

红层泥岩剪切蠕变特性及非定常本构模型研究

李 宁¹, 张慧莉¹, 张茂建¹, 江 宇², 樊 勇³, 沐红元³

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;

3. 云南省水利水电勘测设计研究院, 昆明 650021)

摘要: 滇中红层泥岩具有显著的流变特性, 会给当地工程建设带来安全隐患。选取狮子山隧洞段的红层泥岩进行分级加载蠕变试验, 对其蠕变特性开展研究。结果表明, 在较低应力状态下, 岩样主要表现为衰减蠕变, 而在较高应力状态下, 岩样将发生从衰减蠕变、等速蠕变直至加速蠕变破坏的全过程蠕变。对岩样各阶段变形数据进行回归分析, 建立拟合方程, 发现岩样各阶段变形具有显著的非线性变形特性。根据岩样的非线性变形特性提出了 1 个指数型加速元件, 通过与 Bingham 体中的黏性元件串联形成改进的 Bingham 体, 使其能克服传统 Bingham 体模拟加速阶段存在的不足, 并同时 Hoek 体及 Kelvin 体进行非线性改进, 然后通过将非线性 Hoek 体、Kelvin 体与改进 Bingham 体串联, 建立了 1 个能够描述滇中红层泥岩蠕变特性的非线性、非定常黏弹塑性岩石蠕变模型。通过与不同剪应力下红层泥岩的蠕变试验曲线进行比较, 发现理论模型得到的结果与试验数据吻合较好, 表明所建模型对于滇中红层泥岩具有较好的适用性。

关键词: 红层泥岩; 剪切蠕变试验; 非线性加速元件; 改进 Bingham 体; 非线性; 非定常本构模型

中图分类号: U 451.2

文献标志码: A

Shear creep properties and its unsteady constitutive model of the red mudstone

LI Ning¹, ZHANG Huili¹, ZHANG Maojian¹, JIANG Yu², FAN Yong³, MU Hongyuan³

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Yunnan Institute of Water & Hydropower

Engineering Investigation, Design & Research, Kunming 650021, China)

Abstract: Red mudstone in central Yunnan has significant rheology properties, which can bring hazards to the engineering construction. Using step loading shear creep experiments, the shear creep characteristics of the red mudstone, which from ShiziShan tunnel section, were investigated. The results showed that, the rock samples mainly exhibited decay creep at smaller stresses, while it would undergo the whole process of creep from decay creep, steady creep to accelerate creep damage at larger stresses. Regression analysis was conducted on the deformation data of each stage of the rock sample, and a

收稿日期: 2022-11-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40872179, U1765110); 上海市自然科学基金资助项目(16ZR1423300)

第一作者: 李 宁(1982-), 男, 讲师。研究方向: 地下工程、隧道工程。E-mail: lining0017@usst.edu.cn

fitting equation was established, and it was found that the deformation of rock samples at each stage was nonlinear. In accordance with the nonlinear deformation properties of the rock sample, an exponential acceleration element was proposed. By connecting with the viscous element in the Bingham body, a modified Bingham body was formed. It can overcome the shortcomings in acceleration phase simulation of the traditional Bingham body. Additionally, the nonlinear improvements were made to the Hoke and Kelvin body. By series connecting the nonlinear Hoek body, Kelvin body and the modified Bingham body, a nonlinear and unsteady viscoelastic-plastic rock creep model, which can describe the creep characteristics of the red mudstone in central Yunnan, was established. The results from the theoretical model were in good agreement with the experimental data, indicating that the proposed model was reasonable.

Keywords: *red mudstone; shear creep test; nonlinear acceleration element; modified Bingham body; nonlinear; unsteady constitutive model*

红层泥岩广泛分布于我国西南地区, 随着云南省调水工程的不断推进, 大量输水隧洞将修建于滇中的红层泥岩中, 而滇中红层泥岩具有流变性大的特点, 易引起隧洞的大变形破坏, 给工程建设及后续运营带来安全隐患。因此, 对该地区的红层泥岩的流变特性进行研究, 并建立适宜的流变本构模型, 对该地区的工程施工及工程运营期的长期安全具有重要的理论与现实意义。

国内外研究者对岩石的流变特性及其本构模型进行过大量的研究。胡斌等^[1]通过室内剪切蠕变试验, 对五里堆巴东组紫红色泥岩的蠕变特性进行了研究; Jia 等^[2]通过剪切蠕变试验, 研究了白鹤滩水电站坝基岩体的三阶段蠕变规律; Ji 等^[3]根据边坡节理岩体的剪切蠕变特性, 建立了基于幂函数型加速元件的节理岩体蠕变模型; 何志磊等^[4]对锦屏二级水电站大理岩的剪切蠕变特性进行研究, 并基于分数阶微积分理论建立了锦屏大理岩的蠕变本构模型; Ma 等^[5]采用分级加载剪切蠕变试验对不同含水率的石灰岩蠕变特性进行了研究; 熊良宵等^[6]基于大理岩结构面的剪切蠕变特性, 提出了硬性结构面的六元件剪切蠕变模型; 张治亮等^[7]对向家坝水电站坝基砂岩的蠕变特性进行研究, 并构建了 1 个幂函数型加速元件, 通过与 Burgers 模型串联, 建立了向家坝砂岩的非线性黏弹塑性蠕变模型; 赵延林等^[8]对二辉橄榄岩的蠕变特性进行了研究, 并将摩尔-库伦塑性元件与 Burgers 模型串联, 提出了 1 个改进的 Burgers 蠕变模型; Wu 等^[9]通过对盐岩的蠕变特

性进行研究, 建立了盐岩的非线性损伤蠕变模型; Liu 等^[10]基于砂岩的三轴蠕变试验数据, 通过引入非线性流变参数, 建立了砂岩的非线性蠕变模型; Wang 等^[11]对三峡库区泥岩的蠕变特性进行研究, 并通过引入幂函数型加速元件, 建立了三峡库区泥岩的非线性蠕变模型; 原先凡等^[12]通过将幂函数型加速蠕变元件与西原模型相结合, 建立了卸荷条件下砂质泥岩的蠕变模型; Yan 等^[13]采用 Abel 黏壶代替传统的牛顿黏壶, 对西原模型进行改进, 建立了花岗岩的蠕变本构模型; 李德建等^[14]通过构建分数阶变阶函数, 建立了砂岩的变分数阶损伤蠕变模型; Xu 等^[15]基于盐岩的单轴蠕变试验特性, 提出了一个盐岩的分数阶损伤蠕变模型; Li 等^[16]对冻砂岩的蠕变特性进行了研究, 并建立了考虑冻损伤的砂岩分数阶损伤蠕变模型; Huang 等^[17]采用三轴分级卸载蠕变试验对粗砂岩的卸载蠕变特性进行了研究; Li 等^[18]通过引入体变损伤变量, 对西原模型进行改进, 建立了冻融循环条件下砂岩的非线性蠕变模型; 张玉等^[19]对膏质泥岩的蠕变特性进行研究, 并基于损伤变量的 Weibull 分布对 Burgers 模型进行改进, 建立了膏质泥岩的非线性蠕变模型; Li 等^[20]基于 Kachanov 损伤率对 Burgers 模型进行改进, 建立了裂隙煤岩的非线性蠕变模型; Shan 等^[21]基于卸载条件下含冰裂隙红砂岩的蠕变特性, 通过引入损伤黏塑性体对 Burgers 模型进行改进, 建立了含冰裂隙红砂岩的蠕变本构模型; Song 等^[22]采用考虑损伤的分数阶元件替代传统的黏性元

件,对传统西原模型进行改进,建立了高家梁煤矿泥岩的蠕变本构模型。尽管前人对各类岩石的流变特性进行了大量研究工作,但目前针对滇中红层泥岩的流变特性研究还较少,适用于滇中红层泥岩的非线性、非定常模型还亟待研究,以满足该地区调水工程的实际应用需求。

本文依托“滇中引水工程”项目对该工程大理Ⅱ段狮子山隧洞段所穿越的滇中红层泥岩开展室内剪切流变试验,对其流变特性进行研究,根据其流变特点建立适合滇中红层泥岩的蠕变本构方程,并对建立模型的适用性进行验证。研究结果可为该工程的后续计算提供适用的计算模型及相关参数,并为该地区其他工程的兴建提供参考。

1 剪切蠕变试验

1.1 试验概况

1.1.1 岩样制备

经过前期勘察,发现滇中引水工程大理Ⅱ段狮子山隧洞段有发生软岩大变形的风险,因此,选取该区域的滇中红层泥岩进行室内试验,以对其蠕变特性进行研究。采样过程中尽量避免对岩石的扰动和人为破坏,然后根据《工程岩体试验方法标准》^[23],将所取岩石经高精度切割、磨平

后加工为 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试块,且尺寸测量精度为 0.1 mm。加工好的岩样如图 1 所示。



图 1 滇中红层泥岩岩样
Fig.1 Red mudstone rock samples from Central Yunnan

1.1.2 试验仪器

采用同济大学的 CSS-1950 型岩石剪切流变仪对制备岩样进行剪切蠕变试验,如图 2 所示。该仪器主要由主机、量测仪器和控制柜 3 部分组成。其中,主机通过水平伺服电机提供试验所需的剪切力,通过竖向伺服电机提供试验所需的法向力,通过刚性基座保证整个机体结构的稳定性;量测仪器由竖向传感器与横向传感器构成,分别用以量测蠕变过程中的水平剪切位移与竖向位移,位移传感器精度为 0.001 mm;控制柜与主机和量测仪器相连,用以控制主机的施力大小以及量测仪器的数据采集;控制柜同时与电脑相连,从而实现对主机的自动控制和量测数据的自动采集记录。

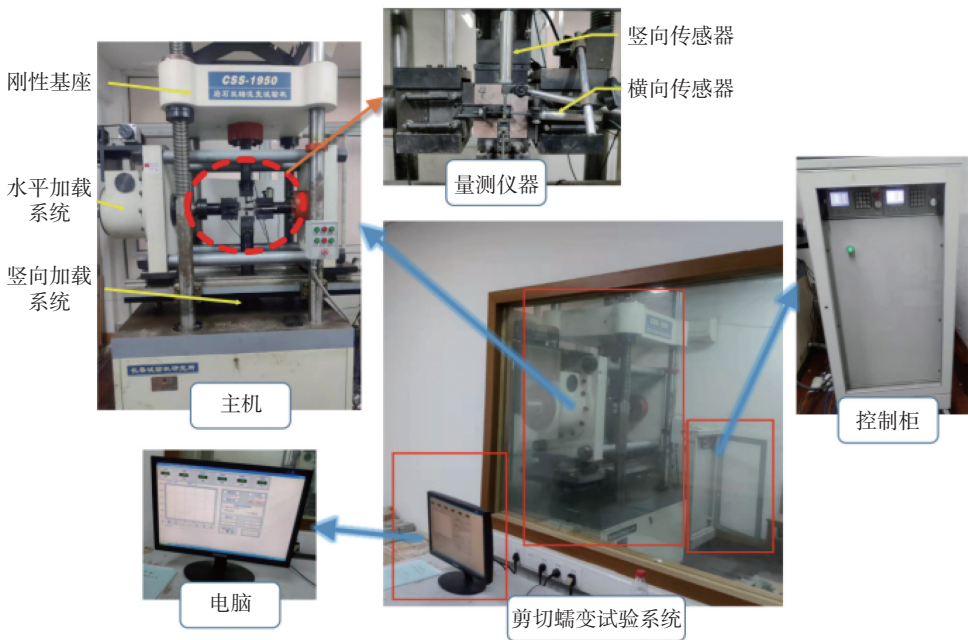


图 2 剪切蠕变试验装置
Fig.2 Shear creep test devices

1.1.3 试验设计与试验过程

采用分级增量加载方式对所取岩样进行剪切蠕变试验。首先通过快剪试验确定一定正应力下岩样的破坏剪应力, 然后以此破坏剪应力的 90% 作为最后一级荷载来设计各分级的剪应力水平。试验时, 通过竖向千斤顶对岩样施加一定正应力, 待位移稳定后, 再逐级施加剪应力, 且每级剪应力维持 7 d, 并同步记录岩样在各时段的剪切变形量。试验过程中尽量保持试验环境温度、湿度不变, 温度变化不大于 1 ℃。

1.2 试验结果分析

为了更清晰地对各级剪应力下红层泥岩的蠕变规律进行描述, 对红层泥岩在正应力为 0.2 MPa、剪应力为 0.1~0.5 MPa 下的蠕变试验结果进行整理和分析。

图 3 为分级加载条件下红层泥岩的剪应变随

加载时间的变化图。为了对各级剪应力水平下红层泥岩的剪切蠕变特性进行研究, 采用陈氏加载及数据处理方法^[24]对图 3 中的数据进行处理, 结果如图 4 所示。由图 4 可以看出, 红层泥岩在剪应力施加瞬时即发生变形, 且随着剪应力的增加, 瞬时变形不断增大, 随后红层泥岩在各级剪应力作用下均表现出蠕变变形特性, 且根据剪应力水平不同呈现出 2 种不同的变化趋势: 当剪应力 $\tau=0.1\sim0.4$ MPa 时(图 4(a)), 红层泥岩的蠕变变形随时间不断增大, 但其增加速率不断减小, 变形呈衰减蠕变趋势; 当剪应力为 0.5 MPa 时(图 4(b)), 红层泥岩在初始时刻呈衰减蠕变趋势, 随后变形随时间呈线性增加的趋势, 即进入等速蠕变阶段, 最后, 岩样进入加速蠕变阶段, 变形随时间迅速地增加直至破坏。现分别对红层泥岩各阶段的变形特性进行研究。

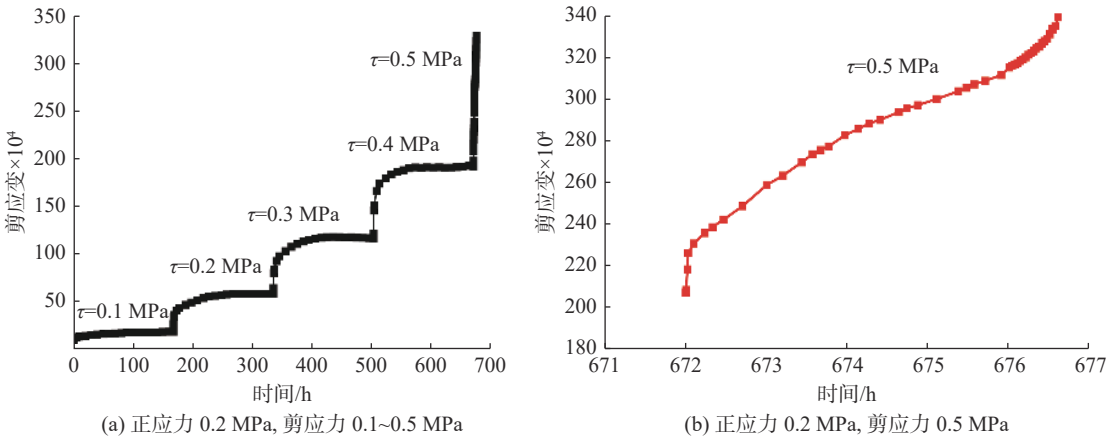


图 3 分级加载条件下岩样蠕变曲线
Fig.3 Creep curves of rock samples under graded loading conditions

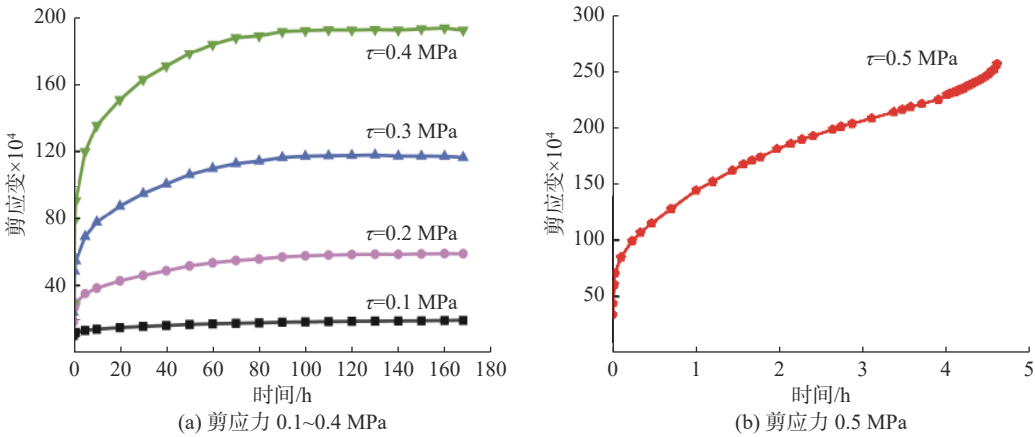


图 4 各剪应力水平下岩样蠕变曲线(正应力 0.2 MPa)
Fig.4 Creep curves of rock samples at various shear stress levels (normal stress is 0.2 MPa)

1.2.1 瞬时变形特性

对图 4 中的数据进行处理，可得各级剪应力作用下岩样的瞬时剪应变，如表 1 所示。

表 1 各剪应力水平下岩样瞬时剪应变
Tab.1 Transient shear strain of rock samples at various shear stress levels

应力/MPa	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
剪应变×10 ⁴	10.1	18.0	23.7	28.9	33.7

由表 1 可以看出，岩石瞬时剪应变随剪应力增加而不断增加，因此，这里采用幂函数表示瞬时剪应变随剪应力的变化。

$$\gamma_e = a\tau^b$$

(1)

式中： γ_e 为瞬时剪应变； τ 为剪应力； a 、 b 分别为相应的拟合参数。

采用式(1)对表 1 中的数据进行拟合，得到的结果如图 5 所示。由图 5 可以看出，式(1)与试验数据的相关系数 R^2 为 0.998，说明红层泥岩的瞬时变形随剪应力有按幂函数增加的趋势，且由拟合参数 a 、 b 的值可以看出，两者的变化趋势是非线性的。

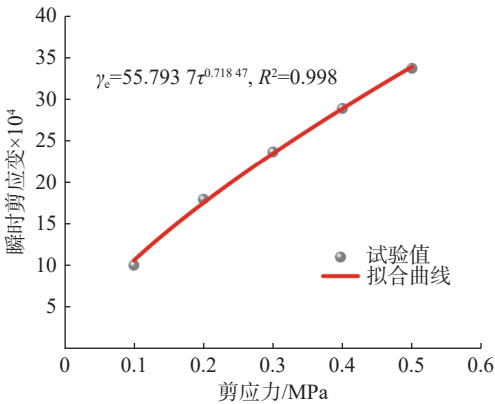


图 5 岩样瞬时剪应变随应力变化图
Fig.5 Transient shear strain of rock samples with stress

1.2.2 衰减蠕变特性

对图 4(a)中的数据进行处理，去除其中的瞬时变形部分，可得各级剪应力下蠕变变形部分的试验散点图，如图 6 所示。由图 6 可以看出，在中、低应力作用下(0.1~0.4 MPa)，红层泥岩变形呈衰减蠕变趋势。

Kelvin 模型常被用来描述岩石的衰减蠕变现象^[25]，因此，这里采用类似函数对红层泥岩的衰减蠕变进行描述。

$$\gamma_{ce} = c(1 - e^{-dt})$$

(2)

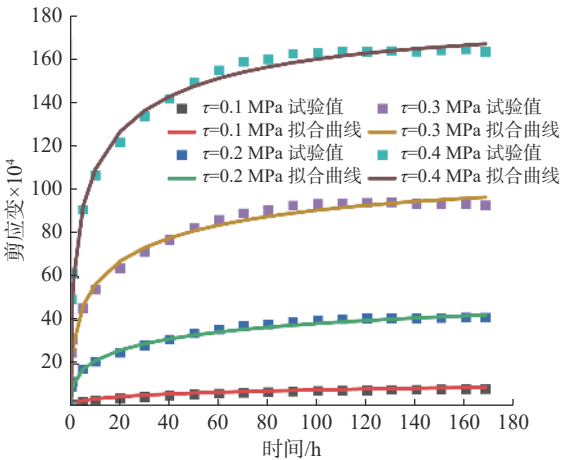


图 6 岩样衰减蠕变变形拟合曲线
Fig.6 Fitting curves for decay creep deformation of rock samples

式中： γ_{ce} 为衰减蠕变变形； t 为时间； c 、 d 分别为拟合参数。

采用式(2)对图 6 中各级剪应力下的蠕变变形进行拟合时发现：当参数 c 、 d 作为常量时，式(2)与试验点的拟合效果不太理想，相关性较差。因此，这里将参数 c 、 d 视为随剪应力及时间变化的非定常量，可得其拟合方程为

$$\gamma_{ce} = 0.083\,8\tau^{1.693\,6}(1 - e^{-0.939\,7\tau^{0.939\,5}t^{0.385}})$$

(3)

各剪应力下的拟合曲线如图 6 所示。由图 6 可以看出，式(3)与试验点的拟合效果较好，这说明红层泥岩的衰减蠕变规律与 Kelvin 体类似，但其中的参数并非常量，而是随着应力与时间呈非线性变化，其中，参数 c 随剪应力呈幂级数增加，参数 d 随应力与时间均呈幂级数增加。

1.2.3 等速蠕变特性

由图 4(b)可以看出，在高应力水平下(0.5 MPa)，红层泥岩将完整地经历衰减蠕变、等速蠕变及加速蠕变 3 个阶段。其中，衰减蠕变阶段(0 < t < 0.5 h)与加速蠕变阶段(4 h < t < 4.6 h)历时较短，而等速蠕变阶段(0.5 h < t < 4 h)历时较长。

当 0 < t < 4 h 时，岩样处于衰减及等速蠕变阶段。对图 4(b)中 0.5 h < t < 4 h 的试验数据进行处理，去除其中的瞬时及衰减蠕变部分，可得该时段的蠕变变形散点图如图 7 所示。

对图 7 中的数据进行线性回归分析可得，

$$\gamma_{cv} = 12.323\,87t - 0.143\,96$$

式中， γ_{cv} 为等速蠕变变形。

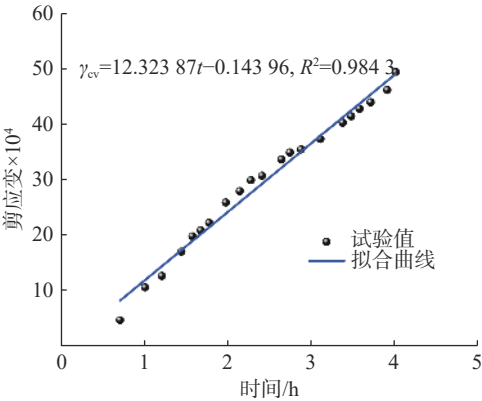


图 7 岩样等速蠕变变形拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve for isokinetic creep deformation of rock samples

拟合曲线与试验点之间具有较好的线性相关性, 其相关系数为 0.9843, 说明在该时段, 岩样变形随时间呈线性增加的趋势, 即岩样处于等速蠕变阶段, 蠕变速率为 0.001 232 387/h。

1.2.4 加速蠕变特性

由图 4(b)可知, 当 4 h < t < 4.6 h 时, 岩样处于加速蠕变阶段, 对该时段试验数据进行处理, 去除其中的瞬时、衰减蠕变及等速蠕变部分, 可得该时段的蠕变变形散点图, 如图 8 所示。

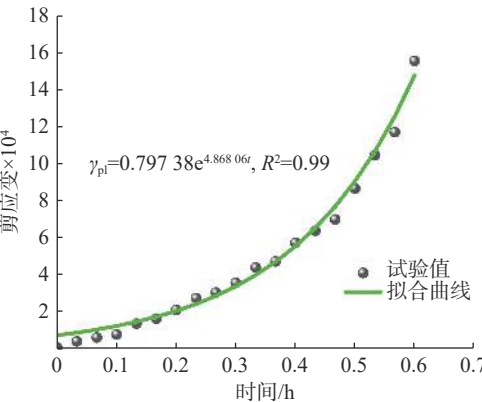


图 8 岩样加速蠕变变形拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve for accelerated creep deformation of rock samples

由图 8 可以看出, 该时段岩样蠕变变形随时间非线性增加, 且增速逐渐变大, 采用指数函数对试验数据进行拟合, 可得

$$\gamma_{pl} = 0.797\,38e^{4.868\,6t}$$

(4)

式中, γ_{pl} 为加速蠕变变形。

拟合曲线如图 8 所示。由图 8 可知, 式(4)与试验数据的拟合效果较好, 相关系数为 0.99, 说明在加速阶段岩样蠕变变形随时间呈指数型变化规律。

2 红层泥岩非线性非正常蠕变模型

2.1 模型辨识

根据滇中红层泥岩的蠕变变形特性, 构建蠕变模型。

a. 在不同剪应力状态下, 岩样均发生瞬时变形, 这里选用弹性元件模拟岩样的瞬时变形特性;

b. 岩样存在长期强度 (0.4 MPa), 当剪应力水平小于长期强度时, 岩样主要发生衰减蠕变。Kelvin 黏弹性模型及村山黏弹塑性模型均能描述岩石的衰减蠕变, 因试验在较小的剪应力状态下, 岩样即可发生衰减蠕变, 因此, 选用 Kelvin 黏弹性模型来模拟岩样的衰减蠕变特性;

c. 当剪应力水平大于长期强度时, 岩样除了发生衰减蠕变, 还会发生等速蠕变及加速蠕变。Bingham 体常被用来描述岩石的等速蠕变过程, 但其不能有效地描述岩石的加速蠕变过程, 因此, 对 Bingham 体进行改进, 使其能够反映岩石的加速蠕变过程。

对试验数据进行分析, 可知岩样的加速蠕变变形随时间呈指数增加, 因此, 构建一指数型加速元件, 使该元件满足蠕变方程:

$$\gamma_{ca} = \frac{\tau - \tau_s}{\eta} H(t - t_F) e^{n_3 \left(\frac{t - t_F}{t^*} \right)}$$

(5)

$$H(t - t_F) = \begin{cases} 0, & t \leq t_F \\ 1, & t > t_F \end{cases}$$

(6)

式中: γ_{ca} 为改进指数函数加速蠕变变形; τ_s 为岩样长期强度; t_F 为加速蠕变启动时间; t^* 为单位时间 (便于统一量纲); η , n_3 为材料参数; $H(t - t_F)$ 为符号函数。

将该加速元件与 Bingham 体的黏性元件进行串联, 从而使新的 Bingham 体可同时反映岩样的等速及加速蠕变特性。

综上所述, 根据岩样的蠕变试验特性构建岩样的蠕变模型如图 9 所示。该模型由 3 部分组成, 其中, I 为弹性元件, 反映岩样的瞬时变形特性; II 为 Kelvin 体, 反映岩样的黏弹性蠕变特性;

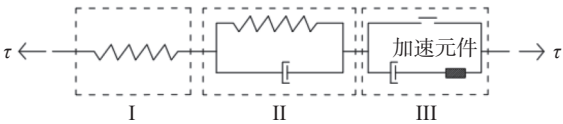


图 9 红层泥岩非线性非正常黏弹塑性蠕变模型

Fig. 9 Nonlinear and unsteady viscoelastic-plastic creep model for red mudstone

性；Ⅲ为改进的 Bingham 体，反映岩样的等速及加速蠕变特性。

2.2 模型蠕变本构方程

根据图 9 红层泥岩非线性、非定常黏弹塑性蠕变模型确定模型本构方程。

a. 弹性元件(第Ⅰ部分)。

对于第Ⅰ部分，根据试验中瞬时变形与剪应力的非线性变化规律，引入非线性弹性元件，使其剪切模量满足：

$$G_1 = G_{1i} \tau^{m_1} \tag{7}$$

则第Ⅰ部分的剪应变为

$$\gamma_1 = \frac{\tau}{G_1} = \frac{\tau^{1-m_1}}{G_{1i}} \tag{8}$$

式中： γ_1 为第Ⅰ部分的剪应变； G_1 为第Ⅰ部分的剪切模量； G_{1i} 为第Ⅰ部分的初始剪切模量； m_1 为材料参数。

b. Kelvin 体(第Ⅱ部分)。

对于第Ⅱ部分，根据试验中岩样的衰减蠕变特性，引入非线性弹性元件及非线性、非定常黏性元件构成的 Kelvin 体，使该部分的剪切模量及黏滞系数满足：

$$G_2 = G_{2i} \tau^{n_2} \tag{9}$$

$$\eta_2 = \eta_{2i} \tau^{n_2} t^{\lambda_2} \tag{10}$$

式中： G_2 为第Ⅱ部分的剪切模量； G_{2i} 为第Ⅱ部分

的初始剪切模量； η_2 为第Ⅱ部分的黏滞系数； η_{2i} 为第Ⅱ部分的初始黏滞系数； m_2 、 n_2 和 λ_2 分别为材料参数。

对第Ⅱ部分，建立其微分型本构方程

$$G_2 \dot{\gamma}_2 + \eta_2 \frac{d\gamma_2}{dt} = \tau \tag{11}$$

式中： γ_2 为第Ⅱ部分的剪应变。

将式(9)和(10)代入式(11)并对该微分方程进行求解，可得第Ⅱ部分的剪应变为

$$\gamma_2 = \frac{\tau^{1-m_2}}{G_{2i}} \left(1 - e^{-\frac{G_{2i}}{(1-\lambda_2)\eta_{2i}} \tau^{m_2-n_2} t^{1-\lambda_2}} \right) \tag{12}$$

c. 改进的 Bingham 体(第Ⅲ部分)

对于第Ⅲ部分，当 $\tau \leq \tau_s$ 时，剪应变为 0，因此，有

$$\gamma_3 = 0 \tag{13}$$

当 $\tau > \tau_s$ 时，根据黏性元件特性并结合所构建的加速元件(式(5))，可得，

$$\gamma_3 = (\tau - \tau_s) \left[\frac{t}{\eta_3} + \frac{H(t-t_F)}{\eta} e^{\eta_3 \left(\frac{t-t_F}{\tau^r} \right)} \right] \tag{14}$$

式中： γ_3 为第Ⅲ部分的剪应变； η_3 为第Ⅲ部分的黏滞系数。

综合以上对 3 部分的分析可知，所建立的红层泥岩的蠕变模型具有非线性、非定常特性，其蠕变本构方程为

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 = \begin{cases} \frac{\tau^{1-m_1}}{G_{1i}} + \frac{\tau^{1-m_2}}{G_{2i}} \left(1 - e^{-\frac{G_{2i}}{(1-\lambda_2)\eta_{2i}} \tau^{m_2-n_2} t^{1-\lambda_2}} \right), & \tau \leq \tau_s \\ \frac{\tau^{1-m_1}}{G_{1i}} + \frac{\tau^{1-m_2}}{G_{2i}} \left(1 - e^{-\frac{G_{2i}}{(1-\lambda_2)\eta_{2i}} \tau^{m_2-n_2} t^{1-\lambda_2}} \right) + (\tau - \tau_s) \left[\frac{t}{\eta_3} + \frac{H(t-t_F)}{\eta} e^{\eta_3 \left(\frac{t-t_F}{\tau^r} \right)} \right], & \tau > \tau_s \end{cases} \tag{15}$$

3 模型参数确定及其验证

基于剪切蠕变试验数据对红层泥岩非线性、非定常黏弹塑性蠕变模型的本构方程参数进行确定，以便对所建蠕变模型的适用性进行验证。

a. 弹性元件参数确定。

模型的第Ⅰ部分弹性元件，反映岩样的瞬时变形特性，将弹性部分的本构方程(式(8))与试验得到的岩样瞬时变形特性(式(1))相结合，可得弹性元件参数

$$G_1 = 179.232 \tau^{0.28153} \tag{16}$$

由此可以看出，瞬时变形模量随剪应力水平的增加而不断增加，说明岩样的瞬时弹性随着剪应力的提高有不断强化的趋势。

b. Kelvin 体参数确定。

模型的第Ⅱ部分 Kelvin 体，反映岩样的衰减蠕变特性，将 Kelvin 体的本构方程(式(12))与试验得到的岩样衰减蠕变特性(式(3))相结合，可得 Kelvin 体参数

$$G_2 = \frac{11.9332}{\tau^{0.6936}} \tag{17a}$$

$$\eta_2 = \frac{32.98427 t^{0.615}}{\tau^{1.6331}} \tag{17b}$$

由此可以看出，Kelvin 体的黏滞系数 η_2 随着时间的增加不断增大，说明在同一剪应力水平下，随着剪应力作用时间的增长，岩样的蠕变速率不断减小，这符合岩样的衰减蠕变特性；且黏滞系数 η_2 及剪切模量 G_2 均随着剪应力水平的增加而不

断减小, 说明当剪应力水平增大时, 岩样的衰减蠕变速率有所提高, 岩样将更快地从衰减蠕变过渡到等速蠕变阶段, 这与试验规律也是相符的。

c. 改进 Bingham 体参数确定。

根据岩样的蠕变变形特性, 当剪应力小于 0.4 MPa 时, 岩样只发生衰减蠕变, 而当剪应力大于 0.4 MPa 时, 岩样将发生从衰减蠕变、等速蠕变到加速蠕变的全过程蠕变, 因此, 可确定改进 Bingham 体的参数为

$$\tau_s = 0.4 \text{ MPa}$$

(18)

由试验中岩样的加速蠕变开始时间, 可确定岩样的加速蠕变元件的启动时间为

$$t_F = 4 \text{ h}$$

(19)

由改进 Bingham 体的本构方程(式(14)), 并结合试验得到的岩样等速蠕变速率, 可得改进 Bingham 体的参数

$$\eta_3 = 81.143 \text{ 342}$$

(20)

将改进的 Bingham 体的本构方程(式(14))与试验得到的岩样加速蠕变特性(式(4))相结合, 可得改进 Bingham 体的参数

$$\eta = 1.254 \times 10^3$$

(21)

$$n_3 = 4.868 \text{ 6}$$

(22)

将以上所得模型参数(式(16)~(21))代入所构建的红层泥岩非线性、非正常蠕变本构方程(式(15)), 并对不同剪应力水平下的岩样剪应变进行计算, 得到正应力 0.2 MPa 下的模型参数如表 2 所示。将模型理论值与各级剪应力水平下的试验数据进行对比, 结果如图 10 所示。

由图 10 可以看出, 理论模型得到的结果与试验数据吻合较好, 说明所建立的非线性、非正常蠕变模型能够较好地描述红层泥岩的蠕变特性。

为了进一步验证本文建立的剪切蠕变模型的适用性, 基于岩样在正应力为 0.4, 0.6 MPa 的剪切蠕变试验数据进行分析。根据前文中对参数确定的计算方法, 同理得到正应力 0.4, 0.6 MPa 下的模型参数如表 3 和表 4 所示。将所得参数代入模型的本构方程, 得到岩样蠕变理论值, 将其与试验值对比, 如图 11 所示。由图 11 可知, 理论模型得到的结果与试验数据吻合较好, 这表明本文所建立的非线性、非正常剪切蠕变模型对于分析滇中红层泥岩蠕变特性具有较好的适用性。

表 2 模型拟合参数表(正应力 0.2 MPa)

Tab.2 Model fitting parameters table(normal stress is 0.2 MPa)

正应力/MPa	G_{1i}	m_1	G_{2i}	m_2	η_{2i}	n_2	λ_2	η_3	η	n_3
0.2	179.232	0.2815	11.933	-0.6936	32.984	-1.633	0.615	81.143	1 254.1	4.868 6

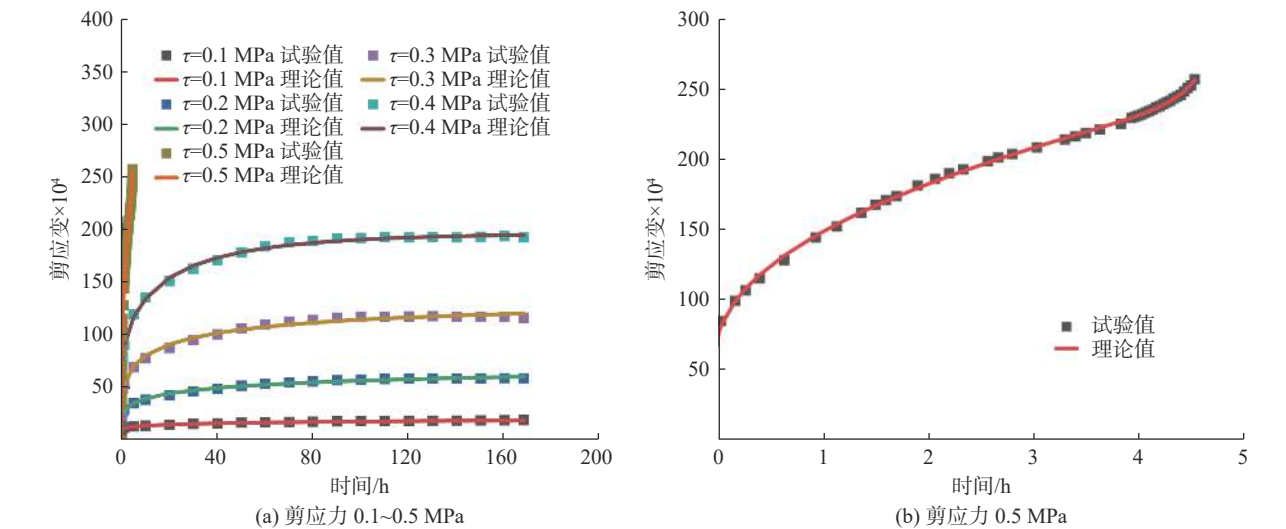


图 10 岩样蠕变理论值与试验值对比(正应力 0.2 MPa)

Fig.10 Comparison of theoretical and experimental values of creep of rock sample(normal stress is 0.2 MPa)

表 3 模型拟合参数(正应力 0.4 MPa)

Tab.3 Model fitting parameters table(normal stress is 0.4 MPa)

正应力/MPa	G_{1i}	m_1	G_{2i}	m_2	η_{2i}	n_2	λ_2	η_3	η	n_3
0.4	5.1546	0.2089	2.2962	0.3767	6.8408	-0.0845	0.5211	97.4026	13.33	0.2302

表 4 模型拟合参数(正应力 0.6 MPa)

Tab.4 Model fitting parameters table(normal stress is 0.6 MPa)

正应力/MPa	G_{1i}	m_1	G_{2i}	m_2	η_{2i}	n_2	λ_2	η_3	η	n_3
0.6	6.4399	0.1484	2.2889	0.1375	5.8322	-0.6692	0.6692	149.8	52.11	0.1388

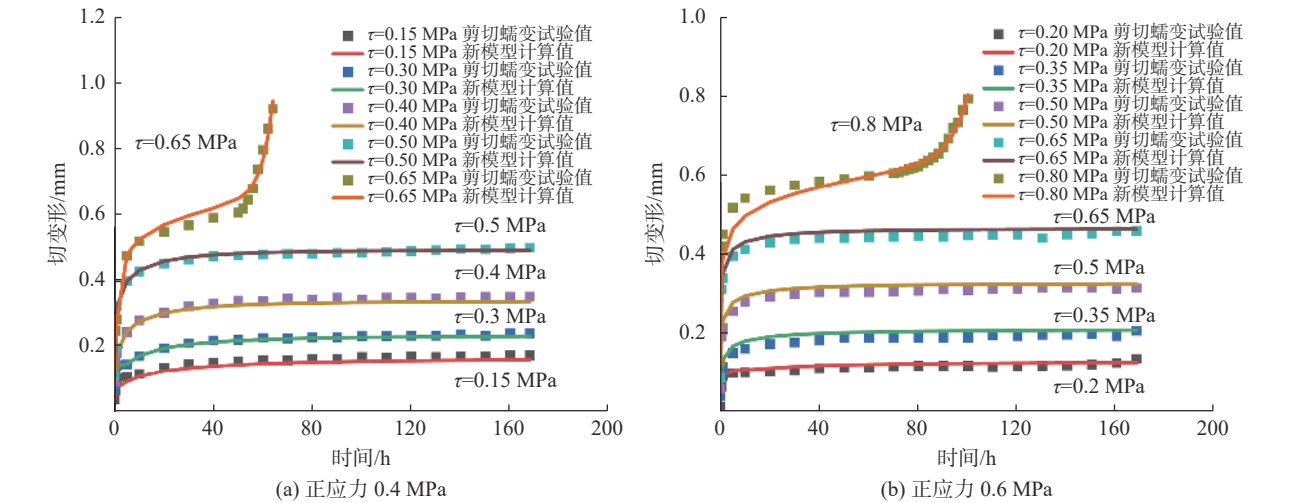


图 11 岩样蠕变变形理论值与试验值对比

Fig.11 Comparison deformation of theoretical and experimental creep values of rock samples

4 结 论

相较于花岗岩、石灰岩、大理岩等硬岩，滇中红层泥岩具强度低、抗滑能力弱、抗压能力弱、流变效应显著等特性，因此，滇中红层泥岩在工程建设中常表现为较高的变形和较大破坏风险。本文对滇中红层泥岩的剪切蠕变特性进行了研究。通过室内剪切蠕变试验揭示其蠕变特性，并对其蠕变本构模型进行研究，结果如下：

a. 岩样存在应力阈值，当应力水平小于该阈值时，岩样仅发生衰减蠕变，当应力水平大于该阈值时，岩样将发生从衰减蠕变、等速蠕变直至加速蠕变破坏的全过程蠕变。

b. 岩样的各阶段变形均呈现出非线性变化规律，其中，瞬时变形随着应力的提高，其变形增速不断减小，而衰减蠕变变形随着应力的提高，其变形速率不断增大。根据试验数据建立了岩样各阶段变形随应力和时间变化的非线性回归拟合方程。

c. 基于岩样的试验特性，提出了指数型加速元件，并通过与 Bingham 体中的黏性元件串联形成改进的 Bingham 体，同时对传统 Hoek 体及 Kelvin 体进行非线性改进，并将改进后的元件进行串联，进而提出岩样的非线性、非定常蠕变模型。

d. 通过对所建模型进行参数辨识发现，理论模型所得结果与试验数据吻合较好，说明所建模型对红层泥岩具有较好的适用性。

参考文献：

[1] 胡斌, 蒋海飞, 胡新丽, 等. 紫红色泥岩剪切流变力学特性分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S1): 2796–2802.
[2] JIA C J, XU W Y, WANG R B, et al. Experimental investigation on shear creep properties of undisturbed rock discontinuity in baihetan hydropower station[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 104: 27–33.
[3] JI F, LI R J, FENG W K, et al. Modeling and identification of the constitutive behavior of embedded non-persistent

- joints using triaxial creep experiments[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 133: 104434.
- [4] 何志磊, 朱珍德, 朱明礼, 等. 基于分数阶导数的非正常蠕变本构模型研究 [J]. *岩土力学*, 2016, 37(3): 737–744.
- [5] MA C, ZHAN H B, YAO W M, et al. A new shear rheological model for a soft interlayer with varying water content[J]. *Water Science and Engineering*, 2018, 11(2): 131–138.
- [6] 熊良宵, 虞利军, 杨昌斌. 硬性结构面的剪切流变模型及试验数值分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S1): 2894–2899.
- [7] 张治亮, 徐卫亚, 王伟. 向家坝水电站坝基挤压带岩石三轴蠕变试验及非线性黏弹塑性蠕变模型研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(1): 132–140.
- [8] 赵延林, 唐劲舟, 付成成, 等. 岩石黏弹塑性应变分离的流变试验与蠕变损伤模型 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(7): 1297–1308.
- [9] WU F, GAO R B, ZOU Q L, et al. Long-term strength determination and nonlinear creep damage constitutive model of salt rock based on multistage creep test: implications for underground natural gas storage in salt cavern[J]. *Energy Science & Engineering*, 2020, 8(5): 1592–1603.
- [10] LIU W B, ZHANG S G. Creep parameter determination and model establishment considering stress and time effects[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2020, 38(2): 1509–1520.
- [11] WANG X G, HUANG L, YAN C B, et al. HKCV rheological constitutive model of mudstone under dry and saturated conditions[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 2018: 2621658.
- [12] 原先凡, 邓华锋, 李建林. 砂质泥岩卸荷流变本构模型研究 [J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(9): 1733–1739.
- [13] YAN B Q, GUO Q F, REN F H, et al. Modified Nishihara model and experimental verification of deep rock mass under the water-rock interaction[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 128: 104250.
- [14] 李德建, 刘校麟, 韩超. 基于等效黏弹性的变阶分数阶岩石损伤蠕变模型 [J]. *岩土力学*, 2020, 41(12): 3831–3839.
- [15] XU G W, GUTIERREZ M, ARORA K, et al. Visco-plastic response of deep tunnels based on a fractional damage creep constitutive model[J]. *Acta Geotechnica*, 2022, 17(2): 613–633.
- [16] LI Z Y, YANG G S, YAO W. Construction of frozen sandstone creep damage model and analysis of influencing factors based on fractional-order theory[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021, 46(11): 11373–11385.
- [17] HUANG S J, MENG X R, ZHAO G M, et al. Creep mechanics of the high-stress soft rock under grade unloading[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 8822265.
- [18] LI J L, ZHU L Y, ZHOU K P, et al. Non-linear creep damage model of sandstone under freeze-thaw cycle[J]. *Journal of Central South University*, 2021, 28(3): 954–967.
- [19] 张玉, 王亚玲, 俞缙, 等. 深层膏质泥岩蠕变特性及非线性蠕变模型研究 [J]. *岩土力学*, 2018, 39(S1): 105–112.
- [20] LI M T, LI K S, ZHANG D, et al. Study on creep characteristics and constitutive relation of fractured rock mass[J]. *Shock and Vibration*, 2020, 2020: 8833512.
- [21] SHAN R L, BAI Y, JU Y, et al. Study on the triaxial unloading creep mechanical properties and damage constitutive model of red sandstone containing a single ice-filled flaw[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(2): 833–855.
- [22] SONG Y, WANG H P, CHANG Y T, et al. Nonlinear creep model and parameter identification of mudstone based on a modified fractional viscous body[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(20): 607.
- [23] 王洪, 邬爱清, 盛谦, 等. GB/T 50266–2013, 工程岩体试验方法标准 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [24] 杨文东, 张强勇, 陈芳, 等. 辉绿岩非线性流变模型及蠕变加载历史的处理方法研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(7): 1405–1413.
- [25] 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.

(编辑: 石 瑛)