

# 非饱和泥质粉砂岩蠕变特性及其模型

叶为民<sup>1,2</sup>, 王启力<sup>1</sup>, 罗文静<sup>3</sup>, 谢雄耀<sup>1</sup>, 周彪<sup>1</sup>

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 教育部城市环境与可持续发展联合研究中心, 上海 200092;  
3. 广州地铁设计院股份有限公司, 广东 广州 510010)

**摘要:** 以南宁第三系泥质粉砂岩为研究对象, 开展非饱和和三轴压缩蠕变试验, 分析含水率对岩石蠕变特性的影响; 再在既有五元件蠕变模型中, 引入非线性黏塑性元件, 构建泥质粉砂岩的七元件非饱和压缩蠕变模型, 分析相关蠕变参数的变化规律。结果表明, 随着含水率增加, 泥质粉砂岩的蠕变变形和蠕变速率显著增加, 且蠕变长期强度明显降低, 表明水对泥质粉砂岩蠕变变形影响显著; 新建七元件模型较好地拟合了非饱和泥质粉砂岩全过程蠕变曲线。

**关键词:** 非饱和泥质粉砂岩; 三轴压缩蠕变试验; 蠕变变形; 蠕变速率; 蠕变长期强度; 非线性七元件蠕变模型  
**中图分类号:** TU47 **文献标志码:** A

## Compressive Creep Property and Model for Unsaturated Argillaceous Siltstone

YE Weimin<sup>1,2</sup>, WANG Qili<sup>1</sup>, LUO Wenjing<sup>3</sup>,  
XIE Xiongyao<sup>1</sup>, ZHOU Biao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. United Research Center for Urban Environment and Sustainable Development of the Ministry of Education, Shanghai 200092, China; 3. Guangzhou Metro Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, China)

**Abstract:** In this paper, the tertiary argillaceous siltstone soft rock was extracted from a subway station construction site in Nanning, China. Triaxial compression creep tests were conducted and influences of water content on creep properties of the unsaturated argillaceous siltstone were analyzed. Meanwhile, a nonlinear viscoplastic component was embedded into a five-component viscoelastic model and a seven-component unsaturated compression creep model for the argillaceous siltstone was built. Using this model, the variations of the creep parameters were analyzed. The

results show that as water content increases, the creep deformation and creep rate of the argillaceous siltstone significantly increase, while the long-term creep strength obviously decreases, indicating that water has an important impact on the creep deformation of the argillaceous siltstone. The newly built seven-component nonlinear viscoelastoplastic model well simulates the whole creep process curves.

**Key words:** unsaturated muddy siltstone; triaxial compression creep test; creep deformation; creep rate; creep long-term strength; nonlinear seven-element creep model

隧道等地下工程开挖施工后, 洞壁围岩的蠕变变形及其对地下工程长期稳定性的影响, 一直是岩土工程界高度重视的问题<sup>[1]</sup>。工程实践中, 地下岩体开挖时, 围岩发生卸载变形并伴随既有裂隙扩展或新裂隙产生, 使岩体强度降低、渗透性增加, 特别是在地下水作用下围岩发生软化, 且随着时间的推移变形逐渐累积, 可导致围岩破裂失稳, 甚至隧洞坍塌等重大工程事故<sup>[2-4]</sup>。因此, 开展考虑含水率影响的软岩蠕变性能研究, 具有重要的理论和工程实践意义。

对此, 国内外学者开展了大量有关含水率和应力对岩石蠕变变形影响的研究。Wawersik<sup>[5]</sup>发现砂岩的蠕变变形和蠕变率随含水率增大而增大, 并且饱和试样的稳态蠕变率比干燥试样高出约两个数量级。Okubo 等<sup>[6]</sup>用饱和凝灰岩分别进行了 2.5 年和 12 年的蠕变试验, 发现蠕变应变和应变速率均可表示为时间的幂函数。朱合华等<sup>[7-9]</sup>开展了干燥和饱和状态下凝灰岩的单轴蠕变试验, 发现干燥和饱和试样的最大蠕变变形量可差 5~6 倍, 并且干燥试样在

收稿日期: 2021-07-16

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1509900)

第一作者: 叶为民(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为非饱和土工程地质、环境地质。

E-mail: ye\_tju@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

较短时间进入稳定蠕变阶段。另外,刘光廷等<sup>[10-11]</sup>发现饱水后砾岩蠕变量可达干燥样的10倍,干燥和饱水后砾岩蠕变变形与瞬时变形的比值分别是25%和50%。李男等<sup>[12]</sup>研究了干燥和饱水砂岩剪切蠕变性质,发现水的存在增大了岩石的蠕变应变和速率,并且降低了蠕变破坏时的强度值。干燥和饱和状态下粉砂质泥岩的三轴压缩蠕变试验表明,含水率越高,岩石的稳态蠕变速率越大,蠕变也越难稳定<sup>[13]</sup>。巨能攀等<sup>[14]</sup>研究了考虑含水率影响的红层泥岩三轴压缩蠕变特性,发现初始、稳态和极限加速蠕变速率都随含水率的升高而增大。于永江等<sup>[15]</sup>研究了富水软岩蠕变特性,发现一定剪应力下,随着含水率增大,软岩瞬时弹性模量、极限变形模量减小;一定含水率下,随着剪切应力的增加,软岩瞬时剪切位移量、蠕变变形量都逐渐增大。于超云等<sup>[16]</sup>研究了含水率对红砂岩蠕变性质的影响,发现随着含水率增大,蠕变应变和破坏时间减小,而稳态应变速率增大。刘新喜等<sup>[17]</sup>开展了高应力泥质粉砂岩蠕变特性研究,发现随着轴向荷载增大,瞬时应变和蠕变变形均增大。

与此同时,Zou等<sup>[18]</sup>通过从净应力张量中减去气压构建了非饱和土的扩展 Burgers 蠕变模型。在此基础上,郑俊等<sup>[19]</sup>将非饱和抗剪强度引入进一步改进了此模型。Liu等<sup>[20]</sup>用Hutter提出的非饱和土的单应力状态变量修正广义 Kelvin 模型的有效应力。于永江等<sup>[15]</sup>通过引入一个与含水率  $w$  有关的描述加速流变的非线性流变元件,串联传统的西原模型,较为准确地描述不同含水率条件下、软岩随时

间变化的非线性蠕变特性。但纵观前人研究可以发现,目前关于水对岩石蠕变特性的影响研究多局限在干燥和饱和两种极端状态,含水率对岩石蠕变特性的影响研究有待完善<sup>[21-22]</sup>。本文以南宁市某地铁站为工程背景,以第三系泥质粉砂岩为研究对象,开展从干燥到饱和4种含水率的三轴压缩蠕变试验,构建了非饱和泥质粉砂岩的非线性黏弹塑性蠕变模型,分析了含水率对岩石蠕变特性的影响。

## 1 试验材料、装置和方法

### 1.1 试样制备

本文试验所用泥质粉砂岩取自南宁地铁3号线某车站暗挖隧道开挖面现场,埋深约为60 m,岩块采集时标记其原始层位与方位。试样呈青灰色,粉砂质、局部含泥质结构,厚层状构造。岩块经室内锯磨加工成直径38 mm、高76 mm标准圆柱状试件,如图1所示。泥质粉砂岩的基本物理力学性质指标如表1所示。

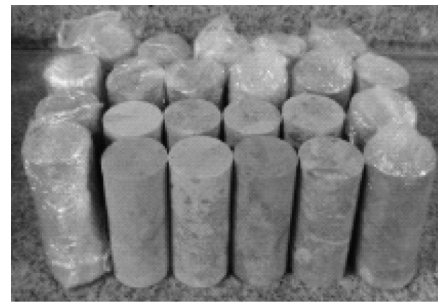


图1 泥质粉砂岩试件

Fig.1 Argillaceous siltstone specimens

表1 泥质粉砂岩的基本物理力学指标

Tab.1 Basic physical and mechanical parameters of argillaceous siltstone

天然含水率/%	天然密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙比	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	饱和度/%
9.82	2.22	0.35	1.56	3.0	0.30	90.60

本文开展了0、4.56%、8.47%和12.38%(饱和状态)4种含水率试样的蠕变试验研究。试样制备时,首先将天然状态试样在105℃下烘干至干燥,再将干燥样放入饱和器并在真空桶内抽真空4 h,然后用蒸馏水分别浸泡6、12 h,获取含水率为4.56%和8.47%的非饱和试样;并将天然状态试样直接抽真空4 h后,蒸馏水浸泡24 h获取饱和试样。

### 1.2 试验装置和方法

#### 1.2.1 试验装置

本研究所用试验仪器为多功能三轴试验仪(图2)。该仪器由加压系统、量测系统和控制系统3部

分组成。其中,加压系统可提供最大轴向荷载40 kN(精度0.01 kN),最大围压10 MPa,量测系统中变形量测精度为0.01 mm。

#### 1.2.2 试验方法

为了确定蠕变试验中最大荷载值,开展了围压为1 MPa、不同含水率泥质粉砂岩的常规三轴压缩试验,获取三轴压缩峰值强度 $\sigma_{max}$ ,并将峰值强度值的90%作为蠕变试验中所施加的最大荷载。蠕变试验采用分级加载方式加载,考虑到含水率对试样强度影响,避免加载应力过大造成试样破坏,轴向分11级加载。具体加载方案如表2所示。

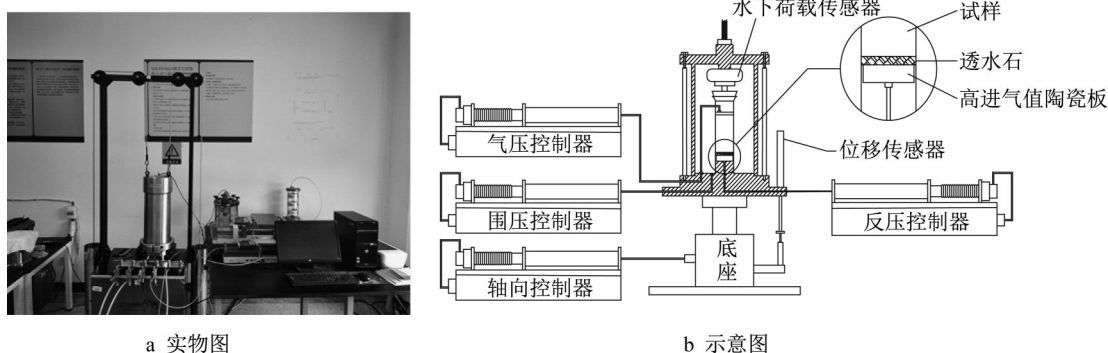


图2 多功能三轴试验仪

Fig.2 Multifunctional triaxial test system

表2 蠕变试验加载方案

Tab.2 Loading scheme for creep tests

$w/\%$	$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	偏应力/MPa										
		1级	2级	3级	4级	5级	6级	7级	8级	9级	10级	11级
0	10.96	0.88	1.68	2.48	3.28	4.08	4.88	5.68	6.48	8.08	9.68	10.08
4.56	7.24	0.88	1.68	2.48	3.28							
8.47	5.59	0.88	1.28	1.68								
12.38	3.06	0.88	1.28									

蠕变试验时,首先用橡皮膜包裹岩样,并在其两端垫放滤纸和透水石,放入三轴压力室中,调整试样中心位置以免偏心受压;然后,将三轴仪腔室充满水,再按 $0.6 \text{ kPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 加载速率施加围压至预定值 $1 \text{ MPa}$ ,并将记录仪位移清零;随后,施加 $1 \text{ kN}$ 初始轴向荷载(对应偏应力 $0.88 \text{ MPa}$ ),记录变形至稳定,即当变形速率小于 $0.01 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时<sup>[23]</sup>,再按表2加载方案,施加下一级荷载,直至试样发生破坏,试验结束。更换试样并重复上述步骤,直至完成表2中所有蠕变试验。所有试验均在恒温 and 恒湿条件下进行,温度为 $(22.0 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ ,湿度为 $(40 \pm 1)\%$ 。

## 2 试验结果和分析

### 2.1 试验结果

围压 $1 \text{ MPa}$ 条件下,不同含水率泥质粉砂岩轴向应变与时间关系如图3所示。基于陈氏法原理<sup>[24]</sup>,将分级加载获取的蠕变曲线,转化为单级加载下的蠕变曲线,如图4所示。

### 2.2 瞬时应变和蠕变应变

图3、4表明,每级应力下的变形曲线均由瞬时弹性应变 $\epsilon_i$ 和蠕变应变 $\epsilon_c$ 两部分组成。瞬时弹性应变在施加荷载过程中产生,蠕变应变随时间延长而增长。

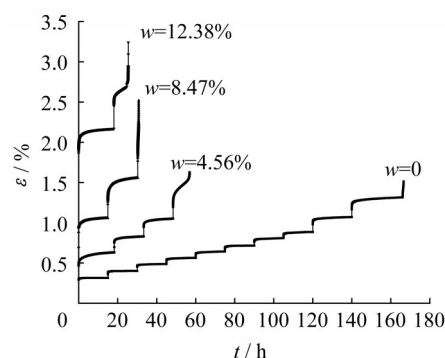


图3 泥质粉砂岩分级加载蠕变曲线

Fig.3 Creep curves of argillaceous siltstone in step loading

#### 2.2.1 应力水平的影响

由图3、4可知,对于给定含水率,应力水平提高,瞬时应变和蠕变应变增大,且瞬时应变明显高于蠕变应变。对于干燥试样( $w=0$ ),应力为 $0.88 \text{ MPa}$ 时,瞬时应变为 $2.913 \times 10^{-3}$ ,蠕应变为 $2.24 \times 10^{-4}$ ;应力为 $8.08 \text{ MPa}$ 时,瞬时应变为 $9.792 \times 10^{-3}$ ,蠕变应变为 $9.11 \times 10^{-4}$ 。对于饱和试样( $w=12.38\%$ ),应力为 $0.88 \text{ MPa}$ 时,瞬时应变为 $1.884 \times 10^{-2}$ ,蠕变应变为 $2.859 \times 10^{-3}$ ;应力为 $1.28 \text{ MPa}$ 时,瞬时应变为 $2.451 \times 10^{-2}$ ,蠕应变为 $7.901 \times 10^{-3}$ 。

上述荷载导致软化现象曾被认为是孔隙水压力增大对砂岩产生拉应力,孔隙水的流动减小岩石骨



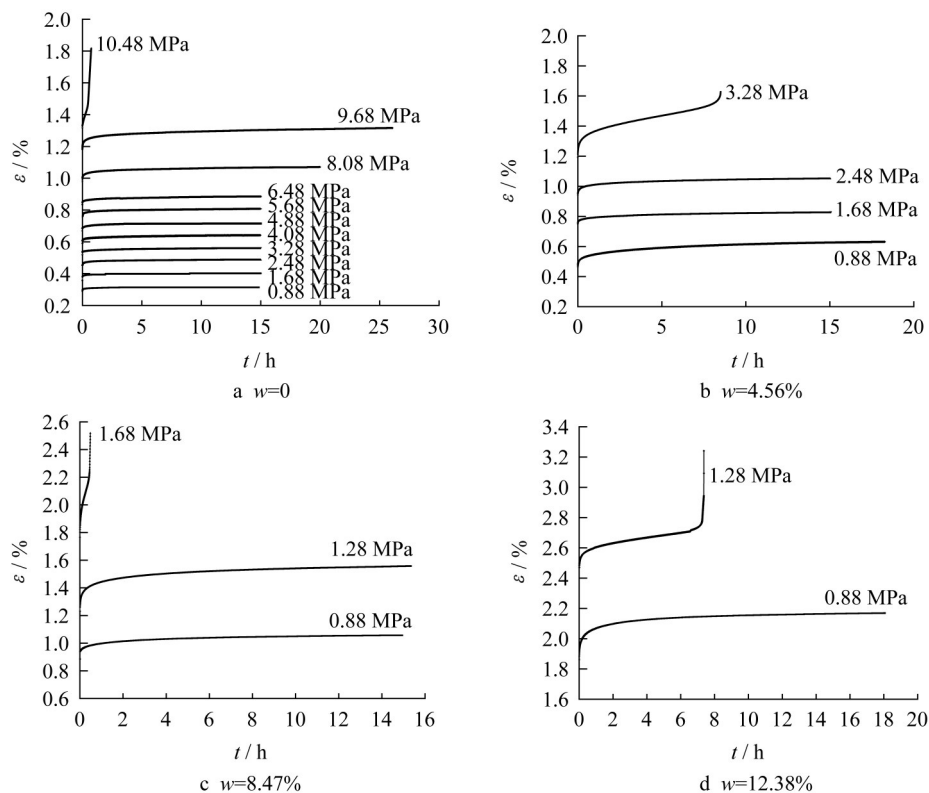


图4 泥质粉砂岩单级加载蠕变曲线

Fig.4 Creep curves of argillaceous siltstone in single step loading

架变形阻力,结合水膜润滑降低了受压后接触侧壁之间的剪切强度,引发Rheibinder效应降低了岩石强度<sup>[25]</sup>。但实际上,饱和砂岩在单轴压缩过程中的最大孔隙水压力仅约1.3 kPa<sup>[26]</sup>。因此,本文认为,随着应力水平提升,泥质粉砂岩颗粒间的剪应力增大,当围压引起的颗粒间法向应力基本不变时,相同时间内颗粒间相对变形增大。这一解释与文献[25]中涉及的砂岩软化情况一致。

### 2.2.2 含水率的影响

由图5可见,一定应力水平下,随着含水率增大,岩石瞬时变形和蠕变变形均增大,且饱和状态下岩样的变形增长最大,图中 $\sigma_1$ 为轴向荷载, $\sigma_3$ 为围压。从干燥到饱和状态,瞬时应变从 $2.913 \times 10^{-3}$ 增大到 $1.884 \times 10^{-2}$ ,蠕应变从 $2.24 \times 10^{-4}$ 增加到 $2.859 \times 10^{-3}$ ,即饱和岩样瞬时应变增大了约6倍,蠕应变增大了约10倍。

针对含水率对岩石变形影响问题,张安斌等<sup>[27]</sup>开展了自由变形条件下干燥、天然状态和饱和状态试样的变形试验,发现干燥泥质粉砂岩颗粒之间原始微裂隙和微缺陷较为明显,粒间胶结物充填密实,力学性能较强;自然状态下,颗粒间胶结物遇水膨胀,包裹粉砂颗粒,颗粒集体水解,局部区域聚

集成团絮;饱和状态下,由于水的溶蚀作用,颗粒间胶结程度差,呈紊流状排列。田巍巍<sup>[28]</sup>认为,泥质粉砂岩孔隙结构提供了水的浸入通道,水分引起泥质粉砂岩中蒙脱石、伊利石等黏土矿物的软化、膨胀和崩解等。同时,颗粒吸水增大了水膜厚度。李万才等<sup>[29]</sup>认为,除了颗粒吸水膨胀外,孔隙水与颗粒之间的胶结物发生理化反应,软化和溶解胶结物。

本文试样制备过程中,泥质粉砂岩中黏土矿物的干燥失水收缩或可产生裂隙或缺陷;同时,虽然由于饱和器限制,黏土矿物的吸水膨胀不会发生崩解,但土颗粒间水膜增厚,摩擦力减小,且含水率增大溶蚀胶结物,减弱颗粒之间的胶结等,均可造成泥质粉砂岩蠕变变形随着含水率增大而增大。

### 2.3 蠕变速率

根据蠕变曲线斜率,可计算获取蠕变速率-时间关系曲线。本文干燥试样的蠕变速率-时间关系曲线如图6所示。由图6a可见,岩样未发生破坏时,轴向应变速率包括衰减蠕变和稳态蠕变速率阶段。随着应力水平增大,稳态蠕变速率呈现增大的趋势。当岩样发生蠕变破坏时,岩石的轴向蠕变速率变化呈现3个阶段特征(图6b),即衰减蠕变、稳态蠕变和

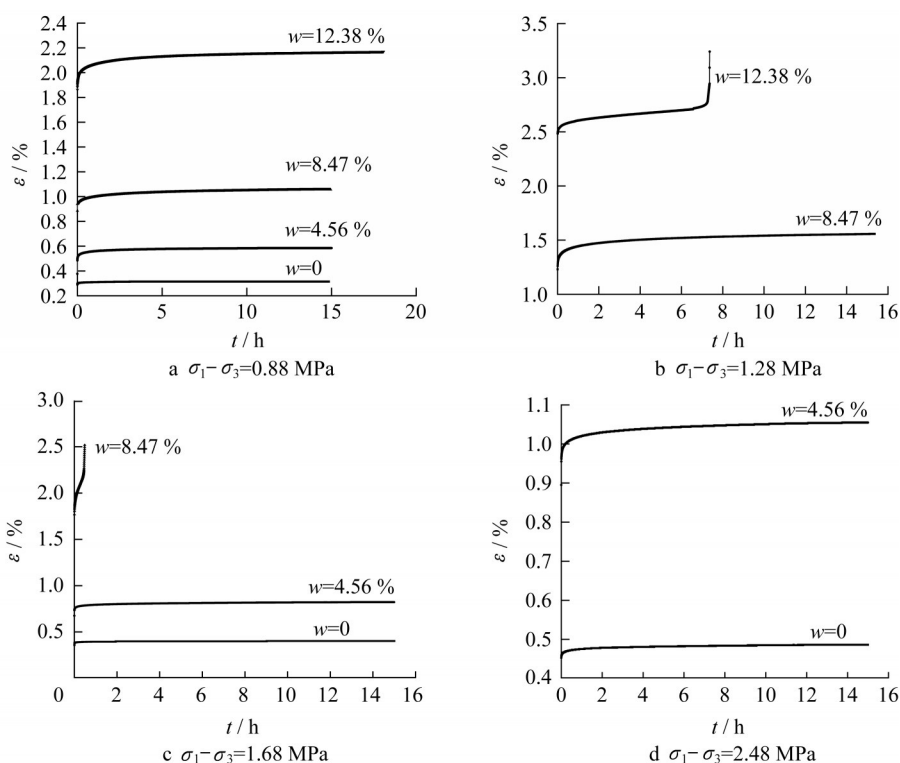


图5 一定荷载不同含水率下泥质粉砂岩蠕变曲线

Fig.5 Creep curves of argillaceous siltstone at different water contents and a given deviatoric stress

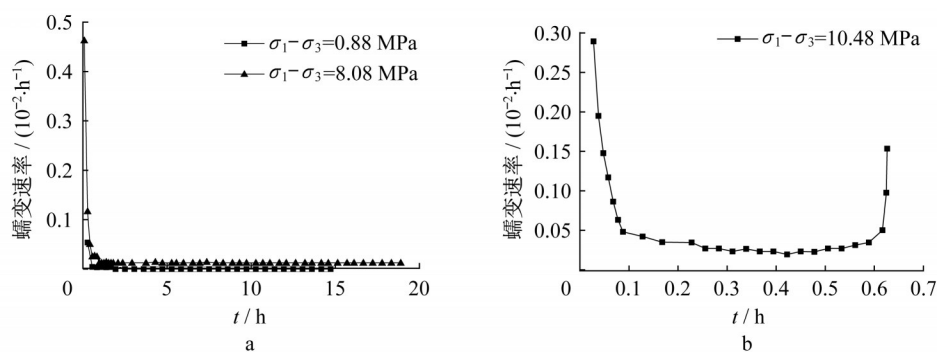


图6 轴向蠕变速率与时间关系曲线

Fig.6 Relationship between axial creep rate and creep time

加速蠕变,蠕变速率-时间曲线呈现“U”形。在加速蠕变阶段,蠕变速率迅速增大,岩样在较短时间内发生蠕变破坏。工程实践中,当加速蠕变阶段出现时,应该引起特别重视。

#### 2.4 蠕变长期强度

恒定荷载作用下,岩石内部不断发生既有微裂隙的扩展和新裂隙的产生,导致岩石长期强度低于瞬时强度。当应力作用时间趋于无穷时,岩石所能抵抗的最低应力即为岩石的蠕变长期强度 $\sigma_{\infty}$ 。数值上, $\sigma_{\infty}$ 可由试样蠕变破坏前,稳态蠕变转变为非稳态蠕变时的临界应力值确定<sup>[30]</sup>。工程实践中,岩体长期稳定性通常以长期强度作为评价指标。因此,长

期强度的确定具有重要的工程实践意义。

通常情况下,岩石的长期强度可采用等时簇曲线法确定,即在同一时间所对应的应力( $\sigma_1 - \sigma_3$ )-应变( $\varepsilon$ )曲线上,确定出各等时曲线的拐点,即蠕变由黏弹性阶段向黏塑性阶段(加速蠕变)转变的屈服极限点。根据拐点绘制屈服渐近线,对应的应力值即为岩石长期强度 $\sigma_{\infty}$ 。根据等时簇曲线法,计算得非饱和泥质粉砂岩的蠕变长期强度如表3所示。可见,随着含水率增大,蠕变长期强度显著降低,且饱和和试样的蠕变长期强度约为干燥试样的9.1%,表明水对泥质粉砂岩的蠕变强度影响显著。

表 3 非饱和泥质粉砂岩的蠕变长期强度

Tab. 3 Creep long-term strength of unsaturated argillaceous siltstone

$w/\%$	0(干燥)	4.56	8.47	12.38(饱和)
$\sigma_{\infty}/\text{MPa}$	9.68	2.48	1.28	0.88

### 3 非饱和泥质粉砂岩蠕变本构模型

#### 3.1 非线性黏弹塑性蠕变模型

针对未发生蠕变破坏时岩样的线性黏弹性特征,可采用五元件蠕变模型(图 7)<sup>[31]</sup>来模拟。五元件线性黏弹性模型的蠕变方程如式(1)所示。

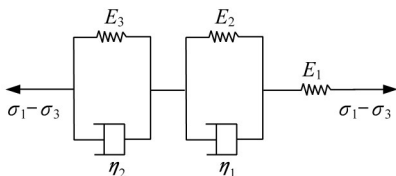


图 7 五元件黏弹性蠕变模型

Fig. 7 Five-component viscoelastic rheological model

$$\epsilon(t) = \left[ \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_1} t}) + \frac{1}{E_3} (1 - e^{-\frac{E_3}{\eta_2} t}) \right] (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (1)$$

式中:  $\epsilon$  为岩石轴向总应变;  $t$  为总蠕变时间;  $E_1$  为瞬时弹性模量;  $E_2$  和  $E_3$  均为黏弹性模量;  $\eta_1$  和  $\eta_2$  均为黏滞系数, 其中  $\eta_1$  为稳态蠕变阶段的蠕变速率,  $\eta_2$  为蠕变趋向稳定的快慢程度。

然而, 五元件模型中没有考虑塑性变形的元件, 无法描述应力高于长期强度时的加速蠕变和非线性蠕变特性。为了表征泥质粉砂岩全过程蠕变特性, 引入一个非线性黏塑性体<sup>[31]</sup>, 并将其与五元件线性黏弹性模型串联, 构成一个新的七元件非线性黏弹塑性蠕变模型(图 8), 相应的蠕变方程如(2)、(3)所示。

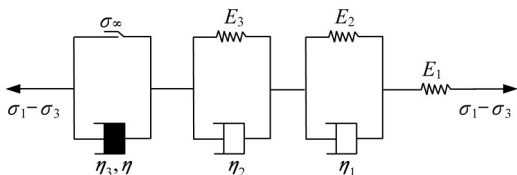


图 8 七元件非线性黏弹塑性蠕变模型

Fig. 8 Seven-component nonlinear viscoelastoplastic creep model

当  $\sigma_1 - \sigma_3 \leq \sigma_{\infty}$  时,

$$\epsilon(t) = \left[ \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_1} t}) + \frac{1}{E_3} (1 - e^{-\frac{E_3}{\eta_2} t}) \right] (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (2)$$

当  $\sigma_1 - \sigma_3 > \sigma_{\infty}$  时,

$$\epsilon(t) = \left[ \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_1} t}) + \frac{1}{E_3} (1 - e^{-\frac{E_3}{\eta_2} t}) \right] (\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_{\infty}}{\eta_3} t^n \quad (3)$$

式中:  $\eta_3$  为塑性指数;  $n$  为蠕变指数, 反映岩石加速蠕变速率的快慢程度。

当所施加的应力小于长期强度时, 非线性黏塑性体变形为零; 当所施加的应力大于长期强度时, 随着  $\eta_3$  减小和  $n$  增大, 一定时间内蠕变变形增大, 可描述岩石蠕变全过程曲线。当  $\sigma_1 - \sigma_3 \leq \sigma_{\infty}$  时, 模型退化为五元件线性蠕变模型; 当  $\sigma_1 - \sigma_3 > \sigma_{\infty}$  时, 模型为可描述加速蠕变状态的非线性模型。

#### 3.2 参数辨识

采用 Lenvenberg-Marquardt 无条件约束优化算法<sup>[32]</sup>, 并利用 Origin 软件, 辨识七元件模型的蠕变参数如表 4 所示。

由表 4 可见, 给定含水率, 随着应力水平提高,  $E_1$  单调增加, 这主要是由于加载初期, 岩石孔隙被压密导致瞬时变形不断减小。低应力水平时,  $E_2$  和  $E_3$  呈增大趋势, 表明岩石蠕变过程中逐渐硬化, 抵抗变形能力提升; 但在高应力水平时,  $E_2$  和  $E_3$  变化规律较复杂。随应力变化, 黏滞系数 ( $\eta_1$  和  $\eta_2$ ) 离散性较大, 规律不明显。

给定应力条件下, 随着含水率提高,  $E_1$  不断减小,  $E_2$  和  $E_3$  也呈减小趋势, 这是由于瞬时弹性变形和蠕变变形不断增大的结果。随着含水率的提高,  $\eta_1$  和  $\eta_2$  呈减小趋势, 这主要是由于岩石内部损伤逐渐增大, 黏滞性增强导致黏滞系数减小。

塑性系数  $\eta_3$  反映了岩石产生塑性变形的能力。随着含水率提高,  $\eta_3$  逐渐减小, 表明岩石产生的塑性变形越来越大。蠕变指数  $n$  反映了岩石加速蠕变速率的快慢程度。随着含水率提高,  $n$  值不断增大, 表明泥质粉砂岩的加速蠕变速率不断提高。

最后, 采用七元件非线性蠕变模型模拟了 4 种含水率试样的蠕变曲线(图 9)。结果表明, 七元件模型可较好描述岩石全过程蠕变曲线。

表 4 蠕变模型参数值  
Tab. 4 Creep parameters for creep models

$w/\%$	应力/MPa	$E_1/\text{GPa}$	$E_2/\text{GPa}$	$E_3/\text{GPa}$	$\eta_1/(\text{GPa}\cdot\text{h})$	$\eta_2/(\text{GPa}\cdot\text{h})$	$\eta_3/(\text{GPa}\cdot\text{h})$	$n$	$R^2$
0	0.88	3.02	75.28	87.34	92.03	101.74			0.989
	1.68	4.32	109.67	145.69	1.73	337.90			0.955
	2.48	5.38	185.60	190.96	64.20	1 276.83			0.990
	3.28	6.04	226.80	173.50	1.52	631.15			0.972
	4.08	6.59	268.92	185.87	7.10	799.77			0.970
	4.88	7.04	227.73	211.29	326.84	3.97			0.978
	5.68	7.25	4.47	248.00	3.03	874.16			0.926
	6.48	7.61	432.73	261.31	192.16	2 832.71			0.991
	8.08	8.25	156.97	212.33	1.18	1 103.98			0.952
	9.68	9.07	6.54	148.01	5.32	1 194.49			0.959
	10.48	7.94	417.52	276.54	31.35	20.68	30.64	3.30	0.995
4.56	0.88	1.77	9.03	21.14	73.69	9.23			0.999
	1.68	2.20	39.96	67.55	214.56	19.77			0.997
	2.48	2.56	50.22	72.01	310.94	27.08			0.997
	3.28	2.66	39.08	16.35	5.46	60.72	15.26	5.96	0.997
8.47	0.88	0.93	13.42	18.65	52.86	9.77			0.996
	1.28	0.98	10.92	9.87	3.78	50.59			0.986
	1.68	0.88	4.42	4.72	5.54	4.25	8.87	17.28	0.968
12.38	0.88	0.87	13.86	15.24	4.73	6.87			0.995
	1.28	0.51	7.54	18.12	33.47	2.98	2.96	27.77	0.958

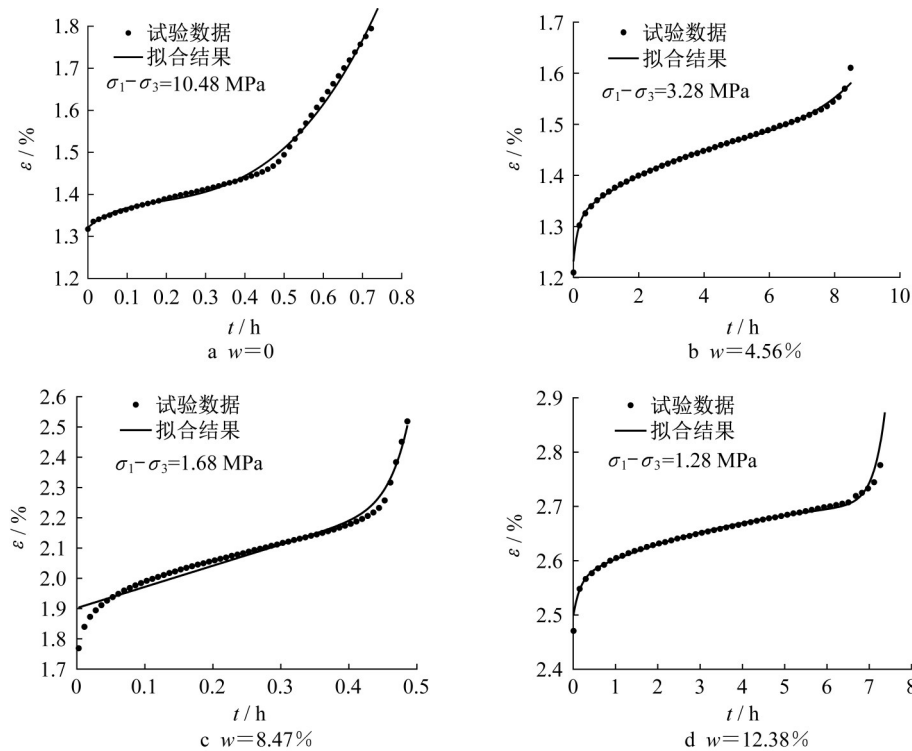


图 9 非饱和泥质粉砂岩七元蠕变模型计算数据和试验数据对比

Fig.9 Comparison of creep deformation curves calculated by seven-component creep model and measured from tests for unsaturated argillaceous siltstone

### 4 结论

本文以南宁地区不同含水率的非饱和泥质粉砂岩为研究对象,开展了三维压缩蠕变试验研究,获取了蠕变曲线并分析了数据变化规律;构建了针对非

饱和泥质粉砂岩的七元蠕变模型。结论如下:

水对泥质粉砂岩蠕变变形有显著影响。随着含水率升高,岩石产生的瞬时应变和蠕应变均不断增大。1 MPa围压下,与干燥试样相比,饱和试样的瞬时应变增大了约6倍,蠕应变增大了约10倍。同时,



随着含水率升高,岩石的蠕变长期强度显著降低,饱和和试样的蠕变长期强度约为干燥试样的9.1%。应力水平未达到破坏强度时,轴向蠕变速率呈现出衰减蠕变和稳态蠕变;达到破坏强度时,轴向蠕变速率呈现出衰减、稳态和加速蠕变,且蠕变速率-时间曲线呈“U”形。

基于既有五元件线性黏弹性模型,引入非线性黏塑性元件,构建了七元件非线性黏弹塑性模型,并较好模拟了非饱和泥质粉砂岩包含加速蠕变阶段的全过程蠕变曲线。

#### 作者贡献声明:

叶为民:方案设计,理论指导,文稿修改。

王启力:试验实施,结果与理论分析,初稿撰写与修改。

罗文静:现场协调,方案讨论。

谢雄耀:方案讨论与优化,结果分析。

周彪:现场协调,文稿修改。

#### 参考文献:

- [1] 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.  
SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1081.
- [2] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.  
CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan. Rock mechanics and engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [3] BOIDY E, BOUVAND A. Back analysis of time-dependent behavior of a test gallery in claystone [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2002, 17(4): 415.
- [4] CRUDEN D M, LEUNG K. Technique for estimating the complete creep curve of a subbituminous coal under uniaxial compression [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1987, 24(4): 265.
- [5] WAWERSIK W R. Time-dependent rock behavior in uniaxial compression [C]//New Horizons in Rock Mechanics. University Park: A A Balkema, 1972: 85-106.
- [6] OKUBO S, FUKUI K, HASHIBA K. Long-term creep of water-saturated tuff under uniaxial compression [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2010, 47(5): 839.
- [7] 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.  
ZHU Hehua, YE Bin. Experimental study on mechanical properties of rock creep in saturation [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1791.
- [8] MARANINI E, BRIGNOLI M. Creep behaviour of a weak rock: experimental characterization [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(1): 127.
- [9] FUJII Y, KIYAMA T. Circumferential strain behavior during creep tests of brittle rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(3): 323.
- [10] 刘光廷, 胡昱, 陈凤岐, 等. 软岩多轴流变特性及其对拱坝的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 8: 1237.  
LIU Guangting, HU Yu, CHEN Fengqi, et al. Rheological property of soft rock under multiaxial compression and its effect on design of arch dam [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 8: 1237.
- [11] GASC-BARBIER M, CHANCHOLE S. Creep behavior of bore clayey rock [J]. Applied Clay Science, 2004, 24: 449.
- [12] 李男, 徐辉, 胡斌. 干燥与饱水状态下砂岩的剪切蠕变特性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 439.  
LI Nan, XU Hui, HU Bin. Shear creep characteristics of sandstone under dry and saturated states [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 439.
- [13] 康文献, 于怀昌, 王玲玲, 等. 三轴应力下水对粉砂质泥岩蠕变力学特性影响作用试验研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(4): 622.  
KANG Wenxian, YU Huaichang, WANG Lingling, et al. Experimental study of influence of water on creep properties of silty mudstone under triaxial compression [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(4): 622.
- [14] 巨能攀, 黄海峰, 郑达, 等. 考虑含水率的红层泥岩蠕变特性及改进伯格模型[J]. 岩土力学, 2016, 37(S2): 67.  
JU Nengpan, HUANG Haifeng, ZHENG Da, et al. Improved Burgers model for creep characteristics of red bed mudstone considering water content [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 67.
- [15] 于永江, 张伟, 张国宁, 等. 富水软岩的蠕变特性实验及非线性剪切蠕变模型研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(285): 299.  
YU Yongjiang, ZHANG Wei, ZHANG Guoning, et al. Study of nonlinear shear creep model and creep property experiment of water-rich soft rock [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(285): 299.
- [16] 于超云, 唐世斌, 唐春安. 含水率对红砂岩瞬时和蠕变力学性质影响的试验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 473.  
YU Chaoyun, TANG Shibin, TANG Chunan. Experimental investigation on the effect of water content on the short-term and creep mechanical behaviors of red sandstone [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 473.
- [17] 刘新喜, 李盛南, 周炎明, 等. 高应力泥质粉砂岩蠕变特性及长期强度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 138.  
LIU Xinxi, LI Shengnan, ZHOU Yanming, et al. Study on creep behavior and long-term strength of argillaceous siltstone under high stresses [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 138.
- [18] ZOU L C, WANG S M, LAI X L. Creep model for unsaturated soils in sliding zone of Qianjiangping landslide [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,



- 2013, 5(2): 162.
- [19] 郑俊, 王世梅, 周辉, 等. 基于伯格模型的非饱和土蠕变模型构建[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(8): 112.  
ZHENG Jun, WANG Shimei, ZHOU Hui, *et al.* A creep model of unsaturated soil based on Burger's model [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(8): 112.
- [20] LIU J, LIU W, LIU P, *et al.* Preliminary research on the theory and application of unsaturated red-layers embankment settlement based on rheology and consolidation theory [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(6): 503.
- [21] 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.  
YANG Caihong, WANG Yongyan, LI Jianguang, *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.
- [22] 黄小兰, 杨春和, 刘建军, 等. 不同含水情况下的泥岩蠕变试验及其对油田套损影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S2): 3477.  
HUANG Xiaolan, YANG Chunhe, LI Jianjun, *et al.* Experimental study on mudstone's creep behavior under different water contents and its effect on casing damage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S2): 3477.
- [23] 陈卫忠, 谭贤君, 吕森鹏, 等. 深部软岩大型三轴压缩流变试验及本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1735.  
CHEN Weizhong, TAN Xianjun, LV Senpeng, *et al.* Research on large-scale triaxial compressive rheological test of soft rock in depth and its constitutive model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1735.
- [24] 陈宗基, 康文法. 岩石的封闭应力、蠕变和扩容及本构方程[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(4): 299.  
CHEN Zongji, KANG Wenfa. On the locked in stress, creep and dilatation of rocks, and the constitutive equations [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1991, 10(4): 299.
- [25] 贾海梁, 王婷, 项伟, 等. 含水率对泥质粉砂岩物理力学性质影响的规律与机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(7): 1618.  
JIA Hailiang, WANG Ting, XIANG Wei, *et al.* Influence of water content on the physical and mechanical behaviour of argillaceous siltstone and some microscopic explanations [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(7): 1618.
- [26] HAWKINS A B, MCCONNELL B J. Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content [J]. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1992, 25(2): 115.
- [27] 张安斌, 张艳博, 刘祥鑫, 等. 水对泥质粉砂岩物理力学性能影响的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2015(8): 70.  
ZHANG Anbin, ZHANG Yanbo, LIU Xiangxin, *et al.* Test study on water affected to physical mechanics performances of muddy siltstone [J]. Coal Science and Technology, 2015(8): 70.
- [28] 田巍巍. 干湿循环下不同风化程度泥质粉砂岩崩解特性试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(6): 223.  
TIAN Weiwei. Experimental study on disintegration characteristics of argillaceous siltstone with different degree of weathering under dry-wet cycling [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(6): 223.
- [29] 李万才, 赖远超, 邓辉, 等. 新近系泥质粉砂岩水理特性室内试验研究[J]. 人民长江, 2020, 51(9): 173.  
LI Wancai, LAI Yuanchao, DENG Hui, *et al.* Laboratory study on hydro-physical characteristics of neogene argillaceous siltstone [J]. Yangtze River, 2020, 51(9): 173.
- [30] 武东生, 孟陆波, 李天斌, 等. 灰岩三轴高温后效流变特性及长期强度研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(S1): 183.  
WU Dongsheng, MENG Lubo, LI Tianbin, *et al.* Study of triaxial rheological property and long-term strength of limestone after high temperature [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S1): 183.
- [31] 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.  
XU Weiya, YANG Shengqi, XIE Shouyi, *et al.* Investigation on triaxial rheological mechanical properties of greenschist specimen (II): model analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(5): 693.
- [32] 谭冬莲, 肖汝诚. 基于Levenberg-Marquardt算法的桥梁结构静力参数识别[J]. 交通运输工程学报, 2005(3): 56.  
TAN Donglian, XIAO Rucheng. Static parameter identification of bridge structure based on Levenberg-Marquardt algorithm [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005(3): 56.