

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.S2.008

考虑含水率的红层泥岩蠕变特性 及改进伯格斯模型

巨能攀, 黄海峰, 郑 达, 周 新, 张成强

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘 要: 为揭示西南地区广泛分布的红层泥岩在不同含水条件下的蠕变特性, 采用 YSJ-01-00 岩石三轴流变试验机进行三轴压缩蠕变试验。试验结果表明, (1) 随着含水率的升高和轴向荷载的提升, 蠕应变与瞬时应变量的比值整体上都呈增大趋势, 比值范围为 0.117~0.985, 平均比值维持在 0.348~0.480 之间; (2) 红层泥岩的初始、稳态和极限加速蠕变速率都随含水率的升高而增大; (3) 红层泥岩的长期强度随含水率的上升而降低, 量化比较发现红层泥岩的非线性蠕变程度随含水率的上升而越得到体现。研究了红层泥岩蠕变的非线性特征, 提出一个黏弹性模量 $E(\omega)$, 并引入一个非线性黏塑性体, 建立一个改进后的伯格斯 (Burgers) 模型。基于 BFGS 算法和通用全局优化法对蠕变试验曲线进行辨识, 确定模型参数, 并进行模型可靠性分析, 验证了所建模型的正确性和合理性。

关 键 词: 蠕变; 含水率; 蠕变速率; 长期强度; 改进伯格斯模型

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2016) 增 2-0067-08

Improved Burgers model for creep characteristics of red bed mudstone considering water content

JU Neng-pan, HUANG Hai-feng, ZHENG Da, ZHOU Xin, ZHANG Cheng-qiang

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: In order to reveal the creep characteristics of red bed mudstone with wide distribution in Southwestern China under different water content conditions, the rock triaxial creep testing machine YSJ-01-00 is used to carry out the triaxial compressive creep test. Experiment results show that: (1) On the whole, with increasing of water content and the lifting of the axial load, the ratio of creep strain and instantaneous strain is increasing. Also, the ratio range is 0.117-0.985, and the average ratio is maintained at 0.348-0.480. (2) The initial, steady and ultimate accelerated creep rate increase with the rise of water content. (3) The long-term strength of red bed mudstone decreases with the rise of water content. By quantitative comparison, it is found that the nonlinear creep degree of red bed mudstone is more obvious with the increase of water content. Therefore, in the construction of important project, the influence of water content on the creep characteristics of red bed mudstone should not be neglected. Based on the nonlinear characteristics of red bed mudstone, a viscoelastic modulus $E(\omega)$ is proposed; and a new improved Burgers model is established by introducing a nonlinear viscoplastic body. Based on the BFGS algorithm and the general global optimization method, the creep test curves are identified; the model parameters are determined; and the reliability of model is analyzed; and the correctness and rationality of the model are verified.

Keywords: creep; water content; creep rate; long-term strength; improved Burgers model

1 引 言

红层主要是指侏罗纪到新近纪的陆相红色岩系, 以砂岩、泥岩和页岩为主, 主要分布在我国

西南、西北、华中及华南地区^[1-4]。西南地区分布有大量的砂泥岩互层的红层边坡^[5], 当滑带附近的岩土体蠕变累积到一定程度时, 暴雨作用下常发生滑坡^[6-8]。此类滑坡的软弱夹层常为泥岩或泥岩风化

收稿日期: 2016-05-17

基金项目: 国家自然科学基金 (No.41372306)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41372306).

第一作者简介: 巨能攀, 男, 1973 年生, 博士, 教授, 主要从事岩质高边坡和灾害监测预警方面的教学和科研工作。E-mail: jnp@cdut.edu.cn

物,因此,对不同含水条件下的红层泥岩蠕变特性进行深入研究很有必要。关于不同含水条件下岩石蠕变特性的研究已有很多,取得不少成果,朱合华等^[9]进行干燥和饱水状态下晶玻屑熔结凝灰岩的单轴压缩蠕变试验,研究认为含水率对蠕变性能的影响主要体现在极限蠕变变形量和达到稳定蠕变阶段的时间,对瞬时弹性模量的影响较小。黄小兰等^[10]开展了不同含水情况下大庆泥岩的强度试验和单轴压缩蠕变试验,表明含水率的增加会大幅度降低单轴抗压强度和弹性模量,而稳态蠕变率和蠕变变形显著增加。杨彩红等^[11]以页岩为研究对象,开展了三轴压缩蠕变试验研究,发现随着含水率的增加,岩石的瞬态弹性模量先减小后增大,而极限蠕变变形模量和黏滞系数明显趋于下降。刘小军等^[12]进行不同含水状态下浅变质板岩单轴蠕变试验,得出瞬时弹性模量与饱和度线性负相关,而黏性模量和黏滞系数与饱和度呈负指数相关的结论。

由于红层泥岩成岩时间短、成岩作用差,蠕变试验耗时长、过程复杂,给红层泥岩的蠕变特性的研究带来一定难度,针对红层泥岩,特别是考虑含水率的蠕变特性的深入研究较少。笔者以新津县狮子山滑坡泥岩为研究对象,进行不同含水条件的红层泥岩三轴压缩蠕变试验,基于试验结果,分析了红层泥岩在不同含水状态的蠕变特性,并改进 Burgers 模型,证明其模型能更好地描述红层泥岩在不同含水状态的蠕变特性,可为红层滑坡的长期稳定性研究及监测预警提供一定依据。

2 试验背景、方案及蠕变特性分析

2.1 蠕变试验背景

狮子山滑坡位于新津县西南侧长秋山丘陵区中上部,地形坡度为 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$,滑坡最大相对高差为 29 m,纵向轴长 121 m,横向宽 145 m,滑体厚 3~15 m,平均滑体厚约 5 m,地层倾角为 $5^{\circ} \sim 8^{\circ}$,属于缓倾顺层推移式滑坡。“5·12”地震后坡体后缘形成一条拉裂缝,最宽处约 1.5 m,深约 3 m,延伸长度约为 30 m。由于强降雨、地震作用及滑坡的流变特性,截止 2013 年 8 月这条拉裂缝发展贯穿为喇叭形拉陷槽,拉陷槽最宽处达 23 m,深度达 15 m,延伸长约 110 m。

2.2 蠕变试验方案

蠕变试验采用 YSJ-01-00 岩石三轴流变试验机,使用逐级增量加载的试验方式,对滑体后缘进行削坡,取出新鲜泥岩,密封运回实验室后加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱样。由于滑带较浅,根据

$p = \rho ghK$ (ρ 为密度; K 为侧压力系数)将围压设置为 1 MPa。每级轴向荷载增量 $\Delta q = Kq_f / n$, 其中 K 为材料的强度降低系数,据经验取 0.65~0.85。试验分为天然状态、泡水 1 d 和泡水 3 d,其质量含水率 ω 分别为 1.07%、3.55%和 5.14%。

试样过程以 0.5 MPa/s 的速率施加围压,围压稳定后以 0.1 mm/s 的速率施加轴向荷载,共施加 6 级轴向荷载,试样破坏,试验共历时 1 251 h。

2.3 蠕变试验成果

图 1 为利用 Boltzmann 线性叠加原理处理后的分别加载蠕变曲线,图 2 为等时应力-应变曲线,图 3 为蠕变速率与时间关系曲线。

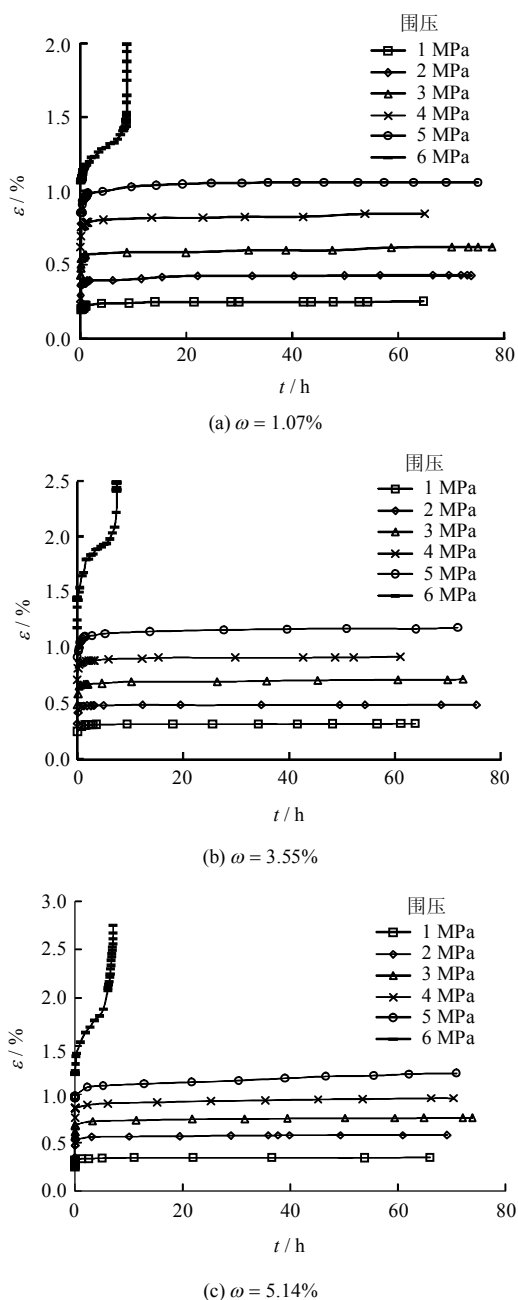


图 1 分别加载蠕变曲线
Fig.1 Curves of separate loading creep

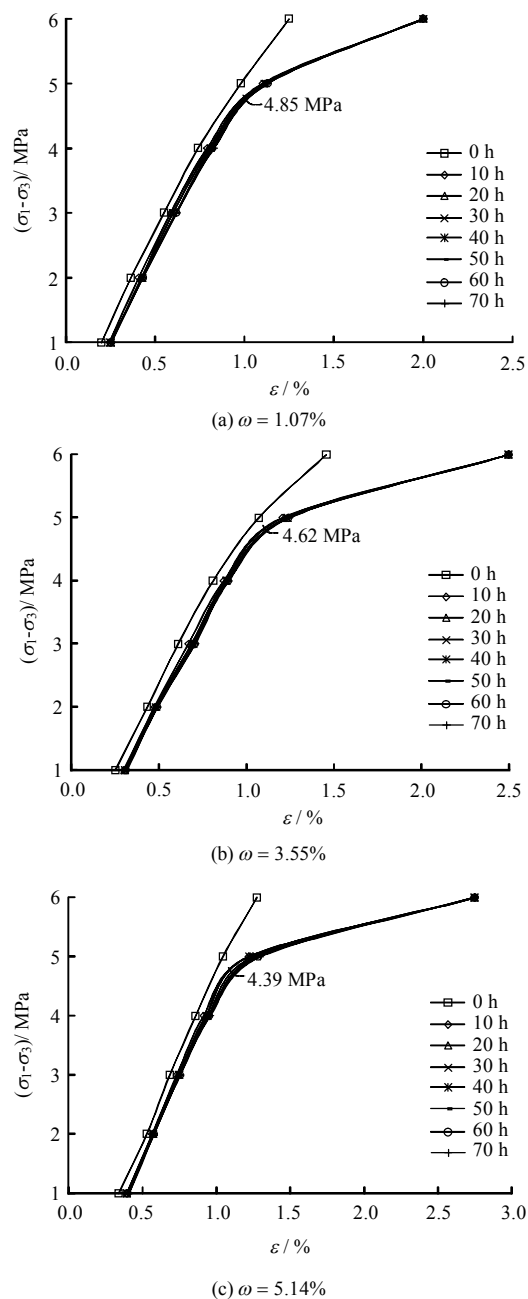


图2 等时应力-应变曲线
Fig.2 Curves of isochronous stress-strain

2.4 不考虑含水率的蠕变特性分析

通过对蠕变成果的分析发现以下现象: (1) 如图1所示, 试样在轴向荷载作用下先产生瞬时应变, 其次是蠕应变 (本文定义蠕变应变 ε 为瞬时应变 ε_a 与蠕应变 ε_b 之和), 经过较为短暂的加速蠕变阶段, 后试样破坏; (2) 由图2可以看出, 等时蠕变曲线在第5级轴向荷载之前近线性, 偏应力达到2 MPa时, 右侧整体斜率小于左侧, 右侧曲线有靠拢横轴的趋势。等时蠕变曲线这样的非线性特点愈得到体现, 表明红层泥岩的黏性特性愈趋于表现出来, 再结合图3分析可知, 红层泥岩的非线性蠕变程度随着轴向荷载的提升而愈得到体现; (3) 如图3所示,

曲线近似一个“桶”形, 左侧曲线代表衰减蠕变阶段, 其斜率的绝对值小于代表加速蠕变阶段的右侧曲线。在围压1 MPa下3种含水状态的曲线都体现出共同的规律性, 即内侧的曲线为第一级轴向荷载, 向外侧轴向荷载依次抬高, 最内侧曲线为最靠近横轴的曲线, 说明红层泥岩初始蠕变速率随着轴向荷载的提升而增大, 从 0 h^{-1} 到 0.038 h^{-1} 。

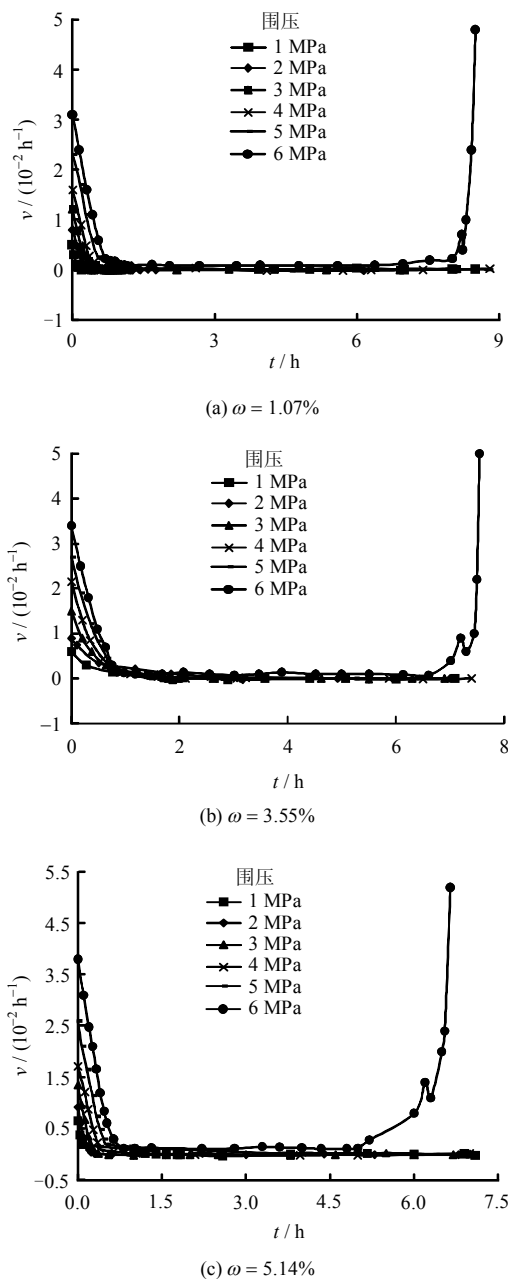


图3 蠕变速率与时间关系曲线
Fig.3 Relationships between creep rate and time

3 不同含水状态下蠕变应变特征研究

3.1 瞬时、蠕应变量的对比

表1为不同含水状态下红层泥岩的应变变量对比, 图4为应变变量统计图, 图5为平均应变变量与含

水率关系曲线。由表 1 可看出,随着含水率的升高和轴向荷载的提升,蠕应变与瞬时应变量的比值整体都呈增大趋势,比值范围为 0.117~0.985,平均比值范围 0.348~0.480。从图 4 中可以看出,随

着轴向荷载提升,瞬时应变量和蠕应变整体呈上升趋势。从表 1 和图 5 可以看出,一般情况下随着含水率的上升,同一轴向荷载下的瞬时应变量和蠕应变都随之增高。

表 1 不同含水状态的应变对比
Table 1 Strain contrast of different water contents

$(\sigma_1 - \sigma_3)$ / MPa	天然状态 ($\omega = 1.07\%$)			泡水 1 d ($\omega = 3.55\%$)			泡水 3 d ($\omega = 5.14\%$)		
	$\varepsilon_a / \%$	$\varepsilon_b / \%$	比值	$\varepsilon_a / \%$	$\varepsilon_b / \%$	比值	$\varepsilon_a / \%$	$\varepsilon_b / \%$	比值
1	0.144	0.029	0.201	0.154	0.018	0.117	0.168	0.040	0.238
2	0.141	0.032	0.227	0.162	0.035	0.216	0.171	0.064	0.374
3	0.155	0.034	0.219	0.162	0.043	0.265	0.179	0.065	0.363
4	0.171	0.064	0.374	0.180	0.072	0.393	0.189	0.082	0.446
5	0.181	0.072	0.398	0.185	0.092	0.497	0.214	0.102	0.477
6	0.227	0.152	0.670	0.250	0.218	0.872	0.265	0.261	0.985
平均值	0.170	0.064	0.348	0.183	0.080	0.394	0.197	0.102	0.480

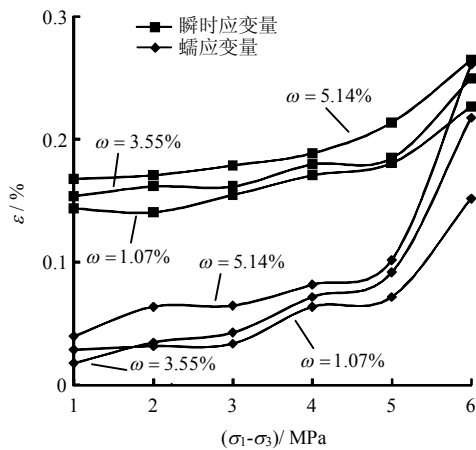


图 4 应变统计曲线
Fig.4 Strain statistic curves

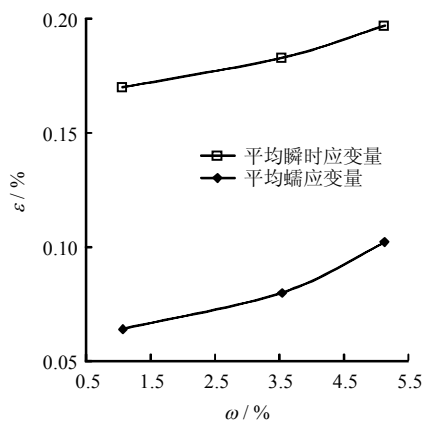


图 5 平均应变与含水率关系曲线
Fig.5 Relationships between average strain and water content

3.2 蠕变速率对比

最后一级轴向荷载下 3 种含水状态的蠕变曲线如图 6 所示,图 7 为相应的蠕变速率对比曲线。为

了方便叙述,在此将加速蠕变阶段蠕变速率最大值定义为极限加速蠕变速率。由图 6、7 可以看出,红层泥岩的初始、极限加速蠕变速率都随含水率的上升而增大,当 $\omega = 5.14\%$ 时,初始蠕变速率最高可达 0.038 h^{-1} ,极限加速蠕变速率最高可达 0.052 h^{-1} 。红层泥岩的稳态蠕变速率也随含水率的上升而增大,从最低 $0.065 \times 10^{-2} \text{ h}^{-1}$ 到最高 $0.14 \times 10^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。

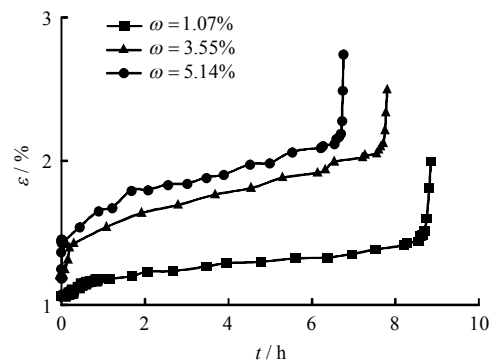


图 6 不同含水状态的蠕变曲线
Fig.6 Creep curves of different water contents

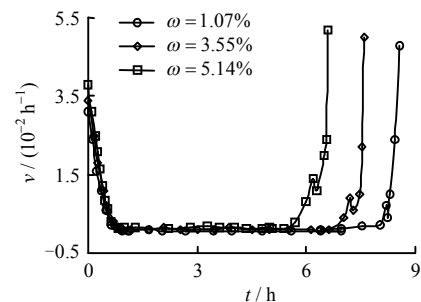


图 7 不同含水状态的蠕变速率曲线
Fig.7 Creep strain rate curves in different water contents

在最后一级轴向荷载下,当 $\omega = 1.07\%$ 、 3.55%

和 5.14% 时, 红层泥岩达到稳定蠕变阶段所需时间分别为 0.56、0.24、0.13 h, 达到加速蠕变阶段所需时间分别为 8.65、7.55、6.62 h, 达到稳定、加速蠕变阶段所需时间都呈递减趋势。

3.3 长期强度比较

通过图 2 曲线簇的拐点^[13]可确定红层泥岩的长期强度 σ_L , 当 $\omega = 1.07\%$ 、 3.55% 和 5.14% 时, 红层泥岩的 σ_L 分别为 4.85、4.62、4.39 MPa, 长期强度随含水率的提升而递减。

为了量化比较红层泥岩的非线性蠕变程度随含水率的变化, 利用 Matlab 对前四级轴向荷载和后两级轴向荷载的等时应力-应变数据 (见图 2) 进行线性回归, 通过比较前四级和后两级之间的夹角 α 来判断非线性蠕变程度的变化。图 8 为线性回归示意图, $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 和 ε 分别以 y 和 x 来表示。

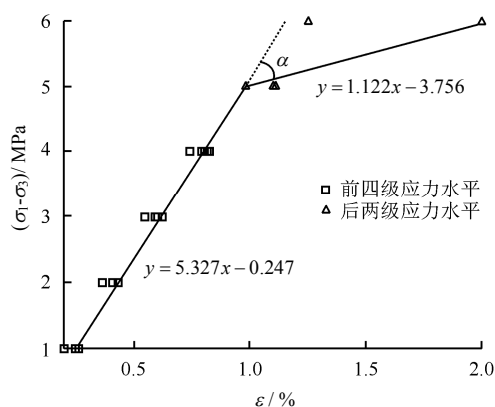


图 8 线性回归示意图

Fig.8 Sketch of linear regression

由表 2 可见, α 随着含水率的上升而增大, 表明红层泥岩的非线性蠕变程度随含水率的上升而愈得到体现。

表 2 线性回归结果

Table 2 Linear regression results

$\omega / \%$	前四级线性归	后两级线性归	$\alpha / (^\circ)$
1.07	$y = 5.327x - 0.247$	$y = 1.122x + 3.756$	31.079
3.55	$y = 5.095x - 0.477$	$y = 0.789x + 4.029$	40.615
5.04	$y = 5.510x - 1.126$	$y = 0.667x + 4.164$	45.994

4 考虑含水率的蠕变模型及参数拟合

4.1 黏弹性模量与时间及含水率的关系

由图 2 和章节 2.4 可知, 在等时应力-应变曲线中红层泥岩的蠕变非线性特征逐渐得到体现, 未达到破裂应力前, 红层泥岩的蠕变主要表现为黏弹性

变形, 黏弹性变形对应图 2 曲线中的近线性段, 因此可将等时应力-应变曲线的斜率定义为黏弹性模量 $E(\omega)$ 。图 9 为黏弹性模量 $E(\omega)$ 与含水率 ω 关系曲线。

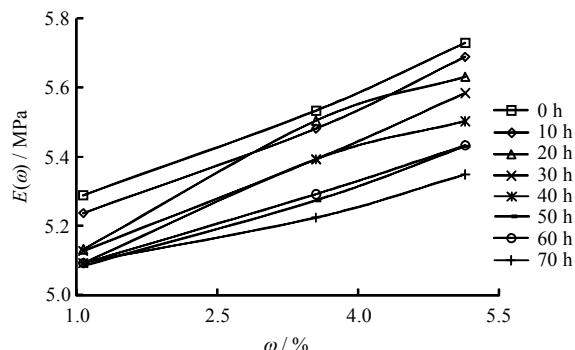


图 9 黏弹性模量与含水率关系

Fig.9 Relationships between viscoelastic modulus and water content

由图 9 可以看出, 曲线近线性, 用式 (1) 进行线性回归, 结果见表 3。

$$E(\omega) = M\omega + N \quad (1)$$

式中: ω 为含水率。

从表 3 可知, R^2 在 0.977 3 以上, $E(\omega)$ 的参数变化可表示红层泥岩蠕变的非线性特征的变化。图 10 为 M 、 N 随时间变化的数据分布, 式 (2)、(3) 分别为 M 、 N 的拟合结果:

$$M = a \exp(bt) \quad (2)$$

$$N = ct + d \quad (3)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 均为拟合参数。

表 3 $E(\omega)$ 的线性回归结果

Table 3 Fitting results of $E(\omega)$

t/h	M	N	R^2
0	0.125 0	5.121 1	0.996 2
10	0.120 4	5.098 7	0.993 8
20	0.124 9	5.084 5	0.977 3
30	0.111 7	5.036 9	0.999 0
40	0.110 9	5.035 5	0.981 8
50	0.084 1	5.011 1	0.994 8
60	0.095 3	5.002 1	0.999 3
70	0.075 1	4.956 6	0.979 2

将式 (2)、(3) 代入式 (1), 可得

$$E(\omega, t) = a\omega \exp(bt) + ct + d \quad (4)$$

即表示黏弹性模量与时间及含水率之间的关系。通过式 (4) 可以建立红层泥岩蠕变受时间和含水率影

响的水岩作用时效力学响应过程。

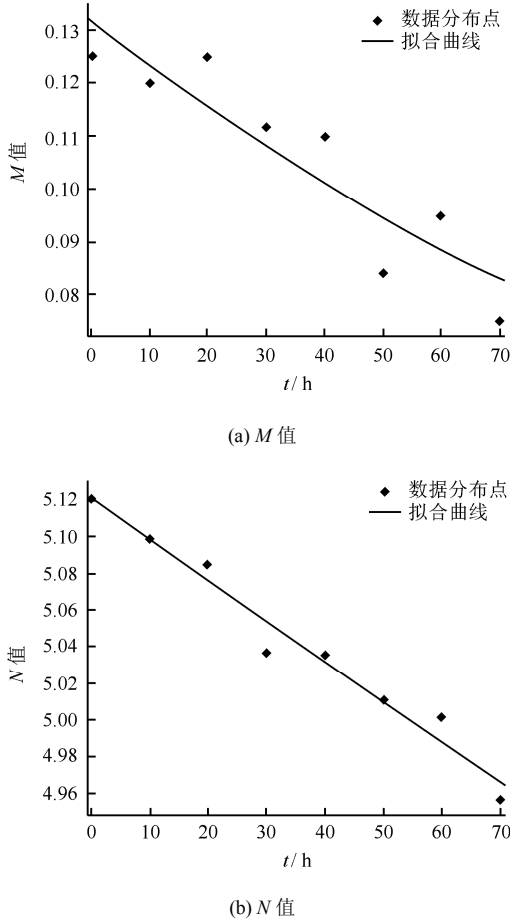


图 10 数据分布及拟合曲线
Fig.10 Data distribution and fitting curves

4.2 改进后的 Burgers 模型

假定 Burgers 模型中 Kelvin 模型的 H 体弹性模量服从式 (4)，并且根据前人经验引入一个非线性黏塑性体^[14]与 Burgers 模型串联，则可得到改进后的 Burgers 模型，如图 11 所示。

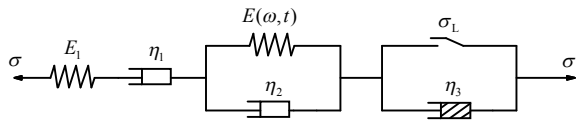


图 11 改进后的 Burgers 模型
Fig.11 Improved Burgers model

当 $\sigma_0 \leq \sigma_L$ 时，非线性黏塑性体失效，相应的状态方程为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_0 &= \sigma_1 = \sigma_2 \\ \varepsilon &= \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \\ \dot{\varepsilon}_1 &= \dot{\sigma}_1 / E_1 + \sigma_1 / \eta_1 \\ \sigma_2 &= E(\omega, t) \varepsilon_2 + \eta_2 \dot{\varepsilon}_2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

相应的蠕变方程为

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_1} t + \frac{\sigma_0}{a\omega \exp(bt) + ct + d} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{a\omega \exp(bt) + ct + d}{\eta_2}\right) \right] \quad (6)$$

式中： σ 为轴向应力； $\dot{\sigma}$ 为 σ 与时间 t 的一阶导； $\dot{\varepsilon}$ 为 ε 与时间 t 的一阶导； η 为黏滞系数。

当 $\sigma_0 > \sigma_L$ 时，非线性黏塑性体发挥作用，相应的状态方程为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_0 &= \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \\ \varepsilon &= \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \\ \dot{\varepsilon}_1 &= \dot{\sigma}_1 / E_1 + \sigma_1 / \eta_1 \\ \sigma_2 &= E(\omega, t) \varepsilon_2 + \eta_2 \dot{\varepsilon}_2 \\ \sigma_3 &= \sigma_L + \eta(\sigma, t) \dot{\varepsilon}_3 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

相应的蠕变方程为

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_1} t + \frac{\sigma_0}{a\omega \exp(bt) + ct + d} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{a\omega \exp(bt) + ct + d}{\eta_2}\right) \right] + \frac{\sigma_0 - \sigma_L}{(\alpha t + \beta) \eta_3} \quad (8)$$

4.3 模型参数确定及模型可靠性分析

利用数学优化软件 1stOpt，基于 BFGS 算法和通用全局优化法对图 1 曲线进行辨识，得出相关参数见表 4。限于篇幅，这里仅列出 $\omega = 1.07\%$ 的拟合效果对比图，如图 12 所示。

改进后的模型作分析验证可知：(1) 由表 4 和图 12 可以得出，改进后的模型整体拟合效果较好，平均 $R^2 = 0.9845$ ，辨识最后一级轴向荷载下的蠕变曲线的平均 R^2 达到 0.9910，可见改建后模型能准确地反映红层泥岩蠕变应变的量值关系；(2) 弹性模量 $E_1 = \sigma / \varepsilon_a$ (ε_a 为轴向应变)，由表 1 可知， ε_a 整体上随加载等级的提升和含水率的上升呈递增趋势，再由表 4 可知，与 ε_a 负相关的 E_1 整体上呈递减趋势，与章节 3.1 中关于瞬时应变 ε_a 的结论是吻合的。其次， $\sigma = \eta d\varepsilon / dt$ ， η 与应变率呈负相关。从表 4 可见，在同一荷载下 η_1 、 η_2 、 η_3 随含水率的上升呈递减趋势，与章节 3.2 分析得出红层泥岩的初始、稳态和极限加速蠕变速率随含水率的上升呈递增趋势是吻合的。对 E_1 、 η_1 、 η_2 、 η_3 的分析证明了改进后的 Burgers 模型能较为准确地反映红层泥岩蠕变变形的黏弹性性质问题；(3) 改进后的 Burgers 模型

建立了与含水率、时间的关系, 章节 3.3 中已量化证明红层泥岩的非线性蠕变程度随含水率的上升而愈得到体现, 而其中 Kelvin 模型的 H 体弹性模量

$E(\omega, t)$ 以函数关系表示相比传统的以定量表示更加符合实际, 使得红层泥岩的非线性特征得到更好的体现。

表 4 改进 Burgers 蠕变模型参数
Table 4 Improved Burgers creep model parameters

ω /%	偏应力 /MPa	E_1 /MPa	η_1 /(MPa·h)	η_2 /(MPa·h)	η_3 /(MPa·h)	a	b	c	d	R^2
1.07	1	7.583 0	9 431.775 2	147.075 2		10.173 4	-0.013 6	-0.112 4	17.212 6	0.980 5
	2	6.945 9	7 890.662 0	131.533 6		10.126 5	-0.123 9	-2.011 8	16.984 4	0.973 6
	3	6.462 9	5 316.500 1	218.124 6		6.931 2	-3.018 4	-2.154 7	16.689 4	0.986 4
	4	6.134 8	3 340.774 9	382.372 2		4.263 3	-4.073 3	-5.351 1	13.837 8	0.967 6
	5	5.666 6	2 359.361 6	384.780 9		4.2895	-4.598 4	-8.005 0	10.297 5	0.974 7
	6	5.025 4	1 149.624 3	134.174 8	156.283 4	-0.228 4	-10.160 6	-8.019 2	8.714 8	0.993 9
3.55	1	6.988 5	7 885.224 9	71.023 5		7.027 6	-0.238 4	-0.446 9	13.123 5	0.981 6
	2	6.504 4	5 044.388 8	112.041 3		4.091 3	-2.545 6	-1.002 8	12.161 9	0.998 9
	3	6.353 7	3 640.921 1	217.044 0		4.001 8	-5.658 1	-4.243 0	13.726 9	0.998 7
	4	6.095 8	2 762.616 4	332.330 2		2.402 1	-5.185 3	-4.910 7	10.471 3	0.994 0
	5	5.192 0	1 718.992 2	378.361 8		2.704 2	-8.924 1	-7.004 8	8.568 8	0.994 1
	6	4.524 8	876.914 8	122.404 5	94.364 9	-0.301 4	-13.117 5	-10.023 5	8.398 5	0.981 2
5.14	1	6.359 2	3 990.040 2	52.013 6		5.337 8	-1.364 8	-1.669 7	13.296 0	0.951 5
	2	5.230 2	2 966.995 6	107.130 3		3.759 6	-4.635 7	-3.002 5	11.612 9	0.959 0
	3	4.651 8	1 647.185 1	219.594 4		2.860 2	-8.657 4	-7.634 7	11.485 9	0.991 3
	4	4.381 0	1 348.303 7	351.920 8		3.015 6	-7.387 9	-8.080 6	10.323 5	0.999 9
	5	4.282 6	945.304 5	369.378 2		1.758 0	-10.053 1	-12.218 9	8.334 8	0.996 9
	6	4.025 1	452.599 6	104.601 2	7.660 7	-0.312 8	-15.827 0	-14.679 4	7.442 2	0.998 0

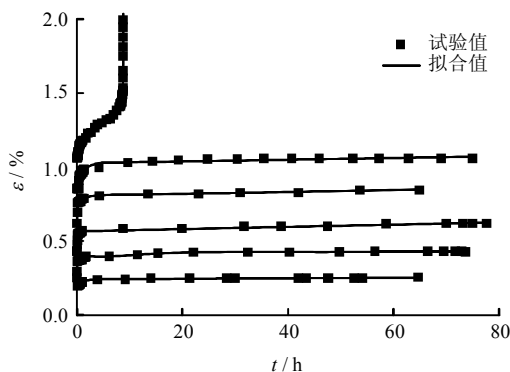


图 12 试验曲线与拟合曲线对比

Fig.12 Comparisons between test curves and fitting ones

5 结 论

(1) 一般情况下红层泥岩在同一轴向荷载下的瞬时应变量和蠕应变变量都随着含水率的上升而增大。同一荷载下, 红层泥岩的 E_1 、 η_1 、 η_2 、 η_3 随着含水率的上升整体呈递减趋势。

(2) 红层泥岩的初始蠕变速率随含水率的上升而增大, 当 ω 达到 5.14% 时, 初始蠕变速率最高可达 0.038 h^{-1} , 极限加速蠕变速率最高可达 0.052 h^{-1} 。红层泥岩的稳态蠕变速率也随含水率的上升而增大, 从最低 $0.065 \times 10^{-2} \text{ h}^{-1}$ ($\omega = 1.07\%$) 到最高

$0.14 \times 10^{-2} \text{ h}^{-1}$ ($\omega = 5.14\%$)。红层泥岩在最后一级轴向荷载下达到稳定、加速蠕变阶段所需时间都呈递减趋势。

(3) 当含水率 $\omega = 1.07\%$ 、 3.55% 、 5.14% 时, 红层泥岩的长期强度分别为 4.85、4.62、4.39 MPa, 长期强度随含水率的提升而递减, 非线性蠕变程度随含水率的升高而愈得到体现。

(4) 本文定义的黏弹性模量 $E(\omega)$, 经过推导变换后得到 $E(\omega, t)$, 建立黏弹性模量随含水率和时间变化的关系, 引入一个非线性黏塑性体, 最终建立一个新的改进后的 Burgers 模型, 能较为准确地描述不同含水状态下红层泥岩随时间变化的黏弹塑性蠕变特性。

本文结论皆建立在本次试验结果的基础上, 由于试样数量不多, 试验过程中误差不可避免, 部分结论尚处于初步阶段, 后续研究中笔者拟进行更多三轴蠕变试验, 为进一步研究红层泥岩在不同含水状态的蠕变特性研究提供更多依据。

参 考 文 献

- [1] 郭永春, 谢强, 文江泉. 我国红层分布特征及主要工程地质问题[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(6): 67-71.
GUO Yong-chun, XIE Qiang, WEN Jiang-quan. Red beds

- distribution and engineering geological problem in China[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2007, 34(6): 67—71.
- [2] 程强, 寇小兵, 黄绍槟, 等. 中国红层的分布及地质环境特征[J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 34—40.
CHENG Qiang, KOU Xiao-bing, HUANG Shao-bin, et al. The distribution and geologic environmental characteristics of red beds in China[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2004, 12(1): 34—40.
- [3] VINDELL H, BAKSI A. Magnetostratigraphy of the red beds in the Hengyang Basin[J]. **Acta Geologica Sinica-English Edition**, 1995, 8(2): 221—232.
- [4] ZHANG M, YIN Y P, HUANG B L. Mechanisms of rainfall-induced landslides in gently inclined red beds in the eastern Sichuan Basin, SW China[J]. **Landslides**, 2015, 12(5): 973—983.
- [5] 李晓. 滑带土组成特征及其成因意义[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
LI Xiao. Composition characteristics and its genetic significance of sliding zone soil[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010.
- [6] LI D Y, YIN K L, Leo C. Analysis of Baishuihe landslide influenced by the effects of reservoir water and rainfall[J]. **Environmental Earth Sciences**, 2010, 60(4): 677—687.
- [7] 谭万鹏, 郑颖人, 王凯. 考虑蠕变特性的滑坡稳定状态分析研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 2): 5—8.
TAN Wan-peng, ZHENG Ying-ren, WANG Kai. Stable state of landslides considering creep properties[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(Supp.2): 5—8.
- [8] PYTHAROULI SI, STIROS SC. Kinematics and rheology of a major landslide based on signal analysis[J]. **Geotechnique**, 2010, 60(3): 207—222.
- [9] 朱合华, 叶斌. 饱水状态下隧道围岩蠕变力学性质的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1791—1796.
ZHU He-hua, YE Bin. Experimental study on mechanical properties of rock creep in saturation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(12): 1791—1796.
- [10] HUANG X L, LIU J J, YANG C H, et al. Experimental investigation of Daqing Oilfield mudstone's creep characteristic under different water contents[J]. **Journal of Central South University of Technology**, 2010, 15(1): 471—474.
- [11] 杨彩红, 王永岩, 李剑光, 等. 含水率对岩石蠕变规律影响的试验研究[J]. 煤炭学报, 2007, 32(7): 695—699.
YANG Cai-hong, WANG Yong-yan, LI Jian-guang, et al. Testing study about the effect of different water content on rock creep law[J]. **Journal of China Coal Society**, 2007, 32(7): 695—699.
- [12] 刘小军, 刘新荣, 王铁行, 等. 考虑含水劣化效应的浅变质板岩蠕变本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2384—2389.
LIU Xiao-jun, LIU Xin-rong, WANG Tie-xing, et al. Creep model of low-grade metamorphic slate considering moisture degradation effect[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(12): 2384—2389.
- [13] 杨淑碧, 徐进, 董孝璧. 红层地区砂泥岩互层状斜坡岩体流变特性研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1996, 7(2): 12—24.
YANG Shu-bi, XU Jin, DONG Xiao-bi. Rheological feature of slope rockmass composed of alternating beds of sandstone and mudstone in red beds area[J]. **Journal of Geological Hazards and Environment Preservation**, 1996, 7(2): 12—24.
- [14] 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, 2047.
LI Ya-li, YU Huai-chang, LIU Han-dong. Study of creep constitutive model of silty mudstone under triaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(7): 2035—2040, 2047.