

含水状态下软岩蠕变试验及损伤模型研究

杨秀荣, 姜谔男, 江宗斌

(大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026)

摘 要: 为考虑时效劣化和含水弱化对岩石蠕变参数的劣化效应, 提出了蠕变损伤模型, 即对西原模型进行参数修正与完善, 开展了不同含水状态的软岩三轴蠕变试验。首先, 对不同含水率的岩石蠕变规律进行了对比分析, 初步揭示了含水状态对岩石蠕变过程影响规律的机理。其次, 为了能够较好地描述岩石蠕变过程, 引入时效劣化效应和含水弱化效应, 并通过试验数据拟合了损伤变量和蠕变参数。最后, 将模型的计算值与试验值进行对比分析。结果表明, 岩石随着含水率的增大, 初始蠕变值和稳态蠕变值有所增大。通过 FLAC^{3D} 验证了该模型的数值计算值与试验值具有很好的吻合性, 提出的岩石时效蠕变损伤模型将为岩石流变特性的研究提供一定的理论基础。

关 键 词: 蠕变试验; 损伤; 改进西原模型; 时效劣化; FLAC^{3D}; Kelvin 模型; 软岩; 黏滞系数

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 增 1-0167-08

Creep test and damage model of soft rock under water containing condition

YANG Xiu-rong, JIANG An-nan, JIANG Zong-bin

(Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China)

Abstract: In order to consider the damage effect of aging deterioration and water content weakened on the creep parameters of rock, a creep damage model is proposed, that is, the parameter correction and improvement of Nishihara model and the triaxial creep tests of basalt with different water contents are carried out. First of all, the creep regularities of rocks with different water contents are comparatively analyzed; and the mechanism of the influence of water content on the rock creep process is revealed. Secondly, in order to describe the rock creep process better, the aging deterioration effect and water content weakened effect are introduced. The damage variables and creep parameters are fitted by the experimental data. Finally, the calculated values of the model are compared with the experimental data. The results show that the initial creep value and steady creep value increase with the increase of water content. Furthermore, it is verified that the numerical calculation of the model agreed well with the experimental data by FLAC^{3D}. The rock aging creep damage model proposed in this paper will provide a theoretical basis for the study of rock rheological properties.

Keywords: creep test; damage; modified Nishihara model; aging deterioration; FLAC^{3D}; Kelvin model; soft rock; viscosity coefficient

1 引 言

岩石(岩体)是一种自然损伤材料, 长期受到应力作用, 其力学性质会逐渐弱化并按一定指数形式弱化。对于含水率岩石蠕变的试验研究已有很多, Trk^[1]和 Vásárhelyi 等^[2]研究了含水率对岩石强度的影响规律, 但未对岩石强度损伤时间效应和温度进一步探究。黄明等^[3-4]通过试验建立了岩石蠕变模量

和含水率的关系式, 并基于泥质砂岩非线性蠕变方程建立了考虑含水损伤的蠕变模型。刘小军等^[5]研究了不同含水状态下板岩的蠕变试验, 建立了可考虑含水劣化效应的 FLAC^{3D} 蠕变本构二次开发模型。康文献等^[6]在不同围压状态下对不同含水率的粉砂质泥岩进行了流变试验, 分析了含水率对其蠕变变量和长期强度的影响。李海洲等^[7]通过试验得出了随含水率逐渐增加岩石的弹性模量和黏滞系数

收稿日期: 2017-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51678101); 中央高校基本科研业务费专项资金 (No. 3132014326)。

This work was supported by the National Nature Science Foundation of China(51678101) and Central University Basic Research Fund Special Funds(3132014326).

第一作者简介: 杨秀荣, 女, 1991 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程稳定性分析的研究工作。E-mail: yangxiurong6@163.com

通讯作者: 姜谔男, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程稳定性分析和多场耦合方面的研究工作。E-mail: jiangannan@163.com

逐渐减小的结论。杨彩虹等^[8]对不同含水状态的页岩进行三轴蠕变试验,得到含水率和应力差是影响岩石蠕变的重要因素。张永兴等^[9-10]对不同含水率岩石进行三轴蠕变试验和模型参数衰减分析,根据试验模型参数变化形势建立了非线性含水蠕变模型。

岩石蠕变理论研究方面,张强勇等^[11-12]对变参数流变理论进行了模型应用,并建立了变参数流变损伤模型。不仅如此,岩石蠕变模型参数流变弱化还与岩石的含水率有关,国内很多学者对不同含水率的岩石蠕变进行了大量的研究,证明了岩石蠕变模型参数的弱化效应,于超云等^[13]通过引入含水损伤变量以及时效损伤变量,建立了含水劣化的变参数本构模型,并且证明了模型的正确性。江宗斌^[14]针对低温环境下的含水岩石蠕变试验提出 THB 蠕变本构模型,印证该模型具有很好的合理性。齐亚静等^[15]改进了西原模型即串联一个非线性黏壶,经验证要优于西原模型,但相关理论研究未考虑时效损伤与含水损伤对蠕变的影响。

2 岩石蠕变试验

2.1 试验设备的研制

RLW-2000 微机控制三轴试验机是大连海事大学和长春朝阳试验机厂联合研制的多功能流变仪,可进行岩石单轴、三轴压缩试验和蠕变-渗流试验。控制系统采用德国 DOLI 全数字伺服控制器,可以实现试验力、变形、位移等 3 种方式的闭环控制以及可以完成 3 种控制方式的平滑切换,是一种非常理想的控制器,流变仪和安装后的引伸计见图 1。

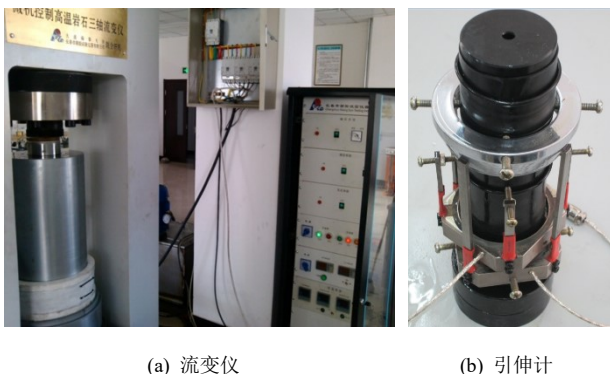


图 1 RLW-2000 流变仪及引伸计安装
Fig.1 RLW-2000 rheometer of rock and extensometer install

2.2 试样制备

为了克服天然岩石离散性大的问题,采用岩石相似材料作为研究对象,本次根据配制岩石相似材

料的要求,采用韩涛等^[16]中根据正交试验结果得到的配比,确定相似材料的配比(kg/m^3)为混凝土增强剂用量 Mz :水泥用量 Mc :砂用量 Mg 为 8:310:1 520,水胶比 W/C 取 0.4,砂粒径取 0.3~2.0 mm。

制作试件时先将砂和胶凝材料拌合均匀后加入约 1/2 用量的水拌合均匀,逐渐加水并搅拌均匀,将拌合材料倒入模具内并用一定压力压制直径为 50 mm、高 100 mm 的试样,脱模后在标准养护室对试样进行养护,共制成了 10 个标准试样,模具和制成的试样见图 2。



(a) 模具



(b) 岩样

图 2 模具及制成的岩样
Fig.2 Mold and sample

2.3 试验方案

先将制成的试样在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[17]下烘干 48 h 后称重,得出试样的干重 m_0 ,再进行抽真空强制饱和和处理,测定每个试样的饱和含水率 w_s 。将部分饱和的试样放入干燥箱内进行烘烤,每隔 30 min 对试样称重一次,称重时间随实际需要调整,直至达到不同含水情况下对应的试样质量的设定值 m_p ,停止烘烤。再将试样放置在恒温恒湿养护箱内,每隔 2 h 对岩样称重,直到岩样质量变为 m_1 后不再变化为止,岩样最终含水率为

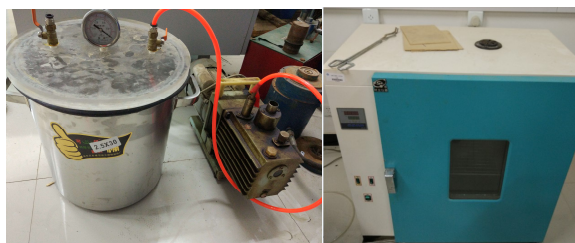
$$w = [(m_1 - m_0) / m_0] \times 100\% \quad (1)$$

此时试样内部的水分已经达到分布均匀的状态,根据以上情况分别制成 4%、8%、12% 的含水试样,饱和装置和干燥箱见图 3。

进行三轴压缩试验测定干燥试样和饱和试样的抗压强度,确定三轴蠕变试验分级加载过程中的荷

载水平等级, 三轴试验的基本情况见表 1。

试验过程中采用固定围压(5 MPa)、轴压分级加载的方式, 每级荷载增量为 2 MPa, 当位移增量小于 0.01 mm/h 时再施加第二级荷载, 直到蠕变进入加速段后停止试验。



(a) 饱和器

(b) 干燥箱

图 3 饱和装置和干燥箱

Fig.3 Saturated device and dryer

表 1 试验的基本情况

Table 1 Basic condition of test

岩样 编号	试样高度 /mm	质量 /g	含水率 ω /%	饱和含水率 /%	围压 σ_3 /MPa
T1	100.38	330.1	0	12	5
T2	100.42	343.2	4	12	5
T3	100.28	356.5	8	12	5
T4	100.26	369.7	12	12	5

3 岩石蠕变试验结果分析

不同含水率的岩石蠕变曲线如图 4 所示。从图中可以看出, 含水率为 0% 的蠕变曲线在所有曲线的下方, 而且经历较长的蠕变时间和极限应变才发生破坏; 相同荷载水平下, 随着含水率的增大, 瞬时应变增大, 抗压强度 σ_s 、蠕变历时和极限应变都是呈减小趋势; 同一围压下瞬时轴向变形和稳定段蠕变速率有所增大, 说明岩样的弹性模量和黏性模量在受荷过程中逐渐减小。

当含水率为 0% 时, $\sigma_s = 14$ MPa; 当含水率为 4% 时, σ_s 为 12 MPa; 当含水率为 8% 时, σ_s 为 10 MPa; 当含水率为 12% 时, σ_s 为 8 MPa。干燥状态 ($\omega = 0\%$) 的轴向应变在接近 0.8% 时就进入加速段, 含水率为 4% 的试样, 轴向应变在达到 0.62% 时进入加速段, 含水率为 8% 的试样, 轴向应变在达到 0.66% 时进入加速段, 含水率为 12% 的试样, 轴向应变在达到 0.61% 时进入加速段。由岩石蠕变曲线还可知, 含水率为 0%、4%、8%、12% 的岩样随着荷载的增大, 蠕变曲线分别出现了衰减蠕变、稳定蠕变和加速蠕变 3 个阶段。

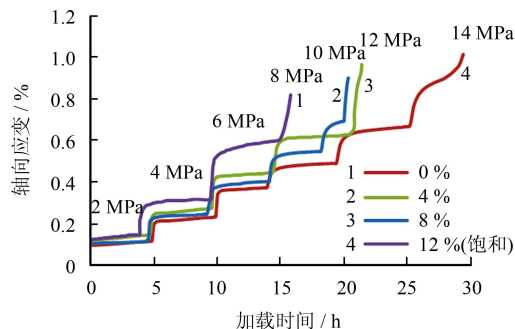


图 4 不同条件下的蠕变曲线

Fig.4 Creep curves under different conditions

4 考虑损伤的蠕变本构模型

4.1 蠕变损伤模型的提出

常见的岩石蠕变模型由 Hook 体、Maxwell 体、Kelvin 体和理想黏塑性体组成, 对这些模型体的串联或并联可以有效地描述岩石屈服前后的蠕变曲线。西原力学模型由 Hook 体、Kelvin 体和理想黏塑性体组成, 能够全面地反映岩石瞬间弹性应变、衰减蠕变、稳定蠕变和加速蠕变几个阶段, 并且能够描述岩石的综合性质, 是西原模型被应用较为广泛的优点之一。

单轴压缩情况下西原模型的蠕变表达式:

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - \exp\left(\frac{-E_2 t}{\eta_2}\right) \right), & (\sigma < \sigma_s) \\ \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - \exp\left(\frac{-E_2 t}{\eta_2}\right) \right) + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_3} t, & (\sigma \geq \sigma_s) \end{cases} \quad (2)$$

式中: E_1 为 Hook 体弹性模量; E_2 、 η_2 分别为 Kelvin 弹性模量和黏滞系数; η_3 为理想黏塑性体黏滞系数; σ_s 为岩石屈服应力; σ 为荷载应力; t 为加载时间。

由式(2)可知, 当应力小于屈服应力时 ($\sigma < \sigma_s$) 退化为广义 Kelvin 模型, 蠕变时间足够大时其蠕变表达式为

$$\varepsilon = \lim_{t \rightarrow \infty} \left(\frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \right) \quad (3)$$

当应力大于屈服应力 ($\sigma \geq \sigma_s$) 时且时间足够大时西原模型蠕变表达式为

$$\varepsilon = \lim_{t \rightarrow \infty} \left(\frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \right) + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_3} t \quad (4)$$

应力屈服前后的应变-时间曲线如图 5 所示。

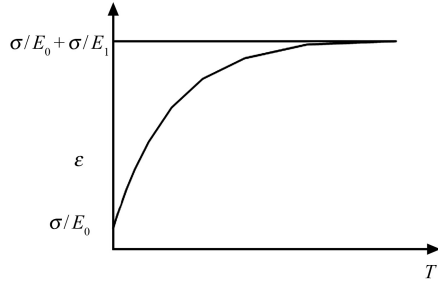
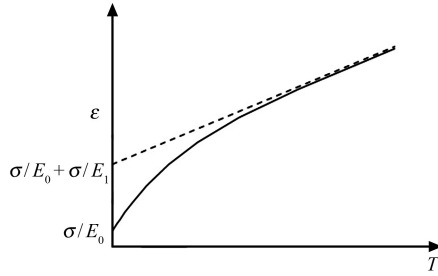
(a) $\sigma < \sigma_s$ (b) $\sigma \geq \sigma_s$

图5 西原模型蠕变曲线

Fig.5 Nishihara model creep curve

由式 (3)、(4) 可知, 西原蠕变模型曲线在应力屈服前后的变化, 当荷载应力小于屈服应力时稳定蠕变阶段的蠕变速率为 0; 当荷载应力大于屈服应力时, 稳定蠕变速率为荷载应力减去屈服应力后和理想黏塑性体中黏滞系数的比值。

根据不同含水率的岩石蠕变特征可建立能反映瞬时弹性变形、衰减蠕变、等速蠕变、塑性性质和加速段的含水状态下岩石蠕变损伤本构模型。由试验结果可知, 含水岩石的蠕变性质与含水率、应力状态、加载时间有关。本文以西原模型为基础, 提出了一个考虑时效损伤 D_t 和含水损伤 D_w 的蠕变本构模型。

如图 6 所示, 针对含水状态下岩石的蠕变模型对西原模型进行了改进, 由一个修正的弹性体、修正的 Kelvin 损伤体、修正的黏塑性损伤体串联组成。图中, η_1 、 η_2 为与加载时间 t 有关的参数; E_1 、 E_2 为与含水率 ω 、加载时间 t 有关的参数。一维损伤蠕变模型蠕变表达式为

(1) 当 $\sigma < \sigma_s$ 时,

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1(1-D_t)(1-D_w)} + \frac{\sigma}{E_2(1-D_t)(1-D_w)} \left(1 - \exp\left(\frac{-E_2(1-D_w)}{\eta_2} t\right) \right) \quad (5)$$

(2) 当 $\sigma \geq \sigma_s$ 时,

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1(1-D_t)(1-D_w)} + \frac{\sigma}{E_2(1-D_t)(1-D_w)} \left(1 - \exp\left(\frac{-E_2(1-D_w)}{\eta_2} t\right) \right) + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_3(1-D_t)} t \quad (6)$$

修正弹性体:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1(1-D_t)(1-D_w)} \quad (7)$$

K 体:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_2(1-D_t)(1-D_w)} \left(1 - \exp\left(\frac{-E_2(1-D_w)}{\eta_2} t\right) \right) \quad (8)$$

黏塑性体:

$$\varepsilon = \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_3(1-D_t)} t \quad (9)$$

式中: σ 为初始应力, ε 为总应变, E_1 为瞬时弹性模量; E_2 为黏弹性变形模量; η_2 、 η_3 为黏滞系数, 利用最小二乘法拟合试验结果可以得到各级应力不同含水状态下的蠕变参数, 本文仅考虑时效劣化和含水弱化对岩石蠕变参数的劣化效应, 不考虑蠕变参数随应力的损伤劣化效应。

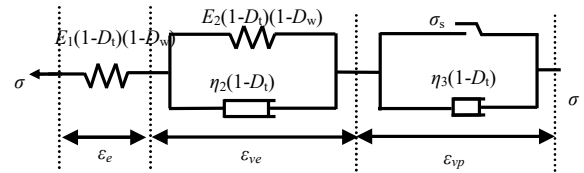


图6 改进的西原模型

Fig.6 Improved Nishihara model

本文基于弹性模量定义损伤变量, 岩石时效损伤变量为

$$D_t = 1 - E_t / E_0 \quad (10)$$

式中: E_0 为开始时弹性模量; E_t 为任意时刻弹性模量。

含水蠕变损伤变量:

$$D_w = 1 - E_w / E_0 \quad (11)$$

式中: E_w 为含水蠕变弹性模量; E_0 为含水率为 0 时弹性模量, 认为含水率为 0 时岩石处于无损状态, 含水率达到饱和时弹性模量趋向于一稳定值。

本文采用常体积模量法, 将一维蠕变表达式推广到三维状态下, 在三维应力状态下改进的西原模型总应变为

$$\varepsilon = \varepsilon_e^* + \varepsilon_{ve}^* + \varepsilon_{vp}^* \quad (12)$$

式中： ε_e^* 、 ε_{ve}^* 、 ε_{vp}^* 分别为西原模型改进后的弹性应变、黏弹性应变和黏塑性应变。

弹性体的三维本构关系为

$$e_{ij} = \frac{S_{ij}}{2G_1^*}; \quad \varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{3K} \quad (13)$$

式中： S_{ij} 、 e_{ij} 分别为偏应力张量和偏应变张量； σ_m 、 ε_m 分别为球应力张量和球应变张量； G_1 、 K 分别为剪切模量和体积模量；

$$G_1^* = G_1(1-D_t)(1-D_w) \quad (14)$$

弹性体的应变为

$$\varepsilon_e^* = \frac{S_{ij}}{2G_1^*} + \frac{\sigma_m \delta_{ij}}{3K} \quad (15)$$

黏弹性体的三维本构关系为

$$\varepsilon_{ve}^* = \frac{S_{ij}}{2G_2^*} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2^*}{\eta_2^*} t\right) \right] \quad (16)$$

式中：

$$G_2^* = G_2(1-D_t)(1-D_w); \quad \eta_2^* = \eta_2(1-D_t) \quad (17)$$

式中： G_2 、 η_2 分别为黏弹性体的剪切模量和剪切黏滞系数。

黏塑性体的三维本构关系为

$$\varepsilon_{vp}^* = \frac{1}{\eta_3^*} \left\langle \phi\left(\frac{F}{F_0}\right) \right\rangle \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}} t \quad (18)$$

式中： $\left\langle \phi\left(\frac{F}{F_0}\right) \right\rangle$ 为开关函数，

$$\left\langle \phi\left(\frac{F}{F_0}\right) \right\rangle = \begin{cases} 0, & (F < 0) \\ \phi\left(\frac{F}{F_0}\right), & (F \geq 0) \end{cases} \quad (19)$$

塑性流动采用相关联流动法则，当 $F \geq 0$ 时，

$$\varepsilon_{vp}^* = \frac{1}{\eta_3^*} \left(\frac{F}{F_0}\right) \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} t \quad (20)$$

式中： F 为岩石屈服函数； $\eta_3^* = \eta_3(1-D_t)$ 。

将式 (15)、(16)、(20) 代入式 (5) 可得到三维状态下改进的西原模型的本构方程：

$$\varepsilon = \begin{cases} \left[\frac{S_{ij}}{2G_1^*} + \frac{\sigma_m \delta_{ij}}{3K} + \frac{S_{ij}}{2G_2^*} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2^*}{\eta_2^*} t\right) \right] \right], & (F < 0) \\ \left[\frac{S_{ij}}{2G_1^*} + \frac{\sigma_m \delta_{ij}}{3K} + \frac{S_{ij}}{2G_2^*} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2^*}{\eta_2^*} t\right) \right] + \frac{1}{\eta_3^*} \left(\frac{F}{F_0}\right) \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} t \right], & (F \geq 0) \end{cases} \quad (21)$$

4.2 不同含水率蠕变参数的演化规律

由蠕变试验获得 σ 、 $\varepsilon(t)$ 和 t 的数据，基于图 4 的试验结果，根据式 (5) 的本构关系对不同 σ 应力状态下的参数进行拟合，分别取平均值，获得该状态下的参数取值，见表 2。

表 2 含水软岩的三轴蠕变参数平均值
Table 2 Fitting parameters average values of soft rock under water containing condition triaxial creep test

试样编号	含水率 $\omega/\%$	E_1 /GPa	E_2 /GPa	η_2 /(GPa·h)	η_3 /(GPa·h)
T1	0	5.634	1.456	130.822	95.634
T2	4	5.450	1.376	92.892	78.030
T3	8	4.954	1.179	77.046	64.068
T4	12	4.830	1.122	60.612	56.534

由表 2 可得到瞬时弹性模量 E_1 、黏弹性变形模量 E_2 、黏滞系数 η_2 、 η_3 随含水率变化的拟合曲线，如图 7 所示。拟合方程为

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= 5.6603e^{-0.014w}; E_2 = 1.4683e^{-0.023w} \\ \eta_2 &= 126.19e^{-0.062w}; \eta_3 = 94.088e^{-0.04w} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

分析可知， E_1 、 E_2 、 η_2 、 η_3 随含水率的增加而降低， η_2 、 η_3 降低明显。

由以上可得

$$\left. \begin{aligned} D_{E1}(w) &= 1 - 1.005e^{-0.014w} \\ D_{E2}(w) &= 1 - 1.008e^{-0.023w} \\ D_{\eta2}(w) &= 1 - 0.965e^{-0.062w} \\ D_{\eta3}(w) &= 1 - 0.984e^{-0.04w} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

5 岩石蠕变模型验证

依据考虑时效劣化和含水弱化效应的岩石蠕变本构模型，通过 VC++6.0 开发环境编译成的 userTHB.dll 文件，将其添加到 FLAC^{3D} 动态链接库^[14]。为了验证蠕变模型的合理性与正确性，利用 FLAC^{3D} 建立数值试验模型。模型尺寸与试验所用试样相同，模型试件高 $h = 100$ mm，直径 $\phi = 50$ mm，共划分 2 000 个单元，2 121 个节点。模型底部施加约束，顶部逐级加载。

关于强度的某些参数根据常规三轴试验获得，将不同条件下的数值模拟蠕变曲线计算值与试验值进行对比，如图 8 所示。图中，个别条件下的蠕变曲线吻合程度较差，如图 8(a)、8(d)中计算曲线的加速段并未完全与蠕变试验极限承载力水平和极限应变大小吻合，说明实际试验材料过程中存在部分试样的岩石颗粒排布不均、内部含有裂隙以及试样

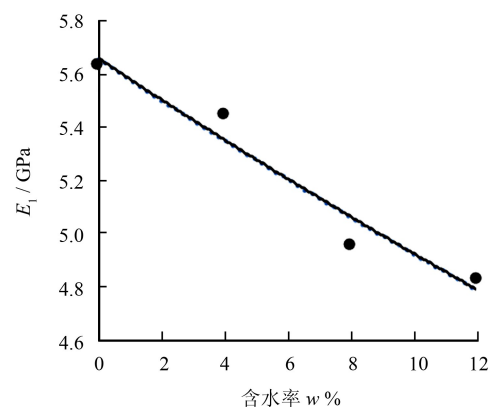
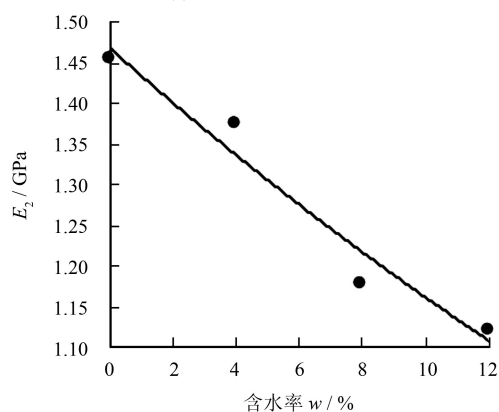
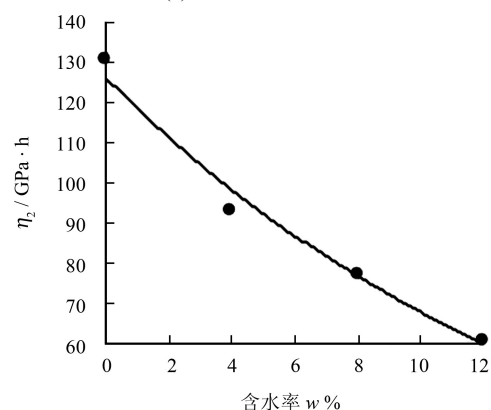
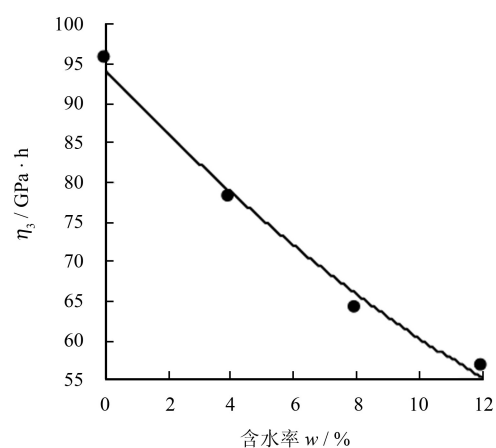
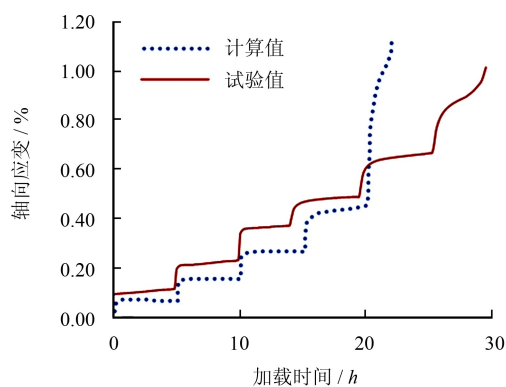
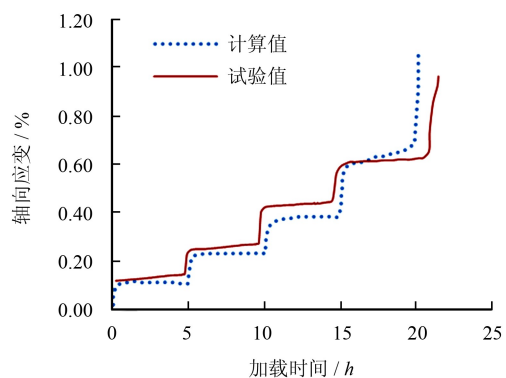
(a) E_1 随含水率 w 的变化曲线(b) E_2 随含水率 w 的变化曲线(c) η_2 随含水率 w 的变化曲线(d) η_3 随含水率 w 的变化曲线

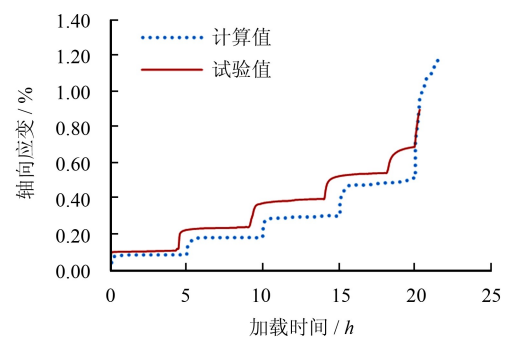
图 7 E_1, E_2, η_2, η_3 随含水率 w 的变化曲线
Fig.7 Variation curves of E_1, E_2, η_2, η_3 with water content w



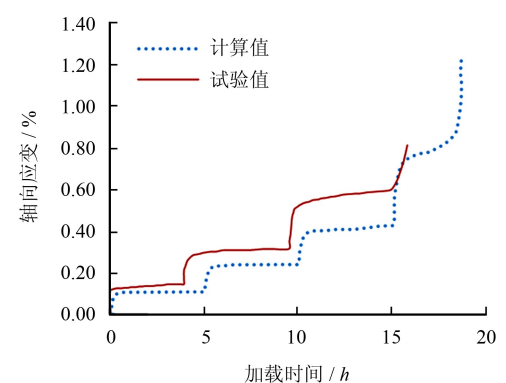
(a) 含水率 0%



(b) 含水率 4%



(c) 含水率 8%



(d) 含水率 12%

图 8 不同条件下的蠕变模型计算值与试验值对比
Fig.8 Comparison of creep constitutive model with trial value under different conditions

离散性大的岩性特点, 而试验中的偶然误差也将导致试验与模拟值的偏差。

数值模拟曲线与试验曲线的瞬时变形段、减速段、稳定段和加速段基本能达到吻合, 虽然存在一定偏差, 但总体规律和趋势相似, 且计算值与试验值相差不大, 计算结果与试验结果曲线吻合程度较高, 说明该蠕变损伤模型的合理性。

6 结 论

(1) 岩石蠕变试验中在相同应力水平下干燥试样的瞬时应变、蠕变应均小于含水状态下试样的相应值, 表明水对岩石的蠕变特性影响相对较大。

(2) 水是影响岩石蠕变的重要因素之一, 同一应力水平下岩石含水率越大其初始蠕变值和稳态蠕变值越大, 当含水率为 0 时其损伤为 0, 含水率逐渐增大时参数损伤趋势逐渐增大并趋于稳定。

本文建立的岩石时效蠕变损伤模型, 考虑了时效劣化效应和含水弱化效应对含水岩石蠕变的影响规律, 数值计算结果与试验结果曲线吻合程度较高, 说明本文模型的合理性和正确性, 可供岩石流变特性的研究提供一定的理论基础。

参 考 文 献

- [1] TÖRÖK Á, VÁSÁRHELYI B. The influence of fabric and water content on selected rock mechanical parameters of travertine, examples from Hungary[J]. **Engineering Geology**, 2010, 115(3-4): 237—245.
- [2] VÁSÁRHELYI B, VÁN P. Influence of water content on the strength of rock[J]. **Engineering Geology**, 2006, 84(1-2): 70—74.
- [3] 黄明, 刘新荣, 邓涛. 考虑含水劣化的泥质粉砂岩单轴蠕变特性研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2012, 40(3): 399—405.
HUANG Ming, LIU Xin-rong, DENG Tao. Study on the creep properties of T2b2 siltite in terms of the damage law induced by water[J]. **Journal of Fuzhou University(Natural Science)**, 2012, 40(3): 399—405.
- [4] 黄明, 刘新荣, 邓涛. 基于含水劣化特性的隧道围岩时效变形数值计算[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1876—1882.
HUANG Ming, LIU Xin-rong, DENG Tao. Numerical calculation of time effect deformations of tunnel surrounding rock in terms of water degradation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(6): 1876—1882.
- [5] 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-hang, 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.
- [6] 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—628.
KANG Wen-xian, YU Huai-ling, WANG Ling-ling, 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—628.
- [7] 李海洲. 基于含水软岩蠕变特性的岩体时变强度及边坡动态稳定性研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
LI Hai-zhou. Study on rock time-varying strength and slope dynamic stability based on creep properties of water-bearing soft rock[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.
- [8] 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.
- [9] 张永兴, 王更峰, 周小平, 等. 含水炭质板岩非线性蠕变损伤模型及应用[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(3): 1—9.
ZHANG Yong-xing, WANG Geng-feng, ZHOU Xiao-ping, et al. Nonlinear creep damage model of water bearing carbonaceous slate and its application[J]. **Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering**, 2012, 34(3): 1—9.
- [10] 王俊光, 梁冰, 田蜜. 含水状态下油页岩非线性损伤蠕变特性研究[J]. 实验力学, 2014, 29(1): 112—

- 118.
- WANG Jun-guang, LIANG Bing, TIAN Mi. Study on creep characteristics of oil shale nonlinearity under water condition[J]. **Journal of Experimental Mechanics**, 2014, 29(1): 112—118.
- [11] 张强勇, 杨文东, 张建国, 等. 变参数蠕变损伤本构模型及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 732—739.
- ZHANG Qiang-yong, YANG Wen-dong, ZHANG Jian-guo, et al. Variable parameters-based creep damage constitutive mode l and its engineering application[J] **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 28(4): 300—304.
- [12] 杨文东, 张强勇, 张建国, 等. 基于 FLAC^{3D} 的改进 Burgers 蠕变损伤模型的二次开发研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1956—1964.
- YANG Wen-dong, ZHANG Qiang-yong, ZHANG Jian-guo, et al. Second development of improved Burgers creep damage constitutive model of rock based on FLAC^{3D}[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(6): 1956—1964.
- [13] 于超云, 唐春安, 唐世斌. 含水弱化的软岩变参数蠕变损伤模型研究[J]. 中国科技论文, 2015, 10(3): 300—304.
- YU Chao-yun, TANG Chu-nan, TANG Shi-bin. Creep damage model with variable parameters and weakness effect by water or soft rock[J]. **China Sciencepaper**, 2015, 10(3): 300—304.
- [14] 江宗斌. 多场环境作用岩石蠕变特性试验及力学模型研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- JIANG Zong-bin. Experiments and mechanical model study on rock creep properties under multi-fields environment[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016.
- [15] 齐亚静, 姜清辉, 王志俭, 等. 改进西原模型的三维蠕变本构方程及其参数辨识[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 347—355.
- QI Ya-jing, JIANG Qing-hui, WANG Zhi-hui, et al. 3D creep constitutive equation of modified Nishihara model and its parameters identification[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(2): 347—355.
- [16] 韩涛, 杨维好, 杨志江, 等. 多孔介质固液耦合相似材料的研制[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1411—1417.
- HAN Tao, YANG Wei-hao, YANG Zhi-jiang, et al. Development of similar material for porous medium solid-liquid coupling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(5): 1411—1417.
- [17] 崔强, 冯夏庭, 薛强, 等. 化学腐蚀下砂岩孔隙结构变化的机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1209—1216.
- CUI Qiang, FENG Xia-ting, XUE Qiang, et al. Mechanism study of porosity structure change of sandstone under chemical corrosion[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(6): 1209—1216.