第 18 卷 第 2 期 2018 年 1 月
1671—1815(2018)002-0139-07

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

Vol. 18 No. 2 Jan. 2018
© 2018 Sci. Tech. Engrg.

引用格式:周小棚, 李 部, 吴礼舟, 等. 甘肃天水泥岩压缩蠕变特性试验及模型研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 139—145
Zhou Xiaopeng, Li Bu, Wu Lizhou, et al. Gansu tianshui mudstone rock compression creep property test and model research[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 139—145

甘肃天水泥岩压缩蠕变特性试验及模型研究

周小棚 李 部 吴礼舟* 许 强
(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,成都 610059)

摘 要 甘肃天水地区黄土-岩质滑坡和岩质滑坡分布面积较广,数量较多,且滑面多处于泥岩中。为了进一步探究软岩的蠕变特性,了解滑坡变形破坏的本质,采用 YSJ—01—00 岩石三轴压缩蠕变试验仪对天然状态下的甘肃天水泥岩进行了分级加载条件下的三轴压缩蠕变试验,得到了泥岩的蠕变全过程曲线、不同应力水平下的应变-时间曲线和长期强度。通过对其蠕变特性进行分析,提出了一种改进的西原模型和模型的破坏判据,并利用改进的西原模型对泥岩压缩蠕变曲线进行拟合,获得了泥岩的蠕变参数,推导出蠕变破坏的时间。分析结果表明,改进的西原模型能够较好地描述泥岩的蠕变规律,特别是加速蠕变阶段,这有利于滑坡临滑预报的研究,对甘肃地区黄土-岩质滑坡、岩质滑坡和其他软岩研究等具有重要的科研意义和工程意义。

关键词 泥岩 蠕变试验 加速蠕变 蠕变模型
中图法分类号 TU452; **文献标志码** B

甘肃天水市位于甘肃陇西黄土高原地带,地形复杂,沟壑纵横,地质环境脆弱,水土流失严重,历史地震频发,构造上位于南北活动构造带和西秦岭构造带的交汇处,断裂、褶皱发育,地质构造复杂,市区南北两山滑坡、泥石流密集分布,尤其是滑坡特别发育,是甘肃省地质灾害较为严重的地区之一。

该地区的黄土-岩质滑坡、岩质滑坡的分布面积较广,数量较多,且滑坡的滑面多处于新进系的泥岩中,如鲁湾滑坡、王家半滑坡、苏洼滑坡和贾川乡烂山里滑坡、白驼镇白家湾滑坡等[1]。泥岩具有承载能力较低、变形量较大、遇水易软化、且具有明显蠕变特性等特点。因此,研究泥岩的应力-应变与时间的关系变化特征,建立能够描述泥岩蠕变特性的蠕变模型,对于滑坡的预警预报和防治减灾工程的建设有着重要的实际意义[2—4]。

对岩石流变特性的分析,很多学者进行了大量研究,并取得了很多重要科研成果,为工程建设设计提供了理论依据,解决了岩体力学的许多重大难题。早在 1939 年外国学者 Griggs[5] 便对软岩的流变特性进行了研究,得出当荷载达到其破坏强度的 12.5% ~80% 时,粉砂岩和砂岩等中等强度的岩石便会产生蠕变变形;Faber 等[6] 对沉积岩的单轴压缩蠕变试验进行了研究,认为当岩石受到的应力超过某一特定值时才会出现等速蠕变和加速蠕变,否则只表现出减速蠕变;徐慧宁等[7] 对粉砂质泥岩进行的三轴蠕变试验的研究发现,与瞬时强度相比,该粉砂质泥岩的蠕变的长期强度的降低比例随着围压的升高而增大,单轴条件下降低 25%,围压为 30 MPa时,降低 50% 以上;谌文武等[8] 在分级加载条件下对红层软岩蠕变特性进行了研究,结果表明其破坏应力水平约为单轴抗压强度的 75% ~85%,且具有显著的蠕变特性,蠕变量、蠕变速率都比砂岩、大理岩、盐岩和花岗岩大很多;朱定华等[9] 发现红层软岩存在明显的流变性并符合 Burgers 模型,得出其软岩的流变参数,并认为红层软岩的长期强度为其单轴抗压强度的 63% ~70%;邓荣贵等[10] 在总结前人研究结果的基础上,根据岩石加速蠕变的力学特性提出了一种非线性阻尼器元件,该元件所受的应力与蠕变加速度大小成正比,引进该元件与传统模型元件相组合,可以构成一种新的综合流变力学模型;Zhou 等[11] 将传统西原模型中的 2 个线性黏壶均以非线性黏壶代替,该黏滞阻尼所受应力与其加速度大小成正比,建立了微分形式的蠕变本构方程,并对该蠕变方程进行分析,验证其能很好地描述盐岩流变试验曲线。齐亚静等[12] 通过在西原模型上串联一个带应变触发的非线性黏壶,提出了改

2017 年 4 月 10 日收到 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB733202)、四川省青年科技创新研究团队(2015TD0030)和中国地质调查项目(DD20160271)资助
第一作者简介:周小棚(1994—),男,硕士研究生。研究方向:岩石力学与工程及地质灾害。E-mail: 942986252@ qq. com。
* 通信作者简介:吴礼舟,男,教授。研究方向:非饱和土力学、降雨型滑坡和岩石破裂。E-mail: wulizhou07@ cdut. cn。

进的西原模型,并推导了新模型在一维和三维应力状态下的蠕变本构方程。

滑坡的变形和形成过程是滑坡岩土体蠕动变形的过程,它是揭示岩土体变形时间效应的蠕变理论,故一直是滑坡滑动时间预报研究的基础[13]。软岩滑坡的产生往往是岩体长期蠕动滑移的结果。因此,可以根据岩石蠕变理论研究滑坡时间预报问题[14]。在许多滑坡的研究中也可以发现滑坡通常具有变形时间较长,下滑时间却很短的特征,如四川省天台乡滑坡[15]和新滩滑坡[16],这一特征与岩石的蠕变特别是加速蠕变阶段有着密切的关系。王志俭等[17]在对三峡库区万州红层砂岩进行流变特性试验的研究中发现在岩石试样进入加速蠕变的初期,应变率的变化比应变的变化更加显著,依据应变率变化可以更准确地进行滑坡临滑预报。

为了更深入地对甘肃天水地区滑坡进行研究,揭示滑坡发生与岩石蠕变的关系,提出一种能够充分描述泥岩蠕变特性的改进西原模型。该模型与其他改进模型的不同之处在于它不仅能与试验数据相吻合,还提出了模型破坏的判据,推导出模型的破坏时间,为滑坡的预警预报和防治减灾工程提供更好的理论依据。通过对甘肃天水市武山县泥岩试样蠕变试验结果的对比,验证了改进的西原模型的准确性,特别是在加速蠕变阶段,并对模型的参数进行确定,分析讨论了参数的敏感性。

1 改进的西原模型及其蠕变方程

1.1 新蠕变体元件

完整的岩石的蠕变过程一般分为三个阶段:减速蠕变阶段、等速蠕变阶段和加速蠕变阶段。如图1所示,传统的西原模型能够很好地描述岩石蠕变的第一阶段和第二阶段,即减速和等速蠕变阶段,但是由于西原模型是由理想的线性元件:胡克体(H)、黏弹性体(N/H)和黏塑性体(N/St. V)组成,无法准确地描述岩石蠕变的第三阶段即加速蠕变阶段。实际情况下,岩石在发生蠕变破坏前一般都会经历加速蠕变阶段。所以,为了更好地分析岩石的蠕变过程,尤其是加速蠕变阶段,对西原模型进行了改进。图1中,E_0 为胡克体的弹性模量;E_1 为黏弹性体的弹性模量;η_1、η_2 分别为黏弹性体和黏塑性体的黏滞系数。

岩石的变形破坏机制是岩石内部微裂隙发育、贯通、最后裂纹扩展破坏的过程。在岩石蠕变接近破坏的最后阶段时,会进入加速蠕变阶段,蠕变速率会随着时间的增加而快速增长,其主要原因是在于黏滞系数是可变的,特别是在裂隙扩展阶段,黏滞系数会随着裂隙的不断扩大而逐渐变小,当岩石因裂隙扩展发生贯通破坏时,黏滞系数最小,而在裂隙闭合阶段,由于时间较短,可以认为黏滞系数是不变的[18]。基于以上分析,把西原模型中黏塑性体的线性黏滞元件,改为非线性黏滞元件,在加速蠕变阶段,非线性黏滞元件的黏滞系数应随着应变的增加而减小。因此,在总结前人经验的基础上,引进了陈沅江等[19]提出的一种新的非线性牛顿体－蠕变体的部分功能。

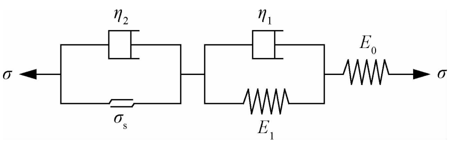

图1 西原模型

Fig. 1 Nishihara model

陈沅江等提出的新的非线性牛顿体－蠕变体是由变截面的牛顿阻尼器构成。该阻尼器在应变的初始区域长度 $\varepsilon < \varepsilon_c$ 内,具有线性牛顿体类似的特性,黏滞系数为常数 η_c;而对于其他应变区域 $\varepsilon \geqslant \varepsilon_c$,黏滞系数则是非线性的 $\eta_c' = \eta_c\left(\dfrac{\varepsilon_c}{\varepsilon}\right)^n$,其中 $n > 1$。定义该元件的本构关系为

$$\begin{cases} \mathrm{d}\varepsilon/\mathrm{d}t = \sigma/\eta_c, & \varepsilon < \varepsilon_c \\ \mathrm{d}\varepsilon/\mathrm{d}t = \sigma/\eta_c(\varepsilon/\varepsilon_c)^n, & \varepsilon \geqslant \varepsilon_c, n > 1 \end{cases} \tag{1}$$

式(1)中,η_c 为新蠕变单元体的应变 $\varepsilon < \varepsilon_c$ 时的黏滞系数。

图2为新蠕变单元体的示意图和应变-时间曲线。

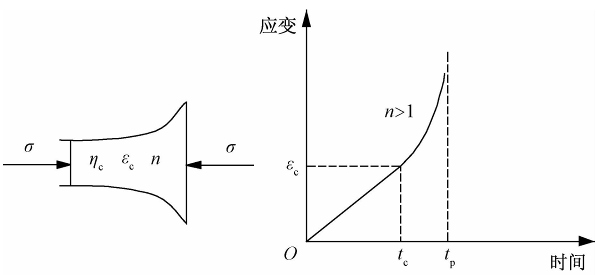

图2 蠕变体的示意图及应变-时间曲线

Fig. 2 Schematic diagram and axial strain-time curve of a creep mass

由图2可以看出,当元件的应变 $\varepsilon < \varepsilon_c$ 即 $t < t_c$ 时,应变-时间曲线为一条直线,黏滞系数为直线的斜率即为常数;当应变 $\varepsilon \geqslant \varepsilon_c$ 即时 $t > t_c$,应变-时间曲线为上凹型曲线,黏滞系数的大小随着时间的增加而快速增加。其中 t_c 为新蠕变体元件应变达到初始区域 ε_c 时所经历的时间。

由于岩体一般是在恒定应力的作用下发生的破坏,所以可以令 $\sigma = \sigma_0$;而当 $t = 0$ 时,有 $\varepsilon = 0$;$t = t_c$

时,$\varepsilon=\varepsilon_c$。将以上条件代入式(1)中,求解出新元件的蠕变方程为

$$\varepsilon=\begin{cases}\dfrac{\sigma_0}{\eta_c}t, & t<t_c=\dfrac{\varepsilon_c\eta_c}{\sigma_0}\\ \varepsilon_c\left[\dfrac{(1-n)\sigma_0}{\eta_c\varepsilon_c}t+n\right]^{\frac{1}{1-n}}, & t\geqslant t_c=\dfrac{\varepsilon_c\eta_c}{\sigma_0},n>1\end{cases}\tag{2}$$

由新蠕变元件的应力-应变曲线图和蠕变方程可知,应力作用在蠕变体上的时间 t 趋近于 $t_p=\dfrac{n}{n-1}\dfrac{\eta_c\varepsilon_c}{\sigma_0}$时,$\varepsilon$、$\dfrac{d\varepsilon}{dt}$、$\dfrac{d^2\varepsilon}{dt^2}$均趋于无穷大,元件发生破坏,$t_p$ 即为破坏时间[19,20]。

1.2　改进的西原模型

考虑到岩石蠕变的第一、第二阶段仍然是线性,故仅将改进后的元件替换掉西原模型的黏塑性体的黏滞元件,得到如图 3 所示的改进西原模型。

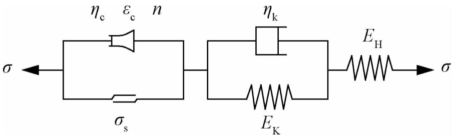

图 3　改进的西原模型

Fig. 3　The modified Nishihara model

根据模型元件串联的关系,改进西原模型的总应变为

$$\varepsilon=\varepsilon_H+\varepsilon_k+\varepsilon_c\tag{3}$$

式(3)中,ε_H 为胡克体(H)的应变;ε_k 为黏弹性体(N/H)的应变;ε_c 为改进后黏塑性体(N/St. V)的应变。

根据模型元件并联的关系得:

胡克体(H)中:

$$\varepsilon_H=\frac{\sigma_0}{E_H}\tag{4}$$

黏弹性体(N/H)中:

$$\frac{d\varepsilon_k}{dt}\eta_k+E_K\varepsilon_k=\sigma_0\tag{5}$$

黏塑性体(N/St. V)中:

当 $\sigma_0<\sigma_s$ 时

$$\varepsilon_c=0\ (\text{黏塑性体不参与反应})\tag{6}$$

当 $\sigma_0>\sigma_s$,但 $t<t_c$ 时

$$\frac{d\varepsilon_c}{dt}\eta_c+\sigma_s=\sigma_0\tag{7}$$

当 $\sigma_0>\sigma_s$,且 $t\geqslant t_c$ 时

$$\frac{d\varepsilon_c}{dt}\eta_c\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon}\right)^n+\sigma_s=\sigma_0\tag{8}$$

将式(4)~式(7)进行积分求解后代入式(3),可以得到改进后西原模型的蠕变方程:

$$\begin{cases}\varepsilon(t)=\dfrac{\sigma_0}{E_H}+\dfrac{\sigma_0}{E_K}\left[1-e^{\left(-\frac{E_K}{\eta_K}\right)t}\right], & \sigma_0\leqslant\sigma_s\\ \varepsilon(t)=\dfrac{\sigma_0}{E_H}+\dfrac{\sigma_0}{E_K}\left[1-e^{\left(-\frac{E_K}{\eta_k}\right)t}\right]+\dfrac{\sigma_0-\sigma_s}{\eta_c}t, & \\ \qquad\sigma_0>\sigma_s,t<t_c\text{ 或 }\varepsilon<\varepsilon_c & \\ \varepsilon(t)=\dfrac{\sigma_0}{E_H}+\dfrac{\sigma_0}{E_K}\left[1-e^{\left(-\frac{E_K}{\eta_k}\right)t}\right]+\varepsilon_c\left[\dfrac{(1-n)(\sigma_0-\sigma_s)}{\eta_c\varepsilon_c}t+n\right]^{n-1}, & \\ \qquad\sigma_0>\sigma_s,t\geqslant t_c\text{ 或 }\varepsilon\geqslant\varepsilon_c & \end{cases}\tag{9}$$

式(9)中,E_H、E_k 分别为胡克体和凯尔文体的弹性模量;η_k、η_c 分别为凯尔文体和新蠕变体在其初始区域 ε_c 时的黏滞系数;ε_c、σ_s 分别为新蠕变体的初始区域长度和泥岩长期强度;t_c 为新蠕变体元件应变达到初始区域 ε_c 时所经历的时间,亦为整个模型进入加速蠕变的时间。

由蠕变方程可以看出,当应力 $\sigma_0<\sigma_s$ 时,黏塑性体不发挥作用,蠕变模型实际上可以认为是广义的开尔文模型;当应力 $\sigma_0>\sigma_s$,但 $t<t_c$ 即未进入加速蠕变阶段时,蠕变模型退化为传统的西原模型,岩石蠕变的第一、第二阶段实际是由传统的西原模型进行描述;当应力 $\sigma_0>\sigma_s$,且 $t\geqslant t_c$ 即岩石进入加速蠕变阶段后,新蠕变体元件的非线性功能开始发挥作用,岩石蠕变第三阶段由求解出来的蠕变方程的第三式来描述,此时模型的任意一个元件的破坏都会导致整个模型的失效。

2　试验验证与流变模型参数的获取

2.1　试验方法

为了验证改进的西原模型,采用 YSJ—01—00 岩石三轴压缩流变试验仪(图 4)对甘肃天水市武山县的天然状态下的泥岩试样(图 5)进行蠕变试验,试样尺寸为标准试验圆柱形,直径 $D=50$ mm,高 $H=100$ mm。在试验过程中保持围压不变,温度控制在 19°~20°。轴向荷载的加载采用分级加载的方式,由于泥岩自身的强度较低,蠕变试验初始轴向应力的大小为 1 MPa,围压大小为 1 MPa,保持 48 h 之后增加下一级轴向荷载,每级轴向荷载增加 1 kN,如此循环施加下一级轴向荷载直至试样破坏。

通过试验,取最具有代表性的岩样进行分析,得到了如图 6 所示的泥岩蠕变全过程曲线,利用图 6 进行 Boltzmannn 叠加法处理,得到如图 7 所示的泥岩不同应力水平的应变-时间曲线图。

由图 6 和图 7 可知,泥岩在第 19 级荷载即轴向应力为 10.2 MPa 之前,应变-时间曲线只出现了

图 4 YSJ—01—00 岩石三轴压缩流变试验仪

Fig. 4 YSJ-01-00 triaxial creep test machine for rocks

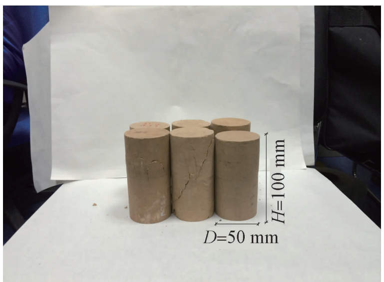

图 5 泥岩试样

Fig. 5 Mudstone specimen

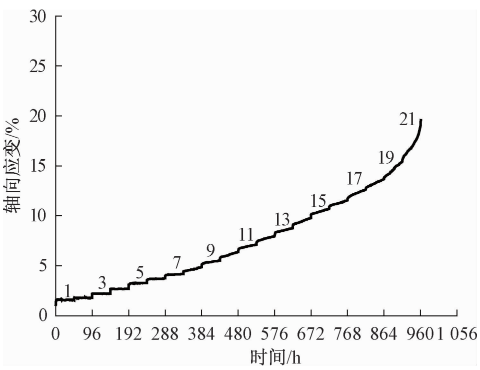

图 6 泥岩蠕变全过程曲线

Fig. 6 Complete creep curve of the mudstone sample

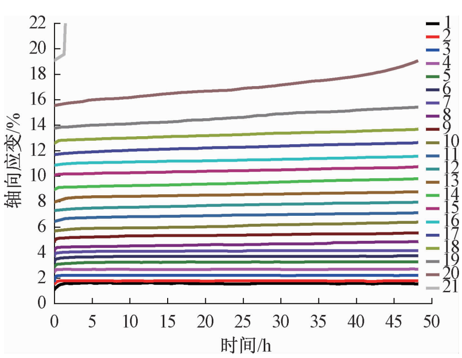

图 7 泥岩不同应力水平的轴向应变-时间曲线

Fig. 7 Axial strain-time curves of the mudstone sample under different stress level

减速蠕变和等速蠕变阶段;在第 20 级荷载即轴向应力为 10.7 MPa 时,应变-时间曲线出现了减速、等速和加速蠕变阶段;在 21 级荷载即轴向应力为 11.2 MPa 时,应变-时间曲线在经历了短暂的减速蠕变阶段以后,直接出现了加速蠕变阶段,并没有出现等速蠕变阶段。由试验结果可以知道,泥岩的蠕变一般也是分为减速蠕变、等速蠕变和加速蠕变阶段,但是各个阶段是否出现与轴向应力的大小有关。

取泥岩 20 级荷载下,岩石经历减速、等速、加速三个阶段的应变-时间曲线来验证改进的西原模型,并进行参数的确定。作第 20 级荷载轴向应力为 10.7 MPa 下,泥岩试样临近蠕变破坏时的轴向应变-时间曲线,如图 8 所示。

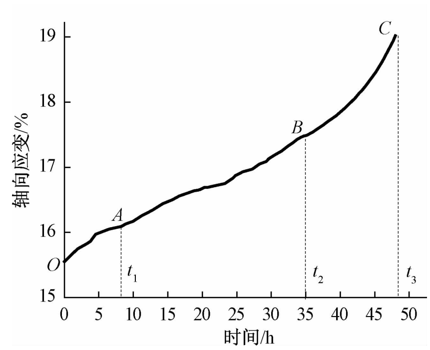

图 8 泥岩轴向应变-时间曲线

Fig. 8 Axial strain-time curve of the mudstone sample

为了求出轴向应变的速率,以判断出岩石的减速蠕变阶段、等速蠕变阶段和加速蠕变阶段的起始和结束时间,采用轴向应变对时间进行求导的运算方法来求解应变速率。根据求导运算的法则有:$\dfrac{d\varepsilon}{dt} = \dfrac{\varepsilon(t+\Delta t)-\varepsilon(t)}{\Delta t}$ 在 $\Delta t \to 0$ 时的极限值即为该点的蠕变速率,所以利用应变-时间曲线对时间 t 进行求导,得出的结果即为轴向应变率。图 9 为第 20 级荷载下泥岩的轴向应变率-时间曲线。

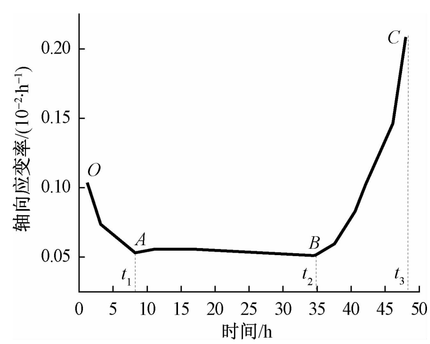

图 9 泥岩轴向应变率-时间曲线

Fig. 9 Axial strain rate-time curve of the mudstone sample

由轴向应变率-时间曲线可以看出来,在 OA 段,应变率随着时间的增大而减小,故 OA 段为岩石的

减速蠕变阶段,t_1 即为减速蠕变的结束时间;在 AB 段,应变率随着时间的变化并没有发生明显改变,而是保持在一定的值,故 AB 段为等速蠕变阶段,t_1 即为等速蠕变的开始时间;在 BC 段,应变率快速增加直至岩石发生破坏,故 BC 段为加速蠕变阶段,t_2 为加速蠕变的开始时间和等速蠕变的结束时间;由泥岩轴向应变率-时间曲线图可以得出,当岩石进入加速蠕变阶段的时间 $t=t_2=32$ h,此时新蠕变体元件对应的应变即为改进的西原模型加速蠕变方程中的参数 ε_c,新蠕变体的非线性功能开始产生作用。

2.2　参数确定

根据由试验得出的 20 级荷载下的轴向应变-时间曲线,并结合改进西原模型的蠕变方程,可以将 $t_2=t|_{\varepsilon=\varepsilon_c}$ 作为分界点,t_2 时刻之前的轴向应变-时间曲线段为第一部分,改进西原模型可退化成传统的西原模型,第一部分实际由传统的西原模型来描述;t_2 时刻之后的轴向应变-时间曲线为第二部分,岩石进入加速蠕变阶段,新蠕变体的非线性功能开始产生作用,此时采用改进的西原模型进行描述。现给出岩石长期强度 σ_s 及蠕变方程各参数的确定方法。

2.2.1　岩石长期强度 σ_s 的确定

通过作出岩石的应力-应变等时曲线(图 10)可以看出,在轴向应力 $\sigma_1=4.56$ MPa 时,应力-应变等时曲线出现了明显的拐点,拐点之后的曲线簇会随着 t 值的增大而越趋近于平行 X 轴。根据这样的变化趋势,可以推测出存在一条 $t\to\infty$的曲线,其曲线后半段为趋近平缓的直线,作该直线的反向延长线与纵坐标的交点即为岩石的长期强度。根据变化的趋势可以知道 $t\to\infty$的曲线会在轴向应力 $\sigma_1=4.56$ MPa 时产生拐点,拐点后的曲线趋近平缓,此时拐点值即岩石的长期强度值 $\sigma_s=\sigma_1=4.56$ MPa。

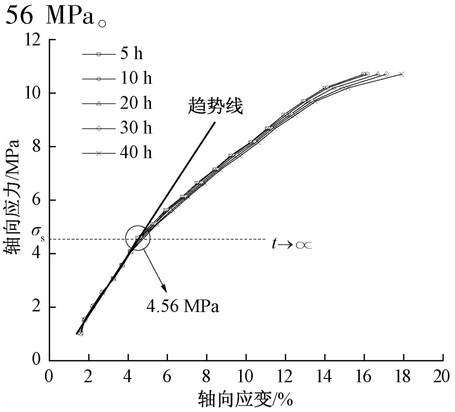

图 10　泥岩的应力-应变等时曲线

Fig. 10　Isochronous stress-strain curves of the mudstone sample

2.2.2　蠕变方程参数的确定

利用图 8 泥岩 20 级临近蠕变破坏时得到的轴向应变-时间曲线,根据步骤(1)~步骤(3)可求出各参数。

(1)当 $t=0$ 时,由 $\varepsilon(t_0)=\dfrac{\sigma_0}{E_H}$可得

$$E_H=\frac{\sigma_0}{\varepsilon(t_0)} \tag{10}$$

(2)在$(0,t_2)$时段的曲线,运用 1st Opt 软件,采用麦夸特法和通用全局优化法对曲线进行拟合。通用全局优化算法无需使用者手动给出参数初始值,参数初始值由 1st Opt 随机给出,软件通过其全局优化算法,最终求出 E_K、η_k、η_c 的最优解。

(3)在(t_2,t_3)时段的曲线,E_H、E_K、η_k、η_c 的参数值已经由步骤(2)确定,由于新蠕变体元件的 ε_c 不容易直接得出,所以通过:

$$\varepsilon_c=\frac{t_c(\sigma_0-\sigma_s)}{\eta_c} \tag{11}$$

转换得出,其中 $t_c=35$h 可由轴向应变率-时间曲线得到。最后 n 值可以通过将 E_H、E_K、η_k、η_c、ε_c、σ_s 代入蠕变方程,然后再次运用 1st Opt 软件求解确定。表 1 给出了改进西原模型的全部参数。

表 1　改进西原模型参数

Table 1　Parameters of the modified Nishihara model

$(\sigma_0-\sigma_s)$/MPa	E_H/GPa	E_K/GPa	η_k/(GPa·h)	η_c/(GPa·h)	ε_c/%	n	σ_s/MPa
9.7	0.688	74.235	111.277	124.641	0.172	3.007	4.56

图 11 给出了传统西原模型、改进西原模型对泥岩第 20 级荷载在蠕变过程曲线的拟合结果。由图 11可以明显看出,传统的西原模型能够很好地描述泥岩蠕变的第一阶段和第二阶段,但当进入第三阶段以后,传统西原模型的理论曲线开始偏离了实际试验曲线,并出现了较大的偏差;而改进的西原模型的理论值能很好地与试验结果相吻合,它不仅能充分反映泥岩蠕变的第一阶段和第二阶段,还能很好地描述泥岩蠕变的第三阶段,克服了传统西原模型不能准确地描述加速蠕变阶段的缺点,其对于泥岩蠕变特性的描述效果明显要优于传统西原模型。由于该模型仅对传统西原模型的一个黏滞元件进行了改进,模型参数较少,推导过程简单,使用性好,所以该模型具有一定的应用价值,在对于滑坡的临滑预报方面具有指导意义。

3　破坏时间的推导和参数敏感性分析

由新蠕变体的应力-应变曲线图和蠕变方程可

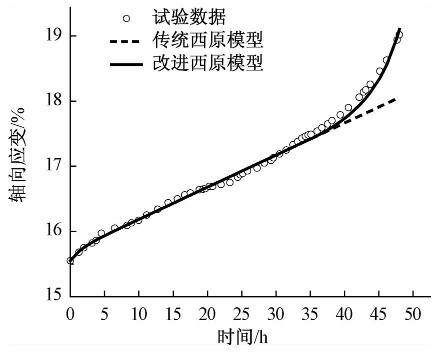

图11 改进西原模型计算值与试验结果值的对比

Fig. 11 Comparison between the modified Nishihara model and the experiment

知,当应力作用在蠕变体单元体上的时间 t 趋近于 $t_p = \dfrac{n}{n-1}\dfrac{\eta_c\varepsilon_c}{\sigma_0-\sigma_s}$ 时,应变趋于无穷大,元件发生破坏,整个模型也会发生破坏,故以此作为模型破坏的判据,式中 $\sigma_0-\sigma_s$ 为作用在蠕变单元体上的轴向应力。将表1中得到的参数代入 $t_p = \dfrac{n}{n-1}\dfrac{\eta_c\varepsilon_c}{\sigma_0-\sigma_s}$,得 $t_p = 52.43$ h,此时,元件发生破坏,即该模型在第20级应力水平的作用下会在52.43 h后发生破坏,但是由于试验每一级荷载的持续时间仅为48 h,所以可以推测出如果试验时间足够长,泥岩试样会在时间趋近于 $t = 52.43$ h 时发生破坏。

将表1的参数值代入蠕变方程,仅改变 n 值的大小,得到 n 值对岩石蠕变的全过程的影响曲线(图12),只对 n 值进行敏感性分析。由图12可以知道,随着 n 值的增加,岩石进入加速蠕变以后的应变速率也会增加,发生破坏的时间更短;反之,则越长。这表明了改进的西原模型能够很好地应用于岩石加速蠕变阶段的描述,具有很好的适用性。

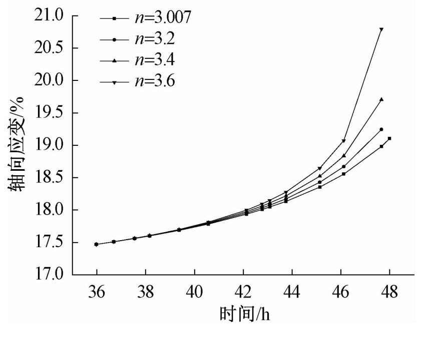

图12 n 值对岩石蠕变的全过程的影响曲线

Fig. 12 Effect of n on the complete creep curves

4 结论

本文通过对传统西原模型的改进,得出一种新的非线性蠕变模型,并利用天然状态下的泥岩流变试验对改进模型进行了验证,获取了泥岩蠕变参数,得出如下结论:

(1)改进后的西原模型克服了传统西原模型无法描述岩石非线性加速蠕变阶段的缺陷,不仅可以准确地描述岩石的减速蠕变、等速蠕变阶段的特性,还可以很好地描述岩石的非线性加速蠕变阶段。

(2) 通过改进的西原模型,提出了模型的破坏判据,推导出泥岩试样在某轴向应力作用下的蠕变破坏时间,该模型参数较少,且容易获取,模型方程形式也较为简单,对研究甘肃黄土-岩质(泥岩)滑坡和岩质(泥岩)滑坡的临滑预报具有重要的科研意义和工程意义。

(3) 通过参数敏感性的分析可知,随着参数 n 值的增大,岩石进入加速蠕变直至发生破坏的时间会减短,应变速率加快;反之则时间增长,应变速率减缓,说明改进模型具有很好的适应性,尤其在加速蠕变阶段;获得了甘肃天水泥岩的长期强度,这对于该地区岩土工程的设计和施工有重要的参考价值。

参 考 文 献

1 盛宏文,蒋常林. 甘肃清水县地质灾害类型?形成条件及发育规律分析. 甘肃地质, 2014; 23(3): 67—72
Sheng Hongwen, Jiang Changlin. Development characteristics of geological hazards in Qingshui County of Gansu. Gansu Geology, 2014; 23(3): 67—72

2 张向东,李永靖,张树光,等. 软岩蠕变理论及其工程应用. 岩石力学与工程学报, 2004; 23(10): 1635—1639
Zhang Xiangdong, Li Yongjing, Zhang Shuguang, *et al*. Creep theory of soft rock and its application to engineering. Chinese Journa of Rock Mechanics and Engineering, 2004; 23(10): 1635—1639

3 谢正团,郭富赟,孟兴民,等. 天水市北山王家半坡滑坡形成机制. 兰州大学学报(自然科学版), 2016; 1:31—36
Xie Zhengtuan, Guo Fuyun, Meng Xingmin, *et al*. Causes and mechanism of Wangjiabanpo landslide in North Mountain of Tianshui City. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2016; 1:31—36

4 李 浩,杨为民,黄 晓,等. 天水市麦积区税湾地震黄土滑坡特征及其形成机制. 地质力学学报, 2016; 1:12—24
Li Hao, Yang Weimin, Huang Xiao, *et al*. Characteristics and deformation mechanism of shuiwan seismic loess landslide in Maiji, Tianshui. Journal of Geomechanics, 2016; 1:12—24

5 Griggs D T. Greep of rocks. Journal of Geology. 1939; 47: 225—251

6 Faber D T, Pellet F D. Greep and time-dependent damage in argillaceous rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining, 2006; 43(6): 950—960

7 徐慧宁,庞希斌,徐 进,等. 粉砂质泥岩的三轴蠕变试验研究. 四川大学学报(工程科学版), 2012; 44(1): 69—74
Xu Huining, Pang Xibin, Xu Jin, *et al*. Study on triaxial creep test of silty mudstone. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2012; 44(1): 69—74

8 谌文武,原鹏博,刘小伟. 分级加载条件下红层软岩蠕变特性试验研究. 岩石力学与工程学报, 2009; 28(增刊1):3076—3081
Chen Wenwu, Yuan Pengbo, Liu Xiaowei. Study on creep properties

of red-bed soft rock under step load. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009; 28(S1): 3076—3081

9 朱定华, 陈国兴. 南京红层软岩流变特性试验研究. 南京工业大学学报(自然科学版), 2002; 24(5): 77—79
Zhu Dinghua, Chen Guoxing. Experimental study of Nanjing red-bed on rheology. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science), 2002; 24(5): 77—79

10 邓荣贵, 周德培, 张倬元, 等. 一种新的岩石流变模型. 岩石力学与工程学报, 2001; 20(6): 780—784
Deng Ronggui, Zhou Depei, Zhang Zhuoyuan, *et al.* A new rheological model for rocks. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001; 20(6): 780—784

11 Zhou H W, Wang C P, Han B B, *et al.* A creep constitutive model for salt rock based on fractional derivatives. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011; 48(1): 116—121

12 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. 岩石力学与工程学报, 2012; 31(2): 347—355
Qi Yajing, Jiang Qinghui, Wang Zhijian, *et al.* 3D creep constitutive equation of modified Nishihara model and its parameters identification. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012; 31(2): 347—355

13 郑孝玉, 曹炳兰. 滑坡时间预报的实验研究. 长春科技大学学报, 2000; 30(2): 170—173
Zheng Xiaoyu, Cao Binglan. Experimental study on time forecasting of landslide. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2000; 30(2): 170—173

14 艾志雄, 边秋璞, 赵克全. 岩土蠕变试验及应用简介. 三峡大学学报(自然科学版),2006; (6): 518—521
Ai Zhixiong, Bian Qiupu, Zhao Kequan. Brief introduction to creep tests and their application to geomaterials. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2006; (6): 518—521

15 黄润秋, 赵松江, 宋肖冰, 等. 四川省宣汉县天台乡滑坡形成过程和机制分析. 水文地质工程地质, 2005; 32(1): 13—15
Huang Runqiu, Zhao Songjiang, Song Xiaobing, *et al.* The formation and mechanism analysis of Tiantai Landslide, Xuanhan County, Sichuan Province. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005; 32(1): 13—15

16 殷坤龙, 姜清辉, 汪　洋. 新滩滑坡运动全过程的非连续变形分析与仿真模拟. 岩石力学与工程学报, 2002; 21(7): 959—962
Yin Kunlong, Jiang Qinghui, Wang Yang. Numerical simulation on the movement process of Xintan landslide by DDA method. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002; 21(7): 959—962

17 王志俭, 殷坤龙, 简文星, 等. 三峡库区万州红层砂岩流变特性试验研究. 岩石力学与工程学报, 2008; 27(4): 840—847
Wang Zhijian, Yin Kunlong, Jian Wenxing, *et al.* Experimental study on rheological behaviors of Wanzhou red sandstone in Three Gorges Reservoir area. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008; 27(4): 840—847

18 曹树刚, 边　金, 李　鹏. 岩石蠕变本构关系及改进的西原正夫模型. 岩石力学与工程学报, 2002; 21(5): 632—634
Cao Shugang, Bian Jin, Li Peng. Rheologic constitutive relationship of rocks and a modified model. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002; 21(5): 632—634

19 陈沅江, 潘长良, 曹　平, 等. 软岩流变的一种新力学模型. 岩土力学, 2003; 24(2): 209—214
Chen Yuanjiang, Pan Changliang, Cao Ping, *et al.* A new mechanical model for soft rock rheology. Rock and Soil Mechanics, 2003; 24(2): 209—214

20 王建锋. 两类经典滑坡发生时间预报模型的理论分析. 地质力学学报, 2004; 10(1): 40—50
Wang Jianfeng. Theoretical analysis of two classic landslide prediction models: Saito's model and Voight's model. Journal of Geomechanics, 2004; 10(1): 40—50

Gansu Tianshui Mudstone Rock Compression Creep Property Test and Model Research

ZHOU Xiao-peng, LI Bu, WU Li-zhou*, XU Qiang

(State Key Laboratory of Geohazards Prevention and Geoenviroment Protection, Chengdu University of Techology, Chengdu 610059, China)

[**Abstract**]　The loess-rocky landslide and rock landslide have a wide distribution in Gansu Tianshui region, having a large quantity, and the major sliding surfaces are happened in mudstone. In order to further understand the creep characteristics of soft rock and the nature of landslide deformation and failure, YSJ—01—00 rock triaxial creep test machine was used to carry out the triaxial compression creep test on the mudstone in the natural state and obtained in Tianshui, Gansu. The complete creep curve, different stress level strain-time curves, and long-term strength of mudstone were obtained. The creep behaviors of the mudstone samples were analyzed, a modified Nishihara model and the failure criteria of the model were obtained. The parameters of the modified Nishihara model and the creep damage time were derived by fitting the modified Nishihara model to compression creep curve of the mudstone samples. The results show that the modified Nishihara model can effectively describe mudstone creep, especially in the accelerating creep stage, which is conducive to the research of landslide prediction, and has great scientific significance and engineering significance to the study of loess-rock landslide, rock landslide and other soft rock in Gansu area.

[**Key words**]　mudstone　　creep tests　　accelerating creep　　creep model