

基于Weibull分布的红砂岩三轴蠕变试验及模型研究

张卫泽, 王琳庆, 郭文重, 陈雷

Triaxial creep test and model study of red sandstone based on Weibull distribution

ZHANG Weize, WANG Linqing, GUO Wenchong, and CHEN Lei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211041>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于断裂及高温损伤的岩石蠕变模型研究

A study of the creep model of rock considering fractures and thermal damage

李修磊, 李起伟, 李倩 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 46-56

红层砂岩高温后效蠕变试验研究

Creep tests of red-bed sandstone after high temperature

李畅, 任光明, 孟陆波, 代晗, 张晓东, 李科 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 71-71

非饱和土蠕变力学特性试验及经验模型研究

An experimental study of the creep mechanical properties of unsaturated soil and empirical models

魏建柄, 刘卫斌 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 67-73

红层泥岩三轴膨胀力的试验研究

An experimental study of the triaxial expansion force of red-bed mudstone

郭永春, 赵峰先, 闫圣龙, 刘家志 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 87-93

水-岩作用下粉砂质泥岩含水损伤本构模型

Constitutive model of water-damaged silty mudstone under water-rock interactions

李安润, 邓辉, 王红娟, 郑瀚, 苟晓峰, 潘远阳 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 106-113

典型黄土滑坡滑带土不同含水率下蠕变特性试验研究

An experimental study of the creep characteristics of loess landslide sliding zone soil with different water content

王新刚, 刘凯, 王友林, 张培栋, 石卫, 罗力 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 137-143



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211041

张卫泽, 王琳庆, 郭文重, 等. 基于 Weibull 分布的红砂岩三轴蠕变试验及模型研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(4): 137-148.

ZHANG Weize, WANG Linqing, GUO Wenchong, *et al.* Triaxial creep test and model study of red sandstone based on Weibull distribution[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(4): 137-148.

基于 Weibull 分布的红砂岩三轴蠕变试验及模型研究

张卫泽¹, 王琳庆¹, 郭文重¹, 陈 雷²

(1. 中铁十八局集团有限公司, 天津 300222;

2. 辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 当前, 地下工程围岩蠕变问题仍然存在, 蠕变理论需要进一步丰富。岩石蠕变实质上是损伤不断积累的过程, 针对蠕变条件下岩石损伤演化情况, 文章采用 TAW-2000 多功能三轴伺服试验系统对取自四川乐山依卜隧道的红砂岩进行三轴蠕变试验, 分析不同围压下试样蠕变变形规律, 同时以西原模型为基础, 结合 Weibull 分布和 Perzyna 黏塑性理论, 建立一种改进的可以描述岩石蠕变破坏全过程的黏弹塑性蠕变模型。通过划分蠕变阶段来定义临界点损伤变量, 从而更为准确地确定加速蠕变启动时间。得出如下结论: (1) 模型曲线与试验数据具有良好的一致性, 验证了模型的准确性与合理性, 说明基于 Weibull 分布建立的红砂岩黏弹塑性蠕变模型是可行的; (2) 基于 Perzyna 黏塑性理论, 建立了可以更加准确的描述加速蠕变的黏塑性应变表达式; (3) 文章建立的基于 Weibull 分布和 Perzyna 黏塑性理论的三轴损伤蠕变模型能够较好的描述岩石蠕变全过程, 克服了西原模型不能描述加速蠕变的缺点。本研究通过定义不同蠕变阶段的临界点损伤变量更好的反映了岩石蠕变变形与损伤之间关系, 丰富了岩石类材料的蠕变本构理论。

关键词: Weibull 分布; 红砂岩; 蠕变模型; Perzyna 黏塑性理论; 临界阈值

中图分类号: P642.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)04-0137-12

Triaxial creep test and model study of red sandstone based on Weibull distribution

ZHANG Weize¹, WANG Linqing¹, GUO Wenchong¹, CHEN Lei²

(1. China Railway 18th Bureau Group Co. Ltd., Tianjin 300222, China; 2. School of Civil Engineering, Liaoning University of Engineering and Technology, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: At present, the creep problem of underground engineering surrounding rock still exists, and the creep theory needs to be further enriched. In essence, rock creep is a process of constant accumulation of damage. In view of the damage evolution of rock under creep conditions, triaxial creep tests are carried out on red sandstone taken from Yibo Tunnel in Leshan, Sichuan Province by TAW-2000 to analyze the creep deformation rule of specimens under different confining pressures. Based on Weibull distribution and Perzyna viscoplastic theory, an improved viscoelastoplastic creep model is established which can describe the whole process of rock creep failure. The critical point damage variable is defined by dividing the creep stage, so that the acceleration creep start time can be determined more accurately. The following conclusions are drawn: (1) the model curve in this paper is in good agreement with the test data, which verifies the accuracy and rationality of the model in this paper, and indicates that the viscoelastic-plastic creep model of red sandstone established based on Weibull distribution is

feasible. (2) Based on Perzyna viscoplastic theory, a more accurate viscoplastic strain expression is established to describe accelerated creep. (3) The triaxial damage creep model established in this paper based on Weibull distribution and Perzyna viscoplastic theory can describe the whole process of rock creep well, overcoming the shortcoming of the Siyuan model which can not describe accelerated creep. The relationship between rock creep deformation and damage can be better reflected by defining the critical point damage variables of different creep stages, which enriches the creep constitutive theory of rock materials.

Keywords: Weibull distribution; red sandstone; creep model; Perzyna viscoplastic theory; critical threshold

地下工程围岩在复杂环境中通常表现出显著的流变性,一般通过建立流变模型来反映围岩的变形特性^[1-2]。现有的流变模型大致分为 3 类:经验模型、积分模型和元件模型。其中,经验模型是根据施工现场的实测数据和经典流变理论建立的,积分模型是通过流变理论对经典模型进行积分建立的,元件模型是通过串并联法则建立的。3 类模型中应用最多的是元件模型,该方法具有明确的模型参数,推导过程简便,被国内外学者广泛采用^[3-4]。但现有元件模型少有对岩石内部微元体损伤的描述,导致细观层面微元体损伤与蠕变变形之间关系难以确定。

近年来,国内外学者对岩石流变本构理论方面进行了大量研究,取得了较为丰硕的成果^[5-6]。卢功臣等^[7]针对加速蠕变启动判断问题,以西原模型为基础,结合能量耗散理论和 Perzyna 黏弹塑性理论,建立了一种能够判定加速启动时间的岩石蠕变模型,并基于试验数据对模型进行了验证。Liu 等^[8]通过三轴蠕变试验,对花岗片麻岩在蠕变过程中的渗透特性进行了研究,建立了体积应变与渗透系数之间的函数关系。胡波等^[9]通过分析泥质粉砂岩的蠕变变形规律,将传统开关元件替换为可用阶跃函数,从而建立了一种新的考虑蠕变初始应力阈值的本构模型,并对模型进行了验证。李晓照等^[10]针对高渗透压硬脆性岩石的长期稳定性问题,建立考虑渗透压影响的裂纹尖端应力强度模型,进而推导出硬脆性岩石的宏细观蠕变模型,并对模型进行了验证。王游等^[11]为了更加准确的描述岩石加速蠕变阶段的变形规律,引入非线性函数对 Kelvin 模型进行修正,进而推出了改进的西原模型。王军保等^[12]为了研究盐岩的蠕变变形规律,提出了一种基于 S 型反函数的蠕变模型,通过盐岩单轴压缩蠕变试验对该模型进行了验证。Liu 等^[13]基于砂岩三轴蠕变试验,建立了考虑应力和时间双重影响的非线性蠕变模型,并结合试验结果对模型进行了验证。沈才华等^[14]基于西原模型,结合断裂力学理论和裂纹张开位移 COD 理论,建立一种新的岩石蠕变模型,该模型能够较好地描述硬脆性岩石的加速过程。

刘东燕等^[15]采用幂函数经验模型对 Kelvin 模型进行修正,并与 Burgers 模型串联,最终得到一个新的可以描述蠕变全过程的本构模型。Lyu 等^[16]通过单轴压缩蠕变试验,对泥岩-盐岩组合体的蠕变力学特征进行了研究,并提出了一种新的非线性蠕变损伤本构模型,该模型能较好地描述泥岩-岩盐组合体的蠕变规律。杨秀荣等^[17]对不同含水状态下的软岩进行了三轴蠕变试验,根据蠕变曲线分布规律,建立了考虑含水损伤的蠕变模型,并对模型进行了验证。蔡煜等^[18]通过将定常元件改为非定常元件,对 Burgers 模型进行了修正,得到的非定常 Burgers 模型能够较好地预测岩石加速蠕变特性。宋勇军等^[19]针对寒区岩体所处的自然环境,对红砂岩进行三轴卸卸荷蠕变试验,根据试验结果建立了考虑冻融-损伤影响的非线性蠕变模型。王者超等^[20]通过三轴蠕变试验分析了不同层理方向对岩石蠕变力学性质的影响,推出了考虑横观各向异性的蠕变模型。张俊文等^[21]通过三轴蠕变试验对深部砂岩的变形规律及黏弹性塑性特征进行了分析,建立了分数阶蠕变模型。王新刚等^[22]以榆林市色草湾村的滑坡带黄土为研究对象,通过三轴蠕变试验对不同含水率下的黄土蠕变特性进行了研究,分析了含水率对滑坡带黄土长期强度的影响机制。

综上所述,已有成果对岩石元件模型进行了较为详细的论述,但并未从细观层面对岩石损伤进行考虑。据此,本文以西原模型为基础,结合 Weibull 分布函数和 Perzyna 黏塑性理论,建立考虑细观损伤的红砂岩三轴蠕变模型,并通过依卜隧道红砂岩的三轴试验数据对模型进行验证。

1 基于 Weibull 分布的黏弹塑性蠕变模型建立

1.1 统计损伤模型建立

经典流变元件模型当中,西原模型(图 1)能够较好的描述岩石类材料的蠕变过程。

根据已有研究成果可知,西原模型能够较好地描述岩石类材料的衰减蠕变阶段和稳定蠕变阶段,而对

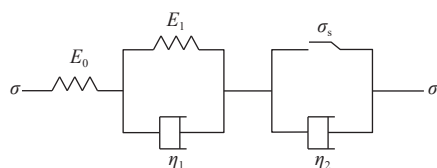


图1 西原模型

Fig. 1 Nishihara model

注: E_0 为瞬时弹性模量; E_1 为黏弹性模量; η_1 为黏弹性黏滞系数; η_2 为黏塑性黏滞系数; σ 为应力; σ_s 为长期强度。

于加速蠕变阶段, 西原模型误差较大, 故需要建立一个新的模型来弥补西原模型的缺陷。由于 Perzyna 黏塑性理论对岩石的黏塑性特性具有较好地呈现, 同样可较好地描述岩石加速蠕变阶段的变形行为。因此, 本文采用 Perzyna 黏塑性模型替换西原模型中的黏塑性部分^[23-24]。根据 Perzyna 黏塑性理论, 黏塑性应变率可表示为:

$$\dot{\varepsilon}_{vp} = \eta \langle \phi(F) \rangle m \quad (1)$$

式中: $\dot{\varepsilon}_{vp}$ ——Perzyna 黏塑性应变率/%;

η ——黏滞系数/(GPa·h);

F ——屈服函数;

m ——黏塑性流动方向;

$\phi(F)$ ——屈服函数 F 的任意函数, 通常可表示为:

$$\phi(F) = \left(\frac{F}{\sigma_{s0}} \right)^\beta \quad (2)$$

式中: β ——材料参数;

σ_{s0} ——初始屈服强度/MPa。

通常情况下, 岩石类材料内部缺陷的萌生是造成其变形的主要诱因, 而统计损伤理论是根据材料内部微元损伤个数 (N_f) 与总个数 (N) 的比值来对材料的损伤程度进行描述, 故可采用统计损伤理论来描述岩石类材料加速蠕变阶段屈服函数的演化规律和蠕变行为。图2为岩石典型蠕变曲线分段示意图, 当岩石蠕变由衰减阶段进入稳定阶段时, 对应的时间为 t_1 , 损伤微元体个数为 N_1 , 下限值为 N_1^* , 为衰减蠕变阶段微元体损伤个数最大值; 当岩石蠕变由稳定阶段进入加速

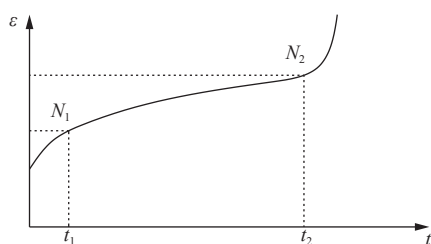


图2 应变临界示意图

Fig. 2 Diagram of strain criticality

阶段时, 对应的时间为 t_2 , 损伤微元体个数为 N_2 , 下限值为 N_2^* 。

根据张慧梅等^[25-26]研究成果可知, Weibull 分布能够准确描述岩石的微元强度, 其概率密度函数可表示为:

$$P(F) = \frac{m}{F_0} \left(\frac{F}{F_0} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right] \quad (3)$$

式中: m 、 F_0 ——Weibull 分布参数。

岩石类材料受到外荷载作用时, 整体将发生损伤劣化。当外荷载达到屈服极限时, N_f 可表示为:

$$N_f = \int_0^F NP(x) dx \quad (4)$$

联立式(3)(4)得到岩石在 t_1 时刻的损伤微元体个数 N_1 为:

$$\begin{aligned} N_1 &= \int_0^{F(\sigma)} NP(x) dx \\ &= \int_0^{F(\sigma)} \frac{m}{F_0} \left(\frac{x}{F_0} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{x}{F_0} \right)^m \right] dx \Big|_{F(\sigma)=F_1(\sigma)} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $F(\sigma)$ ——岩石稳定蠕变阶段的应力状态函数。

结合式(5), N_1 的下限值 N_1^* 为:

$$\begin{aligned} N_1^* &= \int_0^{F(\sigma_s)} NP(x) dx \\ &= \int_0^{F(\sigma_s)} \frac{m}{F_0} \left(\frac{x}{F_0} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{x}{F_0} \right)^m \right] dx \Big|_{F(\sigma_s)=F_1(\sigma_s)} \end{aligned} \quad (6)$$

在岩石蠕变过程中, 任意时刻试样内部损伤微元体个数可由式(5)进行描述^[27], 则黏塑性应变率可表示为:

$$\dot{\varepsilon}_{vp} = \eta \left[\frac{N_f}{N_1^*} \right] m, N_f > N_1^* \quad (7)$$

根据相关联流动法则, 流动方向与塑性流动方向一致, 故 $m=1$ 。

1.2 一维蠕变模型建立

通过上述模型, 材料的黏塑性应变率能够准确给出, 但材料内部的微元损伤个数 N_f 和总个数 N 还不能确定。为了使各个蠕变阶段得到准确的划分, 采用 Weibull 分布统计损伤理论将 N_f 和 N 之间关系进行合理转化, 即将 N_f 和 N 的比值定义为损伤变量 (D), 即:

$$D = \frac{N_f}{N} \quad (8)$$

将式(3)(4)(8)代入式(7), 简化后得:

$$\dot{\varepsilon}_{vp} = \eta_2 \frac{1 - \exp \left[- \left(\frac{F(\sigma^*)}{F_0} \right)^m \right]}{D_1^*}, D > D_1^* \quad (9)$$

式中: D_1^* ——临界点微元体损伤个数下限值 N_1^* 对应的损伤变量;

σ^* ——有效应力/MPa。

根据图 2 和式(9), 采用损伤变量对蠕变阶段重新划分, 如图 3 所示。当蠕变由衰减阶段进入稳定阶段, 即蠕变时间 t_1 时, 对应的损伤变量为 D_1 , 下限值为 D_1^* ; 当蠕变由稳定阶段进入加速阶段, 即蠕变时间 t_2 时, 对应的损伤变量为 D_2 , 下限值为 D_2^* 。

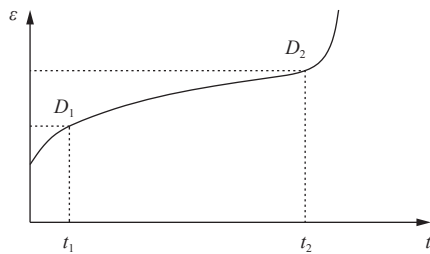


图 3 损伤变量临界分段示意图

Fig. 3 Schematic diagram of critical segment of damage variable

根据 Lemaitre 应变等效性假设原理^[28], 岩石类材料的有效应力与应力之间满足如下关系:

$$\sigma^* = \frac{\sigma}{1-D} \quad (10)$$

根据式(10), 岩石类材料的微元体屈服函数可表示为:

$$F(\sigma^*) = \frac{F(\sigma)}{1-D} \quad (11)$$

将式(11)代入式(9)得到基于 Weibull 分布的岩石类材料黏塑性应变率为:

$$\dot{\varepsilon}_{vp} = \eta_2 \frac{1 - \exp\left\{-\left[\frac{\sigma/(1-D)}{F_0}\right]^m\right\}}{D_1^*}, D > D_1^* \quad (12)$$

通常情况下, 岩石类材料的应变是 σ 与时间 (t) 的函数, 蠕变条件下, 应力为恒定值 ($\sigma = \sigma_0$), 即蠕变应变仅为随 t 变化的函数。因此, 基于 Lemaitre 应变等价性假设, 考虑损伤的岩石类材料的黏塑性应变可表示为:

$$\varepsilon_{vp}(\sigma_0, t) = \frac{\sigma_0 \varepsilon(t)}{1-D} \quad (13)$$

式中: ε_{vp} ——黏塑性应变/%;

$\varepsilon(t)$ ——与时间有关的应变函数。

根据经典岩石类材料黏塑性应变的分布规律可知, 采用多项式对其进行无限逼近, 效果较好, 可由下式进行表示:

$$\varepsilon(t) = h(t) = \lambda_0 + \lambda_1 t + \dots + \lambda_i t^i, i = 0 \sim M \quad (14)$$

式中: $h(t)$ ——与时间有关的多项式函数;

i ——多项式幂次;

λ_i ——多项式常数。

当蠕变时间介于 t_1 与 t_2 之间时, 蠕变处于稳定阶段, 此时的蠕变应变与时间之间基本满足线性关系, 即:

$$\varepsilon(t) = h(t) = \lambda_0 + \lambda_1 t \quad (15)$$

将式(13)~(15)代入式(12)中, 可得:

$$\{\dot{\varepsilon}_{vp}\} = \eta_2 \frac{1 - \exp\{-[\varepsilon_{vp}(t)/(\lambda_0 + \lambda_1 t)F_0]^m\}}{D_1^*}, D_2^* \geq D > D_1^* \quad (16)$$

当材料的蠕变处于衰减阶段与稳定阶段的临界点处时, 其损伤变量下限值 D_1^* 可表示为:

$$D_1^* = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{\varepsilon_{vp}^1}{(\lambda_0 + \lambda_1 t)F_0}\right]^m\right\}, D_2^* \geq D > D_1^* \quad (17)$$

式中: ε_{vp}^1 —— t_1 时刻对应的黏塑性应变/%。

在临界点 t_1 时刻之前, 岩石类材料产生的黏塑性应变 $\varepsilon_{vp} < \varepsilon_{vp}^1$, 因此, 在衰减阶段存在 $D < D_1^*$ 。由于岩石类材料的蠕变变形与时间满足一定的函数关系, 则衰减阶段产生的损伤与临界点 t_1 处产生的损伤所对应的分布参数相同。

采用泰勒级数对式(16)等号右边进行展开, 得:

$$\exp\{-[\varepsilon_{vp}(t)/(\lambda_0 + \lambda_1 t)F_0]^m\} = 1 - [\varepsilon_{vp}(t)/(\lambda_0 + \lambda_1 t)F_0]^m + o(\varepsilon_{vp}^2) \quad (18)$$

式中: $o(\varepsilon_{vp}^2)$ —— ε_{vp} 的高阶无穷小。

将式(18)代入式(16), 得:

$$\dot{\varepsilon}_{vp} = \eta_2 \left\{ \frac{[\varepsilon_{vp}(t)/(\lambda_0 + \lambda_1 t)F_0]^m + o(\varepsilon_{vp}^2)}{D_1^*} \right\}, D_2^* \geq D > D_1^* \quad (19)$$

边界条件: 当 $t \rightarrow 0$ 时, $\varepsilon_{vp} = 0$; 对式(19)积分:

$$\varepsilon_{vp} = [(\lambda_0 + \lambda_1 t)F_0]^{\frac{m}{m-1}} \left[(m-1) \left(\frac{\eta_2}{D_1^*} t \right) \right]^{\frac{1}{1-m}} \quad (20)$$

综上得改进后的西原模型蠕变方程为:

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} t\right) \right], D \leq D_1^* \\ \varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} t\right) \right] + \\ \quad [(\lambda_0 + \lambda_1 t)F_0]^{\frac{m}{m-1}} \left[\left(\frac{\eta_2}{D_1^*} t_1 \right) (m-1) \right]^{\frac{1}{1-m}}, D_2^* \geq D > D_1^* \end{cases} \quad (21)$$

岩石类材料蠕变过程中稳定阶段和加速阶段差

别较大,稳定阶段中蠕变速率恒定不变,而加速阶段中蠕变速率呈非线性增大趋势,直至失稳破坏。加速阶段的黏塑性应变曲线同样是关于时间 t 的函数,且在同一应力状态下的破坏模式基本一致。根据图 3,当 $\varepsilon_{vp} > \varepsilon_{vp}^*$ 时,蠕变应变与时间之间满足如下非线性关系:

$$\varepsilon(t) = h(t) = \lambda_0 + \lambda_1 t + \lambda_2 t^2 \quad (22)$$

将式(13)(22)代入式(12)中,得到加速阶段的黏塑性应变率为:

$$\dot{\varepsilon}_{vp} = \eta_3 \frac{1 - \exp\left\{-[\varepsilon_{vp}(t)/(\lambda'_0 + \lambda'_1 t + \lambda_2 t^2) F'_0]^{m'}\right\}}{D_2^*}, D > D_2^* \quad (23)$$

式中: F'_0 、 m' —加速阶段黏塑性应变 Weibull 分布参数。

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} t\right)\right], D \leq D_1^* \\ \varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} t\right)\right] + [(\lambda_0 + \lambda_1 t) F_0]^{\frac{m}{m-1}} \left[\left(\frac{\eta_2}{D_1^*} t_1\right)(m-1)\right]^{\frac{1}{1-m}}, D_2^* \geq D > D_1^* \\ \varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} t\right)\right] + [(\lambda_0 + \lambda_1 t) F_0]^{\frac{m}{m-1}} \left[\left(\frac{\eta_2}{D_1^*} t_1\right)(m-1)\right]^{\frac{1}{1-m}} + \frac{A[C \cdot (m'-1)]^{\frac{1}{m-1}}}{[C \cdot (m'-1)]^{\frac{1}{1-m'}} + \frac{\eta_3}{D_2^*} [\lambda'_0 + \lambda'_1 (t-t_2) + \lambda_2 (t-t_2)^2]^2}, D_2^* < D \end{cases} \quad (26)$$

1.3 一维模型三维推广

在实际地下工程中,围岩体通常处于三向受力状态,为了使蠕变模型的适用性更为接近工程岩体所处

采用泰勒级数对式(23)等式右边进行展开,得:

$$\exp\left(-[\varepsilon_{vp}(t)/(\lambda'_0 + \lambda'_1 t + \lambda_2 t^2) F'_0]^{m'}\right) = 1 - [\varepsilon_{vp}(t)/(\lambda'_0 + \lambda'_1 t + \lambda_2 t^2) F'_0]^{m'} + o(\varepsilon_{vp}^2) \quad (24)$$

将式(24)代入式(23)中,积分得:

$$\varepsilon_{vp} = \frac{A[C \cdot (m'-1)]^{\frac{1}{m-1}}}{[C \cdot (m'-1)]^{\frac{1}{1-m'}} + \frac{\eta_3}{D_2^*} [\lambda'_0 + \lambda'_1 (t-t_2) + \lambda_2 (t-t_2)^2]^2} \quad (25)$$

式中: C —— $C = \lambda_1 [F'_0 (\lambda'_0 + \lambda'_1 (t-t_2) + \lambda_2 (t-t_2)^2)]^{m'}$;

A ——积分常数。

综上所述,基于 Weibull 分布的一维黏弹塑性蠕变方程如下:

的真实应力环境,通常对围岩体进行室内常规三轴压缩蠕变试验($\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$)。本文采用类比法将基于 Weibull 分布的一维黏弹塑性蠕变模型进行三维推广:

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_0} + \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_1}{\eta_1^*} t\right)\right], D \leq D_1^* & (a) \\ \varepsilon = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_0} + \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_1}{\eta_1^*} t\right)\right] + [(\lambda_0 + \lambda_1 t) F_0]^{\frac{m}{m-1}} \left[\left(\frac{\eta_2^*}{D_1^*} t_1\right)(m-1)\right]^{\frac{1}{1-m}}, D_2^* \geq D > D_1^* & (b) \\ \varepsilon = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_0} + \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_1}{\eta_1^*} t\right)\right] + \frac{A[C \cdot (m'-1)]^{\frac{1}{m-1}}}{[C \cdot (m'-1)]^{\frac{1}{1-m'}} + \frac{\eta_3^*}{D_2^*} [\lambda'_0 + \lambda'_1 (t-t_2) + \lambda_2 (t-t_2)^2]^2} + [(\lambda_0 + \lambda_1 t) F_0]^{\frac{m}{m-1}} \left[\left(\frac{\eta_2^*}{D_1^*} t_1\right)(m-1)\right]^{\frac{1}{1-m}}, D_2^* < D & (c) \end{cases} \quad (27)$$

式中: G_0 、 G_1 ——剪切模量/GPa;

K ——体积模量/GPa;

η_1^* 、 η_2^* 、 η_3^* ——三维状态下的黏滞系数/(GPa·h)。

2 三轴蠕变试验

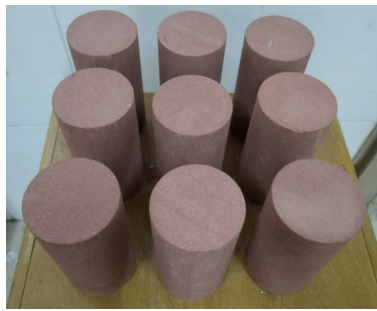
本文试验用红砂岩采自依卜隧道施工现场,粒径分布均匀,质地较为坚硬,试样表面未见明显节理,自然状态下呈红褐色,干密度为 $2.11 \sim 2.32 \text{ g/cm}^3$,孔隙率为 $0.62\% \sim 0.71\%$ 。为了避免试样离散性带来的试验误差,所有试件均从同一岩块上钻取。根据国际岩

石力学规范,最终制得直径 50 mm、高 100 mm 的标准圆柱试件,见图 4(a)。在进行三轴压缩及蠕变试验前所有岩样均需进行烘干处理。

本文红砂岩三轴压缩试验和三轴蠕变试验均在辽宁工程技术大学土木工程学院的 TAW2000 多功能三轴伺服试验系统上进行,如图 4(b)所示。

2.1 常规三轴压缩试验

根据隧道实际埋深,取三轴压缩试验围压分别为 5, 10, 15, 20 MPa。具体试验方法为:(1)对试样施加围压至预定值,保持恒定,加载方式为力控制,加载速



(a) 红砂岩试件



(b) TAW-2000三轴试验系统

图4 试验岩样与仪器

Fig. 4 Test rock samples and instruments

率为 500 N/s; (2) 对试样施加轴压, 直至失稳破坏, 加载方式和加载速率与围压相同; (3) 导出试验数据绘制应力-应变曲线。为避免试样离散性对试验结果造成误差, 每组围压下均进行 3 组平行试验, 最终选出

最具代表性的试验结果。图 5、图 6 为围压 20 MPa 红砂岩的全过程应力-应变曲线及破坏模式, 不同围压下红砂岩力学参数见表 1。

由图 6 可知, 红砂岩三轴加载破坏过程与经典岩石应力-应变曲线的变化规律基本一致, 大体分为 4 个阶段: 微裂隙压密阶段、弹性阶段、塑性屈服阶段和峰后阶段。由于本文红砂岩试样取自依卜隧道施工现场, 埋深约 600 m, 试样的完整性较好, 硬度较高, 因此, 在不同围压下试样均呈剪斜破坏模式。由表 1 可知, 随着围压逐渐增大, 红砂岩的峰值强度、峰值应变和弹性模量均呈逐渐递增变化趋势, 泊松比逐渐减小。

2.2 三轴蠕变试验

三轴压缩蠕变试验具体方法为: (1) 根据室内三轴压缩峰值强度, 确定不同围压下蠕变试验的荷载水平, 初始荷载水平按峰值强度的 60% 取值, 之后每级荷载分别为峰值强度的 70%、80% 和 90%, 以此保证试样在 4 级荷载水平内失稳破坏; (2) 对试样施加围压至预定值, 保持恒定, 加载方式为力控制, 加载速率为 500 N/s; (3) 对试样施加轴向荷载至预定值, 保持恒定, 加载方式和加载速率与围压相同; (4) 当加载时间达到 24 h 后, 施加下一级荷载, 重复操作, 直至试样失稳破坏; (5) 导出试验数据, 并根据陈氏加载法对数据进行处理, 最终得到不同围压下红砂岩的蠕变曲线, 见图 7。

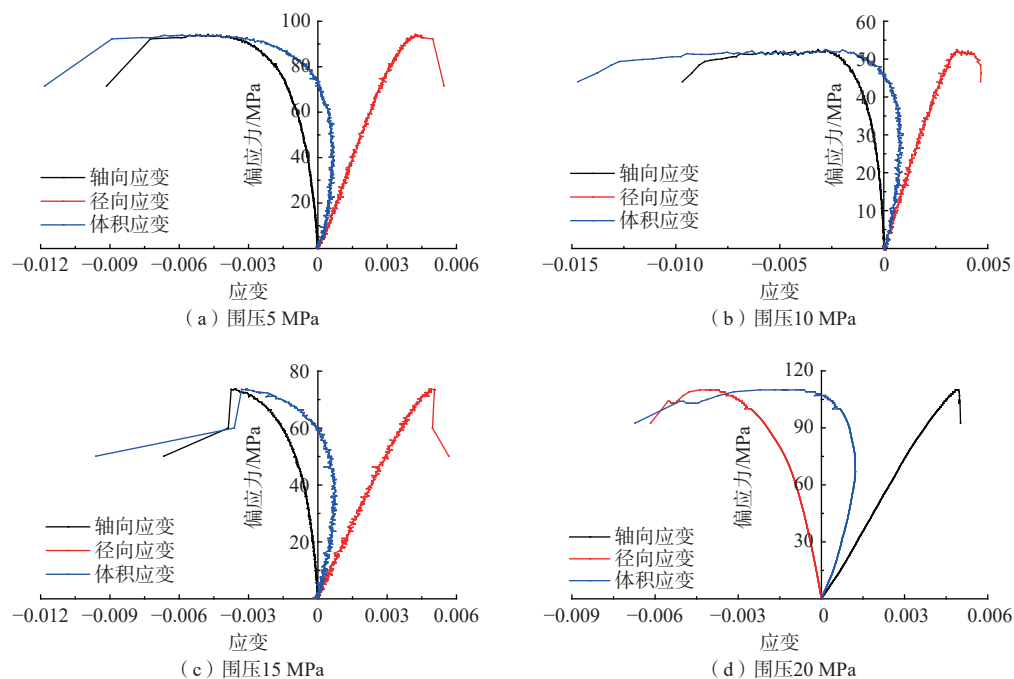


图5 全过程应力-应变曲线

Fig. 5 Whole process stress-strain curve

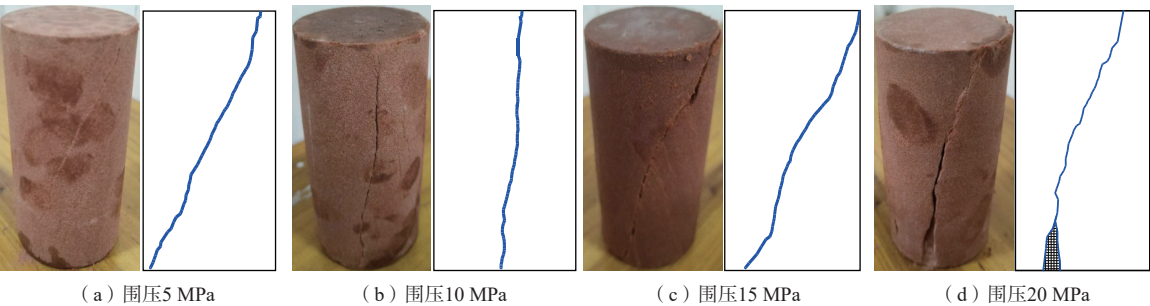


图 6 破坏模式
Fig. 6 Failure mode

表 1 红砂岩力学参数

Table 1 Mechanical parameters of red sandstone							
参数	围压/MPa	峰值强度/MPa	轴向峰值应变	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
取值	5	52.51	0.005 4	9.67	0.263	6.27	31.05
	10	73.73	0.004 7	15.39	0.257		
	15	94.19	0.005 0	18.81	0.252		
	20	110.31	0.004 5	24.41	0.248		

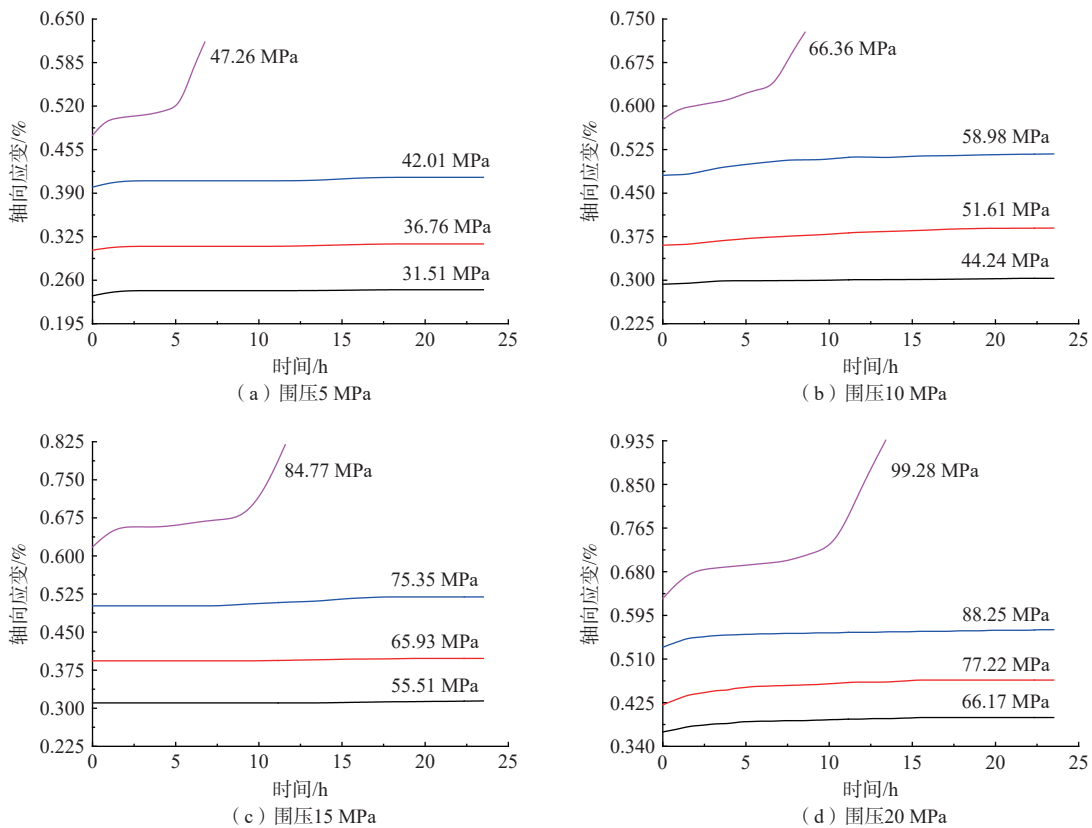


图 7 不同荷载水平下红砂岩轴向蠕变曲线

Fig. 7 Axial creep curves of red sandstone under different load levels

从图 7 可以看出, 同一围压下, 在逐级增加轴向荷载时, 试样在加载瞬间会产生瞬时变形, 且随轴向荷载逐渐增大。加载前, 试样内部孔隙处于完全张开状态, 加载时的孔隙闭合能够为瞬时变形提供一定的形变量, 随着加载的持续进行, 原有裂隙逐渐闭合, 新裂隙开始萌生, 瞬时变形在试样整体变形中所占的比例逐渐下降, 蠕变应变占比逐渐升高, 说明试样内部新生裂隙逐渐增多, 损伤程度逐渐加重。但从瞬时应变

和蠕变应变占总应变的比例来看,瞬时应变的占比远远大于蠕变应变,说明瞬时变形对试样造成的损伤更为严重。以围压 5 MPa 为例,前 3 级荷载水平下,试样仅表现为衰减蠕变和稳定蠕变;第 4 级荷载水平下,在经历一段时间的衰减和稳定蠕变后,试样进入加速阶段,蠕变时间缩短,说明荷载水平的提升使试样更易发生失稳破坏。

3 模型验证与参数辨识

3.1 临界参数的确定

根据前文模型推导过程,本文模型存在 2 个临界点,即由衰减阶段到稳定阶段的临界点(ε_{vp}^1, t_1)和由稳定阶段到加速阶段的临界点(ε_{vp}^2, t_2),2 组临界参数均可由蠕变曲线给出,表 2 为不同围压下两组临界点总计结果。

3.2 模型验证

为了验证本文模型的准确性,采用 origin 软件对不同围压下的试验数据进行参数反演。根据红砂岩蠕变曲线的变化规律可知,当荷载水平为 66.17 MPa 时,蠕变表现为衰减蠕变,采用式(27a)进行拟合;当荷载水平为 77.22 MPa 和 88.25 MPa 时,蠕变表现为衰减和稳定蠕变,采用式(27b)进行拟合;当荷载水平为 99.28 MPa 时,蠕变表现为衰减、稳定和加速蠕变,采

表 2 红砂岩临界点参数

Table 2 Critical point parameters of red sandstone

参数	围压/MPa	荷载水平/MPa	t_1/h	$\varepsilon_{vp}^1/\%$	t_2/h	$\varepsilon_{vp}^2/\%$
	5	31.51	2.54	0.243	—	—
		36.76	2.21	0.315	—	—
		42.01	2.02	0.414	—	—
		47.26	1.33	0.503	5.02	0.527
	10	44.24	2.55	0.291	—	—
		51.61	2.43	0.368	—	—
		58.98	2.22	0.492	—	—
		66.36	2.01	0.598	6.66	0.619
取值	15	55.51	1.04	0.323	—	—
		65.93	1.97	0.401	—	—
		75.35	1.58	0.502	—	—
		84.77	1.74	0.658	9.54	0.662
	20	66.17	2.61	0.369	—	—
		77.22	2.56	0.452	—	—
		88.25	2.35	0.559	—	—
		99.28	2.11	0.687	9.86	0.703

注:表中“—”表示无数值,下表同。

用式(27c)进行拟合,以围压 20 MPa 为例,参数反演结果见表 3。图 8 为不同围压下试验曲线与理论曲线对比情况。从图 8 中可以看出,不同围压下的模型理论值与试验值基本重合,拟合相关系数 R^2 均在 0.95 以上,验证了本文模型的准确性,说明基于 Weibull 分布函数建立的岩石全过程蠕变模型是合理的。

表 3 模型参数反演结果

Table 3 Model parameter inversion results

模型参数	荷载水平/MPa	G_0 /GPa	K /GPa	G_1 /GPa	η_1^* /(GPa·h)	η_2^* /(GPa·h)	F_0	m	λ_0	λ_1	η_3^* /(GPa·h)	F_0'	m'	λ_0'	λ_1'	λ_2	A	R^2
反演结果	66.17	105.34	161.58	241.98	142.66	359.63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.95
	77.22	114.29	186.76	435.97	298.66	688.54	5.43	1.79	6.32	12.31	—	—	—	—	—	—	—	0.97
	88.25	124.58	246.87	985.64	178.92	1 231.55	5.02	2.86	3.05	7.54	—	—	—	—	—	—	—	0.96
	99.28	66.48	188.93	92.45	98.33	1 112.30	4.62	4.31	1.14	3.88	2 041.69	1.96	2.03	1.13	-0.37	-5.01	2.88	0.95

4 讨论

为了进一步验证本文模型的准确性,引用文献[29]中的试验数据,绘制本文模型、西原模型及文献[29]试验数据对比曲线见图 9,参数反演结果见表 4。从图 9 中可以看出,本文模型曲线与文献[29]中的试验数据具有较高的吻合度,基本可以描述文献[29]中非饱和泥质粉砂岩的蠕变过程。从表 4 中可以看出,不同含水率(ω)泥质砂岩最后一级荷载水平下蠕变曲线拟合相关系数均在 0.95 以上,再次验证了 Weibull 分布函数建立的岩石全过程蠕变模型是合理的。对于西原模型,在衰减蠕变和稳定蠕变阶段,均能较好

的描述岩石的变形规律,当蠕变进入加速阶段,模型曲线与试验数据逐渐偏离,误差逐渐增大。本文模型恰好弥补了西原模型不能描述岩石加速蠕变的缺点,说明本文模型具有一定的工程应用价值。

通过上述对比结果可知,岩石类材料的加载蠕变过程实际上一种内部微元体累计损伤劣化的过程,是一种不可逆行为。对于岩石类材料而言,仅通过外变量来描述本构关系并不充分,需要一个能够描述材料微观结构变化的内变量作为补充,而岩石的损伤贯穿蠕变全过程,可由应力-应变状态函数进行描述。因此,本文结合 Weibull 分布函数和 Perzyna 黏塑性理

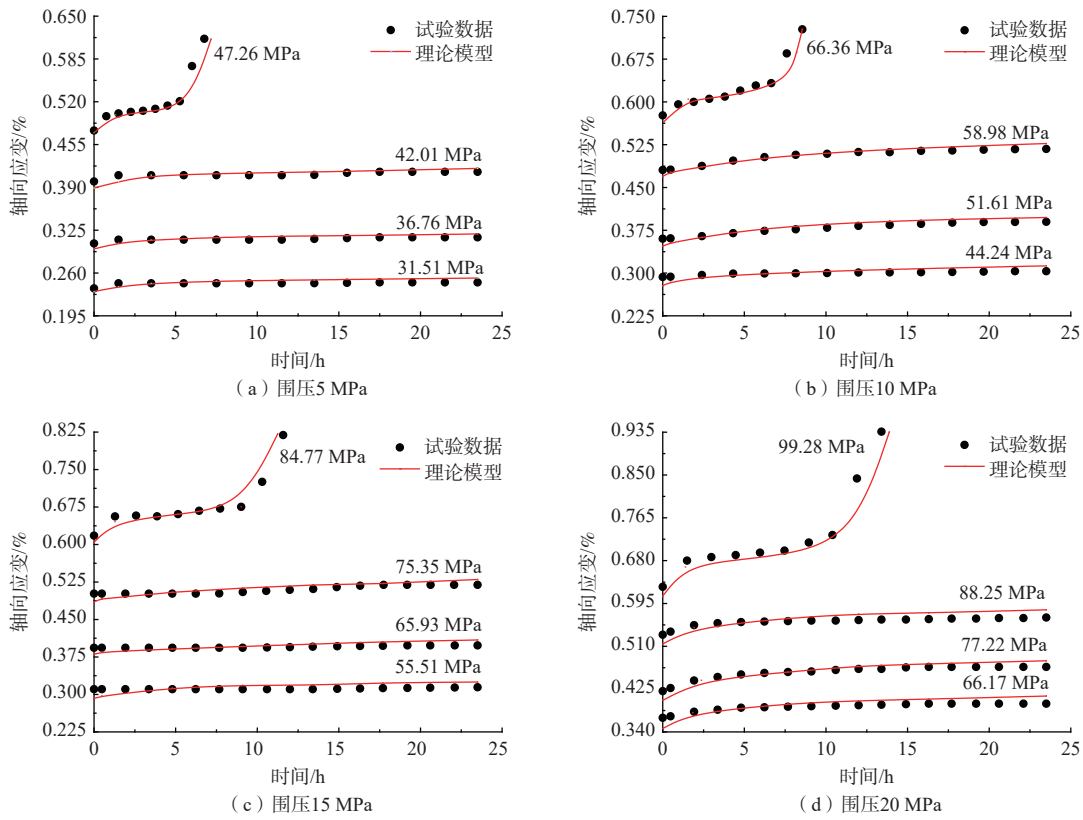


图 8 模型验证

Fig. 8 Model validation

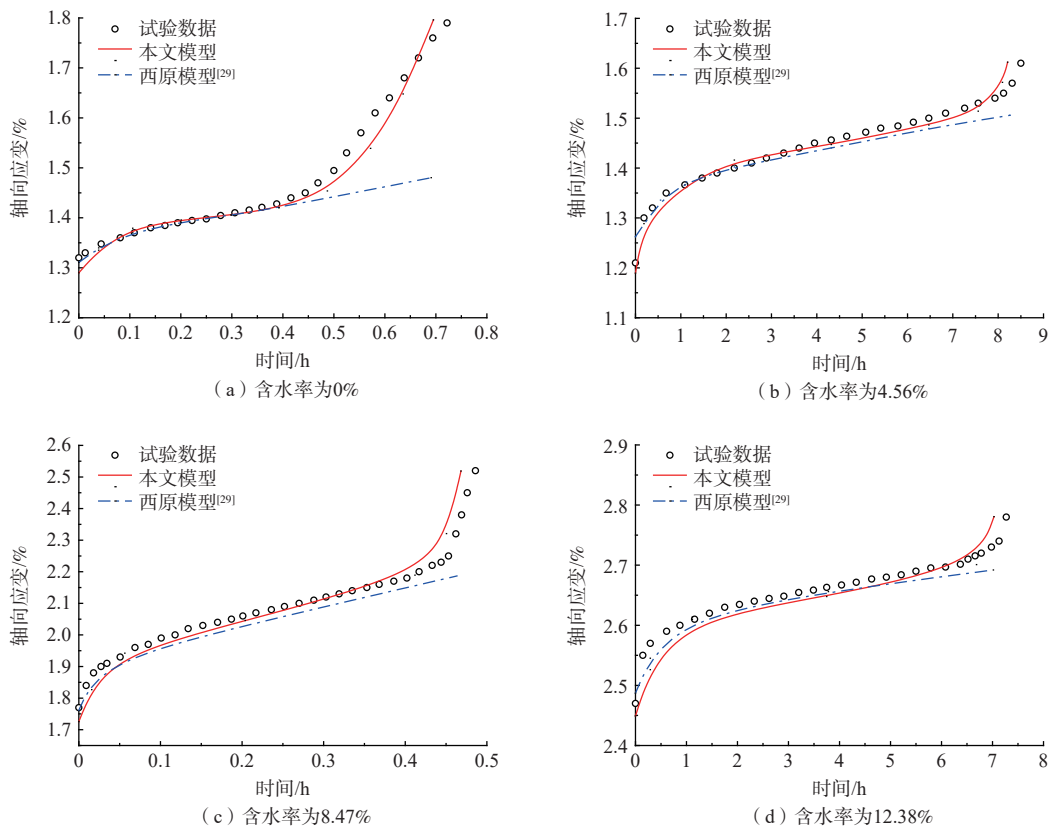


图 9 模型曲线与文献 [29] 试验数据对比

Fig. 9 Comparison between model curve and test data in Reference [29]

表 4 文献 [29] 模型参数反演结果

Table 4 Model parameter inversion results of Reference [29]

模型 参数	含水率/%	G_0 /GPa	K /GPa	G_1 /GPa	η_1^* /(GPa·h)	η_2^* /(GPa·h)	F_0	m	λ_0	λ_1	η_3^* /(GPa·h)	F'_0	m'	λ'_0	λ'_1	λ_2	A	R^2
反演 结果	0	89.75	255.06	124.81	132.75	1 501.61	6.24	5.82	6.99	1.85	2 756.28	5.64	4.35	0.08	-2.31	-4.55	3.44	0.95
	4.56	86.42	245.61	120.19	127.83	1 445.99	6.01	5.60	0.87	5.22	2 654.20	2.24	1.37	0.83	-1.55	-2.09	7.48	0.97
	8.47	73.13	207.82	101.70	108.16	1 223.53	5.08	4.74	1.25	3.11	2 245.86	2.16	2.23	1.05	-2.54	-10.87	15.21	0.96
	12.38	66.48	188.93	92.45	98.33	1 112.30	4.62	4.31	1.14	3.88	2 041.69	1.96	2.03	1.13	-0.37	-5.01	2.88	0.95

论,将蠕变曲线划分为 3 个阶段,定义临界点损伤变量的数学表达式,在西原模型的基础上进行改进,建立一个能够描述蠕变全过程的损伤本构模型,进而更好的反映岩石类材料的损伤演化规律和应力-应变状态,为地下工程围岩长期稳定提供可靠的理论基础。

5 结论

(1)基于 Weibull 函数定义损伤变量,从细观角度对岩石的损伤进行了解释,通过定义临界损伤变量,对岩石的蠕变阶段进行划分,为加速蠕变阶段模型的建立奠定基础。

(2)基于 Perzyna 黏塑性理论,建立了岩石黏塑性应变率的表达式,结合基于 Weibull 函数定义的损伤变量,得到了可以描述加速蠕变的黏塑性应变表达式。

(3)本文以西原模型为基础,同时结合 Weibull 分布函数和 Perzyna 黏塑性理论建立了非线性蠕变模型,该模型能够较好的描述红砂岩蠕变破坏的全过程,能够更为准确的反映出岩石蠕变变形与损伤之间的关系,弥补了西原模型不能描述加速蠕变的缺点,具有一定的工程应用价值。

参考文献 (References):

- [1] 张亮亮, 王晓健. 岩石黏弹塑性损伤蠕变模型研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1085 - 1092. [ZHANG Liangliang, WANG Xiaojian. Viscoelastic-plastic damage creep model for rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 1085 - 1092. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 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 - 146. [LIU Xinxi, LI Shengnan, ZHOU Yanming, et al. Study on creep behavior and long-term strength of argillaceous siltstone under high stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 138 - 146. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 姜鹏, 潘鹏志, 赵善坤, 等. 基于应变能的岩石黏弹塑

性损伤耦合蠕变本构模型及应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 2967 - 2979. [JIANG Peng, PAN Pengzhi, ZHAO Shankun, et al. A coupled elasto-viscoplastic damage model based on strain energy theory of rock and application[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 2967 - 2979. (in Chinese with English abstract)]

- [4] 程爱平, 付子祥, 刘立顺, 等. 胶结充填体蠕变硬化-损伤特征及非线性本构模型[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(3): 449 - 457. [CHENG Aiping, FU Zixiang, LIU Lishun, et al. Creep hardening-damage characteristics and nonlinear constitutive model of cemented backfill[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(3): 449 - 457. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 张立. 冻融循环条件下含软弱夹层隧道围岩力学性质及破坏特征[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 74 - 80. [ZHANG Li. On mechanical properties and failure characteristics of surrounding rock of tunnel with weak interlayer under freezing-thawing cycles[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 74 - 80. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 郭长宝, 王磊, 李任杰, 等. 西藏贡觉粉砂质泥岩工程地质特性与蠕变强度研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 54 - 64. [GUO Changbao, WANG Lei, LI Renjie, et al. Engineering geology properties and creeping strength characteristics of the silty mudstone in Gongjue County in Tibet of China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 54 - 64. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 卢功臣, 祝荃芑, 周林林. 基于能耗理论的岩石三维蠕变本构模型及临界分段[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(1): 107 - 113. [LU Gongchen, ZHU Quanpeng, ZHOU Linlin. Three-dimensional creep constitutive model and critical segment of rock based on energy consumption theory[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(1): 107 - 113. (in Chinese with English abstract)]
- [8] LIU L, XU W Y, WANG H L, et al. Permeability evolution of granite gneiss during triaxial creep tests[J].

- Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(9): 3455 – 3462.
- [9] 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 Bo, WANG Zonglin, LIANG Bing, et al. Experimental study of rock creep properties[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(4): 438 – 446. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 李晓照, 班力壬, 戚承志. 高渗透压脆性岩石蠕变宏-细观力学模型研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(12): 3987 – 3995. [LI Xiaozhao, BAN Liren, QI Chengzhi. Study on the mechanical model of macro-micro creep under high seepage pressure in brittle rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(12): 3987 – 3995. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 王游, 卢小雨, 翟国良. 基于西原体模型的非定常岩石蠕变模型[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(2): 676 – 682. [WANG You, LU Xiaoyu, ZHAI Guoliang. Non-stationary creep model for rock based on Nishihara model[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(2): 676 – 682. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 王军保, 刘新荣, 宋战平, 等. 基于反S函数的盐岩单轴压缩全过程蠕变模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(11): 2446 – 2459. [WANG Junbao, LIU Xinrong, SONG Zhanping, et al. A whole process creeping model of salt rock under uniaxial compression based on inverse S function[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(11): 2446 – 2459. (in Chinese with English abstract)]
- [13] LIU Wenbo, ZHANG Shuguang. Creep parameter determination and model establishment considering stress and time effects[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38(2): 1509 – 1520.
- [14] 沈才华, 王浩越, 王媛, 等. 基于COD理论的岩石蠕变加速判别法探究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊2): 3752 – 3759. [SHEN Caihua, WANG Haoyue, WANG Yuan, et al. Study on creep acceleration discrimination method based on COD theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(Sup 2): 3752 – 3759. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 刘东燕, 谢林杰, 庾晓峰, 等. 不同围压作用下砂岩蠕变特性及非线性黏弹塑性模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊2): 3705 – 3712. [LIU Dongyan, XIE Linjie, TUO Xiaofeng, et al. Creep properties of sandstone under different confining pressures and research on a nonlinear viscoelasto-plastic creep model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(Sup 2): 3705 – 3712. (in Chinese with English abstract)]
- [16] LYU Cheng, LIU Jianfeng, REN Yi, et al. Study on long-term uniaxial compression creep mechanical behavior of rocksalt-mudstone combined body[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2022, 31(2): 275 – 293.
- [17] 杨秀荣, 姜谔男, 江宗斌. 含水状态下软岩蠕变试验及损伤模型研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊1): 167 – 174. [YANG Xiurong, JIANG Annan, JIANG Zongbin. Creep test and damage model of soft rock under water containing condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(Sup 1): 167 – 174. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 蔡煜, 曹平. 基于Burgers模型考虑损伤的非定常岩石蠕变模型[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊2): 369 – 374. [CAI Yu, CAO Ping. A non-stationary model for rock creep considering damage based on Burgers model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup 2): 369 – 374. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 宋勇军, 张磊涛, 任建喜, 等. 冻融环境下红砂岩三轴蠕变特性及其模型研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5): 841 – 849. [SONG Yongjun, ZHANG Leitao, REN Jianxi, et al. Triaxial creep properties and model of red sandstone under freeze-thaw environment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(5): 841 – 849. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 王者超, 宗智, 乔丽苹, 等. 横观各向同性岩石蠕变性质与本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1221 – 1229. [WANG Zhechao, ZONG Zhi, QIAO Liping, et al. Creep behaviors and constitutive model of transversely isotropic rocks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(7): 1221 – 1229. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 张俊文, 霍英昊. 深部砂岩分级增量加卸载蠕变特性[J]. 煤炭学报, 2021, 46(增刊2): 661 – 669. [ZHANG Junwen, HUO Yinghao. Creep behavior of deep sandstones under stepwise incremental loading and unloading conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(Sup 2): 661 – 669. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 王新刚, 刘凯, 王友林, 等. 典型黄土滑坡滑带土不同含水率下蠕变特性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 137 – 143. [WANG Xingang, LIU Kai, WANG Youlin, et al. An experimental study of the creep

- characteristics of loess landslide sliding zone soil with different water content[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(5): 137 – 143. (in Chinese with English abstract)]
- [23] ZHOU Jiaying, ZHANG Jiwei, WANG Jinan, et al. Research on nonlinear damage hardening creep model of soft surrounding rock under the stress of deep coal resources mining[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 1493 – 1507.
- [24] 沈才华, 张兵, 王文武. 一种基于应变能理论的黏弹塑性蠕变本构模型[J]. *岩土力学*, 2014, 35(12): 3430 – 3436. [SHEN Caihua, ZHANG Bing, WANG Wenwu. A new visco-elastoplastic creep constitutive model based on strain energy theory[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(12): 3430 – 3436. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 张慧梅, 谢祥妙, 彭川, 等. 三向应力状态下冻融岩石损伤本构模型[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(8): 1444 – 1452. [ZHANG Huimei, XIE Xiangmiao, PENG Chuan, et al. Constitutive model for damage of freeze-thaw rock under three-dimensional stress[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(8): 1444 – 1452. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 张慧梅, 彭川, 杨更社, 等. 考虑冻融效应的岩石损伤统计强度准则研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(5): 1066 – 1072. [ZHANG Huimei, PENG Chuan, YANG Gengshe, et al. Study of damage statistical strength criterion of rock considering the effect of freezing and thawing[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(5): 1066 – 1072. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 刘文博, 张树光, 陈雷, 等. 基于统计损伤原理的岩石加速蠕变模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(9): 1696 – 1704. [LIU Wenbo, ZHANG Shuguang, CHEN Lei, et al. Accelerated creep model for rock based on statistical damage principle[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(9): 1696 – 1704. (in Chinese with English abstract)]
- [28] JEAN L. A continuous damage mechanics model for ductile fracture[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1985, 107(1): 83 – 89.
- [29] 叶为民, 王启力, 罗文静, 等. 非饱和泥质粉砂岩蠕变特性及其模型[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(8): 1154 – 1162. [YE Weimin, WANG Qili, LUO Wenjing, et al. Compressive creep property and model for unsaturated argillaceous siltstone[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2022, 50(8): 1154 – 1162. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 刘真真