

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.04.014

真实水环境下红层软岩蠕变模型辨识 与参数确定

肖欣宏¹, 王 静², 白志华¹, 苏卫强², 周家文¹

(1. 四川大学 水利水电学院 水力学与山区河流开发保护重点实验室, 四川 成都 610065;

2. 云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021)

摘要: 采用轴压水压联合作用岩石流变试验系统进行了滇中地区红层软岩室内压缩蠕变试验。研究表明:真实水环境下红层软岩在破裂应力水平之前具有黏弹性特征,在破裂应力水平下表现出非线性黏弹塑性特征;Burgers模型和非线性黏弹塑性模型可以准确地描述软岩在真实水环境下三个蠕变阶段的力学特性,模型拟合效果较好;蠕变参数随加载应力不断变化反映出岩石内部损伤不断加剧、累积,力学性能不断劣化的演变过程。

关键词: 岩石力学;蠕变模型;红层软岩;水环境;模型辨识

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)04—0082—06

Creep Model Identification and Parameter Determination of Red Layer Soft Rock in Real Water Environment

XIAO Xinhong¹, WANG Jing², BAI Zhihua¹, SU Weiqiang², ZHOU Jiawen¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;

2. Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming, Yunnan 650021, China)

Abstract: Compressive creep tests of red beds soft rock from central Yunnan were carried out by using rock rheological test system under combined action of axial compression and hydraulic pressure. Based on the creep curves of mudstone samples, Burgers linear viscoelastic model is selected to describe the characteristics of decaying creep and steady creep of the rock. And a nonlinear viscoplastic model is obtained by introducing a nonlinear viscoelasto-plastic model in series with Burgers model to describe the accelerative creep characteristics of rocks. Finally, the creep parameters under different stress paths are calculated by fitting the test curves based on the least square method. The results show that the red bed soft rock under real water environment has viscoelastic characteristics before the fracture stress level, and nonlinear viscoelasto-plastic characteristics under the fracture stress level. Burgers model and nonlinear viscoelasto-plastic model can accurately describe the mechanical properties of soft rock during three creep stages in real water environment. The variable creep parameters reveal the accumulation of rock interior damage and the deteriorative process of mechanical properties.

Keywords: rock mechanics; creep model; red bed soft rock; water environment; model identification

大型岩土工程的建设给岩石流变力学理论的研究带来机遇与挑战。岩石蠕变模型是岩石流变力学理论的重要组成部分,根据岩石蠕变试验结果,建立

符合实际的蠕变模型并确定相应的模型参数是促进工程建设的顺利进行并确保其长期稳定性的重要举措^[1-2]。目前,岩石蠕变模型建立方法主要为经验

模型法和元件组合模型法,其中元件组合模型具有概念直观、格式简洁、物理意义明确等优点,是目前应用最为广泛的岩石蠕变模型建立方法^[3-4]。但是元件组合模型中的基本元件都是线性本构关系,无论如何组成都无法描述岩石蠕变的非线性特征。针对这一问题,研究人员已提出一些可以描述岩石加速蠕变特性的非线性元件模型,例如徐卫亚等^[5]将一个非线性黏塑性体与五元件线性黏弹性模型串联得到一个新的岩石非线性黏弹塑性蠕变模型,该蠕变模型可以充分反映三轴压缩下绿片岩的加速蠕变特性。余成学等^[6]基于岩石蠕变时效强度理论和Kachanov损伤理论建立了能描述单轴压缩下大理岩三阶段蠕变过程的非线性黏弹塑性蠕变模型。蒋昱州等^[7]提出将一个非线性黏滞系数的牛顿体与元件模型组合,得到一个能反映大理岩三轴蠕变特性的非线性黏弹塑性蠕变模型。周家文等^[8]通过改进广义Bingham模型得到了能描述绿片岩加速蠕变特性的非线性蠕变模型。上述研究成果进一步推动了岩石蠕变模型理论的发展,但受制于试验设备,岩石蠕变模型的建立多是基于单轴压缩、三轴压缩或者剪切荷载作用下的蠕变试验结果,而没有考虑水环境对岩石蠕变试验结果的影响。大量试验及工程实践表明水对岩石产生物理、化学及力学作用,改变了岩石的微观物质结构组成及宏观力学性质,而岩土工程围岩常会与水直接接触,如深埋引水隧洞围岩、高坝坝基岩体、深水库岸岩体等^[9-11]。因此,开展真实水环境下岩石蠕变试验,研究适应于该环境下的蠕变模型具有重要的工程实际意义^[12]。

本文以滇中红层软岩地区所取泥岩试样为研究对象,采用四川大学自主研发的轴压水压联合作用岩石流变试验系统进行了真实水环境下红层软岩分级加载蠕变试验。基于试验结果,分别选取Burgers线性黏弹性模型以及新构建的非线性黏弹塑性模型对泥岩分级加载全过程的蠕变特性进行了描述。最后,基于Origin数据分析软件中的最小二乘法拟合工具对泥岩试样蠕变模型参数进行了识别与分析。研究成果为真实水环境下软岩流变机理的研究及岩体工程的流变数值计算奠定基础。

1 软岩蠕变试验方案及结果

1.1 试验方案

本次研究以滇中地区所取泥岩岩芯为依托,根据国际岩石力学学会试验标准规程,制备得到直径50 mm、高度100 mm的圆柱形试件。室内蠕变试验

采用四川大学自主研发的微机控制多通道轴压水压联合作用岩石流变试验系统(YSL-200)。该试验系统主要包括静油压加载系统、静水压加载系统以及高精度光栅变形测量系统。静油压加载系统通过压缩油缸对岩石试样进行轴向加载,静水压加载系统通过加压承压筒内的介质水环境对密封于筒内的岩石试样施加围压,高精度光栅变形测量系统用于测量岩石在长时间的轴向压力和水压联合作用下的变形情况。该设备进行的岩石流变试验与传统仪器的不同之处在于,其能通过静水压加载系统直接向岩石试样施加环向水压荷载,承压筒内的水既作为提供围压的工作液体,又充当水岩相互作用的浸泡溶液,除发生水岩物理化学作用外还给岩石提供了真实水环境所存在的静水压力作用和动水压力的冲刷作用,能够有效模拟实际工程中岩石在静水压及渗流作用下的长期流变现象。

实际工程中水头高度十几米到几百米不等,考虑到水头的折减,本次研究水压分别设置为0.5 MPa、1.0 MPa、和2.0 MPa三个级别。试验加载采用分级加载的方式,初始轴向荷载根据瞬时强度试验确定为30 kN,此后逐级递增5 kN。分级加载方法一般是待上一级轴向荷载下蠕变稳定或者达到试验预先设定的加载周期后再进行下一级增量的加载,研究表明^[13],软岩在加载的24 h内即可完成衰减蠕变进入稳态蠕变,故本次试验设定加载周期为24 h,达到后即施加下一级荷载,直至试样发生蠕变破坏。

1.2 试验结果

采用轴压水压联合作用岩石流变试验系统对泥岩试样进行了分级加载蠕变试验,基于Boltzmann叠加原理得到了不同轴压及水压下泥岩试样蠕变曲线,如图1所示。

由图1分析可知,各级轴压下试样在加载瞬间均产生瞬时应变,此后随着时间的增加产生蠕变变形。在低轴压水平下,岩石以瞬时变形为主,蠕变变形量较小,瞬时应变占轴向总应变的80%以上。试样在前几级轴压加载下出现了流变速率随时间减小的衰减蠕变阶段和流变速率近似不变的稳态蠕变阶段,只有在最后一级加载条件下出现了流变速率急剧增大的加速蠕变阶段。最后一级加载条件下出现的加速蠕变阶段,虽然蠕变历时较短,但蠕变变形量远大于前几级轴压下的蠕变量。分析不同轴压下试样的蠕变特性,发现随着加载轴压的增大,试样瞬时应变、总应变以及蠕变应变均呈增大的趋势。

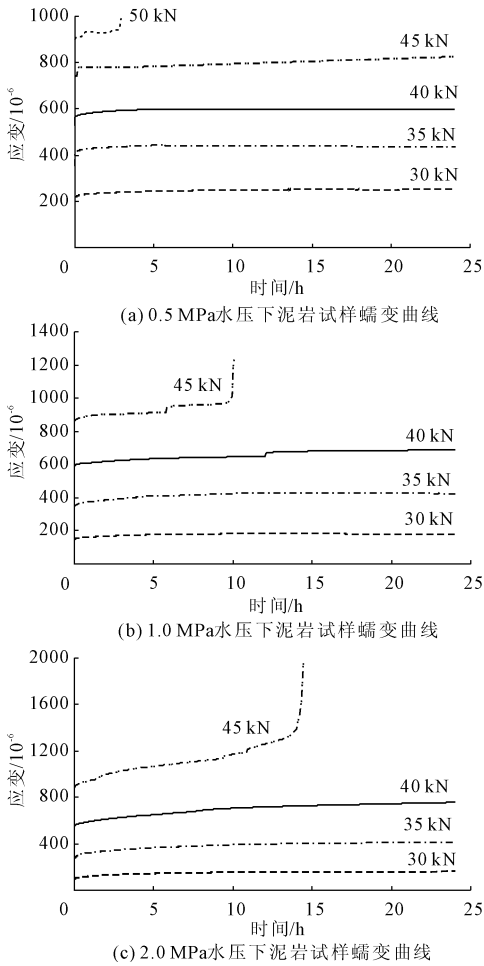


图 1 泥岩试样分级加载蠕变试验结果

2 红层软岩蠕变模型辨识

2.1 软岩蠕变变形特征分析

岩石蠕变模型辨识是指根据岩石蠕变试验所反映的蠕变特性来选择或建立相应的本构模型。根据红层软岩在真实水环境下的蠕变试验结果,结合图 1 的试样分级加载蠕变曲线可知:

(1) 试样在每级应力加载瞬间均产生弹性应变,且该值的大小与作用在试样上的应力水平直接相关,表明蠕变模型中含有弹性元件。

(2) 在恒定应力作用下,试样轴向应变随时间逐渐增大,表明流变模型中含有黏性元件。

(3) 在低应力水平下,随着时间的增加,应变速率逐渐减小,轴向应变逐渐趋于稳定,出现衰减蠕变阶段;在较高应力水平下,应变随着时间的增长不收敛于某定值,而是以某一蠕变速率不断增大,出现了稳态蠕变阶段。

(4) 在最后一级加载应力水平下,试样轴向应变随时间不断增大且出现了加速蠕变阶段,试样变形呈非线性急剧增大直至发生破坏。

根据上述分析,在低于岩石破裂应力水平时,岩石表现出瞬时变形、衰减蠕变和稳态蠕变特性,表明其具有典型的黏弹性特征;而在最后一级加载应力水平下,岩石除前面两种蠕变阶段外还出现了加速蠕变阶段,变形急剧增大直至破坏,表现出典型的非线性黏弹塑性特征。

常见的黏弹性流变模型有 Maxwell 模型、Kelvin 模型、广义 Kelvin 模型、Burgers 模型等,其中 Kelvin 模型无法描述瞬时弹性变形;Maxwell 模型无法描述衰减蠕变阶段;广义 Kelvin 模型和 Burgers 模型常用来描述岩石线性黏弹性特征,但广义 Kelvin 模型主要描述瞬时变形和衰减蠕变阶段,而 Burgers 模型相较广义 Kelvin 模型多串联了一个黏性元件,使其能充分描述岩石瞬时变形、衰减蠕变和稳态蠕变阶段。因此,本文采用 Burger 模型来描述破裂应力水平之前的泥岩试样在真实水环境下的蠕变特性。

由图 1 分析可知,不同水压作用下,岩样在最后一级加载应力条件下均出现了加速蠕变阶段,试样变形呈非线性急剧增大直至发生破坏,表现出典型的非线性黏弹塑性特征。由于元件组合模型均是线性本构关系,其无法描述岩石的加速蠕变阶段,因此需要通过对元件模型改造建立新的非线性蠕变模型。基于非线性蠕变模型的建立方法^[14-15],本文决定引入一个非线性黏塑性体,将其与 Burgers 模型串联,建立一个非线性黏弹塑性蠕变模型使其能够全面反映红层软岩在真实水环境下的瞬时变形、衰减蠕变、稳态蠕变以及加速蠕变特征。

2.2 软岩线性黏弹性蠕变模型

根据红层软岩蠕变曲线特征的分析,真实水环境下红层软岩在破裂应力水平之前表现为黏弹性特征。Burgers 是由 Maxwell 模型和 Kelvin 模型串联而成的黏弹性体,能够较好地描述岩石瞬时应变、衰减蠕变和稳态蠕变特征,其力学模型见图 2。

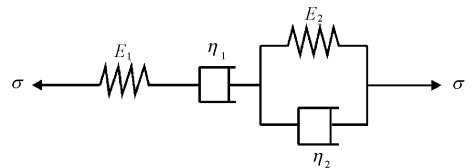


图 2 Burgers 模型

Burgers 模型的一维本构方程为:

$$\sigma + \left(\frac{\eta_1}{E_1} + \frac{\eta_1 + \eta_2}{E_2} \right) \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2} \ddot{\sigma} = \eta_1 \dot{\varepsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_2} \ddot{\varepsilon} \quad (1)$$

式中: E_1 为瞬时弹性模量; E_2 为黏弹性模量; η_1 、 η_2 均为黏性系数,表示流变趋向稳定的快慢程度,数值

越小,则趋向稳定的时间越短; σ 为作用在岩样上的偏应力。

根据式(1) 可得 Burgers 模型一维蠕变方程为:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{\eta_1}t + \frac{\sigma}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2 t}{\eta_2}\right) \right] \quad (2)$$

2.3 软岩非线性黏弹塑性蠕变模型

本文在 Burgers 蠕变模型的基础上,串联一个非线性黏塑性体组成一个非线性黏弹塑性蠕变模型,用以反映真实水环境下红层软岩在破裂应力水平下的蠕变特性。岩石加速蠕变阶段曲线特征通常可用幂函数来表示^[5,16],结合相关研究成果^[15,17-18],将非线性黏性元件与塑性元件并联即可得到一个能够反映加速蠕变特性的非线性黏塑性模型,如图 3 所示。

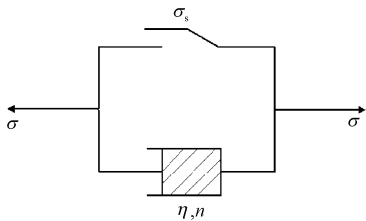


图 3 非线性黏塑性模型

上述非线性黏塑性模型蠕变方程为:

$$\varepsilon(t) = \frac{H(\sigma - \sigma_s)}{\eta} \frac{t^n}{t_0^{n-1}} = \frac{H(\sigma - \sigma_s)}{\eta} t^n \quad (3)$$

式中: n 定义为流变指数,反映岩石加速蠕变速率的快慢程度,当 $n = 1$ 时,该模型应变与时间为线性关系;当 $n > 1$ 时,随着时间的增长,应变速率逐渐增大;当 $n < 1$ 时,随着时间的增长,应变速率逐渐减小。 t_0 为参考时间,这里取为 1; σ 为加载应力; σ_s 为屈服应力或长期强度; H 的表达式如式(4) 所示:

$$H(\sigma - \sigma_s) = \begin{cases} 0, & \sigma \leq \sigma_s \\ \sigma - \sigma_s, & \sigma > \sigma_s \end{cases} \quad (4)$$

将上述非线性黏塑性模型与 Burgers 模型串联即可得到一个非线性黏弹塑性蠕变模型,如图 4 所示,该模型能够全面地反映真实水环境下红层软岩在破裂应力水平下的衰减蠕变、稳定蠕变和加速蠕变特性。

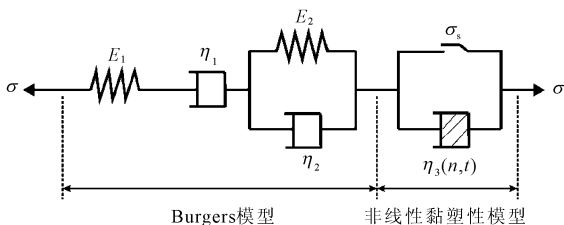


图 4 非线性黏弹塑性模型

由图 4 可知,当 $\sigma < \sigma_s$ 时,非线性黏塑性模型不起作用,此时该模型退化为 Burgers 模型;当 $\sigma >$

σ_s ,非线性黏塑性模型发挥作用,与 Burgers 模型构成非线性黏弹塑性模型,用以反映岩石加速蠕变特性。该模型的应力应变关系满足下列关系式:

$$\begin{cases} \sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 \\ \sigma_2 = \eta_1 \dot{\varepsilon}_2 \\ \sigma_3 = E_2 \varepsilon_3 + \eta_2 \dot{\varepsilon}_3 \\ \sigma_4 = \sigma_s + \eta_3 \frac{\dot{\varepsilon}_4}{nt^{n-1}} \\ \sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_4 \\ \varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 \\ \dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_1 = \dot{\varepsilon}_2 = \dot{\varepsilon}_3 = \dot{\varepsilon}_4 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ 分别为从左到右依次串联元件的应力; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ 分别为从左到右依次串联元件的应变; σ 和 ε 为模型总应力和总应变; E_1, E_2 和 η_1, η_2, η_3 为材料的弹性和黏性系数。

由式(5) 可得非线性黏弹塑性模型一维蠕变本构方程为:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{\eta_1}t + \frac{\sigma}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2 t}{\eta_2}\right) \right] + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_3} t^n \quad (6)$$

3 红层软岩蠕变模型拟合结果与参数分析

3.1 软岩蠕变模型拟合结果

本文采用 Origin 数据分析软件中的非线性最小二乘法拟合工具,通过在拟合工具编辑器中自定义蠕变模型表达式来对每一级加载应力下的试验曲线进行模型参数估计。当加载应力未达到岩样破裂水平时,采用式(2) 的 Burgers 线性黏弹性蠕变模型进行参数估计;在最后一级加载应力作用下,试样蠕变曲线经历了衰减蠕变、稳态蠕变和加速蠕变 3 个阶段,需要采用式(6) 的非线性黏弹塑性蠕变模型进行参数估计。图 5 为 2 MPa 水压下不同轴压岩样试验曲线和模型拟合曲线的对比图。

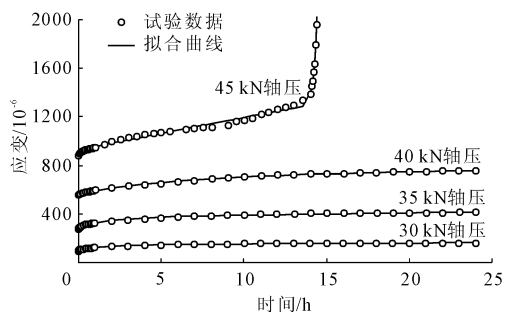
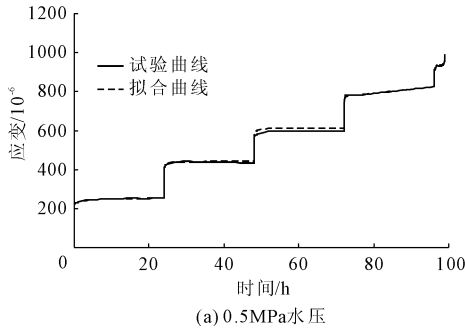


图 5 2 MPa 水压岩样蠕变试验曲线与拟合曲线

由图 5 分析可知, Burgers 模型和建立的非线性黏弹塑性模型可以较好地反映岩样在不同加载应力水平下的蠕变特性, 蠕变试验曲线和模型拟合曲线高度吻合。前 3 级加载应力采用 Burgers 模型进行拟合, 从图中可以看到, 拟合曲线能直观地体现出瞬时变形、衰减蠕变和稳态蠕变特征, 与试验曲线吻合度较高; 最后一级加载应力采用非线性黏弹塑性模型进行拟合, 拟合曲线能有效地描述出岩样的加速蠕



变特性。各级轴压下模型拟合参数相关系数 R^2 均较高, 30 kN ~ 45 kN 轴压条件下的相关系数 R^2 依次为 0.990、0.987、0.997 以及 0.941, 可见所建立模型可以较好地反映真实水环境下红层软岩的蠕变特性。图 6 为 0.5 MPa 及 1.0 MPa 水压下的岩样蠕变试验曲线与拟合曲线全过程对比图, 由图 6 可知, 该模型在不同水压环境下均可有效描述泥岩的蠕变全过程特性, 拟合效果良好, 多组相关系数均在 0.94 以上。

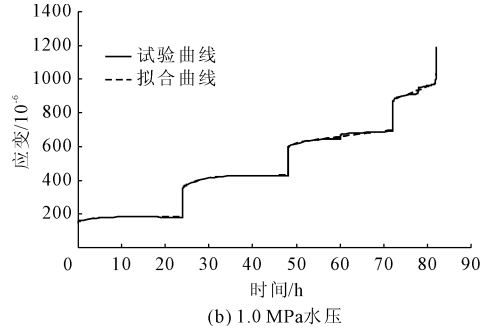


图 6 不同水压下岩样蠕变试验曲线与拟合曲线全过程对比图

3.2 软岩蠕变模型参数分析

基于 Origin 数据分析软件中的非线性最小二乘法拟合工具, 可以得到不同应力路径下软岩试样的

蠕变模型参数, 表 1 为 2 MPa 水压下 Burgers 模型和非线性黏弹塑性模型参数估计结果。

表 1 2 MPa 水压下软岩试样蠕变模型参数估计

轴压/kN	E_1/GPa	$\eta_1/(\text{GPa} \cdot \text{h})$	E_2/GPa	$\eta_2/(\text{GPa} \cdot \text{h})$	$\eta_3/(\text{GPa} \cdot \text{h})$	n
30	21.6	19126.5	290.4	522.4	—	—
35	21.4	7839.7	192.3	363.0	—	—
40	19.6	11808.6	116.3	774.9	—	—
45	18.6	800.7	501.2	270.2	9.7×10^{92}	79.9

表 1 数据表明, 试样蠕变参数随加载轴压不断变化, 从损伤力学的角度来看, 蠕变参数的变化反映了岩石内部损伤不断加剧, 材料特性不断劣化的演变过程。上表中, E_1 反映的是泥岩试样的瞬时弹性模量, 由表中数据可知, 在水压一定的情况下, 随着轴压的增大, 瞬时弹性模量 E_1 逐渐减小。本次试验采用分级加载的方式, 随着轴压的增大, 岩样内部产生的损伤越多, 作用时间越长, 损伤累积得也越多, 岩石力学性能逐渐下降, 导致其瞬时弹性模量减小。

参数 η_1 反映的是岩样稳态蠕变阶段的蠕变速率, 可由下式表示:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\eta_1} \quad (7)$$

根据表中数据, 在水压一定的情况下, 随着应力水平的增加, $\dot{\varepsilon}$ 总体上是呈增大的趋势, 表明试样稳态蠕变速率随应力水平的增大而增大。

参数 E_2 表示的是试样蠕变阶段的黏弹性模量,

η_2 为黏性系数, 表示流变阶段变形趋向稳定的快慢程度。通常用 η_2 与 E_2 的比值来反映岩石达到稳态蠕变阶段所用时间的长短:

$$T_h = \frac{\eta_2}{E_2} \quad (8)$$

根据表中数据, 蠕变参数 E_2 和 η_2 随加载轴压的变化规律不明显; 经计算 2 MPa 水压下试样达到稳态蠕变阶段所需时间约为 0.54 h ~ 6.66 h。

4 结 论

(1) 真实水环境下红层软岩分级加载时蠕变在破裂应力水平之前具有黏弹性特征, 在破裂应力水平下具有非线性黏弹塑性特征。

(2) Burgers 模型能够有效地描述真实水环境下软岩在破裂应力水平之前的瞬时变形、衰减蠕变和稳态蠕变特性; 构建的非线性黏弹塑性流变模型能准确地描述软岩在最后一级加载应力下所体现的

非线性加速蠕变特性。

(3) 基于 Origin 数据分析软件中的非线性最小二乘拟合功能所建立模型能较好地描述软岩试样各级应力水平下的蠕变特性,试验曲线和模型拟合曲线高度吻合,多组相关系数均在 0.94 以上。

(4) 岩石蠕变参数随应力水平不断变化,相同围压下,瞬时弹性模量 E_1 随加载应力的增大而减小;黏性系数 η_1 决定的稳态蠕变速率随加载应力的增大而增大。

参考文献:

[1] Shao J F, Zhu Q Z, Su K. Modeling of creep in rock materials in terms of material degradation [J]. Computers and Geotechnics, 2003,30(7):549-555.

[2] 李亚丽,于怀昌,刘汉东. 三轴压缩下粉砂质泥岩蠕变本构模型研究[J]. 岩土力学,2012,33(7):2035-2040.

[3] 孙 钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(6):1081-1106.

[4] 夏才初,王晓东,许崇帮,等. 用统一流变力学模型理论辨识流变模型的方法和实例[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(8):1594-1600.

[5] 徐卫亚,杨圣奇,褚卫江. 岩石非线性黏弹塑性流变模型(河海模型)及其应用[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(3):433-447.

[6] 余成学. 岩石非线性黏弹塑性蠕变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(10):2006-2011.

[7] 蒋昱州,张明鸣,李良权. 岩石非线性黏弹塑性蠕变模型研究及其参数识别[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(4):832-839.

[8] 周家文,徐卫亚,杨圣齐. 改进的广义 Bingham 岩石蠕变模型[J]. 水利学报,2006,37(7):827-830.

[9] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.

[10] 周翠英,谭祥韶,邓毅梅,等. 特殊软岩软化的微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(3):394-400.

[11] 田 佳. 深埋软岩供水隧洞蠕变特性研究进展[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(4):182-189.

[12] 于超云,唐世斌,唐春安. 荷载与水共同作用对红砂岩蠕变特性的影响[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(1):24-29.

[13] Tsai L S, Hsieh Y M, Weng M C, et al. Time - dependent deformation behaviors of weak sandstones [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008,45(2):144-154.

[14] 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.

[15] 宋勇军,雷胜友,韩铁林. 一种新的岩石非线性黏弹塑性流变模型[J]. 岩土力学,2012,33(7):2076-2080.

[16] 朱昌星,阮怀宁,朱珍德,等. 一种新的非线性黏弹塑性流变模型[J]. 长江科学院院报,2008,25(4):53-55.

[17] 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.

[18] 唐 佳,彭振斌,何忠明. 基于岩体蠕变试验的 Burgers 改进模型[J]. 中南大学学报(自然科学版),2017,48(9):2414-2424.

(上接第 58 页)

[8] 王 湛. 软土地层中盾构隧道结构沉降与变形机制分析[D]. 杭州:浙江大学,2013.

[9] 魏子新,王寒梅,吴建中,等. 上海地面沉降及其对城市安全影响[J]. 上海地质,2009(1):34-39.

[10] 高超,陈 涛,翟 超,等. 建筑工程施工对临近地铁安全性影响因素分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(3):77-80,125.

[11] 杨 喜,朱 颖. 盾构隧道下穿高铁桥梁安全影响分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(6):212-218.

[12] 葛世平,王如路,刘建航. 抓紧地铁隧道渗漏和不均

匀沉降的监测预警和有效治理[J]. 城市轨道交通研究,2012,15(3):4.

[13] 曹文宏,申伟强. 长大隧道安全保护条例制订初议[J]. 地下工程与隧道,2012(1):1-5,55.

[14] 林晓东,李晓军,林 浩. 集成 GIS/BIM 的盾构隧道全寿命管理系统研究[J]. 隧道建设(中英文),2018,38(6):963-970.

[15] 汪小兵,王如路,刘建航. 上海软土地层中运营地铁隧道不均匀沉降的治理方法[J]. 上海交通大学学报,2012,46(1):26-31.