

文章编号: 1001-4888(2011)01-0061-06

分级加载条件下紫色泥岩三轴蠕变特性研究^{*}

张向东, 尹晓文, 傅强

(辽宁工程技术大学 土木与交通学院, 阜新 123000)

摘要: 流变性质是岩石材料的重要力学特性, 以紫色泥岩为例, 在分级加载条件下研究了其三轴蠕变特性。采用自行研制的重力杠杆式岩石蠕变试验机, 并配备三轴压力室, 对紫色泥岩实施分级加载三轴蠕变实验。实验结果表明, 紫色泥岩在相同轴压条件下, 围压越大, 瞬时弹性变形和蠕变变形越小; 在相同围压条件下, 轴压越大, 二者变形越大。紫色泥岩的蠕变速率具有相同的变化趋势, 且在相同轴压条件下, 围压越大, 稳定蠕变阶段的蠕变速率越不明显。另外, 应力与瞬时应变线性拟合结果表明, 瞬时轴向应变与轴向荷载近似成比例增长。通过分析紫色泥岩蠕变曲线变化趋势, 认为采用 H/M 模型进行模拟较为合理。并且采用 MATLAB 软件非线性回归分析进行模型参数拟合, 最后得到实验曲线与理论曲线的最大误差在 $2e-5$ 左右。证明采用的 H/M 模型能较好地描述紫色泥岩的蠕变特性。

关键词: 蠕变实验; 分级加载; 围压; 轴压; 参数拟合

中图分类号: TU458⁺.3

文献标识码: A

0 引言

流变性质是岩石材料的重要力学特性, 尤其是软弱岩体, 其流变特性更为明显, 许多工程问题都与其流变性密切相关。我国著名专家陈宗基教授曾指出, 一个工程的失稳与破坏往往是由其流变性决定的。因此, 在边坡工程、地下工程及其它岩体工程中, 研究软岩的流变性质, 尤其是其蠕变特性, 揭示蠕变过程及其规律, 对于工程的设计、施工、维护具有十分重要的现实意义。

针对软岩的蠕变特性, 许多学者对其进行了单轴或三轴蠕变特性试验^[1-5], 但实施的单轴或三轴蠕变特性试验往往只限于单级加载, 在很多岩体工程中, 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(减少)的, 而分级加载条件下的蠕变特性试验又往往只限于单轴^[6-9], 这两种试验虽然能揭示软弱岩体的蠕变特性, 但与实际工程中软弱岩体所受的荷载条件有所差别。通过岩石的蠕变特性试验获取相关数据, 从而可以构建岩石蠕变的本构模型并应用于工程实践^[10-12]。本文选择紫色泥岩作为研究试样, 研究其在分级加载条件下的三轴蠕变特性, 根据其蠕变规律进行蠕变模型及其参数的研究。

1 紫色泥岩蠕变试验技术

1.1 试验装置

试验采用自行研制的重力杠杆式岩石蠕变试验机, 并配备三轴压力室, 对紫色泥岩进行分级加载条

^{*} 收稿日期: 2010-04-19; 修回日期: 2010-06-20

基金项目: 辽宁省教育厅科学技术研究重点实验室项目(2008S114); 国家自然科学基金(50978131)和辽宁省高等学校优秀人才培养计划项目(2008RC23)资助

通讯作者: 张向东(1962—), 男, 博士, 教授、博士生导师。主要从事土木工程方面的教学与科研工作。E-mail: zhxd2008@yahoo.com.cn

件下的三轴蠕变试验。试件的轴向压力采用重力杠杆式加载方式,围压通过三轴压力室采用液压加载方式,并采用电液比例溢流阀控制的开环系统保持围压的长期稳定。试件的轴向变形采用千分表测定,体积变化采用浮动柱塞式体积计测量。试验是在不同应力状态和应力水平下进行的,即每个试件所受的等效正应力 σ_i 各不相同。

1.2 试验方法

本次试验软岩试样为采自内蒙古鄂尔多斯万利矿区南部高家梁井田的紫色泥岩,松软、发育斜层理、易风化、遇水泥化。试件尺寸为:50mm×50mm×100mm,共分为两组,每组三块试件,围压各不相同;两组试件轴向压力按单轴抗压强度的 65%分五级加载,采用两种轴向压力加载方式进行加载,如表 1 所示,当试件轴向变形<0.001mm/h 时,便施加下一级荷载。

表 1 泥岩试件分组及加载方式

Tab. 1 The grouping and loading of purple mudstone specimens

试件编号		围压/MPa ($\sigma_2 = \sigma_3$)	第一分级加载 σ_1 /MPa	第二分级加载 σ_1 /MPa	第三分级加载 σ_1 /MPa	第四分级加载 σ_1 /MPa	第五分级加载 σ_1 /MPa
ZN1	ZN1-1	0.5	2	3	4	5	6
	ZN1-2	1.0					
	ZN1-3	1.5					
ZN2	ZN2-1	0.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5
	ZN2-2	1.0					
	ZN2-3	1.5					

2 试验结果分析

2.1 分级加载蠕变曲线分析

本次试验所得紫色泥岩蠕变曲线如图 1 所示。

从图 1 可知,紫色泥岩在加载瞬间有瞬时变形,随后产生随时间逐渐增长的蠕变变形,在较低应力水平下,稳定蠕变阶段并不明显,且围压越大其稳定蠕变阶段越不明显。

由图 1 中(a)、(b)的对比可得到,在相同轴向应力条件下,围压越大,瞬时弹性变形和蠕变变形越小;在相同围压条件下,轴向压力越大,瞬时变形和蠕变变形也越大,这与许多工程中通过增加围压以改变岩石轴向受力特性的情况相符。从图 1(c)可以看出,在蠕变初期,变形较为明显,在轴向应力为 2.5MPa、围压为 0.5MPa 的情况下,蠕变经过 6.7h 后趋于稳定,总应变值为 2.3861×10^{-3} ,蠕应变增加 0.5761×10^{-3} ,约为瞬时轴向应变的 33.83%,然后变形趋于稳定。

2.2 蠕变速率分析

紫色泥岩在瞬时变形后便进入蠕变变形阶段,蠕变速率逐渐变小至一稳定值后便进入稳定蠕变阶段,由图 2 可以看出这一特性,且在稳定蠕变阶段蠕变速率相当小,约为衰减蠕变阶段起始蠕变速率的 4%左右。由图 1(c)也可看出这一点,其稳定蠕变阶段在经历 22.5h 后的蠕变量约为 0.266×10^{-3} ,蠕变量约是衰减蠕变阶段的 45.39%。由图 2 三条蠕变速率曲线对比可知,围压越大,起始蠕变速率越小,进入稳定蠕变阶段后的蠕变速率也越小。

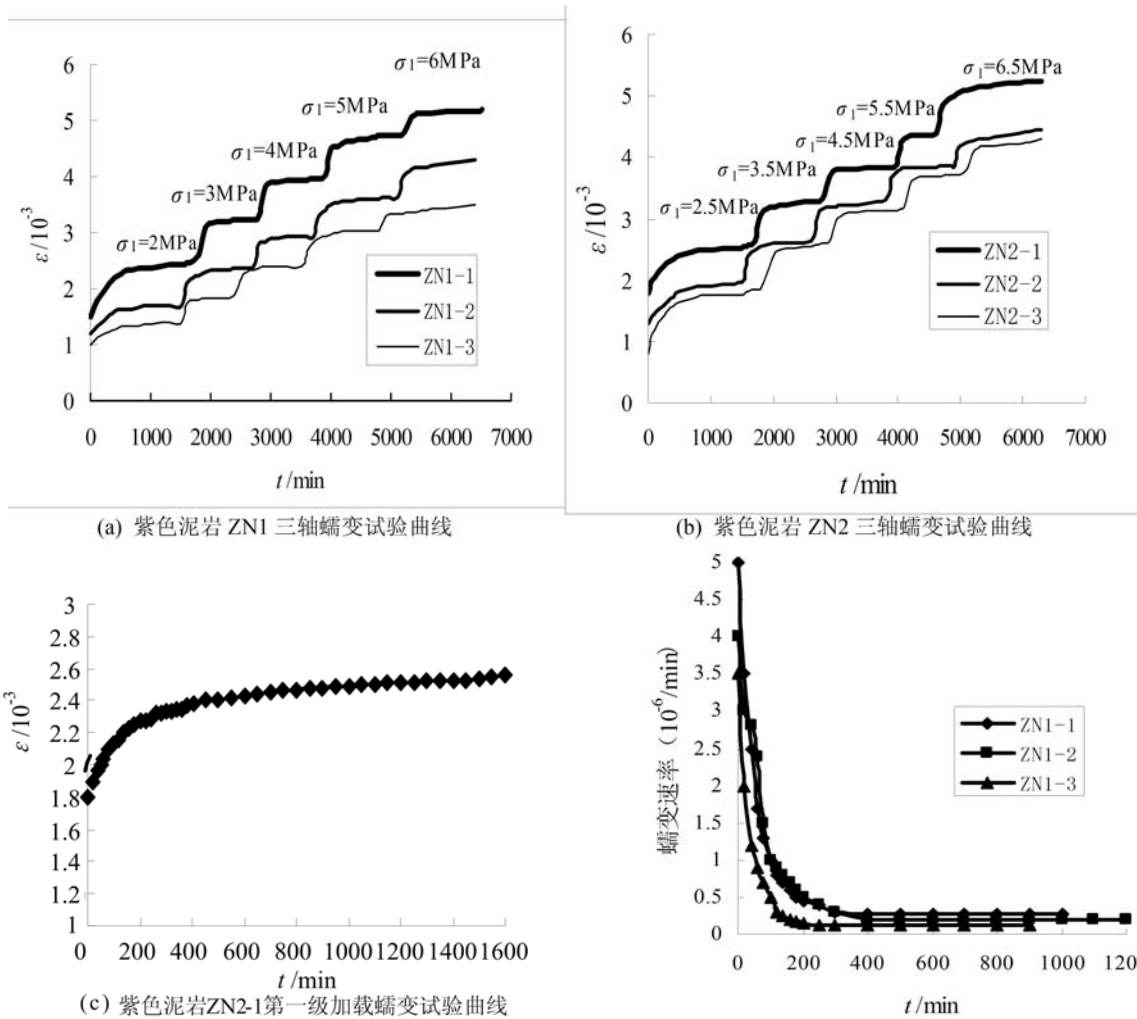


图 1 紫色泥岩三轴蠕变试验曲线

Fig. 1 The triaxial creep test curves of purple Mudstone

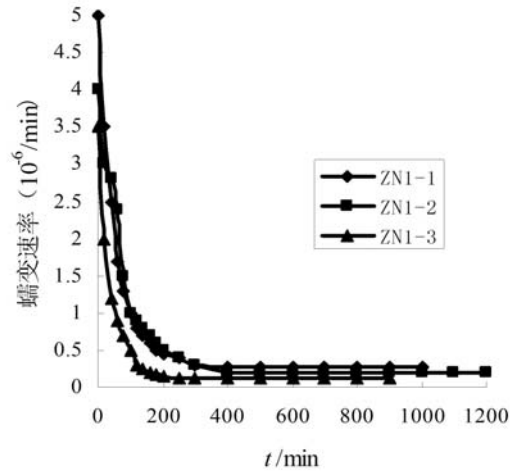


图 2 ZN1 第二级加载蠕变速率曲线

Fig. 2 The ZN1 creep rate curve of the second loading

2.3 应力与瞬时应变关系分析

试件在各级荷载作用的瞬时轴向应变与轴向荷载近似成比例增长,如图 3 所示。轴压相等,围压越大轴向应变越小;围压相等,轴向荷载越大轴向应变越大。

3 蠕变模型分析及参数拟合

3.1 蠕变模型分析

根据蠕变试验数据整理的结果,由 ZN2-1 的蠕变试验曲线可知,蠕变试验曲线开始有瞬时变形,然后在衰减蠕变阶段应变以指数递减的方式增长,稳定蠕变阶段蠕变速率相当小,这与 H/M 体的蠕变曲线接近于某一水平渐近线近似吻合,如图 4 所示。

H/M 体是一种弹黏性体,如图 5 所示,H/M 模型具有三个可调参数,即 E_H 、 E_M 、 η ,可以很好地描述紫色泥岩在加速蠕变阶段以前的蠕变曲线,其蠕变方程如式(1)所示。

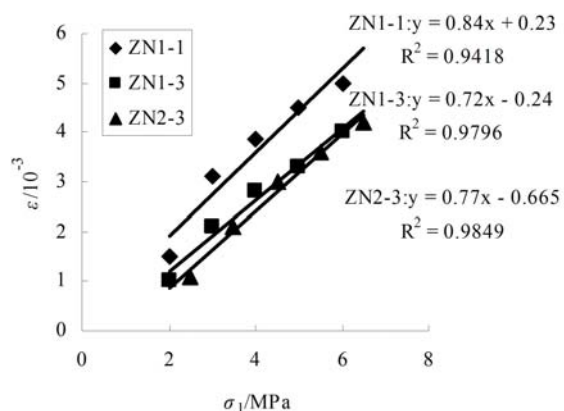


图 3 应力与瞬时应变关系曲线

Fig. 3 The curve of stress and instantaneous strain

$$\epsilon = (\frac{1}{E_H + E_M} - \frac{1}{E_H}) \sigma_0 e^{\frac{E_H E_M}{E_H + E_M} \cdot \frac{t}{\eta}} + \frac{\sigma_0}{E_H}$$

(1)

式中： E_H 为 H(虎克体)体的弹性模量； E_M 为 M(马克斯威尔体)体的弹性模量； η 为 M 体的粘滞性系数。

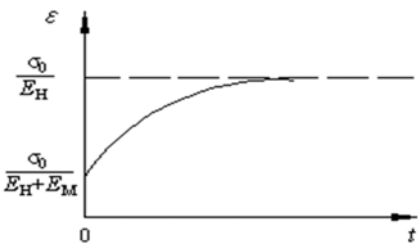


图 4 H/M 体蠕变曲线

Fig. 4 The creep curve of H/M model

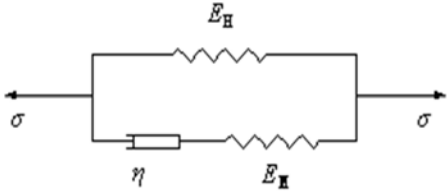


图 5 H/M 模型

Fig. 5 H/M model

由于我们研究的是紫色泥岩的三轴蠕变特性,所以需要将 H/M 体的蠕变方程转化为三维条件下的蠕变方程,如式(2)所示。

$$e_{ij} = (\frac{1}{2G_H + 2G_M} - \frac{1}{2G_H}) s_{ij} e^{-\frac{G_H G_M}{G_H + G_M} \cdot \frac{t}{H}} + \frac{s_{ij}}{2G_H}$$

(2)

式中： G_H 、 G_M 分别为 H 体和 M 体的剪切模量； H 为 M 体的三维粘滞性系数。

3.2 模型参数拟合

本次试验由于试验数据较多,所以仅取试件 ZN2-2 为例,进行模型参数拟合。采用 MATLAB 软件中的非线性回归分析,得到了不同应力水平下的 H/M 模型的参数,如表 2 所示。

表 2 ZN2-2 试件 H/M 模型参数

Tab. 2 The H/M model parmeters of ZN2-2 specimen

步骤	K/GPa	G_H /GPa	G_M /GPa	H /GPa · s
第一分级加载	1. 0684	0. 0004e3	0. 0002e3	2. 7849e3
第二分级加载	4. 2892	0. 0048e3	0. 0016e3	7. 7930e2
第三分级加载	5. 5970	0. 0054e2	0. 0012e2	6. 3948e2
第四分级加载	8. 1845	0. 0059e2	0. 001e2	3. 9275e2
第五分级加载	9. 1808	0. 0063e2	0. 0007e2	6. 4896e2

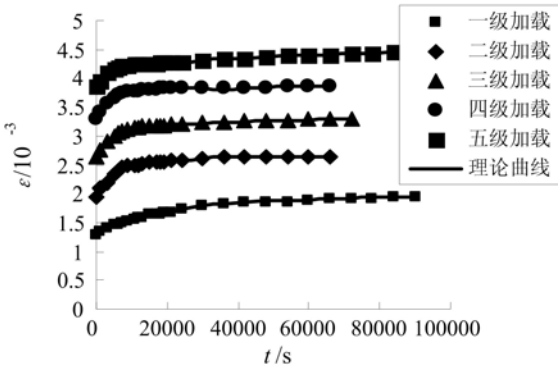


图 6 ZN2-2 蠕变试验曲线与理论曲线

Fig. 6 The creep test curve and theoretical curve of ZN2-2

图 6 的散点图为紫色泥岩 ZN2-2 试件的蠕变试验曲线,实线图为理论曲线,试验曲线与理论曲线的最大误差在 $2e-5$ 左右。误差产生的原因主要是由试验持续时间较长,试件的物理力学特性很难始终保持一致。另外,在用 MATLAB 软件进行非线性回归分析时,初值设置很难达到理想的精度要求,但本次拟合结果的误差较理想,说明采用的 H/M 模型能较好的模拟紫色泥岩的蠕变曲线。

4 结论

(1) 紫色泥岩具有典型的流变特性,但在较低应力水平下其稳定蠕变阶段并不明显,且随着围压的加大,稳定蠕变阶段愈不明显;

(2) 紫色泥岩的瞬时变形和蠕变变形在相同围压的条件下,随着轴压的增大而增大;在相同轴压的条件下,随着围压的增大而减小;

(3) 试件进入蠕变阶段后,变形均随时间不断增长,蠕变初期变形较为明显,在轴向应力为 2.5MPa,围压为 0.5MPa 的情况下,蠕应变值约为瞬时轴向应变值的 33.83%左右,而其它软弱岩石往往小于 10%,说明紫色泥岩具有较强的蠕变特性;

(4) 紫色泥岩的蠕变速率在相同轴压条件下,随围压的增大而减小,进入稳定蠕变阶段的蠕变速率约为其实蠕变速率的 4%,且瞬时应变与轴向应力近似成线性关系;

(5) 蠕变试验曲线与理论曲线较吻合,说明选用的 H/M 模型能较好地描述紫色泥岩的蠕变曲线,采用 MATLAB 软件非线性回归分析进行数据处理较合理。

参考文献:

- [1] 范庆忠,李术才,高延法. 软岩三轴蠕变特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(7):1381—1385 (FAN Qing-zhong, LI Shu-cai, GAO Yan-fa. Experimental study on creep properties of Soft rock under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1381—1385 (in Chinese))
- [2] 陈渠,西田和范,岩本健,等. 沉积软岩的三轴蠕变试验研究及分析评价[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(6): 905—912 (CHEN Qu, NISHIDA K, TAKESHI I, et al. Creep behavior of sedimentary soft rock under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(6): 905—912 (in Chinese))
- [3] 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 (ZHANG Xiang-dong, LI Yong-jing, ZHANG Shu-guang, et al. Creep theory of Soft rock and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1635—1639 (in Chinese))
- [4] 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 (LIU Guang-ting, HU Yu, CHEN Feng-qi, et al. Rheological property of soft rock under multiaxial compression and its effect on design of arch dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1237—1241 (in Chinese))
- [5] 万玲,彭向和,杨春和,等. 泥岩蠕变行为的试验研究及其描述[J]. 岩土力学,2005,26(6):924—928 (WAN Ling, PENG Xiang-he, YANG Chun-he, et al. An investigation on the creep of mudstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 924—928 (in Chinese))
- [6] 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): 1576—1581 (YUAN Hai-ping, 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): 1576—1581 (in Chinese))
- [7] 谌文武,原鹏博,刘小伟. 分级加载条件下红层软岩蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(增1): 3076—3081 (CHEN Wen-wu, YUAN Peng-bo, LIU Xiao-wei. Study on creep properties of red-bed soft rock under step load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup. 1): 3076—3081 (in Chinese))
- [8] 赵延林,曹平,陈沅江,等. 分级加卸载下节理软岩流变试验及模型[J]. 煤炭学报,2008,33(7):748—753 (ZHAO Yan-lin, CAO Ping, CHEN Yuan-jiang, et al. Creep properties experiment and model of jointed soft rocks under step load and unload[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(7): 748—753 (in Chinese))
- [9] 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 Zhong-ting, LUO Ju-jian. Study on creep properties rock under step load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 218—222 (in Chinese))
- [10] Tian Y S, Zhang W. Engineering geological characteristics and rheological properties of rock mass in Jinchuan Nickel Mine//In: Proc. of the 8th ISRM Congress[C]. Tokyo: A. A. Balkema, 1995: 9—12.

- [11] Wu W, Hou Z M. Damage and creep model for rock salt as well as its validation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1797—1804.
- [12] 秦跃平, 王林, 孙文标, 等. 岩石损伤流变理论模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增 2): 2291—2295 (Qin Yue-ping, Wang Lin, Sun Wen-biao, et al. Study on rheological theory model of rock damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Supp. 2): 2291—2295 (in Chinese))

Study of Triaxial Creep Properties of Purple Mudstone under Stepwise Loading

ZHANG Xiang-dong, YIN Xiao-wen, FU Qiang

(Institute of Civil Engineering and Transportation, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Rheological properties is an important mechanical properties of rock material. Triaxial creep properties of specimen made of purple mudstone were studied under stepwise loading. The experiment was carried out on a home-made gravitation lever style rock creep test machine and a triaxial pressure cell. Results show that under the same axial pressure, the greater the confining pressure is, the smaller the instantaneous elastic deformation and creep deformation of purple mudstone are; under the same confining pressure, the greater the axial pressure is, the larger both deformations are; the creep rate of purple mudstone has the same trend, and under the same axial pressure, the greater the confining pressure is, the fuzzier the creep rate at the stable creep stage is. In addition, results of the linear regression for stress and instantaneous strain show that the instantaneous axial strain and axial load approximated to grow proportionally. Through analyzing the purple mudstone creep curve trend, it is suggested that H/M model is reasonable to creep simulation. In order to implement the model parameters fitting, the nonlinear regression analysis of MATLAB software was adopted. Final results show that the maximum deviation between experimental curve and theoretical one is about $2e-5$. This proves that H/M model can reasonably describe the creep properties of purple mudstone.

Keywords: creep experiment; stepwise loading; confining pressure; axial pressure; parameters fitting