

砂岩蠕变特性及蠕变力学模型研究

姜永东¹, 鲜学福¹, 熊德国¹, 周富春^{1,2}

(1. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400030; 2. 重庆交通学院, 重庆 400074)

摘要: 应力水平对岩石蠕变特性有很大的影响。通过对砂岩单轴蠕变试验研究表明: 当加载应力远小于屈服应力时, 应变速率持续衰减最终保持恒定, 只产生蠕变的第1, 2阶段, 试件不会破坏, 属于稳定型蠕变; 当加载应力大于或小于但接近于屈服应力时, 应变速率先衰减后加速增长, 蠕变的3个阶段都产生了, 在蠕变第3阶段产生了轴向方向的3条裂纹, 最终裂纹扩展贯通而破坏, 破坏形式为张性拉裂破坏, 属于非稳定型蠕变。实验说明, 屈服应力是岩石产生极非稳定型蠕变的一个临界值。根据加载应力水平产生的蠕变差异, 建立了砂岩的经验本构模型和蠕变力学模型, 为岩体工程建设提供借鉴与参考。

关键词: 蠕变; 屈服应力; 临界值; 经验模型; 蠕变模型

中图分类号: TU 458

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2005)12-1478-04

作者简介: 姜永东(1977-), 男, 贵州凤冈县人, 博士研究生, 重庆大学教师, 主要从事岩石力学与工程方面的研究。

Study on creep behaviour of sandstone and its mechanical models

JIANG Yong-dong¹, XIAN Xue-fu¹, XIONG De-guo¹, ZHOU Fu-chun^{1,2}

(1. The Key Laboratory of the Exploitation of Southwest Resources & the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Creep of rock could be influenced by a few factors and the stress states had great influence on the rheological characters of soft rock. The uniaxial compressive creep test on sand stone showed that, when the stress was considerably less than yield stress, the decreasing strain rate approached to a final steady value. In this case the creep was named stable creep and only got to the phase 1 and 2 without damage. On the other hand, when the stress was close to the yield stress, the strain rate decreased at the beginning, then accelerated to increase. Crack appeared and spread in the 3rd phase of the creeping process. The destructing pattern is tensile crack, which belonged to unsteady creeping. It was shown that yield stress was a critical value to cause unsteady creeping. An empirical constitutive model and the creep stress model were established according to the differences of creep induced by the stress level.

Key words: creep; yield stress; critical value; empirical model; rheological model

0 引言

在边坡、隧洞、矿井、基坑、铁路路基等岩体工程中, 岩体开挖导致岩体蠕变现象普遍存在, 许多岩体工程的破坏都是因为岩体的蠕变破坏而引起。应力水平对岩石的蠕变特性有很大的影响^[1], 为此本文对砂岩的蠕变进行了试验研究, 先通过实验得到岩石的全应力-应变曲线, 然后蠕变试验的应力水平在应力-应变的各个阶段上取值进行实验, 实验表明, 不同的应力水平表现的蠕变特性有差异, 并通过实验建立了蠕变模型。

1 砂岩的单轴变形试验

为了研究砂岩的蠕变特性受应力水平的影响, 对砂岩进行了单轴变形试验。将所取岩芯加工成为圆柱

体试件, 试件尺寸为 $\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$, 采用日本岛津公司生产的 AG-250 kN 伺服式刚性试验机进行试验, 采用位移控制, 加载速度为 0.1 mm/min , 得到了应力与轴向应变、横向应变、体应变的关系曲线如图1所示, 三个试件的应力与轴向应变、横向应变、体应变的变化趋势均和图2相似, 图2中应力与轴向应变的全过程曲线可以分为4个阶段^[2,3], 即: 压密、弹性、应变强化、应变软化阶段。第1阶段, 轴向应力应变曲线微向上弯曲, 产生的原因是岩石试件中的微裂隙或节理面被压密实; 第2阶段, 曲线近似于直线; 第3阶段, 岩石内部开始产生微裂隙, 随着加载载荷

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50334060); 重庆市院士基金资助项目(6592)

收稿日期: 2005-02-28

的增加, 试件内部的裂隙扩展最终汇合贯通, 导致试件破坏, 在这个阶段内, 体应变有一个最大值, 这个最大值对应的应力就是屈服应力; 第 4 阶段试件破坏后, 试件仍然有一定的承载能力, 应力降到残余应力。试验中三个试件的 σ_A 、 σ_B 、 σ_S 、 σ_C 值见表 1。

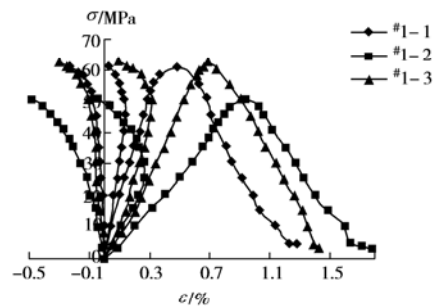


图 1 砂岩在单轴压缩下应力与轴向、横向、体应变曲线
Fig. 1 The relation of stress with axial, transverse and volumetric strain of sand stone under uniaxial compression

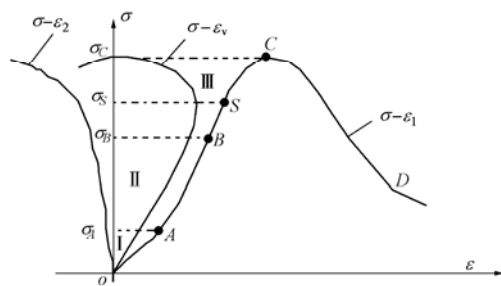


图 2 砂岩应力与轴向应变全过程曲线
Fig. 2 Variation of stress and axial strain of sand stone

表 1 砂岩的 σ_A 、 σ_B 、 σ_S 、 σ_C 值

Table 1 The values of sand stone σ_A , σ_B , σ_S and σ_C				
试件编号	σ_A/MPa	σ_B/MPa	σ_S/MPa	σ_C/MPa
#1-1	12.32	35.51	45.66	60.88
#1-2	9.17	20.20	30.52	50.86
#1-3	15.40	35.39	50.56	62.60
平均	12.30	30.37	42.25	58.11

2 砂岩单轴压缩的蠕变特性

2.1 试件加工与蠕变试验装置

实验采用重庆市云阳县寨坝滑坡体下盘的砂岩, 将所取岩芯加工成为圆柱形试件, 尺寸为 $\phi 25\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 。试验装置采用自行设计加工的 GL-I 型杠杆式流变仪, 采用 2 级加载, 放大倍数为 55.64, 最大荷载为 65 kN, 试件适用高度为 50~100 mm。该仪器可以进行恒载和卸载试验, 在试件表面粘贴应变片, 采用静态电阻应变仪测量试件轴向、横向应变。

2.2 试验结果

在单轴压缩条件下进行了中长期蠕变试验, 共测试了 6 件, 试验结果如图 3、图 4 所示。图 3 中的#1、#2、#3、#4 加载应力分别在图 2 所示的 AB、BS、BS、SC 段内取值, 图 4 中的#5、#6 试件分别在图 2 中的 AB、BS 段内取值。

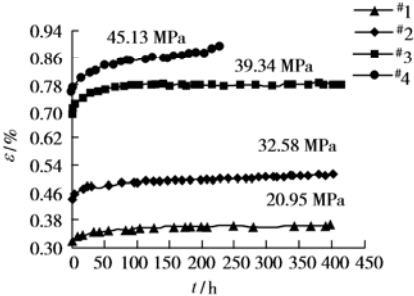


图 3 砂岩在不同应力下的蠕变曲线
Fig. 3 The creep curve of sand stone under different stresses

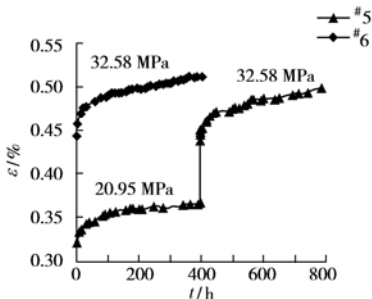


图 4 砂岩阶梯蠕变曲线
Fig. 4 The stepped creep curve of sand rock

从图 3 中可以看出, 加载应力水平对砂岩蠕变特性有很大的影响, 其中#1、#2 试件加载应力远小于平均屈服应力, 只产生了蠕变第 1、2 阶段, 蠕变第 1 阶段持续的时间在 100 h 内, 变形大, 应变速率持续衰减, 到蠕变第 2 阶段应变速率恒定, 蠕变第 2 阶段的变形小且持续时间很长, 试件没有破坏, 属于稳定型蠕变。#3 试件加载应力小于但接近于屈服应力, 变形速率是先衰减后保持恒定, 根据文献[4]研究结果在这种应力水平下, 蠕变的 3 个阶段都会产生, 但第 2 阶段持续的时间很长, 在第 3 阶段会产生裂纹, 最终产生破坏。#4 试件加载应力大于平均屈服应力, 蠕变的 3 个阶段都产生了, 且 3 个阶段都比较明显, 应变速率先衰减后加速增长, 蠕变第 1 阶段的变形大, 蠕变第 2 阶段持续时间在 115 h 左右且变形小, 蠕变第 3 阶段持续时间在 36 个 h 左右且变形较大, 图 5 是蠕变第 3 阶段沿轴线方向产生的 3 条裂纹, 裂纹随加载时间增长而变得越明显, 最终因裂纹扩展贯通而破坏, 破坏形式为张性拉裂破坏, 属于非稳定型蠕变。所以屈服应力是判定岩石产生极非稳定型蠕变的一个临界值。若加载应力接近岩石的抗压强度, 蠕变第 1、2

阶段都不明显,一开始就进入加速蠕变阶段。试验表明,加载应力大小决定岩石蠕变的各阶段及破坏时间。

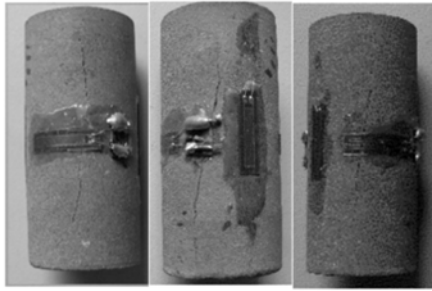


图5 试件#4在轴向方向产生的三条裂纹

Fig. 5 Three cracks of sample #4 in the axial direction

另外对砂岩进行了阶梯蠕变试验如图4所示。从#5试件加载应力水平由20.95 MPa到32.58 MPa的阶梯加载蠕变曲线可以看出,阶梯加载的蠕变曲线后续段在开始变载处有硬化,以后逐渐与#6试件应力水平曲线相同。

3 流变模型

3.1 经验模型

通过砂岩蠕变实验结果分析,蠕变变形总量可以由各阶段的变形量来表示:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t) + \varepsilon_3(t) \quad (1)$$

式中 ε_0 为瞬时弹性应变, $\varepsilon_1(t)$ 为蠕变第1阶段的变形, $\varepsilon_2(t)$ 为蠕变第2阶段的变形, $\varepsilon_3(t)$ 为蠕变第3阶段的变形。

经验公式若采用幂函数、指数函数、对数函数只能描述蠕变第1、2阶段的本构关系,对于加速蠕变阶段现在还没有合适的经验公式^[5~8]。下面是不考虑蠕变第3阶段采用幂函数拟合得到的表达式:

$$\varepsilon(t) = A + Bt^C \quad (2)$$

式中 A 为初始应变, B 、 C 为回归常数, t 为蠕变持续时间。

采回归分析,得出#1、#2、#3、#4试件的本构关系分别为

$$\varepsilon(t) = (3.220 + 0.075 t^{0.3026}) \times 10^{-3} \quad (3)$$

$$\varepsilon(t) = (4.419 + 0.145 t^{0.2569}) \times 10^{-3} \quad (4)$$

$$\varepsilon(t) = (6.906 + 0.235 t^{0.2420}) \times 10^{-3} \quad (5)$$

$$\varepsilon(t) = (7.542 + 0.135 t^{0.4224}) \times 10^{-3} \quad (6)$$

蠕变的经验公式很多,受岩石成分、结构、应力和温度的影响,公式的形式也不同,使用时需注意条件。由蠕变本构关系,可以推断岩体断裂失稳破坏的时间,为岩体工程建设提供了借鉴与参考。

3.2 组合模型

因砂岩蠕变曲线中产生了瞬时弹性应变,则流变

模型应有弹性元件;蠕变曲线反应了应变随时间增加而增大的关系,则模型应有粘性元件;当加载应力小于屈服应力,时间 $t \rightarrow \infty$ 时,应变趋近于稳定值,则与广义的开尔模型应变时间曲线相类似;当加载应力大于屈服应力时,应变随时间增加不收敛于某一稳定值,而是逐渐增大,这一现象可在柏格斯模型中发现,但又有别于柏格斯模型,因为柏格斯模型不存在屈服应力^[9~12]。所以应考虑适应加载应力水平在屈服应力之上的流变力学模型,笔者认为采用如图6所示的西原正夫流变力学模型比较合适。蠕变方程为

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\xi_1} t\right) \right] & (\sigma < \sigma_s) \\ \varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\xi_1} t\right) \right] + \frac{\sigma - \sigma_s}{\xi_2} t & (\sigma \geq \sigma_s) \end{cases} \quad (7)$$

式中 σ_s 为屈服应力, E_0 、 E_1 为弹模, ξ_1 、 ξ_2 为粘性系数。

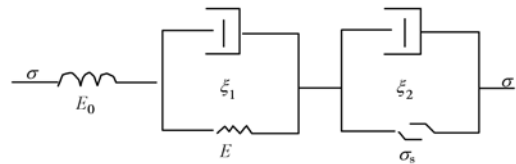


图6 西原正夫流变力学模型

Fig. 6 Rheological model

当时 $\sigma < \sigma_s$, 参数 E_0 、 E_1 、 ξ_1 可采用直接法计算,即

$$E_0 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (8)$$

$$E_1 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon(\infty) - \varepsilon_0} \quad (9)$$

式中 σ_0 为加载应力, $\varepsilon(\infty)$ 为时间 $t \rightarrow \infty$ 的应变, ε_0 为瞬时应变。

在蠕变曲线上任取一时间 $t > 0$ 阶的点 (ε, t) , 得

$$\varepsilon - \varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1}{\xi_1} t} \right) \quad (10)$$

从而可得

$$\xi_1 = \frac{E_1 t}{\ln \sigma_0 - \ln[\sigma_0 - E_1(\varepsilon - \varepsilon_0)]} \quad (11)$$

式中, ε 为任意一点的应变。

当 $\sigma < \sigma_s$ 时,只有在加载过程中卸载,有卸载曲线时可用直接法计算蠕变参数,对于多级加载级,很难在每级荷载下均进行卸载试验,这样直接法就难于实现,此时可采用数值方法求取模型参数。

通过计算得出的试验岩石不同应力水平下的蠕

变参数值见表 2, 将计算出的参数值代入式 (7), 就可以得出不同应力水平下的应变与时间曲线。将实验曲线、经验公式曲线和模型曲线相对比, 采用组合模型得到的应变与时间关系比经验公式更接近于实验曲线, 如图 7 所示。

表 2 不同应力水平下的蠕变参数值

Table 2 The parameters of creep under different stress levels					
试件 编号	加载应力 σ/MPa	E_0/GPa	E_1/GPa	$\xi_1/(\text{GPa} \cdot \text{h})$	$\xi_2/(\text{GPa} \cdot \text{h})$
#1	20.95	6.51	48.05	3637.40	
#2	32.58	7.37	46.58	4512.26	
#3	39.34	5.70	43.88	1455.46	
#4	45.13	5.98	36.86	2347.60	9600

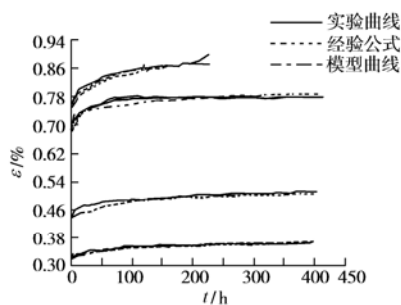


图 7 砂岩在不同应力水平下的实验、经验公式、模型曲线
Fig. 7 The experimental, emperical formula and model curve of sand stone under different stress level

4 结 论

- (1) 分析了加载应力水平对砂岩蠕变特性的影响。当应力水平远小于屈服应力时, 应变速率持续衰减最终恒定, 只产生蠕变第 1、2 阶段, 且第 2 阶段持续时间很长, 试件不会破坏, 属于稳定型蠕变; 当加载应力远大于或小于但接近于屈服应力时, 应变速率先衰减后加速增长, 蠕变 3 个阶段均产生, 第 2 阶段持续时间较长, 在蠕变第 3 阶段试件出现裂纹, 最终扩展贯通而破坏, 属于非稳定型蠕变。
- (2) 屈服应力是岩石产生极非稳定型蠕变的一个临界值。
- (3) #5 试件在阶梯加载的蠕变曲线后续段在开始变载处有硬化, 以后逐渐与#6 试件应力水平曲线相同。
- (4) 通过蠕变实验曲线, 采用幂函数拟合, 得到

了经验的本构关系。对蠕变曲线进行分析, 找到了适合的蠕变组合模型, 即西原正夫流变力学模型, 而且模型曲线与实验曲线拟合得很好, 蠕变模型的建立为研究蠕变断裂失稳有重要意义。

参考文献:

[1] 鲜学福. 岩石蠕变断裂失稳研究中几个问题的探讨 [R].2003.1 - 20.

[2] ЯлушкВТо,иноградовВВВ. Разрушение Горных Пород, II[M]. И Прог-нозирование Проявлений Горного Аавления Москва <<Недра>>, 1982,20 - 60.

[3] ТурчаниовИ А,ИофисМ А, КаспарьянЭ В, Основы.Механики Горных Пород [M]. Пенинград<<Недра>> Ленинградское Отделени е, 1989, 15 - 121.

[4] 周晓军. 煤矿冲地压发生条件及其控制的理论与应用研究 [D]. 重庆:重庆大学, 1997.30 - 111.

[5] 徐 平,夏熙伦. 三峡工程花岗岩蠕变特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 1996,18(4):63 - 67.

[6] Boukharov G N, Chand M W, Boukharov N G. The three processes of brittle crystalline rock creep [J]. Int J Rock Mech Min Sic & Geomech Abstr, 1995, 132(4): 325 - 335.

[7] 杨建辉. 砂岩单轴受压蠕变试验现象研究[J]. 石家庄铁道学院学报, 1995,8(2):77 - 80.

[8] 周火明, 徐 平, 王复兴. 三峡永久船闸边坡现场岩体压缩蠕变试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001,20(增): 1882 - 1885.

[9] 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.

[10] 陈 渠. 沉积软岩的三轴蠕变实验研究及分析评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2003,22(6):905 - 912.

[11] Okubo S. Fukui K. Long-term creep test and constitutive equation of Tage tuff[J]. Journal of Mining and Materials, 2002,118(1):36 - 42.

[12] 曹树刚. 岩石蠕变本构关系及改进的西原正夫模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2002,21(5):632 - 634.