

文章编号: 1673-3363-(2014)02-0284-08

高围压高水压条件下岩石非线性蠕变本构模型

蒋海飞¹, 刘东燕¹, 赵宝云², 李东升¹

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆科技学院建筑工程学院, 重庆 401331)

摘要 基于高围压高水压条件下砂岩三轴压缩蠕变试验结果, 分析岩石蠕变规律, 选取 Burgers 模型对低应力水平下的蠕变特性进行描述, 效果较为理想。当应力水平高于屈服应力时, 岩石在经历一段时间后发生加速蠕变。采用幂函数、对数函数混合方程对加速蠕变段进行拟合, 再通过类比的方法提出一个新的非线性黏性元件, 并将其与塑性体并联, 得到一个可以反映岩石加速蠕变特性的非线性黏塑性模型, 将该模型与 Burgers 模型串联, 构建一个新的六元件非线性黏弹塑性蠕变模型, 并推导了该模型在常规三轴应力状态下的蠕变本构公式。结合试验结果, 运用通用全局优化算法, 对提出的非线性黏弹塑性蠕变模型参数进行了辨识, 辨识结果验证了新构建模型的正确性与合理性。

关键词 高围压; 高孔隙水压; 蠕变; 本构模型

中图分类号 TD 315

文献标志码 A

Nonlinear creep constitutive model of rock under high confining pressure and high water pressure

JIANG Haifei¹, LIU Dongyan¹, ZHAO Baoyun², LI Dongsheng¹

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract According to the triaxial creep curves of sandstone under high confining pressure and high pore water pressure, the creep rule of rock is discussed. The Burgers model is selected to describe the characteristics of creep in the low stress level, which can get nice result. When stress exceeds the yield level, the accelerated creep damage of rock will occur after a period of time. The accelerated creep curves are fitted by the mixed equation of power function and logarithmic function. Then, the method of analogy is used to propose a new nonlinear viscous component, which is in parallel connection with the plastic component to constitute a new nonlinear viscoplastic model. By connecting this model with Burgers model in series, a new six-component nonlinear viscoelastoplastic creep model is acquired. Consequently, the creep constitutive equation in three-dimensional state is deduced. With the test result, the algorithm of Universal Global Optimization is adopted to identify the model parameters, which shows that the proposed six-component nonlinear viscoelastoplastic creep model is available and reasonable.

Key words high confining pressure; high water pressure; creep; constitutive models

收稿日期: 2013-03-10

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目(2009318000001); 中央高校基本科研业务费项目(CDJXS12200004)

作者简介: 蒋海飞(1982-), 男, 安徽省肥东县人, 博士研究生, 从事岩石力学理论与工程方面的研究。

E-mail: jhfworld@163.com

Tel: 13618207078

社会对能源需求量的增加和开采强度的不断加大,使得浅部资源日益减少,国内外矿山都相继进入深部资源开采状态^[1]。随着开采向深部发展,开采过程中的工程灾害不断增多,使得巷道的开挖、支护以及维护等问题越发显得突出,特别是受高应力和高压水体的威胁越来越严重,高应力高水压使得围岩的结构和力学性能恶化,实际载荷高于表观载荷,岩体的蠕变变形大大增加。正因如此,目前我国煤炭行业频繁发生矿井突水事故,不仅给企业带来巨大的经济损失,而且严重地威胁到人员的生命安全。岩土工程发生突水的实质是岩体在水压和外力共同作用下发生蠕变破坏^[2]。因此,加强对高应力高水压作用下岩石蠕变特性的研究,提出一种适用的蠕变模型,不仅可以加强对岩体蠕变规律的进一步认识,还能为岩土工程设计、施工和维护提供更全面的基础资料。

目前国内外对岩石蠕变特性研究已取得很多成果^[3-6],并提出诸多适用性较强的蠕变模型^[7-10],然而有关高围压高水压条件下岩石蠕变模型的研究成果却相对较少。此外,大多数学者提出的岩石蠕变模型都是基于元件理论,然而元件理论所用的基本元件都是线性的,无论构成模型的元件怎么多、组合方式多么复杂,最终得到的本构关系还是线性的,不能研究非线性蠕变^[11],也就无法描述岩石加速蠕变阶段。因此需要对其改进以建立非线性蠕变模型。纵观现阶段诸多研究成果,建立岩石非线性蠕变模型的方法有2种:1)通过对常规线性蠕变模型中的蠕变参数建立与时间的非线性关系,以获得对加速蠕变阶段的描述^[12-13];2)提出新型蠕变模型,建立对应的本构关系,并将其与传统模型串联组成新的非线性黏弹塑性蠕变模型^[14-15]。

本文选取重庆地区某深基坑砂岩为研究对象,对其进行高围压高水压条件下三轴压缩蠕变试验,在对试验结果分析的基础上,采用前述第1种方法来建立新的非线性黏弹塑性蠕变模型。首先,利用经验公式对加速蠕变曲线进行拟合,并运用类比的方法对加速蠕变阶段黏性元件模型中的黏性系数 η 进行非线性化改进,提出一个非线性黏性元件,再通过应力触发方式,将其与塑性元件并联,组成一个新的非线性黏塑性模型,最后将该模型与Burgers模型串联起来,构建一个新的非线性黏弹塑性蠕变模型。利用试验结果对新提出的非线性黏弹塑性蠕变模型进行验证,结果显示本文提出的非线性黏弹塑性模型能够较好地描述高围压高孔隙水压条件

下岩石的含有加速蠕变的全过程蠕变特性。研究结果可为高应力高水压地区岩体的施工和设计提供一定的理论指导。

1 岩石三轴压缩蠕变试验与成果

本次试验采用RLW-2000岩石三轴流变试验系统,该系统由轴向加载系统、围压加载系统、孔隙水压加载系统、伺服系统、控制系统、数据采集和自动绘图系统等部分组成。轴向加载系统和围压加载系统的控制部分采用全数字伺服控制器(EDC)。

试验所需岩样取自重庆地区某深基坑细砂岩,主要成分为石英、长石、燧石和白云母等。依据国际岩石力学学会(ISRM)试验规程对岩样进行加工,制成直径50 mm、高度100 mm的圆柱体。试样干密度为2.33~2.74 g/cm³,孔隙率为0.63%~0.71%,粒径为0.01~0.5 mm,单轴抗压强度为63.40 MPa,弹性模量为25.03 GPa,泊松比为0.13。将加工好的试样在真空抽气饱水机中饱和24 h,再放入水中浸泡7 d。试验中围压和孔隙水压分别设置为40 MPa和10 MPa。采用轴向应变控制,试验加载速率为0.01 mm/s。

试验前,利用MTS 815岩石力学测试系统测得本次试验岩样在围压40 MPa、孔隙水压10 MPa条件下的3个试样进行三轴压缩强度测试,测得强度($\sigma_1 - \sigma_3$)的平均值为230.06 MPa,对应屈服应力($\sigma_1 - \sigma_3$)_s为208.89 MPa。

本次试验共对3个试样进行了分级加载蠕变试验,第1个试件在试验过程中,横向传感器出现故障,未监测到横向数据,第2个试件在未出现加速蠕变就已经破坏了。所以选择试验数据比较完整的第3个试样的试验结果作为本文研究对象。第3个岩石试样分级加载三轴压缩蠕变试验曲线如图1。图中轴向应变为正值,横向应变为负值,各级加载应力水平($\sigma_1 - \sigma_3$)标识在曲线上方。

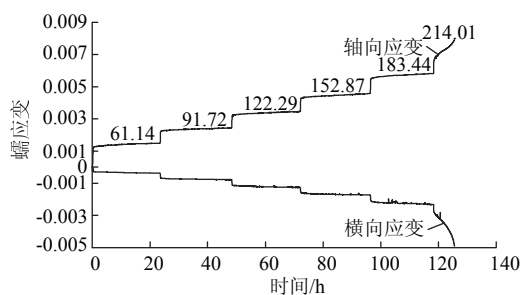


图1 不同应力水平下蠕变试验曲线 (MPa)

Fig.1 Creep testing curves under different stress levels

利用 Boltzmann 叠加原理将图 1 分级加载蠕变曲线转化为分别加载蠕变曲线, 如图 2 所示。这样便可更清晰地观察每级应力水平下的蠕变曲线。

计算图 2 中最后一级应力水平下, 轴向横向蠕变曲线各时刻试验数据点的斜率, 可以得到最后一

级应力水平下轴向和横向蠕变速率与时间的关系曲线, 如图 3 所示。图 3 中标记 t_s 为加速蠕变起始时间点, 即稳态蠕变向加速蠕变过渡的拐点。为了清晰起见, 对图 3 局部进行了放大。

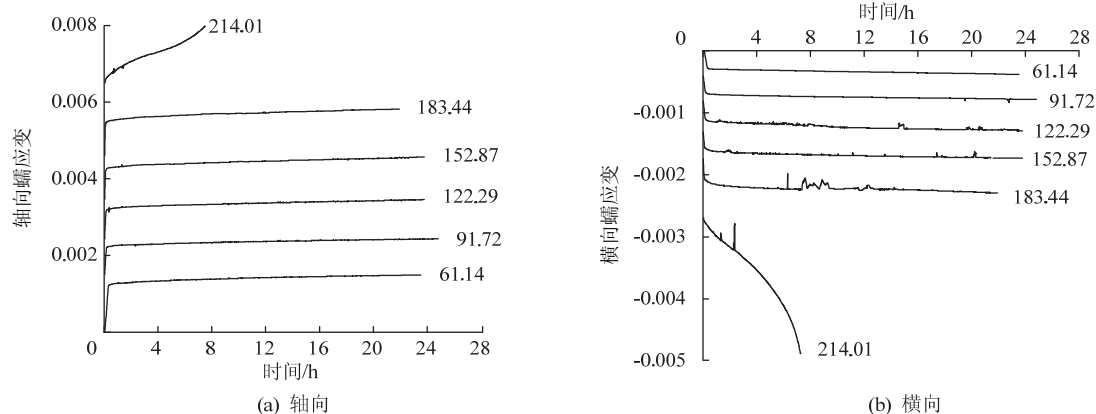


图 2 岩石分别加载蠕变曲线 (MPa)

Fig.2 Creep curves of rock by Boltzmann overlapping

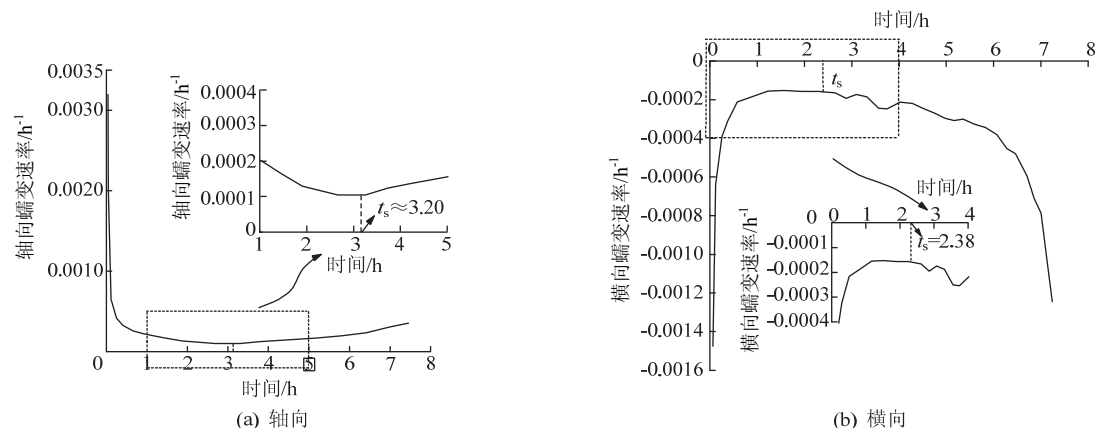


图 3 在高于屈服应力的应力水平下岩石轴向和横向蠕变速率变化曲线

Fig.3 Axial and radial creep strain rate curves of rock under stress higher than the yield level

由试验蠕变曲线可知, 岩石具有显著的瞬时变形, 在不同应力水平下蠕变特征较为明显。当应力水平低于屈服应力时, 岩石轴向蠕变和横向蠕变均只发生衰减蠕变和稳定蠕变。在加载后一较短时间内蠕变速率迅速减小, 并趋近于常数。最后一级应力水平已经高于屈服应力, 该阶段轴向蠕变和横向蠕变都出现了加速蠕变。由图 3 观察得到, 横向蠕变在经历约 2.38 h 的衰减蠕变和稳态蠕变后达到加速蠕变阶段, 而轴向蠕变经历了约 3.20 h 的衰减蠕变和稳态蠕变后达到加速蠕变阶段, 岩石横向蠕变比轴向蠕变先进入加速蠕变阶段。此外, 最后一级应力水平下, 各阶段横向蠕变速率明显高于轴向蠕变速率, 这也是导致岩石发生破坏的重要原因。可

见, 高围压高水压作用下岩石的横向蠕变较轴向蠕变敏感。因此, 在高围压高水压地区进行岩体开挖过程中, 加强对岩石横向蠕变的监测具有重要的工程意义。

2 线性黏弹性蠕变模型

由上述分析可知, 高围压高水压条件下, 当应力水平低于屈服应力时, 岩石的蠕变具有明显的黏弹性特征。元件模型中的 Burgers 模型是一种黏弹性体, 可以较好地描述具有衰减蠕变和稳定蠕变特征的蠕变曲线, 并且模型简单实用。

因此, 采用 Burgers 模型来描述岩石在应力水平低于屈服应力时的蠕变特性。假定岩石体积变化

是弹性的，流变性质主要由偏差应力引起的^[14]，则等围压三轴压缩应力状态下的 Burgers 模型的蠕变方程为^[15]：

$$\varepsilon_{(t)} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3\eta_1}t + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_2} \left(1 - \exp \left(-\frac{G_2}{\eta_2}t \right) \right) \quad (1)$$

依据式(1)，采用 Origin 数据分析软件对试验曲线进行辨识，辨识得到的模型参数如表 1 所示。从表 1 中可看出，除了横向应变在第 3 级应力水平下的模型参数拟合相关系数平方为 0.92，其他均在

0.95 以上，可见拟合效果比较理想。

将模型参数代入式(1)，得到轴向和横向模型拟合曲线。如图 4 所示，对比模型拟合曲线和试验曲线，可以看出二者吻合较好，模型拟合曲线能够很好地描述第 1 阶段的衰减蠕变和第 2 阶段的等速稳定蠕变。由此可见，用 Burgers 模型对高围压高水压条件下表现为黏弹性蠕变特性的曲线进行描述是合适的。

表 1 以轴向应变和横向应变辨识得到的 Burgers 模型参数

Table 1 Parameter values of Burgers model identified by axial strain and radial strain

$\sigma_1 - \sigma_3$ /MPa	轴向应变					横向应变				
	G_1 /GPa	G_2 /GPa	η_1 /(GPa·h)	η_2 /(GPa·h)	R^2	G_1 /GPa	G_2 /GPa	η_1 /(GPa·h)	η_2 /(GPa·h)	R^2
61.14	16.84	157.32	3 027.29	430.32	0.99	71.33	1 683.48	5 733.25	1 576.90	0.99
91.72	13.91	352.01	4 431.64	82.84	0.97	44.45	1 096.87	11 250.76	1 175.19	0.98
122.29	12.82	417.81	5 365.07	500.88	0.99	37.06	457.25	9 986.19	1 658.06	0.92
152.87	11.99	548.66	5 403.47	614.51	0.99	32.46	648.71	14 125.90	894.69	0.95
183.44	11.19	415.91	6 191.79	623.75	0.99	29.82	400.69	13 461.92	420.02	0.97

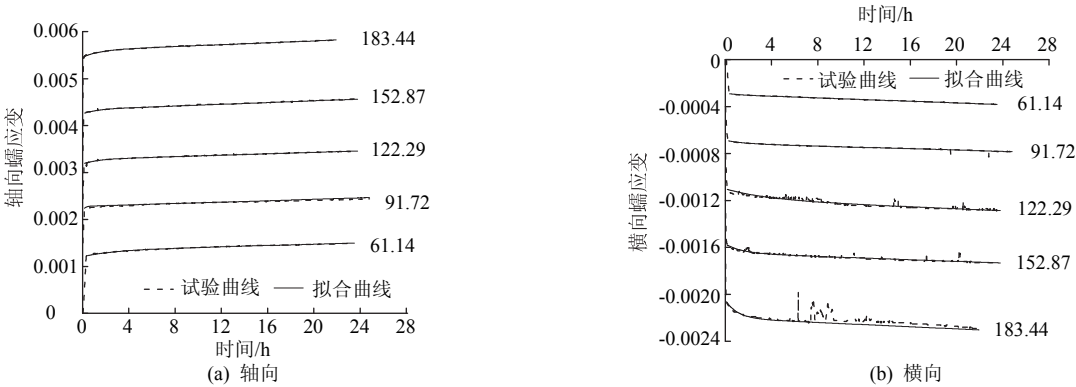


图 4 砂岩三轴压缩蠕变试验曲线与理论曲线对比 (MPa)

Fig.4 Comparison between theoretical curves and triaxial compression creep curves of sandstone

3 非线性黏弹塑性蠕变模型

目前，建立非线性流变模型的方法主要分为：
1) 对传统线性元件进行非线性改进；2) 采用如损伤、断裂等理论建立应变与时间的非线性关系，使之能描述岩石的加速蠕变特征。本文采用第 1 种方法来建立新的非线性黏弹塑性蠕变模型。采用经验公式对加速蠕变曲线进行拟合，再将拟合结果与传统线性黏性元件的蠕变方程进行比较，提出一个非线性黏性元件，最后，通过应力触发方式，将其与塑性元件并联，组成一个新的非线性黏塑性元件。
首先，采用幂函数和对数函数混合方程，对高围压高孔隙水压作用下岩石三轴压缩蠕变的加速蠕变曲进行拟合，其表达式为：

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + A(t^n + B \ln nt) \quad (2)$$

式中： ε 为模型的应变； ε_0 为加速蠕变之前的应变值； A ， B 为拟合参数，设其值均大于 0，代表应力历时参数； t 为蠕变时间； n 为加速蠕变参数。

图 5 为应用式(2)得到的高围压高孔隙水压作用下砂岩三轴压缩蠕变试验轴向和横向加速蠕变段曲线与理论曲线的对比，对应的拟合参数及相关性系数平方 R^2 见表 2。

表 2 加速蠕变段拟合参数

Table 2 Parameters identification of accelerate creep

拟合参数	A	B	n	R^2
轴向	7.4006 E-7	5.1054 E-18	3.444 9	0.996 6
横向	6.0319 E-6	4.2774 E-15	2.800 9	0.995 2

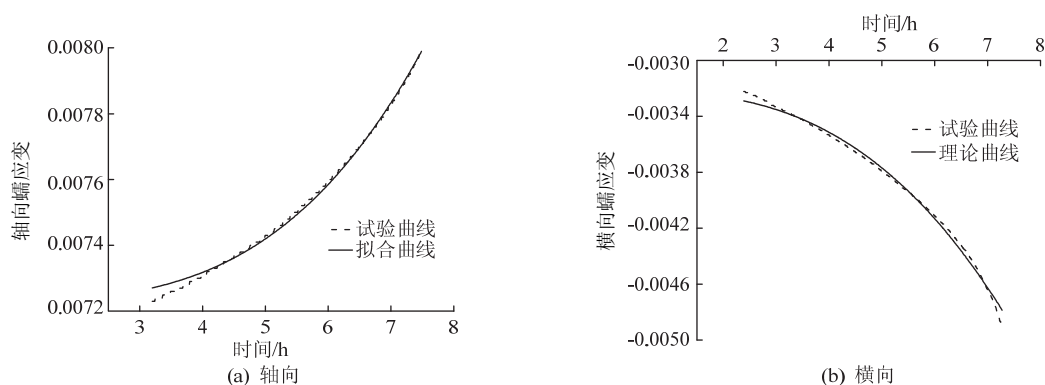


图 5 砂岩加速蠕变曲线与理论曲线

Fig.5 Comparison between accelerate creep curve of sandstone and theoretical curve

由表 2 可知, 拟合相关系数平方 R^2 均达到 0.99 以上, 因此用幂函数和对数函数混合方程对高围压高孔隙水压作用下岩石三轴压缩蠕变的加速蠕变段曲线进行拟合是合适的。

其次, 在线性黏塑性元件模型中, 当 $\sigma > \sigma_s$ 时, 其本构关系为:

$$\sigma - \sigma_s = \eta \dot{\varepsilon} \quad (3)$$

式中 η 为黏滞系数。

对式(3)积分, 得蠕变方程:

$$\varepsilon = \frac{(\sigma - \sigma_s)t}{\eta} + C \quad (4)$$

式中: σ_s 为屈服应力; C 为积分常数。通过比较式(2)与式(4), 并令两式相等, 且取 $A = \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_0}$, $C = \varepsilon_0$,

则可以得到黏性元件 η 的非线性表达式:

$$\eta = \frac{\eta_0 \frac{t}{t_0}}{\frac{t^n}{t_0^n} + B \ln \left(\frac{nt}{t_0} \right)} = \frac{\eta_0 t}{t^n + B \ln nt} \quad (5)$$

式中: t_0 为单位参考时间; η_0 为加速蠕变初始黏滞系数; n 为加速蠕变指数。

经上述非线性处理后得到的非线性黏塑性模型如图 6 所示。

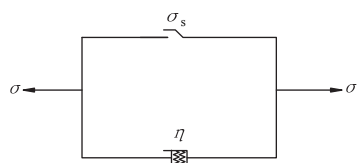


图 6 非线性黏塑性模型

Fig.6 Nonlinear visco-plastic model

该模型可以反映岩石在不同加载条件下的加速蠕变特征, 其相应的蠕变本构方程可表示为:

$$\varepsilon_{(t)} = \frac{H(\sigma - \sigma_s)}{\eta(n, B, t)} t = \frac{H(\sigma - \sigma_s)}{\eta_0} (t^n + B \ln nt) \quad (6)$$

式中 σ_s 为岩石的屈服强度。

函数 $H(\sigma - \sigma_s)$ 的表达式如下:

$$H(\sigma - \sigma_s) = \begin{cases} 0 & (\sigma \leq \sigma_s) \\ \sigma - \sigma_s & (\sigma > \sigma_s) \end{cases} \quad (7)$$

将得到的非线性黏塑性模型与 Burgers 蠕变模型串联起来, 构建一个新的六元件非线性黏弹塑性蠕变模型如图 7 所示。

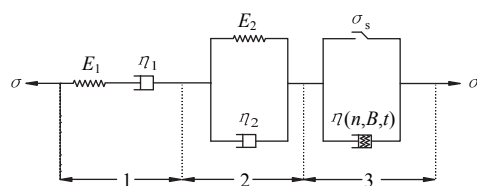


图 7 六元件非线性黏弹塑性蠕变本构模型

Fig.7 Six-component nonlinear viscoelasto-plastic creep constitutive model

在图 7 的元件模型中, 当 $\sigma \leq \sigma_s$ 时, 非线性黏滞系数牛顿体不起作用, 仅有 1, 2 部分参与蠕变, 此时蠕变模型即为 Burgers 模型。

当 $\sigma > \sigma_s$ 时, 1, 2 和 3 均参与蠕变, 此时蠕变模型为非线性黏弹塑性模型, 其相应状态方程如下:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 &= \varepsilon, & \sigma &= \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3, \\ \dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2 + \dot{\varepsilon}_3 &= \dot{\varepsilon}, & \sigma_2 &= E_2 \varepsilon_2 + \eta_2 \dot{\varepsilon}_2, \\ \dot{\varepsilon}_1 &= \dot{\sigma} / E_1 + \sigma / \eta_1, & \sigma_3 &= \sigma_s + \frac{\eta_0 \varepsilon_3}{t^n + B \ln nt} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: σ 与 ε 分别为模型的总应力与总应变; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为图 5 中 1, 2 和 3 对应部分的应力; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 分别为 1, 2 和 3 对应部分的应变; E_1, E_2 为岩石材料的弹性参数; η_2, η_0 为岩石黏性参数。

由式(6)和(8)得:

$$\sigma = E_2(\varepsilon - \varepsilon_1 - \varepsilon_3) + \eta_2 \left[\frac{\dot{\sigma}}{E_1} - \frac{\sigma}{\eta_1} - \frac{\dot{\sigma}(t^n + B \ln nt) + (nt^{n-1} + B/t)(\sigma - \sigma_s)}{\eta_0} \right] \quad (9)$$

等式两边各取一次微分, 再结合式(6)和(8)得:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} = & E_2 \dot{\varepsilon} - \frac{E_2}{E_1} \dot{\sigma} - \frac{E_2}{\eta_1} \dot{\sigma} - \frac{E_2(t^n + B \ln nt)}{\eta_0} \dot{\sigma} - \frac{E_2(nt^{n-1} + B/t)}{\eta_0} (\sigma - \sigma_s) + \eta_2 \ddot{\varepsilon} - \frac{\eta_2}{E_1} \ddot{\sigma} - \frac{\eta_2}{\eta_1} \dot{\sigma} - \\ & \frac{\eta_2(t^n + B \ln nt)}{\eta_0} \ddot{\sigma} - \frac{2\eta_2(nt^{n-1} + B/t)}{\eta_0} \dot{\sigma} - \frac{\eta_2 n(n-1)t^{n-2}}{\eta_0} (\sigma - \sigma_s) + \frac{\eta_2 B}{t^2} (\sigma - \sigma_s) \end{aligned} \quad (10)$$

整理上式, 得六元件非线性黏弹塑性蠕变模型的本构方程为:

$$\begin{aligned} & \left[1 + \frac{E_2}{E_1} + \frac{E_2(t^n + B \ln nt)}{\eta_0} + \frac{\eta_2}{\eta_1} + \frac{2\eta_2(nt^{n-1} + B/t)}{\eta_0} \right] \dot{\sigma} + \left[\frac{\eta_2}{E_1} + \frac{\eta_2(t^n + B \ln nt)}{\eta_0} \right] \ddot{\sigma} + \\ & \left[\frac{E_2(nt^{n-1} + B/t)}{\eta_0} + \frac{\eta_2 n(n-1)t^{n-2}}{\eta_0} + \frac{\eta_2 B}{\eta_0 t^2} \right] (\sigma - \sigma_s) + \frac{E_2}{\eta_1} \sigma = E_2 \dot{\varepsilon} + \eta_2 \ddot{\varepsilon} \end{aligned} \quad (11)$$

由式(11)假定 $t=0$ 时施加瞬间应力, 则 $\sigma = \sigma_0$,

代入边界条件: $t=0, \varepsilon=0; t=0; \dot{\varepsilon}=0; t=0, \ddot{\varepsilon}=0$, 解微分方程, 可求得非线性黏弹塑性模型一维状态下的蠕变方程:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{(t)} = & \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_1} t + \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t\right) \right) + \\ & \frac{\sigma_0 - \sigma_s}{\eta_0} (t^n + B \ln nt) \end{aligned} \quad (12)$$

下面推导等围压三轴压缩状态下六元件非线性黏弹塑性蠕变模型公式。

当岩石处于三维应力状态下, 其内部的应力张量可分解为球应力张量 σ_m 和偏应力张量 S_{ij} , 其表达式分别如下:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_m &= \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3}\sigma_{kk} \\ S_{ij} &= \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_m = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\delta_{ij}\sigma_{kk} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中 δ_{ij} 为 Kronecker 函数, 由式(13)可得:

$$\sigma_{ij} = S_{ij} + \delta_{ij}\sigma_m \quad (14)$$

通常认为, 球应力张量 σ_m 只能改变物体体积; 而偏应力张量 S_{ij} 只引起形状变化。因此也可以将应变张量分解成球应变张量 ε_m 和偏应变张量 e_{ij} , 表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_m &= \frac{1}{3}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) = \frac{1}{3}\varepsilon_{kk} \\ e_{ij} &= \varepsilon_{ij} - \delta_{ij}\varepsilon_m = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3}\delta_{ij}\varepsilon_{kk} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

由上式可得:

$$\varepsilon_{ij} = e_{ij} + \delta_{ij}\varepsilon_m \quad (16)$$

对应三维应力状态下的胡克体有:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_m &= 3K\varepsilon_m \\ S_{ij} &= 2Ge_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中: K 为体积模量; G 为剪切模量。

假定岩石各向同性, 弹性应变由应力球张量引起, 蠕应变主要由应力偏张量引起。结合前面各式可得三维应力状态下六元件非线性黏弹塑性蠕变模型公式:

$$\begin{aligned} e_{ij} = & \frac{(S_{ij})_0}{2G_1} + \frac{(S_{ij})_0}{2\eta_1} t + \frac{(S_{ij})_0}{2G_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right) \right) + \\ & \frac{(S_{ij})_0 - \sigma_s}{2\eta_0} (t^n + B \ln nt) \end{aligned} \quad (18)$$

据此可以得到等围压三轴压缩时岩石在恒定应力条件下的蠕变方程:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{(t)} = & \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3\eta_1} t + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right) \right) + \\ & \frac{\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_s}{\eta_0} (t^n + B \ln nt) \end{aligned} \quad (19)$$

对式(19)两边分别对时间进行一次和二次求导, 可得:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3\eta_1} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3\eta_2} \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right) + \quad (20)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_s}{\eta_0} \left(nt^{n-1} + \frac{B}{t} \right) \\ \ddot{\varepsilon} = & -\frac{G_2(\sigma_1 - \sigma_3)}{3\eta_2^2} \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right) + \\ & \frac{\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_s}{\eta_0} \left(n(n-1)t^{n-2} - \frac{B}{t^2} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

从式(20)和(21)可得出: 当 $n=1$ 时, $\dot{\varepsilon} > 0$, $\ddot{\varepsilon} < 0$, 这时蠕变模型只能反映岩石蠕变全过程曲线

中的衰减蠕变和稳态蠕变,而不能反映岩石的加速蠕变阶段;而当 $n>1$ 时, $\dot{\varepsilon}$ 恒大于零, $\ddot{\varepsilon}$ 能取任意值,可以描述岩石蠕变全过程的不同阶段。可见本文提出的六元件非线性黏弹塑性模型可以描述高围压高水压条件下岩石衰减蠕变、稳态蠕变和加速蠕变 3 个阶段的蠕变特性,并且,不同蠕变阶段的特点通过流变指数 n 的变化体现出来。

4 非线性蠕变模型参数的确定及其验证

目前,确定岩石蠕变模型参数的方法主要有:回归分析法、最小二乘法、流变曲线分解法、优化分离法等^[2]。其中采用最小二乘法对蠕变参数进行辨识最为广泛,但最小二乘法对于非线性问题,其解决的效果并不理想,若迭代初始值选取不合理则

会导致最终结果不收敛,或者收敛于局部极小点,且收敛速度比较慢。为此本文采用通用全局优化算法(Universal Global Optimization, UGO),实现对高围压高孔隙水作用下岩石加速蠕变全过程曲线进行辨识,该方法最大优点是无需给出参数初始值,由程序随机给出,通过其独特的全局优化算法,找出最优解,解决了参数识别中初始参数值选取问题,能够快速准确地识别出模型中的参数。

表 3 给出了辨识得到的非线性黏弹塑性模型参数。从表 3 中可以看出,参数拟合相关系数平方 R^2 均在 0.98 以上,拟合效果相当理想。图 8 为高围压高水压作用下加速蠕变全过程试验曲线与模型拟合曲线对比图。

表 3 以轴向应变和横向应变辨识得到的非线性黏弹塑性模型参数

Table 3 Parameter values of six-component nonlinear viscoelastoplastic creep model identified by axial strain and radial strain

模型参数	G_1/GPa	G_2/GPa	$\eta_0/(\text{GPa}\cdot\text{h})$	$\eta_1/(\text{GPa}\cdot\text{h})$	$\eta_2/(\text{GPa}\cdot\text{h})$	n	B	R^2
轴向	10.97	453.70	1.73 E^9	2.53 E^8	1 380.99	5.16	12 328.56	0.98
横向	26.52	711.75	3.84 E^9	399.72	248.02	5.76	196.77	0.99

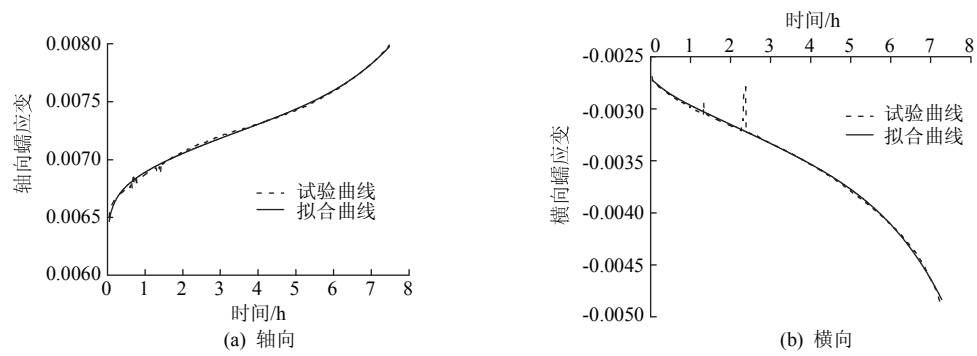


图 8 在高于屈服应力水平下砂岩蠕变试验曲线与模型拟合曲线对比

Fig.8 Comparison between creep test curve of sandstone and theoretical curve under stress level higher than yield stress

从图 8 可看出模型拟合曲线与试验曲线吻合效果较好,这也验证了本文中提出的蠕变模型对于描述高围压高水压条件下的岩石蠕变特性是适用的。

5 结 论

- 1) 在高围压高水压作用下,岩石的横向蠕变率先进入加速蠕变阶段,且在最后一级应力水平作用下,横向蠕变速率高于轴向蠕变速率,因此,高围压高水压作用下,岩石的横向蠕变较轴向蠕变敏感,所以在高围压高水压地区进行岩体开挖过程中,加强对岩石横向蠕变的监测具重要工程意义。
- 2) 当应力水平低于屈服应力时,采用 Burgers 模型来描述高围压高水压作用下岩石的线性黏弹

性蠕变特性,对比模型曲线和试验曲线,二者吻合较好,表明 Burgers 模型可以较为准确地描述高围压高水压条件下岩石的衰减蠕变和稳定蠕变特性。

3) 采用幂函数、对数函数混合方程对高围压高水压作用下砂岩加速蠕变曲线进行拟合,并提出一个二元件非线性黏塑性模型,将该模型与 Burgers 模型串联组成一个新的六元件非线性黏弹塑性蠕变模型,推导了该模型在常规三轴应力作用下的本构公式。新构建模型可以较好地描述具有加速蠕变段的岩石全过程蠕变曲线。

4) 基于通用全局优化算法(Universal Global Optimization, UGO),采用高围压高水压作用下岩石加速蠕变全过程曲线,对提出的非线性黏弹塑性蠕

变模型进行辨识,结果显示辨识参数相关系数平方 R^2 均在0.98以上,二者吻合较好,验证了本文提出的非线性黏弹塑性蠕变模型的正确性和适用性。

5) 由于本文试验数据来自重庆地区某深基坑砂岩的相关试验,且不同岩石蠕变性质千差万别,因此,本文提出的蠕变本构模型是否适用于其他种类岩石,即模型的应用范围还有待进一步研究。此外,通过编程将本文提出的蠕变模型嵌入FLAC^{3D}中,对高应力高水压条件下深埋隧洞开挖后的围岩变形进行数值模拟,并与现场实测数据进行对比,以验证模型的实用性。目前,这方面的工作正在开展,相关研究成果笔者将在后续论文中予以阐述。

参考文献:

- [1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [2] 吴秀仪,刘长武,沈荣喜,等.水压与外力共同作用下的岩石蠕变模型[J].西南交通大学学报,2007,42(6):720-725.
WU Xiuyi, LIU Changwu, SHEN Rongxi, et al. Creep model of rock subjected to water pressure and external force[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2007, 42(6): 720-725.
- [3] 王波,高延法,夏方迁.流变特性引起围岩应力场演变规律分析[J].采矿与安全工程学报,2011,28(3):442-445.
WANG Bo, GAO Yanfa, XIA Fangqian. Analysis of the evolution rule of surrounding rock stress field induced by rheological property[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(3): 442-445.
- [4] 王芝银,艾传志,唐明明.不同应力状态下岩石蠕变全过程[J].煤炭学报,2009,34(2):169-174.
WANG Zhiyin, AI Chuazhi, TANG Mingming. Complete process of rock creep in different stress states[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(2): 169-174.
- [5] 陈绍杰,郭惟嘉,程国强,等.深部条带煤柱蠕变支撑效应研究[J].采矿与安全工程学报,2012,29(1):48-53.
CHEN Shaojie, GUO Weijia, CHENG Guoqiang, et al. Research on creep supporting effect of deep strip pillar[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(1): 48-53.
- [6] 高赛红,曹平,汪胜莲,等.改进的岩石非线性黏弹塑性蠕变模型及其硬化黏滞系数的修正[J].煤炭学报,2012,37(6):936-943.
GAO Saihong, CAO Ping, WANG Shenglian, et al. Improved nonlinear viscoelasto-plastic rheological model of rock and its correction of hardening coefficient of viscosity[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(6): 936-943.
- [7] 余成学,崔璇.岩石非线性蠕变模型[J].武汉大学学报:工学版,2009,42(1):25-28.
SHE Chengxue, CUI Xuan. Research on nonlinear creep model of rock[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(1): 25-28.
- [8] 夏才初,许崇帮,王晓东,等.统一流变力学模型参数的确定方法[J].岩石力学与工程学报,2009,28(2):425-432.
XIA Caichu, XU Chongbang, WANG Xiaodong, et al. Method for parameters determination with unified rheological mechanical model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 425-432.
- [9] 李栋伟,汪仁和,范菊红.软岩屈服面流变本构模型及围岩稳定性分析[J].煤炭学报,2010,35(10):1604-1608.
LI Dongwei, WANG Renhe, FAN Juhong. Yield surface constitutive creep model and stability analysis of soft rock roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(10): 1604-1608.
- [10] 薛凯喜,赵宝云,刘东燕,等.岩石非线性拉、压蠕变模型及其参数识别[J].煤炭学报,2011,36(9):1440-1445.
XUE Kaixi, ZHAO Baoyun, LIU Dongyan, et al. Nonlinear creep model of rock in tensile or compressive stress and its parameter identification[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(9): 1440-1445.
- [11] 孙钧.岩土材料流变及其工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,1999:26-30.
- [12] 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):693-698.
XU Weiya, YANG Shengqi, XIE Shouyi, et al. Investigation on triaxial rheological mechanical properties of green schist specimen(II): model analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(5): 693-698.
- [13] 赵宝云,刘东燕,郑志明,等.基于短时三轴蠕变试验的岩石非线性黏弹塑性蠕变模型研究[J].采矿与安全工程学报,2011,28(3):446-451.
ZHAO Baoyun, LIU Dongyan, ZHENG Zhiming, et al. Non-linear visco-elastic plastic creep model of rocks based on the short time triaxial creep test[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(3): 446-451.
- [14] 李亚丽,于怀昌,刘汉东.三轴压缩下粉砂质泥岩蠕变本构模型研究[J].岩土力学,2012,33(7):2035-2040.
LI Yali, YU Huaichang, LIU Handong. Study of creep constitutive model of silty mudstone under triaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(7): 2035-2040.
- [15] 张治亮,徐卫亚,王伟.向家坝水电站坝基挤压带岩石三轴蠕变试验及非线性黏弹塑性蠕变模型研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(1):132-140.
ZHANG Zhiliang, XU Weiya, WANG Wei. Study of triaxial creep tests and its nonlinear visco-elastoplastic creep model of rock from compressive zone of dam foundation in Xiangjiaba hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 132-140.