac{\sigma_1}{3E_M} + \frac{\sigma_1}{3\eta_M} t \quad (2)$$

当  $t = 0$  时, 曲线在纵轴上的截距为瞬时弹性应

变 $\varepsilon_e$ 即

$$\varepsilon_e = \left( \frac{2}{9K} + \frac{1}{3E_M} \right) \sigma_1 \quad (3)$$

当  $t$  足够大时, 该蠕变曲线近似为直线, 此直线在纵轴上的截距为  $\varepsilon_a$ 。

$$\varepsilon_a = \left( \frac{2}{9K} + \frac{1}{3E_K} + \frac{1}{3E_M} \right) \sigma_1 \quad (4)$$

该直线的斜率为  $m_a$ , 即

$$m_a = \frac{\sigma_1}{3\eta_M} \quad (5)$$

由式(5)可确定参数  $\eta_M$ 。

由于荷载往往不能瞬间施加, 因此, 在实际应用时还需要应用以下方法求得瞬时弹性应变 $\varepsilon_e$ : 令

$$q(t) = \frac{\sigma_1}{3E_K} \exp\left(-\frac{E_K}{\eta_K} t\right) \quad (6)$$

则  $q(t)$  为蠕变试验曲线与第 II 阶段蠕变曲线渐近线的垂直距离。对式(6)两边取自然对数, 则有

$$\ln(q) = \ln\left(\frac{\sigma_1}{3E_K}\right) - \frac{E_K}{\eta_K} t \quad (7)$$

式(7)表明  $\ln(q)$  与  $t$  的关系为一直线, 该直线在纵轴上的截距为  $\varepsilon_q$ , 斜率为  $m_q$ , 即

$$\varepsilon_q = \ln\left(\frac{\sigma_1}{3E_K}\right) \quad (8)$$

$$m_q = -\frac{E_K}{\eta_K} \quad (9)$$

由式(8), (9)可以确定参数  $E_K$  和  $\eta_K$ 。体积模量  $K$  可根据测定的轴向应变  $\varepsilon_1$  来确定。

$$K = \frac{\sigma_1}{3(1-2\nu)\varepsilon_1} \quad (10)$$

从而由下式确定参数  $E_M$ :

$$E_M = \frac{\sigma_1}{3\left[\varepsilon_a - \left(\frac{2}{9K} + \frac{1}{3E_K}\right)\sigma_1\right]} \quad (11)$$

由于试验数据量极大, 本文仅以 T12 为例, 求取蠕变参数。根据上述方法, 表 2 给出了不同应力水平下伯格模型(Burgers model)的参数, 其中泊松比  $\nu = 0.25$ 。

图 9 的散点图为红层软岩试样 T12 蠕变试验曲线, 实线为理论曲线, 显然, 伯格模型(Burgers model)能较好地描述红层软岩的蠕变特性。

表 2 红层软岩试样 T12 伯格模型参数  
Table 2 Creep parameters of the specimen T12

步骤	应力 /MPa	$k$ /GPa	$E_K$ /GPa	$E_M$ /MPa	$\eta_K$ / $10^{12}$ Pa	$\eta_M$ / $10^{14}$ Pa
第 1 分级加载	0.5	1.05	0.044	48	0.73	0.31
第 2 分级加载	1.0	0.79	2.300	40	6.50	0.69
第 3 分级加载	1.5	1.04	3.300	54	110.00	1.10
第 4 分级加载	2.0	1.28	4.900	67	130.00	1.50
第 5 分级加载	2.5	1.49	6.000	78	190.00	2.10
第 6 分级加载	3.0	1.67	8.300	88	170.00	2.60

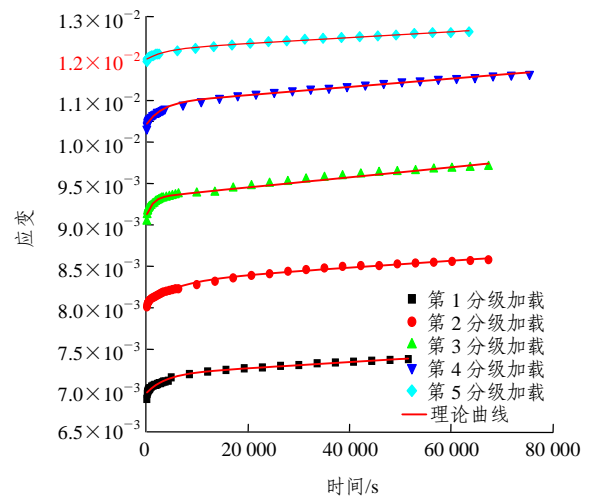


图 9 蠕变试验曲线与理论曲线  
Fig.9 Testing and theoretic curves of creep tests

## 5 结 论

通过本次试验研究, 可以得到以下认识:

(1) 红层软岩具有显著的蠕变特性。与相关研究<sup>[3, 4, 15, 16]</sup>提到的矿岩、大理岩、盐岩和花岗岩相比而言, 红层软岩的蠕变无论在蠕变量上还是蠕变速率都比四者大很多。

(2) 试样在各级荷载作用的瞬时轴向应变与轴向荷载大小呈线性关系, 进入蠕变阶段后, 变形均随时间不断增长。在蠕变初期, 各分级变形较明显, 在轴向应力为 4 MPa 作用下, 蠕变经过 1 315 min 后, 总应变值为  $6.9 \times 10^{-3}$ , 约为瞬时轴向应变的 6.1%, 然后变形趋于稳态状态。

(3) 各分级荷载下的蠕变曲线具有共同特点, 即经历快速蠕变率衰减过程后进入稳定蠕变阶段, 但蠕变稳定后各分级的蠕变率不同, 蠕变应力越高, 稳定的蠕变率越大。

(4) 含水量对红层软岩蠕变特性的影响极其显著。含水量大的试样不仅蠕变量大而且稳定所需时间也长, 即蠕变率也大。

(5) 蠕变试验曲线与理论曲线较吻合, 表明选用伯格模型(Burgers model)描述引洮输水工程 7# 隧道试验平硐红层软岩蠕变特性合理, 由此确定的参数可用于黏弹性分析。

(6) 一般而言, 岩体工程流变分析所计入的时间以月、年来考虑, 甚至更长。由于试验设备和其他条件的限制, 本次试验研究仅限于单轴试验, 加上试件量也有限, 因而以上所得结论尚是初步的、定性的, 作者拟进一步开展二向压缩及三轴流变, 为定量地描述红层软岩的流变性质提供更多的试验依据。

### 参考文献(References):

- [1] 朱定华, 陈国兴. 南京红层软岩流变特性试验研究[J]. 南京工业大学学报, 2002, 24(5): 77 - 79.(ZHU Dinghua, CHEN Guoxing. Experimental study of Nanjing red-bed on rheology[J]. Journal of Nanjing University of Technology, 2002, 24(5): 77 - 79.(in Chinese))
- [2] 张忠亭, 罗居剑. 分级加载下岩石蠕变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 218 - 222.(ZHANG Zhongting, LUO Jujian. Study on creep properties of rock under step load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 218 - 222.(in Chinese))
- [3] 袁海平, 曹平, 万文, 等. 分级加卸载条件下软弱复杂矿岩蠕变规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1 576 - 1 581.(YUAN Haiping, CAO Ping, WAN Wen, et al. Study on creep rules of soft and intricate ore-rock under step load and unload[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1 576 - 1 581.(in Chinese))
- [4] 陶振宇, 王宏, 余启华. 分级加载下大理岩的流变特性试验研究[J]. 四川水利发电, 1991, (1): 23 - 29.(TAO Zhenyu, WANG Hong, YU Qihua. Experimental study on rheological properties of marble under step loading[J]. Sichuan Water Power, 1991, (1): 23 - 29.(in Chinese))
- [5] LAMA R D, VUTUKURI V S. Handbook on mechanical properties of rocks, testing techniques and results(Vol. II) [M]. Clausthal: Trans. Tech. Publications, 1978.
- [6] 徐志英. 岩石力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.(XU Zhiying. Rock mechanics[M]. Beijing: China Water Power Press, 1997.(in Chinese))
- [7] 何满朝, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.(HE Manchao, JING Haihe, SUN Xiaoming. Engineering mechanics of soft rock[M]. Beijing: Science Press, 2002.(in Chinese))
- [8] 杨松林, 张建民, 黄启平. 节理岩体蠕变特性研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1 225 - 1 228.(YANG Song lin, ZHANG Jian min, HUANG Qi ping. Analysis of creep model of jointed rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(8): 1 225 - 1228.(in Chinese))
- [9] 刘高, 聂德新, 韩文峰. 高应力软岩巷道围岩变形破坏研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 726 - 730.(LIU Gao, NIE Dexin, HAN Wenfeng. Deformation and failure of surrounding rocks of roadway in high stressed soft rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 726 - 730.(in Chinese))
- [10] TIAN Y S, ZHANG W. Engineering geological characteristics and rheological properties of rock mass in Jinchuan Nickel Mine[C]// Proc. of the 8th ISRM Congress. Tokyo: A. A. Balkema, 1995: 9 - 12.
- [11] HAYANO K, MATSMOTO M. Study of triaxial creep testing method and model for creep deformation on sedimentary soft rocks[C]// Proceedings of the 29th Symposium of Rock Mechanics. [s.l.]: [s.n.], 1999: 8 - 14.
- [12] 赵法锁, 张伯友, 彭建兵, 等. 仁义河特大桥梁南桥台边坡软岩流变性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1 527 - 1 532.(ZHAO Fasuo, ZHANG Boyou, PENG Jianbing, et al. Rheological study on soft rocks in the south abutment slope of Renyi River great bridge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1 527 - 1 532.(in Chinese))
- [13] 朱合华, 叶斌. 饱水状态下隧道围岩蠕变力学性质的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1 791 - 1 796.(ZHU Hehua, YE Bin. Experimental study on mechanical properties of rock creep insaturation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1 791 - 1 796.(in Chinese))
- [14] 沈振中, 徐志英. 三峡大坝地基花岗岩蠕变试验研究[J]. 河海大学学报, 1997, 25(2): 1 - 7.(SHEN Zhenzhong, XU Zhiying. Creep test of granite for the three gorges dam foundation[J]. Journal of Hohai University, 1997, 25(2): 1 - 7.(in Chinese))
- [15] 刘绘新, 张鹏, 盖峰. 四川地区盐岩蠕变规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1 290 - 1 294.(LIU Huixin, ZHANG Peng, GAI Feng. Study on creep rule of salt rock in sichuan region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1 290 - 1 294.(in Chinese))
- [16] 李铀, 朱维申, 白世伟, 等. 风干与饱水状态的花岗岩单轴流变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 22(10): 1 673 - 1 677.(LI You, ZHU Weishen, BAI Shiwei, et al. Uniaxial experimental study on rheological properties of granite in air-dried and saturated states[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 22(10): 1 673 - 1 677.(in Chinese))