

文章编号:1672-3961(2009)03-0135-04

孔隙压力作用下泥岩三轴蠕变实验研究

王俊光, 梁冰

(辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要:在具有孔隙压力系统的岩石三轴蠕变仪上,对泥岩进行了考虑孔隙压力作用的三轴蠕变实验.实验中不仅考虑了轴压 σ_1 和围压 σ_3 对蠕变的影响,而且考虑了孔隙压力 p 在泥岩蠕变过程中产生的重要影响.通过不同应力水平下的蠕变实验,对比含孔隙压力和不含孔隙压力的蠕变实验曲线,表明当轴压 σ_1 和围压 σ_3 一定时,随着孔隙压力 p 的增加,蠕变变形量将会减小,在稳态蠕变阶段的应变率也会减小,在一定程度上会延长蠕变三个阶段的蠕变时间.并采用经典蠕变模型对实验结果进行分析.

关键词:孔隙压力;泥岩;三轴实验;蠕变

中图分类号:TU452 **文献标志码:**A

Investigation on triaxial creep claystone under pore pressure

WANG Jun-guang, LIANG Bing

(School of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Triaxial creep experiments of a kind of claystone under pore pressure were performed with a triaxial creep testing device which has the system of pore pressure. The effects of axial stress σ_1 and confining pressure σ_3 on the creep, and the pore pressure p were investigated. By creep experiments with different stress states and analyzing the results of different pore pressures, it was found that for constant axial stress and constant confining pressure, with the increase of pore pressure, the deformation amount of creep was reduced, the steady-state creep strain rate was decreased, and the three-state of creep time became longer. The creep behavior of claystone was analyzed with a classic creep model.

Key words: pore pressure; claystone; triaxial creep experiments; creep

岩土工程中存在许多与时间相关的问题,岩体工程的失稳和破坏绝大多数都与岩石的流变性有关,为了保证岩土工程的长期安全,岩石的流变研究越来越被人们重视,得到了许多有意义的成果.传统流变力学中影响岩石流变的因素主要有应力、围压、温度、湿度和岩石的颗粒与矿物成份.随着对多孔介质孔隙压力研究的深入,岩体在孔隙压力的作用下,基本性质就会发生根本性的改变,实验证明孔隙压力对岩石的强度、弹性模量,及岩石蠕变变形具有重要的影响.李传亮和夏才初等对大理岩、红砂岩、粉砂岩和泥岩4种不同岩性的岩石进行了单轴压缩蠕变和松弛实验^[1-2]. Munson 和杨春和等就盐岩单轴、

三轴流变特性进行了实验研究^[3-4],陈渠等对3种沉积软岩进行了三轴蠕变实验,探讨了岩石在不同条件下的强度、变形特征,以及变形、变形速率和时间依存性等的影响因素^[5].然而岩石蠕变时,由于对实验系统要求严格,实验时间长,难度大,这给开展岩石流变性能研究带来一定的困难.以往的蠕变实验都没有考虑孔隙压力的作用,本文主要是在含有孔隙压力系统的三轴蠕变实验仪上,针对泥岩试件进行了考虑孔隙压力作用的三轴压缩蠕变实验,为泥岩的蠕变特性分析提供了有益的实验依据.并利用经典粘弹性本构模型对实验现象进行了分析,得到了较为满意的结果.

收稿日期:2008-05-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50374041; 50574041)

作者简介:王俊光(1980-),男,辽宁阜新人,博士研究生,主要从事岩石力学及渗流力学理论及应用研究. E-mail: shenliu_303@163.com

1 实验装置

按实验要求,采用了含有孔隙压力系统的岩土 SJ-1B 三轴蠕变仪,如图 1 所示.围压和孔压介质都采用水,最大围压为 1.6 MPa,最大孔隙压力为 1.6 MPa.轴向压力由活塞加载装置提供,载荷值由应力环测量.围压由带有压风机的控制箱和注入围压缸的水介质提供,孔压由孔隙系统通过与提供围压相同的控制箱提供,围压和孔压大小直接从压力表读取,如图 2 所示.孔隙压力必须小于围压.岩样的变形由安装在加载装置上的百分表测量,可精确到 0.01 mm.为保证在蠕变过程中蠕变记录的精确性,不仅在围压缸的底座处安装了一个百分表用来测量试件下表面的位移,而且特别在围压缸的活塞上增加了千分表(精度为 0.001 mm)用来读取试件上表面的位移,而真正的蠕变变形量是下表面百分表的读数减去上表面千分表的读数,如图 3 所示^[6].

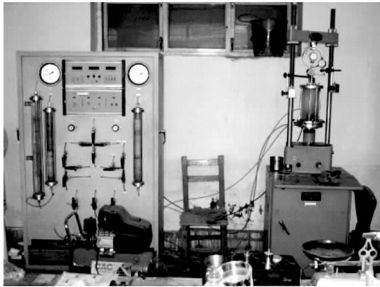


图 1 岩石三轴蠕变仪
Fig.1 Triaxial rock rheometer

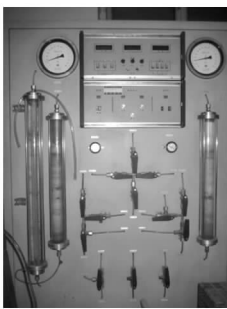


图 2 压力控制箱
Fig.2 Pressure control casing



图 3 位移测试仪表安装图
Fig.3 Install graph of position finder

2 实验

2.1 试件

实验所用泥岩取自内蒙古地区某煤矿岩土层,岩芯经切割、磨削等工序,加工成直径 40 mm、高 80 mm 的圆柱形试件.试样端面平整度和侧面平整度控制在 0.03 mm 范围以内,断面跳动小于 0.03 mm.加工好的试件处于自然含水状态,为了防止因岩样水分流失而改变岩石本身的力学性能,岩样用保鲜膜封装并放入密封容器内.岩样呈褐色,质地非常松软.试件的物理力学参数见表 1.

表 1 泥岩常规物理力学参数
Table 1 Physical parameters of mud rock

岩石	单轴抗压强度 σ_c /MPa	弹性模量 E /MPa	泊松比 μ	密度 $\gamma/(g \cdot cm^{-3})$
泥岩	0.669	478.0	0.24	2.151

2.2 实验

步骤 1 首先用乳胶套将试件包裹,以便与围压水介质隔开;

步骤 2 将试件置入压力室,注入水介质,合上围压缸盖并拧紧螺栓,使围压缸与缸盖可靠密封;

步骤 3 通过压力控制箱向压力室注水,排净围压缸内空气,关闭排气孔;

步骤 4 对活塞施加压力,使得压头与试件充分接触;

步骤 5 安装千分表、百分表;

步骤 6 加围压到所需压力值;

步骤 7 加孔隙压力到所需压力值;

步骤 8 缓慢施加轴压力达到给定值,同时对百分表、千分表调零;

步骤 9 观察并记录试件的变形情况.在实验过程中,须保持轴压、围压和孔隙压力的恒定.

实验中围压取 3 个应力水平,即 $\sigma_3 = 0.1$ MPa、0.2 MPa、0.3 MPa;在同一围压 σ_3 下,轴向压应力 σ_1 也取 3 个应力水平,即 $\sigma_1 = 0.2$ MPa、0.35 MPa、0.5 MPa,孔隙压力 p 也取 3 个应力水平,分别是 $\sigma_1 = 0.2$ MPa, $\sigma_3 = 0.1$ MPa 时, $p = 0$ MPa、0.05 MPa; $\sigma_1 = 0.35$ MPa, $\sigma_3 = 0.2$ MPa 时, $p = 0$ MPa、0.15 MPa; $\sigma_1 = 0.5$ MPa, $\sigma_3 = 0.3$ MPa 时, $p = 0$ MPa、0.2 MPa,主要研究中应力水平下不同孔隙压力作用对岩土蠕变的影响.为了保证结果的准确性,需要对同一种工况进行 3~5 次重复实验^[7-8].

3 实验结果及分析

图 4、5、6 分别是泥岩在轴压和围压是 $\sigma_1 =$

0.2 MPa, $\sigma_3 = 0.1$ MPa; $\sigma_1 = 0.35$ MPa, $\sigma_3 = 0.2$ MPa; $\sigma_1 = 0.5$ MPa, $\sigma_3 = 0.3$ MPa 时,不同孔隙压力下的蠕变曲线图.

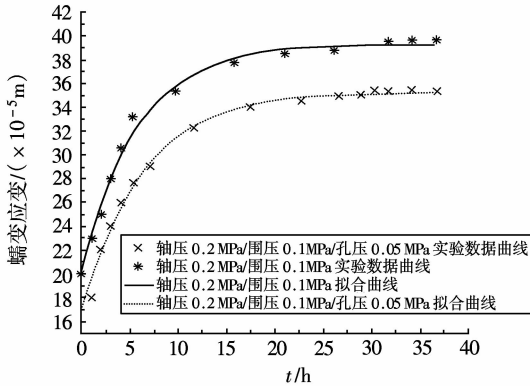


图4 不同孔隙压力下的蠕变曲线图 ($\sigma_1 = 0.2$ MPa, $\sigma_3 = 0.1$ MPa)

Fig.4 Creep curves under different pore pressure ($\sigma_1 = 0.2$ MPa, $\sigma_3 = 0.1$ MPa)

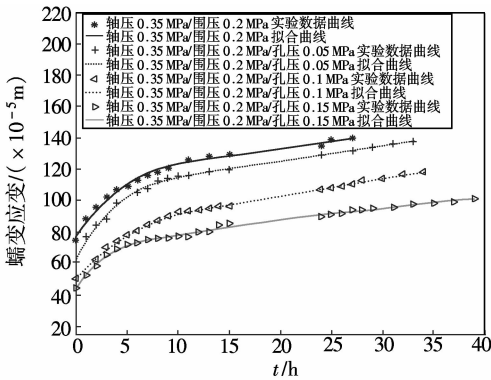


图5 不同孔隙压力下的蠕变曲线图 ($\sigma_1 = 0.35$ MPa, $\sigma_3 = 0.2$ MPa)

Fig.5 Creep curves under different pore pressure ($\sigma_1 = 0.35$ MPa, $\sigma_3 = 0.2$ MPa)

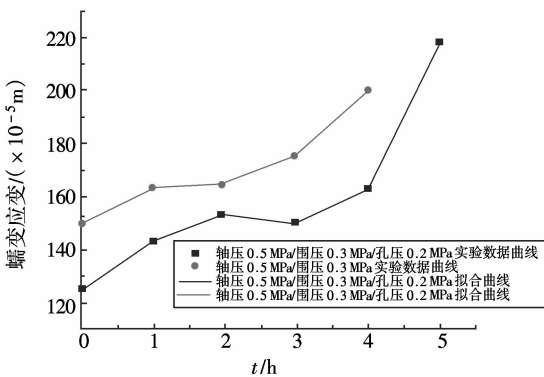


图6 不同孔隙压力下的蠕变曲线图 ($\sigma_1 = 0.5$ MPa, $\sigma_3 = 0.3$ MPa)

Fig.6 Creep curves under different pore pressure ($\sigma_1 = 0.5$ MPa, $\sigma_3 = 0.3$ MPa)

从实验结果知:当轴压 σ_1 和围压 σ_3 一定时,在较小的轴向应力 σ_1 (应力差 $\sigma = \sigma_1 - \sigma_3 = 0.1$ MPa) 的作用下,蠕变曲线的3个阶段中衰减蠕变和稳定蠕变阶段比较明显,并且衰减蠕变阶段时间较短,蠕

变很快进入稳定阶段,孔隙压力的作用不是很明显;在较大的轴向应力 σ_1 (应力差 $\sigma = \sigma_1 - \sigma_3 = 0.15$ MPa) 的作用下,其加速蠕变阶段不明显,但已具有加速蠕变阶段的趋势,随着孔隙压力的增加,蠕变的变形量明显减小,使试件具有了一定的抗压能力的提高,但此过程同时增大了对骨架的压缩程度,因此这种抗压力的提高只是短暂的,可以看出孔隙压力对岩土蠕变具有较大的影响;在大的轴向应力 σ_1 (应力差 $\sigma = \sigma_1 - \sigma_3 = 0.2$ MPa) 的作用下,其加速蠕变阶段非常明显,衰减和稳定蠕变阶段持续时间很短.轴向应力 σ_1 增加,蠕变加快和破坏时间减小,寿命缩短,但孔隙压力的存在将会减缓蠕变速度和破坏时间,延长试件寿命;轴向应力 σ_1 越大,试件在稳态蠕变阶段持续的时间越短,并很快出现加速蠕变阶段而破坏,孔隙压力越大则越延长稳定蠕变阶段的时间;轴向应力 σ_1 大,蠕变应变率也大,而孔隙压力大则蠕变应变率会减小.

4 模型与分析

4.1 有效应力

将孔隙压力与变形相互影响关系引入 Terzaghi 有效应力的概念中,作用在整个介质上的应力称为总应力 σ ,作用在固体颗粒上或固体骨架上的应力称为有效应力 σ' ,孔隙中流体压力称为孔隙压力 P ^[9].

Terzaghi 有效应力

$$\sigma = \sigma' + P. \quad (1)$$

4.2 本构方程

假设材料初始均匀和各向同性,并假定变形规律接近符合 Burgers 体模型,本构模型^[10-11]为

$$\sigma + \left(\frac{\eta_1}{E_1} + \frac{\eta_1 + \eta_2}{E_2} \right) \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2} \ddot{\sigma} = \eta_1 \dot{\epsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_2} \ddot{\epsilon}. \quad (2)$$

蠕变方程为

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_1} t + \frac{\sigma_0}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t \right) \right]. \quad (3)$$

具有孔隙压力作用的蠕变方程为

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma'_0}{E_1} + \frac{\sigma'_0}{\eta_1} t + \frac{\sigma'_0}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t \right) \right]. \quad (4)$$

4.3 计算实例

根据本构模型,对泥岩在含有孔隙压力作用的蠕变行为进行计算,各参数为 $E_1 = 469.8$ MPa, $\eta_1 = 36\ 150$ MPa·s, $E_2 = 783.0$ MPa, $\eta_2 = 3\ 006.0$ MPa·s.

当 $\sigma_1 = 0.35$ MPa, $\sigma_3 = 0.2$ MPa 时, $p = 0$ MPa/0.05 MPa/0.1 MPa/0.15 MPa, 当 $\sigma_1 = 0.2$ MPa, $\sigma_3 =$

0.1 MPa 时, $p = 0 \text{ MPa}/0.05 \text{ MPa}$. 应用数值模拟软件 Matlab 进行理论数值模拟, 得到如图 7 所示曲线图.

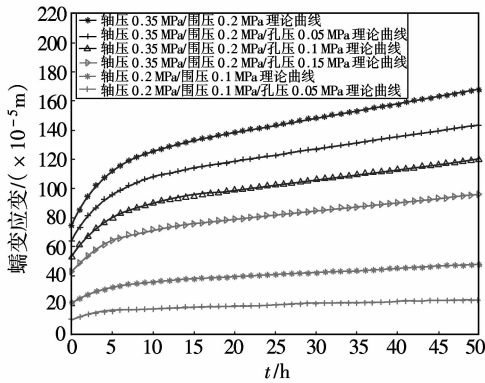


图 7 理论蠕变曲线图

Fig.7 Theoretical creep curves

5 结语

通过含有孔隙压力系统的三轴压缩蠕变实验, 在蠕变仪上对泥岩进行了考虑孔隙压力作用的三轴蠕变实验, 为了充分说明孔隙压力在三轴蠕变实验中所产生不可忽略的作用, 及其对蠕变的影响, 实验中轴压 σ_1 取 3 个应力水平分别 0.2 MPa、0.35 MPa、0.5 MPa 和围压 σ_3 取三个水平分别为 0.1 MPa、0.2 MPa 和 0.3 MPa, 孔隙压力同样取了 3 个应力水平 0 MPa、0.05 MPa、0.1 MPa、0.15 MPa. 实验结果表明在轴压 σ_1 和围压 σ_3 一定, 即应力差 $\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$ 一定时, 孔隙压力增加, 则蠕变减缓, 蠕变应变减小, 稳态蠕变阶段的应变率减小, 在稳态蠕变阶段的持续时间较长, 进入加速蠕变阶段较晚, 因而试件不易破坏. 最后利用经典粘弹性蠕变本构模型对泥岩的蠕变现象进行了分析计算, 由图 4、5、7 含孔隙压力和不含孔隙压力的蠕变对比的结果可以看出模型能较好描述实验现象, 理论曲线与实验结果相吻合, 并充分说明了孔隙压力的作用对蠕变就有较大的影响.

参考文献:

[1] 李传亮, 孔祥言, 徐献芝, 等. 多孔介质的流变模型研究[J]. 力学学报, 2003, 35(2): 230-234.
LI Chuanliang, KONG Xiangyan, XU Xianzhi, et al. A study on the rheological model of porous media[J]. Acta Mechanica Sinica, 2003, 35(2): 230-234.

[2] 夏才初, 孙均. 蠕变实验中流变模型辨识及参数确定[J]. 同济大学学报, 1996, 24(5): 498-503.
XIA Caichu, SUN Jun. Distinction of rheological model and determination of parameters on creep tests[J]. Journal of Tongji University, 1996, 24(5): 498-503.

[3] MUNSON D. Constitutive modeling of salt behavior-state of the technology[C]//WITTKE W. Proceedings of 7th International Congress on Rock Mechanics. Rotterdam: Balkema A A, 1993, 3: 127-134.

[4] 杨春和, 白世伟, 吴益民. 应力水平及加载路径对盐岩时效的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 270-275.
YANG Chunhe, BAI Shiwei, WU Yimin. Time-dependent influence on stress level and stress path of loading on rock salt [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 270-275.

[5] 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.

[6] 万玲, 彭向和, 杨春和, 等. 泥岩蠕变行为的实验研究及其描述[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 921-928.
WAN Ling, PENG Xiang-he, YANG Chun-he, et al. An investigation to the creep of claystone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 921-928.

[7] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
ZHOU Weiyuan. High rock mechanics [M]. Beijing: China Water Resource and Hydropower Press, 1990.

[8] 范广勤. 岩土工程流变力学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992.
FAN Guangqin. Rheological mechanics of engineering rock and soil engineering [M]. Beijing: Coal Industry Press, 1992.

[9] 袁龙蔚. 流变力学[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
YUAN Longwei. Rheological mechanics [M]. Beijing: Science press, 1986.

[10] 姜永东, 鲜学福, 熊德国, 等. 砂岩蠕变特性及蠕变力学模型研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(12): 1478-1481.
JIANG Yongdong, XIAN Xuefu, XIONG Deguo, et al. Study on creep behaviour of sandstone and its mechanical models, Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(12): 1478-1481.

[11] 曹树刚, 边金, 李鹏, 等. 软岩蠕变实验与理论模型分析的对比[J]. 重庆大学学报, 2002, 25(7): 96-98.
CAO Shugang, BIAN Jin, LI Peng. Comparison research of creep experiments and the analysis of the theoretical model of soft rocks [J]. Journal of Chongqing University, 2002, 25(7): 96-98.

(编辑: 孙培芹)