

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.028



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



粉砂质泥岩蠕变特性与非线性黏弹塑性本构模型

付宏渊^{1a,1b}, 戚双星^{1a}, 史振宁^{1b,1c}, 高乾丰^{1b,1c}, 匡波², 曾铃^{1a}

(1. 长沙理工大学 a. 土木工程学院; b. 公路养护技术国家工程实验室; c. 交通运输工程学院, 长沙 410114; 2. 广西交通设计集团有限公司, 南宁 530029)

摘要:针对边坡、隧道工程中粉砂质泥岩长期稳定性问题,采用 DZSZ-150 型多场耦合岩石三轴压力试验机,利用粉砂质泥岩相似材料试样,开展不同围压下粉砂质泥岩蠕变试验。根据蠕变试验结果建立可描述粉砂质泥岩蠕变全过程的非线性黏弹塑性本构模型,以 7 MPa 围压下蠕变试验结果为例,对所提出的蠕变本构模型进行合理性和可行性验证。结果表明:试样的稳态蠕变速率与偏应力大小有关,随着偏应力的增加,试样稳态蠕变速率与偏应力之间符合指数函数关系;在加速蠕变阶段的蠕变速率相对低偏应力水平下减速蠕变和稳态蠕变速率明显要增大很多,且非常短时间内就发生了蠕变破坏;提出一种描述粉砂质泥岩全蠕变过程的非线性黏弹塑性本构模型,该模型能描述粉砂质泥岩蠕变-破坏全过程的蠕变变形规律,反映了粉砂质泥岩在不同偏应力水平作用下的蠕变特性,克服了经典模型中无法准确描述加速蠕变过程的难题。

关键词:粉砂质泥岩;蠕变试验;加速蠕变;蠕变特性;本构模型

中图分类号:TU411.6 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2024)03-0001-08

Creep characteristics of silty mudstone and nonlinear viscoelastic-plasticity constitutive model

FU Hongyuan^{1a,1b}, QI Shuangxing^{1a}, SHI Zhenning^{1b,1c}, GAO Qianfeng^{1b,1c},
KUANG Bo², ZENG Ling^{1a}

(1a. School of Civil Engineering; 1b. National Engineering Laboratory of Highway Maintenance Technology; 1c. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, P. R. China; 2. Guangxi Communications Design Group Co., Ltd., Nanning 530029, P. R. China)

收稿日期:2021-12-01

基金项目:国家自然科学基金(51838001、51908069、52078066、52078067);湖湘青年科技创新人才项目(2020RC306);湖南省重点领域研发项目(2019SK2171);长沙市杰出创新青年培养计划(kq1905043);国家级大学生创新创业训练项目(202120536003);长沙理工大学公路养护技术国家工程实验室开放基金(kfj170103)

作者简介:付宏渊(1965-),男,教授,博士生导师,主要从事岩土工程防灾减灾研究,E-mail: fhy001@126.com。

曾铃(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail: zl001@csust.edu.cn。

Received: 2021-12-01

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 51838001, 51908069, 52078066, 52078067), Youth Scientific and Technological Innovation Talents of Hunan Province (No. 2020RC306), Research and Development Projects in Key Fields of Hunan Province (No. 2019SK2171), Outstanding Innovative Youth Training Program of Changsha City (No. kq1905043), College Students Innovation and Entrepreneurship Program of China (No. 202120536003), Open Fund of National Engineering Laboratory of Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science & Technology (No. kfj170103)

Author brief: FU Hongyuan (1965-), professor, doctoral supervisor, main research interest: disaster prevention and mitigation in geotechnical engineering, E-mail: fhy001@126.com.

ZENG Ling (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zl001@csust.edu.cn.

Abstract: In order to guarantee the long-term stability of silty mudstone in slope and tunneling projects, the DZSZ-150 multi-field coupling rock triaxial pressure testing machine was used to conduct creep tests on silty mudstone specimens of similar materials under different surrounding pressures. Based on the testing results, a nonlinear viscoelastic-plastic constitutive model describing the whole creep process of silty mudstone was established, and the proposed creep model was verified for its rationality and feasibility by taking the results at a confining pressure of 7 MPa as an example. It show that the steady-state creep rate of the specimen is related to the magnitude of the deviatoric stress, and with increase of the deviatoric stress, the steady-state creep rate and the deviatoric stress conform to an exponential function relationship; the creep rate in the accelerated creep stage is significantly greater than that in the decelerated creep and steady-state creep at low stress levels, and the creep damage occurs in a very short time; a nonlinear viscoelastic-plastic constitutive model is proposed to describe the whole creep process of the silty mudstone, which can describe the creep-deformation law of the whole process of creep-damage of silty mudstone, reflecting the creep characteristics of silty mudstone under different levels of deviatoric stress, and avoiding the problem that the classical model cannot accurately describe the accelerated creep process.

Keywords: silty mudstone; creep test; accelerated creep; creep characteristics; constitutive model

随着基础设施建设的快速发展,越来越多的粉砂质泥岩工程问题不断涌现,尤其是切割粉砂质泥岩岩体形成的高陡边坡、地下洞室等工程岩体的蠕变性强,长期服役过程中会产生蠕变变形,导致支护结构破坏,防护体系失稳等灾害频发^[1-2]。粉砂质泥岩蠕变问题已成为威胁大型基础设施安全运营的关键难题。故迫切需要开展粉砂质泥岩蠕变试验,研究粉砂质泥岩长期蠕变规律,建立合理的蠕变本构模型。

学者们在对不同类型岩石的蠕变行为及蠕变本构模型方面开展了大量研究^[3-4]。在研究岩石的蠕变行为方面,辛亚军等^[5]采用红砂岩开展了不同加载速率下三轴蠕变试验,分析了蠕变变形特征,结果表明,随着加载速率增大,减速蠕变应变增量越大,等速蠕变应变增量越小。胡波等^[6]在进行粉砂岩三轴蠕变试验时发现,粉砂岩的起始蠕变速率会随着应力的增加而增大,蠕变进入稳态阶段后蠕变速率也会随时间增加。Wang等^[7]研究了周期循环荷载下盐岩的蠕变行为,发现当超出循环周期数临界值后,周期越短,蠕变发生不可逆变形越大。在研究岩石的蠕变本构模型方面,王永岩等^[8]以西原模型为基础,引入了可考虑温度和围压的软岩蠕变参数,同时将黏塑性元件替换成非线性黏塑性元件,得到了可描述温度和围压共同影响下的非线性蠕变本构模型,并用该模型对三轴蠕变试验结果进行了拟合验证。刘家顺等^[9]针对含水条件下弱胶结软岩的蠕变问题,通过引入分数阶微积分理论,建立并验证了可用于描述全蠕变过程的分数阶弱胶结软岩蠕变本构模型。Liu等^[10]在对盐岩蠕变试验数据分析的基础上,引入了一个损伤系数来描述加

速蠕变阶段的非线性应变,得到的新模型与实验数据拟合效果非常好,可为盐岩工程的蠕变性行为研究提供理论依据。

综上所述,现有对岩石蠕变的研究已经取得了较丰硕的成果,对认识不同类型岩石蠕变特性有着重要意义。但对泥岩蠕变特性,尤其对于粉砂质泥岩蠕变特性及本构模型的系统研究还较少。一直以来,粉砂质泥岩强度低、易破碎、制样困难,并且开展长期蠕变试验对设备要求高,导致粉砂质泥岩的长期蠕变力学特性的试验研究鲜有涉及,尚未建立可描述粉砂质泥岩非线性蠕变特征的本构模型。现有研究成果不能准确表述粉砂质泥岩工程岩体的蠕变规律。为此,开展蠕变试验,分析粉砂质泥岩应变与时间关系,建立基于加速蠕变改进的非线性黏弹塑性本构模型,并验证该模型的合理性和可行性,以期为粉砂质泥岩工程的长期稳定性分析研究奠定基础。

1 岩石试样蠕变试验

1.1 试样制备

鉴于粉砂质泥岩内部裂隙较多且分布不均,在取样过程中难以获取均一的粉砂质泥岩原样试样,为降低试验结果的离散性,采用相似材料代替粉砂质泥岩开展室内试验。已有研究结果已经证明,所配制相似材料试样的强度及变形规律可与粉砂质泥岩试样的规律相一致^[11-12]。试验所采用的相似材料制作方法见文献[13],基本物理参数如表1所示。

1.2 试验设备

试验采用DZSZ-150型多场耦合岩石三轴压力试验机(图1)。该试验机系统主要包括围压加载系

表 1 粉砂质原岩和相似材料物理力学参数

Table1 Physical and mechanical parameters of siltstone protoliths and similar materials

材料	密度/ (g/cm ³)	单轴抗压 强度/MPa	弹性模 量/GPa	黏聚力/ MPa	内摩擦 角/(°)
相似材料	2.02	13.54	1.32	3.84	32.46
原岩	2.01	13.95	1.38	4.32	33.52
差别/%	0.50	-3.03	-4.55	-12.50	-3.27

统、轴压加载系统、变形测量系统和控制系统,可实现蠕变试验过程中对试样的应力、应变及时间数据的连续采集。围压和轴向荷载控制范围分别为 0~150 MPa、0~50 kN,精度分别为 ±0.000 1 MPa、±0.001 kN。变形测量极值为 25 mm,精度为 ±0.001 mm。



图 1 DZSZ-150型多场耦合岩石三轴压力试验机

Fig.1 DZSZ-150 multi-field coupling type rock triaxial pressure tester

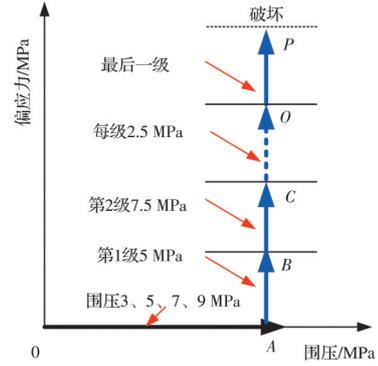
1.3 试验方案

根据国际岩石力学学会(IRSM)推荐的试验规程^[14],制作试样尺寸均为标准 $\phi 50 \text{ mm} \times h 100 \text{ mm}$ 的圆柱体。在开展三轴蠕变试验时,采用加围压到设定值后保持围压不变,再施加每一级荷载,直到发生蠕变破坏,具体应力路径和加载方式见图 2。根据现有研究成果^[15-17],第 1 级荷载可采用单轴抗压强度的 30%~50%,然后再依次增加每级荷载,共设置 6~8 级轴向应力,直到试样发生蠕变破坏后停止。根据试样的单轴抗压强度^[13],蠕变试验的第一级采用 5 MPa 保持偏应力不变,持续时间为 24 h,再依次施加下一级偏应力荷载,每一级增加 2.5 MPa,持续时间为 24 h,直至试样发生加速蠕变破坏;在此过程中围压分别为 3、5、7、9 MPa,始终保持稳定不变。

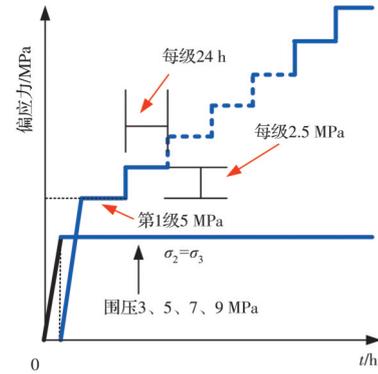
2 试验结果分析

2.1 蠕变变形分析

不同围压下的三轴蠕变特征曲线如图 3 所示。从整个蠕变特征曲线可看出,除最终发生失稳破坏



(a) 应力路径



(b) 加载方式

图 2 蠕变试验加载路径示意图

Fig. 2 Schematic diagram of creep test loading path

的阶段外,每一级偏应力荷载下试样都会经历一段减速蠕变后逐渐趋于稳定。随着加载级数的不断增加,试样蠕变变形进入非稳态蠕变区,最终发生了加速蠕变。此时施加的偏应力已超过试样的屈服强度,试样很快从减速蠕变过渡到稳态蠕变阶段,应变将持续增加,进入加速蠕变阶段,最终发生了失稳破坏。由图 3 可知,除围压 3 MPa 外,加载偏应力等级共经历了 7 级,前 6 级每级持续时间为 1 440 min,第 7 个等级持续时间存在一定差异,最终发生加速蠕变破坏。具体有如下特点:1)当试样处在应力低于屈服强度时,减速蠕变现象不明显,蠕变曲线都经历减速蠕变过渡到稳态蠕变,最终蠕变趋于稳定。2)当偏应力荷载超过屈服强度后,即蠕变试验进入最后一级,试样先减速蠕变,然后稳态蠕变,最后快速进入加速蠕变,最终发生了蠕变破坏。

2.2 稳态蠕变速率特性分析

在蠕变试验中,蠕变速率是蠕变特征的重要指标之一^[18]。根据蠕变试验数据,重点分析稳态蠕变速率和偏应力的关系。图 4 为稳态蠕变速率与偏应力拟合的关系曲线,由图 4 可知:试样的稳态蠕变速率与偏应力有关,在不同围压下,随着偏应力的增加,稳态蠕变速率与偏应力之间符合指数函数关系

$$\epsilon_v = Ae^{B\sigma}, R^2 \geq 0.9228 \quad (1)$$

式中: ϵ_v 为稳态蠕变速率;A 和 B 都是大于零的参

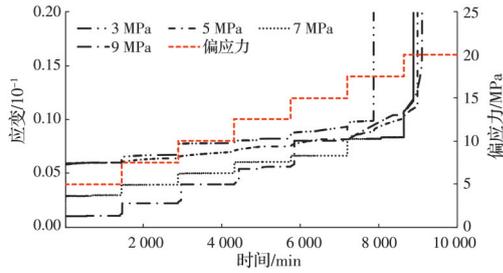


图3 不同围压下三轴蠕变特征曲线

Fig. 3 Triaxial creep characteristic curve under different circumferential pressure

数; σ 为偏应力。其中, 不同偏应力等级下稳态蠕变速率的曲线所对应的参数 A 和 B 变化关系如表 2 所示。

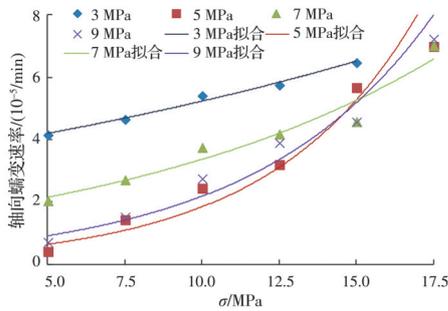


图4 稳态蠕变速率与偏应力的关系

Fig. 4 Steady-state creep rate versus partial stress

表 2 拟合参数

Table 2 Fitting parameters

围压/MPa	参数 A	参数 B	相关系数 R^2
3	3.372 1	0.043 9	0.987 0
5	0.223 4	0.210 9	0.922 8
7	1.373 0	0.089 6	0.958 7
9	0.384 7	0.173 5	0.951 4

2.3 轴向应变速率分析

为进一步分析蠕变试验过程中轴向蠕变速率随时间的变化规律, 将轴向应变对加载时间求导, 所得结果为试验实测的轴向应变速率。在 7 MPa 围压下, 每级荷载下试样轴向应变速率-时间曲线如图 5 所示。由图 5 可知: OA 段, 轴向蠕变速率随时间增加而减小, 并很快降低, 即初期蠕变阶段; AB 段, 轴向蠕变速率保持不变, 并趋于恒定值, 即稳定蠕变阶段; 此外, 初期蠕变阶段, 在相同时刻下, 不同等级应力水平下轴向初始蠕变速率随应力水平等级的增加而逐渐增大, 且表现出良好的一致性。

图 6 为 7 MPa 围压下, 在第 7 级荷载 (偏应力为 20 MPa) 下试样进入非稳态蠕变阶段过程中轴向应变和轴向应变率随时间的变化曲线。由图 6 可知, 随时间的增加, 轴向应变速率在不断下降, 先经历了 $t_1=100$ min 的减速蠕变阶段, 蠕变速率降到非常

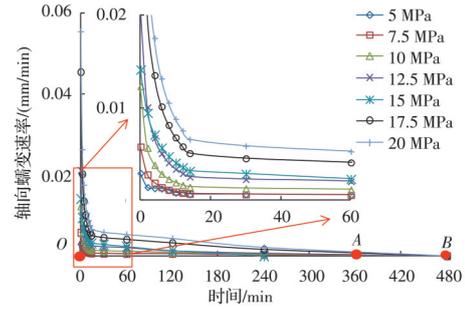


图5 轴向应变速率与时间关系曲线

Fig. 5 Axial strain rate versus time curve

小; 然后过渡到稳态蠕变阶段, 这一过程持续到 $t_2=360$ min, 轴向应变速率接近定值, 轴向应变接近平缓的直线; 最后进入加速蠕变阶段, 持续约 1 min, 试样迅速发生加速蠕变破坏。

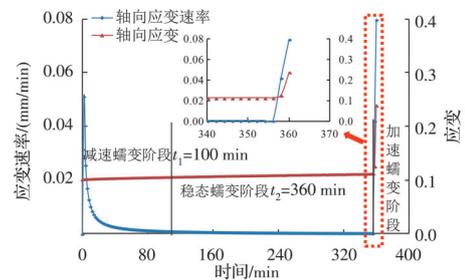


图6 轴向应变和轴向应变速率随时间的关系曲线

Fig. 6 Axial strain and axial strain rate as a function of time

3 粉砂质泥岩试样蠕变模型研究

结合图 6 的分析可知, 在不高于屈服强度的加载等级 ($\sigma_0 \leq \sigma_s$) 时, 对蠕变试验曲线特征进行分析, 可得出试样的蠕变表现出明显的黏弹性特征; 在高于屈服强度的加载等级 ($\sigma_0 > \sigma_s$) 时, 试样等速蠕变阶段会持续很短时间后进入加速蠕变破坏阶段, 表现出明显的非线性黏弹塑性特征。

目前, 描述岩石黏弹性蠕变特性的元件模型有许多种, 最常用的有三元件的广义 Kelvin 模型、四元件的伯格斯模型等^[19-20]。根据上述分析可知, 现有模型中只有宾汉姆模型和西原模型符合, 考虑到宾汉姆模型在低于破坏应力水平下, 理想黏塑性体没有变形, 只有弹性变形, 没有蠕变变形, 不符合本文粉砂质泥岩试样的蠕变特点^[21]。而现有的经典西原模型, 仅能够描述试样除加速蠕变阶段的总体变化趋势。

针对上述本构模型存在的缺陷, 在经典西原模型的基础上, 采用现有线性黏弹性模型 (Modified Kelvin 模型, 简称 MK 模型) 与非线性黏塑性模型^[17] (简称 NVPB 模型) 串联组合, 建立非线性黏弹塑性本构模型来表征粉砂质泥岩的全蠕变过程, 在该模

型中假定非线性黏塑性模型与时间呈指数函数关系^[22],其蠕变力学模型示意图如图 7 所示。

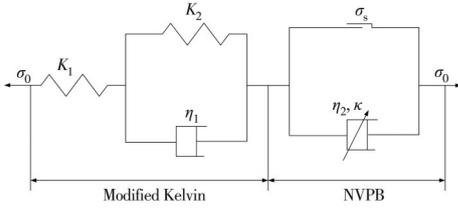


图 7 粉砂质泥岩蠕变力学模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of creep mechanics of silty mudstone

如图 7 所示,构建的新蠕变模型可根据叠加原理得到一维蠕变方程,考虑到应力水平对试验蠕变特性的影响,故蠕变方程要分成两种情况。

1) 当 $\sigma_0 \leq \sigma_s$ 时,模型退化为广义 Kelvin 三元件模型,塑性模型不发挥其作用,该一维蠕变方程为

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{K_1} + \frac{\sigma_0}{K_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{K_2}{\eta_1} t\right) \right] \quad (2)$$

式中: $\epsilon(t)$ 为应变; σ_0 为应力; σ_s 为岩石屈服强度; K_1 弹性体模量; K_2 为 Kelvin 弹性模量; η_1 为 Kelvin 黏滞系数; t 为时间。

2) 当 $\sigma_0 > \sigma_s$ 时,试样发生加速蠕变,此时该模型的黏塑性部分将发挥作用,则该一维蠕变方程为

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{K_1} + \frac{\sigma_0}{K_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{K_2}{\eta_1} t\right) \right] + \frac{\sigma_0 - \sigma_s}{\eta_2} \exp(t^\kappa) \quad (3)$$

式中: η_2 为非线性损伤黏塑性元件黏滞系数; κ 为蠕变参数。

大量蠕变研究成果表明^[23]:在蠕变过程中,当岩石所受荷载超过屈服应力的阈值时,应力长时间作用下岩石内部产生蠕变损伤。因此,引入损伤变量 D 随时间累积呈负指数函数形式来描述黏性系数 η_2 的蠕变损伤劣化,构建了 NVPB 模型。根据以往研究成果^[22],软岩发生蠕变过程中由于损伤变量 D 随时间 t 累积之间满足式(4)所示关系,即损伤变量 D 的表达式为

$$D = 1 - \exp(-\alpha t), 0 < D < 1 \quad (4)$$

式中: D 为损伤变量; α 为与岩石材料性质相关受加载应力的影响的系数,其主要影响加速蠕变发生的时间; t 为时间。

引入开关函数将式(2)和式(3)统一为

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{K_1} + \frac{\sigma_0}{K_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{K_2}{\eta_1} t\right) \right] + \frac{\Gamma(\sigma_0 - \sigma_s)}{\eta_2} \exp(t^\kappa) \quad (5)$$

其中,开关函数 $\Gamma(\sigma_0 - \sigma_s) = \begin{cases} 0, & \sigma_0 \leq \sigma_s \\ \sigma_0 - \sigma_s, & \sigma_0 > \sigma_s \end{cases}$

4 本构模型的验证和分析

为了验证新蠕变本构模型的合理性和可行性,根据试验数据,采用 Levenberg-Marquardt(L-M)算法对 7 MPa 围压下非线性黏弹塑性本构模型进行参数识别,结果见表 3。

表 3 模型参数

Table 3 Model Parameters

K_1/GPa	K_2/GPa	$\eta_1/(\text{GPa}\cdot\text{h})$	$\eta_2/(\text{GPa}\cdot\text{h})$	κ	α
0.35	0.35	61.2	48	0.000 2	0.058

图 8 为 $\sigma_0 \leq \sigma_s$ 时,拟合的理论曲线和试验曲线的对比结果。由图 8 对比曲线可知,试验值和拟合值吻合效果比较理想。表明蠕变本构模型采用新建的非线性黏弹塑性本构模型可很好地反映粉砂质泥岩的减速蠕变阶段和稳态蠕变阶段的蠕变特征。

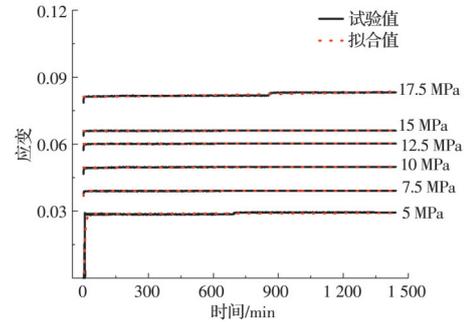


图 8 试验曲线与西原模型对比图

Fig. 8 Comparison of test curve and Nishihara model

图 9 为 $\sigma_0 > \sigma_s$ 时,加速蠕变阶段拟合的理论值曲线和试验值曲线的对比结果。由图 9 通过基于三轴蠕变试验值与西原模型、伯格斯模型和本文提出的模型拟合值进行对比分析发现,加速蠕变阶段下

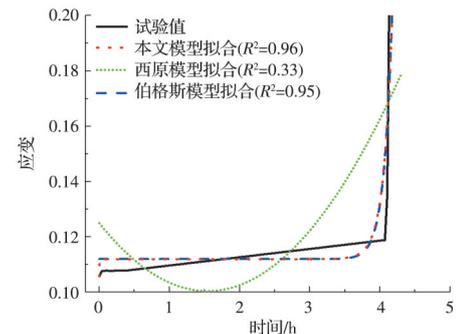


图 9 本文模型与传统经典模型对比图

Fig. 9 Comparison between the model in this paper and the traditional classical models

建立的蠕变本构模型精度明显高于西原模型和伯格斯模型。即模型拟合的相关性系数 R^2 为 0.96, 明显优于西原模型 ($R^2=0.33$) 和伯格斯模型 ($R^2=0.95$) 的结果, 与试验值曲线最为接近。

为进一步分析不同蠕变模型与蠕变试验结果的精度, 以试验值为依据, 对上述 3 种蠕变模型每个小时的蠕变应变与试验值进行对比, 得到的误差见表 4、误差绝对值如图 10 所示, 需要说明的是, 0 h 的数据为第 2 s 采集的数据, 也就是在试验开始后第 1 次采集的数据, 即时间为第 2 s。由表 4 和图 10 可知, 相比西原模型和伯格斯模型得到的蠕变应变值, 建立的粉砂质泥岩非线性黏弹塑性本构模型每小时的应变值与试验值的误差最小。说明建立的

表 4 蠕变试验值与蠕变模型值的误差

Table 4 Error of creep test value and creep model

时间/h	试验应变值	本文模型值	西原模型值	伯格斯模型值	与本文模型误差/%	与西原模型误差/%	与伯格斯模型误差/%
0	0.107 4	0.107 5	0.124 7	0.111 9	-0.09	-16.11	-4.19
1	0.107 4	0.111 5	0.103 3	0.112 0	-1.73	-5.75	-2.19
2	0.112 7	0.111 8	0.102 4	0.112 0	0.80	9.14	0.62
3	0.115 6	0.111 9	0.121 7	0.111 7	3.20	-5.28	3.37
4	0.118 8	0.132 6	0.162 4	0.132 9	-11.62	-36.70	-11.87

综合图 8~图 10 可知, 对以 7 MPa 围压为例的粉砂质泥岩试样全过程蠕变试验结果进行拟合验证后可知, 本文建立的非线性黏弹塑性蠕变本构模型克服了经典西原模型和伯格斯模型不能精确地对加速蠕变过程进行描述的难题, 更适用于准确描述粉砂质泥岩蠕变全过程。

为进一步揭示粉砂质泥岩蠕变破坏机理, 图 11 给出了粉砂质泥岩试样蠕变破坏过程的机理示意图。图 11(a) 所示为初始状态下的结构示意图, 内部岩石骨架颗粒周围包裹着一定量的胶结物, 但是胶结物与其胶结程度较低; 同时岩石骨架内会存在相对均匀分布的初始原生闭合孔隙。图 11(b) 所示为等速蠕变阶段的示意图, 在不高于屈服强度的加载等级 ($\sigma_0 \leq \sigma_s$) 时, 试样内部主要以岩石骨架颗粒弹性变形为主, 原生闭合孔隙被不断挤压, 密度增大, 此时的作用力不足以造成岩石内部产生新缺陷, 在该级偏应力荷载下岩石以结构强度为主。图 11(c) 所示为加速蠕变阶段的示意图, 随着偏应力荷载的不断增大, 弹性应变引起的总应变减少, 造成岩石内部结构以非线性变形为主, 试样内部部分孔隙结构会发生破坏贯穿, 汇集产生微裂纹, 甚至可能产生裂隙簇, 骨架结构重新分布, 损伤不断累积, 承载力会不断下降, 但是岩石仍具有一定的承载力, 且应变增量非常缓慢, 以塑性变形为主。图 11

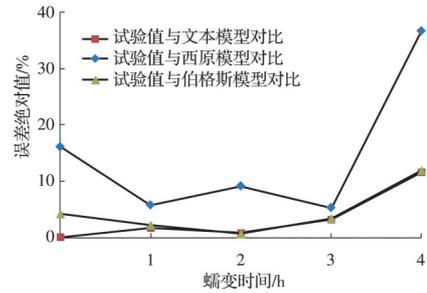


图 10 蠕变试验值与蠕变模型值的误差对比图

Fig. 10 Comparison of the absolute value of the error between the creep test value and the creep model value

粉砂质泥岩非线性黏弹塑性本构模型误差明显更小, 更适用于对粉砂质泥岩蠕变特性中的加速蠕变阶段规律的描述。

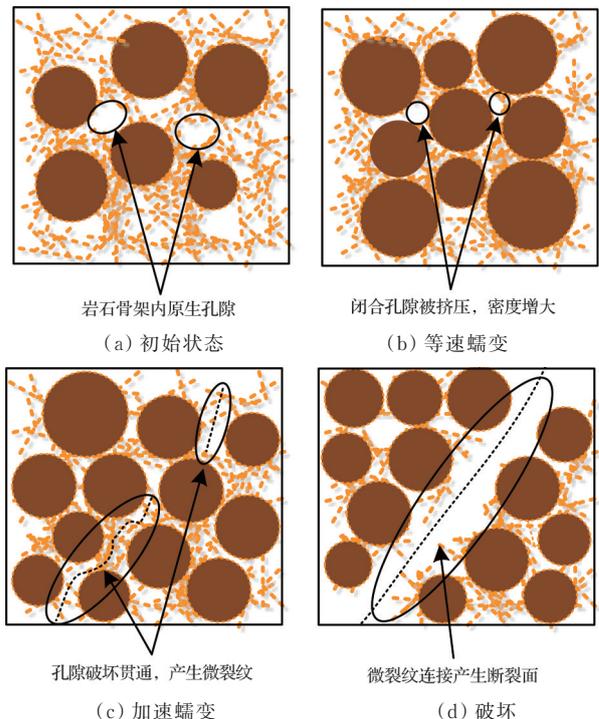


图 11 粉砂质泥岩蠕变破坏过程的机理示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the mechanism of creep damage process of silty mudstone

(d) 所示为破坏阶段的示意图, 偏应力荷载继续增加, 当高于屈服强度的加载等级 ($\sigma_0 > \sigma_s$) 时, 上述现象会不断加剧, 最终导致岩石内部骨架颗粒发生崩溃, 裂纹连接产生断裂面, 丧失承载能力, 发生该现

象的根本原因是,累积损伤致使粉砂质泥岩承载能力下降到临界破坏荷载,迅速发生加速蠕变。综上所述,粉砂质泥岩发生蠕变破坏的整个过程是从初始蠕变阶段到相对缓慢的稳态蠕变阶段,再到突增的加速蠕变阶段,这与文献[24-25]中提到深部岩体的蠕变损伤机理相吻合。

对于粉砂质泥岩工程而言,可采用FLAC^{3D}软件提供的二次开发程序接口,实现提出的非线性黏弹塑性本构模型的二次开发,采用开发后的本构模型进行数值模拟,并结合实际岩体工程的长期监测数据,对粉砂质泥岩相关工程的长期变形进行预测,为该类岩体长期稳定性研究及防护提供理论指导。

5 结论

1)三轴蠕变试验研究表明,试样发生临界破坏时表现出明显的加速蠕变。

2)在粉砂质泥岩蠕变试验过程中,试样的稳态蠕变速率与偏应力大小有关,在不同围压下,随着偏应力的增加,稳态蠕变速率与偏应力之间符合指数函数关系。

3)在蠕变进入破坏阶段时,在加速蠕变阶段的蠕变速率相对低应力水平下减速蠕变和稳态蠕变速率明显要增大很多,且非常短时间内就发生了蠕变破坏。

4)结合三轴蠕变试验结果,基于西原模型和伯格模型不足,提出了一种可描述粉砂质泥岩全蠕变过程的非线性黏弹塑性本构模型。

5)对非线性黏弹塑性本构模型的合理性和可行性进行验证表明,该模型不仅可描述低应力水平过程中的减速蠕变阶段和稳态蠕变阶段,还能很好地描述高应力下的加速蠕变阶段,有效克服了经典蠕变模型存在的不足。

参考文献

[1] 付宏渊,陈镜丞,曾铃,等. 温、湿度对粉砂质泥岩单轴力学性能的影响试验[J]. 土木工程学报, 2019, 52(1): 89-98.
FU H Y, CHEN J C, ZENG L, et al. Experiment on the effects of temperature and humidity on uniaxial mechanical properties of silty mudstone [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(1): 89-98. (in Chinese)

[2] ZHANG S, XU Q, HU Z M. Effects of rainwater softening on red mudstone of deep-seated landslide, Southwest China [J]. Engineering Geology, 2016, 204: 1-13.

[3] YANG S Q, HU B. Creep and long-term permeability

of a red sandstone subjected to cyclic loading after thermal treatments [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(10): 2981-3004.

- [4] 王游,赵翔.改进的Bingham岩石蠕变模型研究[J].力学季刊,2021,42(1):168-177.
WANG Y, ZHAO X. Studies on improved Bingham rock creep model [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2021, 42(1): 168-177. (in Chinese)
- [5] 辛亚军,郝海春,吕鑫,等.高应力区峰后红砂岩蠕变特性及模型分析[J].实验力学,2019,34(5):809-818.
XIN Y J, HAO H C, LV X, et al. Creep characteristics and model analysis of red sandstone in post-peak high stress zone [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(5): 809-818. (in Chinese)
- [6] 胡波,王宗林,梁冰,等.岩石蠕变特性试验研究[J].实验力学,2015,30(4):438-446.
HU B, WANG Z L, LIANG B, et al. Experimental study of rock creep properties [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(4): 438-446. (in Chinese)
- [7] WANG J B, ZHANG Q, SONG Z P, et al. Experimental study on creep properties of salt rock under long-period cyclic loading [J]. International Journal of Fatigue, 2021, 143: 106009.
- [8] 王永岩,王鸿伟,崔立桩,等.温度-围压共同作用的软岩蠕变模型及试验验证[J].应用力学学报,2020,37(6):2561-2566,2705.
WANG Y Y, WANG H W, CUI L Z, et al. Investigation and experimental verification of a soft rock creep model at the effect of temperature and confining pressure [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(6): 2561-2566, 2705. (in Chinese)
- [9] 刘家顺,靖洪文,孟波,等.含水条件下弱胶结软岩蠕变特性及分数阶蠕变模型研究[J].岩土力学,2020,41(8):2609-2618.
LIU J S, JING H W, MENG B, et al. Research on the effect of moisture content on the creep behavior of weakly cemented soft rock and its fractional-order model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(8): 2609-2618. (in Chinese)
- [10] LIU J, WU F, ZOU Q L, et al. A variable-order fractional derivative creep constitutive model of salt rock based on the damage effect [J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2021, 7(2): 1-16.
- [11] FU H Y, QI S X, SHI Z N, et al. Effect of nano-CaCO₃ on the physical and mechanical properties of analogue to silty mudstone materials [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(23): 1-11.
- [12] WANG J J, SHI Z N, ZENG L, et al. The effects of different nanoadditives on the physical and mechanical

- properties of similar silty mudstone materials [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 8850436.
- [13] FU H Y, QI S X, SHI Z N, et al. Mixing ratios and cementing mechanism of similar silty mudstone materials for model tests [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 2426130.
- [14] HOEK E, WOOD D, SHAH S. A modified Hoek-Brown failure criterion for jointed rock masses[C]// Hudson J A. *Proceedings of the Rock Characterization, Symposium of ISRM*. London: Thomas Telford Publishing, 1992:209-214.
- [15] 刘东燕. 岩石力学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2014. LIU D Y. *Rock mechanics* [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2014. (in Chinese)
- [16] 张亮亮, 王晓健, 周瑞鹤. 一种新的岩石非线性黏弹塑性蠕变模型研究[J]. *力学季刊*, 2020, 41(1): 116-124. ZHANG L L, WANG X J, ZHOU R H. A new nonlinear viscoelastic-plastic creep model for rocks [J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2020, 41(1): 116-124. (in Chinese)
- [17] 魏尧, 杨更社, 申艳军, 等. 白垩系饱和冻结砂岩蠕变试验及本构模型研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(8): 2636-2646. WEI Y, YANG G S, SHEN Y J, et al. Creep test and constitutive model of Cretaceous saturated frozen sandstone [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(8): 2636-2646. (in Chinese)
- [18] 李安润, 邓辉, 王小雪, 等. 饱水-失水循环条件下红层泥岩蠕变特性及本构模型研究[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(3): 843-850. LI A R, DENG H, WANG X X, et al. Research on creep characteristics and constitutive model of red bed mudstone under saturated-dehydrated cycle [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(3): 843-850. (in Chinese)
- [19] PU S Y, ZHU Z D, SONG L, et al. Fractional-order visco-elastoplastic constitutive model for rock under cyclic loading [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(9): 1-11.
- [20] 杜超, 杨春和, 马洪岭, 等. 深部盐岩蠕变特性研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(8): 2451-2456, 2520. DU C, YANG C H, MA H L, et al. Study of creep characteristics of deep rock salt [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(8): 2451-2456, 2520. (in Chinese)
- [21] 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 M F, HE M C, LIU D Y. *Rock mechanics and engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [22] 王春萍, 陈亮, 梁家玮, 等. 考虑温度影响的花岗岩蠕变全过程本构模型研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(9): 2493-2500, 2506. WANG C P, CHEN L, LIANG J W, et al. Creep constitutive model for full creep process of granite considering thermal effect [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(9): 2493-2500, 2506. (in Chinese)
- [23] 陈陆望, 李圣杰, 陈逸飞, 等. 岩石含水蠕变损伤模型的开发与应用[J]. *固体力学学报*, 2018, 39(6): 642-651. CHEN L W, LI S J, CHEN Y F, et al. Further development and application of a creep damage model for water-bearing rocks [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2018, 39(6): 642-651. (in Chinese)
- [24] 张晋勋, 宋永威, 杨昊, 等. 冻结饱水砂卵石蠕变损伤特性试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(29): 12665-12671. ZHANG J X, SONG Y W, YANG H, et al. Experimental research on the creep damage characteristics of frozen saturated sandy gravel [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(29): 12665-12671. (in Chinese)
- [25] 邵珠山, 靳冬冬, 陈浩哲, 等. 含水状态对石英砂岩单轴分级蠕变性能影响研究[J]. *应用力学学报*, 2021, 38(5): 1839-1845. SHAO Z S, JIN D D, CHEN H Z, et al. Investigation on creep properties of different moisture state quartz sandstone by multi-stage test [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2021, 38(5): 1839-1845. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)