

Research Summary of Rock Creep Model and Creep Parameter Identification

Li Cao, Haifeng Lu, Duoxi Yao, Le Zhou, Zedong Xu

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui
Email: 1368725932@qq.com

Received: Aug. 24th, 2018; accepted: Sep. 6th, 2018; published: Sep. 13th, 2018

Abstract

Creep is one of the most important mechanical properties of rocks. According to the characteristics of various rock creep models, the progress of research on rock creep models at home and abroad is summarized, and the main three types of creep models and their applicability are empirical model, component combination model and fracture damage model. The identification methods of creep parameters are introduced and summarized. The problems to be considered in establishing creep model and parameter identification are put forward.

Keywords

Rock, Creep Model, Parameter Identification

岩石蠕变模型及蠕变参数识别研究综述

曹力, 鲁海峰, 姚多喜, 周乐, 徐泽栋

安徽理工大学, 地球与环境学院, 安徽淮南
Email: 1368725932@qq.com

收稿日期: 2018年8月24日; 录用日期: 2018年9月6日; 发布日期: 2018年9月13日

摘要

蠕变特性是岩石重要的力学特性之一。根据各种岩石蠕变模型的特点, 总结了国内外学者对于岩石蠕变模型的研究进展, 介绍了现有主要三种类型的蠕变模型和其适用性, 即经验模型、元件组合模型和断裂损伤模型。对蠕变参数识别方法进行了介绍和总结。提出了建立蠕变模型和参数识别需要考虑的问题。

关键词

岩石, 蠕变模型, 参数识别

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

蠕变是正常应力作用下变形(应变)随时间发展而增加的现象。大量工程实践和研究表明, 岩体的失稳破坏与时间之间密切相关[1]。不同岩体表现出不同的蠕变特性, 差异也很大。目前, 对于岩石蠕变的研究已广泛开展起来, 1939年 Griggs 在对砂岩、泥板岩和粉砂岩等进行了大量蠕变试验后, 发现了岩石蠕变的荷载范围[2]。Okubo 完成了大理岩、砂岩、花岗岩和灰岩等岩石的压缩试验, 获得了岩石加速蠕变阶段的应变-时间曲线[3]。Hayano K 等进行了沉积软岩的长期蠕变试验[4]。对于岩石蠕变模型的研究, 众多学者提出了多个阶段的岩石蠕变模型和蠕变本构关系。这些蠕变模型主要分为经验模型、元件组合模型和断裂损伤模型。对于蠕变模型参数的识别也是研究的一大重点, 各位学者和研究人员根据不同实际情况, 提出许多有实用价值的参数识别方法。经过多年的研究, 关于蠕变模型和参数识别方面的研究十分多样, 本文在前人研究结果的基础上, 对岩石蠕变模型和蠕变参数识别的方法进行分类和总结, 希望能对接下来的岩石蠕变研究提供有意义的帮助和借鉴。

2. 岩石蠕变模型

2.1. 经验模型

蠕变经验模型是在蠕变试验结果基础上, 使用数理拟合的方法, 对岩体的应力、应变与时间建立函数关系式, 也即为岩石蠕变经验方程。经验蠕变模型中主要有老化、流动、硬化和继效等理论, 范广勤对其进行了详细的总结[5]。不同的岩石在不一样的条件下, 可得出不相同的蠕变经验模型。岩石蠕变经验方程的通常形式为:

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

式中, $\varepsilon(t)$ 为总应变, ε_0 为瞬时应变, $\varepsilon_1(t)$ 为减速蠕变阶段应变, $\varepsilon_2(t)$ 为等速蠕变阶段应变, $\varepsilon_3(t)$ 为加速蠕变阶段应变。

经验公式作为建立岩石蠕变模型的一种简单方法, 已经取得了丰硕的成果。吴立新等[6]通过研究煤岩蠕变试验, 发现煤岩蠕变符合对数型经验公式, 得到了煤岩在不同应力条件下的蠕变经验公式参数。茵勇勤等[7]通过对露天边坡软弱夹层蠕变特性的研究, 建立了软弱夹层的蠕变本构方程。张向东等[8]对泥岩进行了三轴蠕变试验, 通过蠕变经验模型得到泥岩的非线性蠕变方程。

蠕变经验模型与相对应的蠕变试验有较好吻合程度, 但只反映了一定应力条件下岩石的蠕变特性, 不能完全反映岩石蠕变破坏的特征。此外, 经验模型只反映岩石减速流变阶段和等速流变阶段, 对岩石损伤累积直至加速蠕变的过程无法描述, 这是当前建立岩石蠕变经验模型的一大缺憾。

2.2. 元件组合模型

元件组合模型是根据蠕变试验曲线通过一系列基本元件, 包括弹性体, 黏性体和塑性体等元件组成

的体系。岩石蠕变的基本元件组合可分成下面四种，即黏性体(Maxwell 体)、粘弹性体(Kelvin 体)、粘塑性体(Bingham 体)和粘弹塑性体。其它的元件模型大多是它们的变种或组合。

1) 基本力学元件

a) 弹性元件由一弹簧组成。用以模拟理想中的弹性物体，它的本构规律符合胡克定律。

b) 粘性元件由一带孔活塞和充满粘液的圆筒组成。用以模拟理想粘性体，它的本构规律符合牛顿定律。

c) 塑性元件由摩擦片组成。用以模拟完全塑性体，其本构规律符合库伦摩擦定律。

2) 组合模型

a) Maxwell 模型

Maxwell 模型是岩石蠕变基础组合模型之一，它是通过一弹簧与一粘壶相串组成。其蠕变方程表达式为：

$$\varepsilon(t) = \left(\frac{t}{\eta} + \frac{1}{E} \right) \sigma_0 \quad (2)$$

式中， σ_0 表示加载的恒定应力。

b) Kelvin 模型

Kelvin 模型岩石蠕变模型另一个基础组合模型，它是由一弹簧与一粘壶相并而成。其蠕变方程表达式为：

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta} t} \right) \quad (3)$$

c) Bingham 模型

当岩石蠕变变形过程出现了等速或加速蠕变时，需要利用通过一个模型开启变形过程，而 Bingham 模型具有该功能。Bingham 模型中粘塑性模型是通过一摩擦片和一粘壶相并而成。当 $\sigma < \sigma_s$ 时，摩擦片没有作用，加速模型不产生作用；当 $\sigma \geq \sigma_s$ 时，摩擦片分离，粘塑性模型变为一个单一粘壶，用来表现岩石材料的粘性特征。其蠕变方程表达式为：

$$\sigma < \sigma_s : \varepsilon = 0, \quad \sigma \geq \sigma_s : \varepsilon = (\sigma - \sigma_s) / \eta_2 \quad (4)$$

采用基础元件来建立岩石的蠕变模型，需要确定采用何种蠕变模型。因为线性蠕变模型的组合元件是线性的，所以不管元件怎么组合，模型所反映的只能是线弹粘塑性的特征，它不能反映岩石蠕变的非线性特征，不能描述岩石的加速蠕变。为解决这一问题，一些学者研究了蠕变非线性元件模型，形成了一定理论。

陈沅江等[9]提出了两类非线性单元器件，即蠕变体和裂隙塑性体，通过结合三种基本元件，得到了一个新的蠕变模型，并给出了相应的本构方程。徐卫亚等[10]进行了绿色片岩的三轴蠕变试验，并通过试验曲线提出了非线性粘弹性单元件，并与塑性体组合得到非线性粘塑性体(NVPB)。范庆忠等[11]发现在岩石蠕变中存在损伤和硬化特征，软岩的非线性蠕变模型是由参数损伤和硬化两个变量来建立。

但是元件模型只是反映一些表象，不能揭示岩石破坏机理。事实上不同的岩石有不同的蠕变特性，用元件模型无法完全说明岩石的复杂性质，它有一定实用范围。元件模型优点是比较直观，在确定模型参数方面还具有一定的困难，使模型变得复杂[12]。

2.3. 断裂损伤模型

前面提到的经验与元件组合模型均建立在岩石表现出的蠕变特性上，其不足以充分描述模型自身的

岩石蠕变机理, 不足以很好的对岩石蠕变变形内在机制进行反映。近年来, 岩石损伤力学和断裂力学不断发展, 使得岩石蠕变损伤等特性可以通过模型建立起来。

应用损伤理论建立的损伤模型, 可以较详细地反映岩石的损伤蠕变性质, 岩石蠕变分析中, 岩石损伤时会导致岩石非弹性流动并使岩石发生蠕变。损伤理论应用于阶段损伤累积, 直至最终发生加速蠕变破坏 [13] [14] [15]。断裂力学是一门研究材料裂纹强度及裂纹扩展方面的学科。由于岩石的非连续性和非均质性, 采用断裂力学的方法来研究岩石流变机理是很有必要的, 在岩石的断裂蠕变模型中的研究也有了许多成果。

Kachanov 在 1958 年提出了连续损伤因子和有效应力观点, 并将其应用于金属蠕变断裂的研究中, 取得了很好的效果。之后许多人对这一理论进行了广泛的应用和发展。缪协兴和陈至达 [16] 在进行相关试验的基础上, 得出了能反映损伤历史的蠕变模量参数, 建立了岩石蠕变损伤方程。杨春和等 [17] 对谢和平 [18] 研究的岩石蠕变损伤模型进行改进, 建立了一种能反映盐岩蠕变全过程的蠕变损伤模型, 且模型参数较少, 便于从实验中求取。Turcotte 等 [19] 建立了一个一维损伤模型, 随后 Amitrano 和 Helmstetter [20] 和 Xu [21] 等在 Turcotte 模型的基础上扩展到了 2 维情况, 发现了能够描述岩石蠕变损伤的模型。王来贵等 [22] 利用微分方程建立了单轴和三轴条件下岩石应力应变全过程中的非线性蠕变损伤模型, 讨论了蠕变损伤过程中模型参数的变化规律及其稳定性。刘桃根等 [23] 应用损伤力学理论, 建立了改进 Kachanov 蠕变损伤模型和统计损伤模型。

3. 蠕变模型参数识别

蠕变实验作为研究岩石蠕变力学性质的一大方法, 受到了研究者的广泛关注。根据蠕变试验提供的实验数据, 建立了合适的蠕变模型, 并给出了相应的蠕变参数, 这一直是岩石蠕变领域的一个重要课题。一种好的技术方法对参数辨识有着深远的影响。目前, 蠕变模型参数识别的常用方法有回归反演法、最小二乘法, 流变曲线分解法和极大似然法, 其中回归反演法和最小二乘法最为常用。识别方法有数值方法和解析方法。

3.1. 回归反演法

回归反演法主要通过建立回归方程与蠕变本构方程间的相互联系, 联立解出蠕变方程中的蠕变参数。向文等 [24] 结合解析反演法和智能反演法的优点, 耦合两种方法, 建立起岩体蠕变参数的解析-智能反演法, 准确识别了岩体的蠕变参数。王怡 [25] 等通过参数反演对花岗及片岩两种岩石的室内蠕变分级加载试验曲线进行了流变参数的识别。

3.2. 最小二乘法

由于最小二乘法的精度高, 已成为目前蠕变参数识别应用最广泛的方法, 但在计算中需要给出参数的初始值。线性问题的初值选择较为简单, 但在非线性最小二乘法问题中使用时, 初始参数选择是第一个问题, 一旦选取不合适, 则导致迭代的无法收敛。目前, 曲线拟合中最著名和常用的软件包括 Matlab 和 OriginPro, 都是采用最小二乘法。最小二乘法中最常用的方法就是经典拟牛顿(BFGS)。

BFGS 算法于 1970 年由 Broyden, Fletcher, Goldfarb, Shanno 提出, 该算法收敛速度快, 有较好的计算效果。其基本原理为: 依据给定的搜索方向和搜索方向的长度, 进行多次线性迭代。张青 [26] 等通过 BFGS 法中的 matlab 编程, 实现了煤岩单轴压缩蠕变实验的 Burgers 蠕变模型的参数识别。薛凯喜 [27] 通过 Matlab 编写 Quasi-Newton 优化算法(BFGS)实现了非线性粘弹塑性蠕变模型的参数识别。

4. 结论

针对岩石蠕变的性质, 国内外研究学者进行了大量的研究工作, 提出了许多不同类型的岩石蠕变模

型。由于不同岩石性质有很大差异,因此在研究时需要针对不同岩石性质选用合适的岩石蠕变模型。本文通过查阅资料,对于众多学者的研究内容在蠕变模型和蠕变参数识别方法方面进行较为系统的总结。蠕变模型主要分为经验模型、元件组合模型和断裂损伤模型,蠕变参数识别方法有回归反演法和最小二乘法。

1) 经验模型是建立岩石蠕变模型的最简单方法,取得的成果也较为丰富。虽然经验模型与相关试验较为契合,但它只能描述岩石在特定应力路径和状态下的蠕变特性,很难描述岩石蠕变破坏的机理和特征。

2) 元件组合模型是根据流变试验曲线采用一系列基本元件模型组合形成的模型。但元件模型只描述一些表象,不能描述岩石破坏的机理。元件模型的优点是比较直观,但是蠕变模型参数的辨识比较困难,使得模型越发复杂。并且很难将模型中的弹性、塑性和黏性元件分离开。

3) 使用损伤理论建立的蠕变损伤模型能较好地描述岩石的蠕变损伤特征,并考虑岩石的变形、位移、变形硬化和变形恢复、损伤机制。

4) 蠕变模型的参数的识别一直是蠕变学方面的重要研究,目前主要采用的方法有回归反演法和最小二乘法。回归反演法主要用于线性蠕变本构方程参数的识别,通过寻找回归方程和蠕变本构方程间的联系,建立方程组并求解蠕变参数。但是对于非线性蠕变方程参数的识别存在一定困难。最小二乘法对于线性和非线性蠕变本构方程参数的识别都适用,但是在识别非线性蠕变参数时,需要选取合适的初试参数。

参考文献

- [1] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [2] Griggs, D.T. (1939) Creep of Rocks. *Journal of Geology*, **47**, 225-251. <https://doi.org/10.1086/624775>
- [3] Okubo, S., Nishimatsu, Y. and Fukui, K. (1991) Complete Creep Curves under Uniaxial Compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **28**, No. 1. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(91\)93235-X](https://doi.org/10.1016/0148-9062(91)93235-X)
- [4] Hayano, K. and Matsumoto, M. (1999) Study of Triaxial Creep Testing Method and Model for Creep Deformation on Sedimentary Soft Rock. *Proceedings of the 29th Symposium of Rock Mechanics, Committee of Rock Mechanics, Japan Society of Civil Engineers (JSCE)*, Tokyo, 8-14.
- [5] 范广勤. 岩土工程流变力学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
- [6] 吴立新, 王金庄, 孟顺利. 煤岩流变模型与地表二次沉积研究[J]. 地质力学学报, 1997(3): 29-35.
- [7] 茵勇勤, 徐小荷, 马新民, 等. 露天煤矿边坡中软弱夹层的蠕变变形特性分析[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 1999, 20(6): 612-614.
- [8] 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(10): 1635-1639.
- [9] 陈沅江, 潘长良, 曹平, 等. 软岩流变的一种新力学模型[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 209-214.
- [10] 徐卫亚, 杨圣奇, 谢守益, 等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究(II): 模型分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 693-698.
- [11] 范庆忠, 高延法. 软岩蠕变特性及非线性模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 391-396.
- [12] Tsai, L.S., Hsieh, Y.M., Weng, M.C., et al. (2008) Time-Dependent Deformation Behaviours of Weak Sandstones. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **45**, 144-154. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.04.008>
- [13] Chars, K.S., Bodner, S.R., Fossum, A.F., et al. (1992) A Constitutive Model for Inelastic Flow and Damage Evolution in Solids under Triaxial Compression. *Mathematics of Mathematics*, No. 14, 1-14.
- [14] Chan, K.S., Brodsky, N.S., Fossum, A.F., et al. (1994) Damage-Induced Non-Associated Inelastic Flow in Rock Salt. *International Journal of Plasticity*, No. 10, 623-642. [https://doi.org/10.1016/0749-6419\(94\)90026-4](https://doi.org/10.1016/0749-6419(94)90026-4)
- [15] Fossum, A.F., Brodsky, N.S., Fossum, A.F., et al. (1993) Experimental Evaluation of a Constitutive Model for Inelastic Flow and Damage Evolution in Solids Subjected to Triaxial Compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, **30**, 1341-1344. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(93\)90119-X](https://doi.org/10.1016/0148-9062(93)90119-X)

- [16] 缪协兴, 陈至达. 岩石材料的一种蠕变损伤方程[J]. 固体力学学报, 1995(4): 343-346.
- [17] 杨春和, 陈锋, 曾义金. 盐岩蠕变损伤关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1602-1604.
- [18] 谢和平. 岩石混凝土损伤力学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.
- [19] Turcotte, D.L., Newman, W.I. and Shcherbakov, R. (2003) Micro and Macroscopic Models of Rock Fracture. *Geophysical Journal International*, **152**, 718-728. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01884.x>
- [20] Amitrano, D. and Helmstetter, A. (2006) Brittle Creep, Damage, and Time to Failure in Rocks. *Journal of Geophysical Research*, **111**, B11201. <https://doi.org/10.1029/2005JB004252>
- [21] Xu, T., Tang, C.A., Zhao, J., et al. (2012) Modelling the Time-Dependent Rheological Behaviour of Heterogeneous Brittle Rocks. *Geophysical Journal International*, **189**, 1781-1796. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05460.x>
- [22] 王来贵, 赵娜, 何峰, 等. 岩石蠕变损伤模型及其稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2009, 34(1): 64-68.
- [23] 刘桃根, 王伟, 吴斌华, 等. 基于损伤力学的砂岩蠕变模型研究与参数辨识[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2010(6): 55-60.
- [24] 向文, 张强勇, 张建国. 坝区岩体蠕变参数解析-智能反演方法及其工程应用[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1505-1512.
- [25] 王怡, 王芝银, 韩冰. 岩石三轴蠕变试验黏弹性解析及参数识别[J]. 力学与实践, 2008(4): 20-23 + 43.
- [26] 张青. 高地应力区煤岩蠕变特性试验及蠕变参数识别[J]. 陕西煤炭, 2016, 35(2): 60-62
- [27] 薛凯喜, 赵宝云, 刘东燕, 等. 岩石非线性拉、压蠕变模型及其参数识别[J]. 煤炭学报, 2011, 36(9): 1440-1445.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2330-1724, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ojs@hanspub.org