

地裂缝带 Q<sub>3</sub> 原状黄土三维蠕变本构辨识方法<sup>\*</sup>

李丽<sup>1, 2</sup>, 邓亚虹<sup>2, 3, 4</sup>, 王鹏<sup>5</sup>, 慕焕东<sup>2, 3</sup>, 李飞霞<sup>2</sup>

(1. 甘肃省交通科学研究院有限公司, 兰州 730050; 2. 长安大学 地质工程系, 西安 710054; 3. 长安大学 国土资源部岩土工程开放研究实验室, 西安 710054; 4. 长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 西安 710054; 5. 甘肃省地矿局 第三地质矿产勘查院, 兰州 730050)

**摘 要:**“改进西元模型”是由西元体和村山体串联组成,它包含了黏弹性、黏塑性、黏弹塑性三种基本流变力学性态。本文基于统一流变力学模型理论,结合所得“改进西元模型”的性质及蠕变曲线的特征,对蠕变本构方程进行辨识,获得了西安地区地裂缝带 Q<sub>3</sub> 原状黄土在不同应力水平下的一维蠕变本构方程。考虑到室内试验及实际工程问题均为三维状态,将一维本构模型进行推广,得到了三维蠕变模型,并对其本构方程进行求解。结果表明,所选本构方程较为准确地反映了西安地区地裂缝带 Q<sub>3</sub> 原状黄土的流变性能。

**关键词:** 地裂缝带;改进西元模型;三维蠕变本构方程;辨识方法

中图分类号:P642      文献标识码:A      文章编号:1673-0836(2017)04-0905-08

ThreeDimensional Creep Constitutive Identification Method of Ground Fissure Belt Q<sub>3</sub> Undisturbed-loess

Li Li<sup>1, 2</sup>, Deng Yahong<sup>2, 3, 4</sup>, Wang Peng<sup>5</sup>, Mu Huandong<sup>2, 3</sup>, Li Feixia<sup>2</sup>

(1. Gansu transportation research institute Co. Ltd., Lanzhou 730050, P.R. China; 2. Department of geology Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, P.R. China; 3. Open Research Laboratory of Geotechnical Engineering, Ministry of Land and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, P.R. China; 4. Key Laboratory of Western Chinas Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, P.R. China; 5. Gansu province departmental third exploration institute of geology and mineral resources, Lanzhou 730050, P.R. China)

**Abstract:** The improved Xi Yuan model is to cascade Xi Yuan body and Murayama body, including three fundamental rheological behaviors: visco-elasticity, visco-plasticity and visco-elasticity plasticity. Based on the unified rheological mechanics model theory, combined with the nature of the improved Xi Yuan model and the characteristics of creep curve, the paper identified the creep constitutive equation, obtained one-dimensional creep constitutive equation under different stress level of ground fissures belt Q<sub>3</sub> undisturbed-loess in Xi'an area. Considering the laboratory test and the actual engineering problems are all three-dimensional state, one-dimensional constitutive model was generalized to obtain three-dimensional and solve the constitutive equation. The results show that the constitutive equation can accurately reflect the rheological properties of ground fissure belt Q<sub>3</sub> undisturbed-loess in Xi'an area.

**Keywords:** ground fissure belt; the improved Xi Yuan model; three-dimensional creep constitutive equation; identification method

<sup>\*</sup> 收稿日期:2016-12-09(修改稿)  
作者简介:李丽(1986-),女,新疆人,硕士,助理工程师,主要从事岩土力学与工程相关工作。Email:lily\_er@163.com  
基金项目:国家自然科学基金(41002106,41372327);甘肃省交通运输厅科技项目(2012-03)

0 引言

土的蠕变本构是以室内试验为基础,得到土体应力应变随时间的变化规律,可以定量表征土体的流变特性。其选取原则是在能反映黄土流变规律的前提下尽量选择最简单的模型<sup>[1]</sup>。目前,土的蠕变本构模型主要有以下几种:经验模型、元件模型、屈服面模型、考虑损伤效应的理论模型以及从热力学或内时理论建立起来的模型等。最常用的模型形式就是元件模型,是以弹性元件、黏性元件和塑性元件组成的体系。力学模型理论是根据不同情况将材料抽象成弹簧、黏壶和滑块等元件组成的复杂体系,元件之间不同的组合代表材料的不同蠕变特性。基本力学模型是由这三个元件的串并联组成的,共形成 7 个模型<sup>[2]</sup>。我们将其中 4 个与时间有关的模型,即黏弹性、黏弹塑性、黏性和黏塑性称为基本流变力学模型<sup>[3]</sup>。为了研究与时间有关的变形形态,考虑材料一般均具有瞬时弹性变形,从而可以将弹簧与基本流变力学模型进行串联组合,共形成 15 个流变力学模型。统一流变力学模型(图 1)是将弹簧与 4 个基本流变力学模型同时串联组成的模型,它是包含所有流变形态的最复杂、最完整的一个模型<sup>[3-5]</sup>。

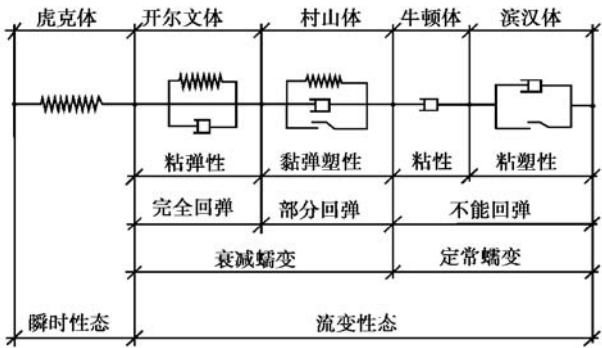


Fig.1 Uniform rheological mechanics model<sup>[3-5]</sup>

郭增玉等<sup>[6]</sup>通过对场地黄土的室内单轴和三轴流变试验,建立了高湿度  $Q_2$  黄土的非线性流变本构模型;丁志坤等<sup>[7]</sup>在页岩蠕变试验基础上,建立了一维情况下非定常黏弹性模型及其本构方程;夏才初等<sup>[3-5]</sup>提出了统一流变力学模型,涵盖了介质的所有流变形态,并对模型及参数进行辨识;王艳婷<sup>[8]</sup>用五元件广义的 Kelvin 模型描述  $Q_2$  黄土的黏弹性特性,给出了一维和三维蠕变本构模型表达式;李良全等<sup>[9]</sup>提出了一维、三维非线性黏弹塑性蠕变模型,并对相应的流变本构方程进行推导。

1 一维蠕变本构方程的建立

所用黄土三轴流变试验数据是在 CSS-2901TS 三轴流变试验机上试验所得。该蠕变试验是以西安地区长安地裂缝( $f_{cl}$ )带  $Q_3$  原状黄土为研究对象,人工采取土样,制作成直径 39.1 cm、高 80 cm 的圆柱形试样。其物理力学性质指标如表 1。

表 1 基本物理力学性质指标

Table 1 Basic physical and mechanical properties					
天然 含水率	天然 密度	天然 孔隙比	液 限	塑 限	比 重
$\omega/\%$	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$e$	$\omega_L/\%$	$\omega_p/\%$	$G_s$
19.2	1.62	1.014	32.5	19.5	2.72

试样采用同一含水率(按天然含水率进行统一配置),固结压力  $\sigma_3$  分别取 100 kPa、200 kPa 和 300 kPa。试验控制条件为固结不排水,采用循环加卸载方式,试验加载速率为 0.001 kPa/s,卸载速率为 0.005 kPa/s。按照常规三轴压缩试验获取的抗剪强度值,将应力分为 5~8 级进行加载。图 2 为蠕变试验实测数据绘制而成。

从试验结果可以看出:

(1)在加载瞬间均有瞬时变形产生,说明具有瞬时弹性变形形态,即本构模型中应串联有单独的弹簧元件。

(2)在很低应力下,蠕变曲线为减速蠕变类型,且能够完全回弹,说明具有黏弹性形态。

(3)在低应力及较高应力水平下,蠕变试验曲线均为减速蠕变,说明不具有完全黏性形态,即模型中没有单独的黏壶存在。

(4)在高应力水平下,蠕变试验曲线出现等速蠕变阶段,且最终出现加速蠕变阶段,说明低应力下该元件不起作用,当应力达到一定值时才起作用,为黏塑性体。

(5)分析较高应力下加卸载曲线,卸载后蠕变变形有且仅有部分回弹,则必有黏弹塑性体。

于是根据蠕变试验曲线特征所得的本构模型与统一流变力学模型相比仅少了一个黏性体,是由西元体和村山体串联而成,命名为“改进西元模型”,如图 3 所示。

根据模型的特点,屈服应力的大小不同,蠕变曲线表现出两种形式,如图 4 所示。从图 4 可以看出,在低应力水平下,无论屈服应力大小,蠕变曲线

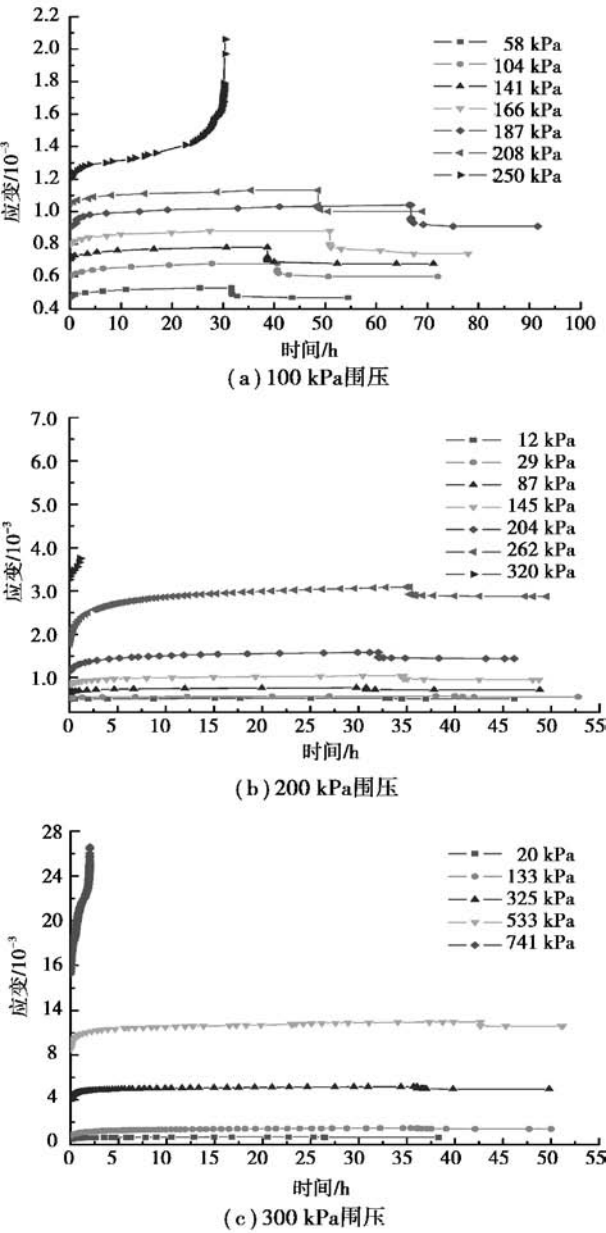


图2 不同围压下试样的蠕变加卸载试验曲线

Fig. 2 Creep loading and unloading curves of the sample under different confining pressure

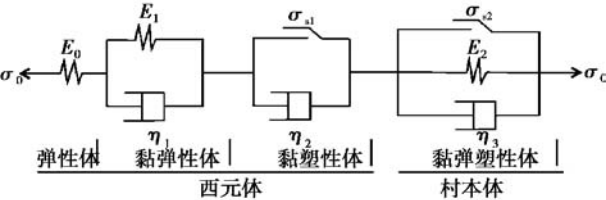


图3 改进西元模型(一维)

Fig. 3 The improved Xi Yuan model(one-dimensional)

均仅有减速蠕变阶段,且卸载后变形完全回弹;在较高应力水平下,图4(a)的蠕变曲线具有减速蠕变和等速蠕变阶段,卸载后变形部分回弹;图4(b)

的蠕变曲线仅具有减速蠕变阶段,卸载后变形部分回弹;在较高应力水平下,无论屈服应力大小,蠕变曲线均具有减速蠕变和等速蠕变阶段。

对图4(a),即当 $\sigma_{s1} \leq \sigma_{s2}$ 时一维本构方程的辨识方法如下:

根据施加应力的大小可以分为低应力、较高应力和高应力三种应力状态,对相应的本构方程进行求解。

在低应力下,即当 $\sigma_0 \leq \sigma_{s1}, \sigma_{s2}$ 时,施加的应力没有达到黏弹性体和黏弹塑性体的屈服应力,二者不发生变形,此时模型只有弹簧和黏弹性体发生变形,模型具有瞬时弹性变形、减速蠕变变形及卸载后变形完全回弹特性,相应本构方程为:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t}\right) \quad (1)$$

式中: $\varepsilon(t)$ 为蠕变量; $\sigma_0$ 为施加的应力; $E_0$ 为弹性体弹簧的弹性模量; $E_1$ 为黏弹性体中弹簧的弹性模量; $\eta_1$ 为黏弹性体中黏壶的黏滞系数; $t$ 为施加应力的时间。

在较高应力下,即当 $\sigma_{s1} \leq \sigma_0 \leq \sigma_{s2}$ 时,施加的应力大于黏塑性体的屈服应力,小于黏弹塑性体的屈服应力,则除了弹簧和黏弹性体产生变形外,黏塑性体也将产生变形。此时模型具有瞬时弹性变形,等速蠕变变形及卸载后变形部分回弹的特性,相应本构方程为:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t}\right) + \frac{\sigma_0 - \sigma_{s1}}{\eta_2} t \quad (2)$$

式中: $\sigma_{s1}$ 为黏塑性体的屈服应力; $\eta_2$ 为黏塑性体的黏滞系数。

在高应力下,即当 $\sigma_0 \geq \sigma_{s1}, \sigma_{s2}$ 时,施加的应力均大于黏弹性体和黏弹塑性体的屈服应力,整个模型元件均发生变形。此时模型具有瞬时弹性变形、等速蠕变变形及卸载后变形部分回弹的特性,相应本构方程为:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t}\right) + \frac{\sigma_0 - \sigma_{s1}}{\eta_2} t + \frac{\sigma_0 - \sigma_{s2}}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_3} t}\right) \quad (3)$$

式中: $\sigma_{s2}$ 为黏弹塑性体的屈服应力; $E_2$ 为黏弹塑性体中弹簧的弹性模量; $\eta_3$ 为黏弹塑性体中黏壶的黏滞系数,下同。

对于图4(b),即当 $\sigma_{s1} \geq \sigma_{s2}$ 时,一维本构方程的辨识方法如下:

在低应力下,即当 $\sigma_0 \leq \sigma_{s1}, \sigma_{s2}$ 时,相应的模型





$$e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon_m \delta_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x - \varepsilon_m & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_y - \varepsilon_m & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \varepsilon_z - \varepsilon_m \end{bmatrix} \quad i, j = x, y, z \quad (9)$$

$$\sigma_{ii} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 3\sigma_m \quad (10)$$

$$\varepsilon_{ii} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 3\varepsilon_m \quad (11)$$

式中:在常规三轴流变状态下,轴向力为  $\sigma_1$ ,围压  $\sigma_2 = \sigma_3$ ;弹性剪切模量  $G_0$ 、弹性体积模量  $K$  与弹性模型  $E_0$  和泊松比  $\mu$  的关系为:

$$E_0 = \frac{9G_0K}{3K + G_0}, \mu = \frac{3K - 2G_0}{2(3K + G_0)} \quad (12)$$

对于黏弹性体,采用下列换算关系将简单一维应力状态推广到复杂三维应力状态:

$$\sigma \leftrightarrow S_{ij}, \varepsilon \leftrightarrow e_{ij}, E \leftrightarrow 2G, \eta \leftrightarrow 2H \quad (13)$$

式中: $\sigma, \varepsilon, E, \eta$  分别为一维条件下的应力、应变、弹性模量和黏滞系数; $S_{ij}, e_{ij}, G, H$  为三维条件下的应力偏量、应变偏量、剪切模量和黏滞系数。由于

$S_1 = \sigma_1 - \sigma_m = \frac{2}{3}(\sigma_1 - \sigma_2), \sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_2)$ , 于是三维条件下黏弹性体的本构方程为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1(t) &= \frac{\sigma_m}{3K} + \frac{S_1}{2G_0} + \frac{S_1}{2G_1}(1 - e^{-\frac{c_1}{H_1}t}) \\ &= \frac{\sigma_1 + 2\sigma_2}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{3G_0} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{3G_1}(1 - e^{-\frac{c_1}{H_1}t}) \end{aligned} \quad (14)$$

对于黏塑性体,一维情况下的应力  $\sigma - \sigma_s$  与三维情况下的屈服函数及塑性势函数  $\left(\frac{F}{F_0}\right)^m \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}}$  相当,于是有:

$$\varepsilon_1(t) = \frac{t}{2H_2} \left(\frac{F}{F_0}\right)^m \frac{\partial Q}{\partial \sigma_1} \quad (15)$$

对于黏弹塑性体,有:

$$\varepsilon_1(t) = \frac{1}{2G_2} \left(\frac{F}{F_0}\right)^m \frac{\partial Q}{\partial \sigma_1} (1 - e^{-\frac{c_2}{H_3}t}) \quad (16)$$

式中: $F$  为屈服函数; $F_0$  为屈服函数初始参考值,通常取 1; $m$  为试验常数,取为 1,当  $F \leq 0$  时,  $\left(\frac{F}{F_0}\right)^m = 0$ ,当  $F > 0$  时,  $\left(\frac{F}{F_0}\right)^m = \frac{F}{F_0}$ ;  $Q$  为塑性势函数,当采用相关联流动准则时,  $Q = F$ ,采用不相关联流动准则时,  $Q \neq F$ 。

由于莫尔-库伦准则在作为塑性模型的屈服准则时,其屈服面及在  $\pi$  平面上有导数不连续的角点,在计算时不方便,于是采用德鲁克-普拉格 (D-P) (广义米塞斯) 屈服准则,其在应力空间的曲面及  $\pi$  平面上的轨迹均是光滑的,进行计算时也比较方便。D-P 准则的屈服函数为:

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (17)$$

式中: $I_1, J_2, \alpha, k$  分别为第一应力不变量、第二应力偏量不变量、与黏聚力  $C$  有关的系数、与内摩擦角  $\varphi$  有关的系数,分别为:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_1 + 2\sigma_2 \quad (18)$$

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = \frac{1}{3}(\sigma_1 - \sigma_2)^2 \quad (19)$$

$$\alpha = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3} \sqrt{3 + \sin^2 \varphi}} \quad (20)$$

$$k = \frac{\sqrt{3} C \cos \varphi}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}} \quad (21)$$

根据塑性势理论,与广义米塞斯相关联的流动法则为: $F = Q$ 。在平面应变状态下,

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} = d\lambda \left[ \alpha \delta_{ij} + \frac{S_{ij}}{2\sqrt{J_2}} \right] \quad (22)$$

$$d\varepsilon_{ii}^p = d\varepsilon_v^p = 3\alpha d\lambda \quad (23)$$

则对于黏塑性体,

$$\begin{aligned} d\varepsilon_1^p &= d\lambda \left[ \alpha + \frac{S_1}{2\sqrt{J_2}} \right] = \frac{1}{2H_2} \left(\frac{F}{F_0}\right)^m \frac{\partial F}{\partial \sigma_1} \\ \left[ \alpha + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{3\sqrt{J_2}} \right] &= \frac{1}{2H_2} F \left( \alpha + \frac{\sqrt{3}}{3} \right) \end{aligned} \quad (24)$$

当  $F \leq 0$  时,  $\left(\frac{F}{F_0}\right)^m = 0$ ,改进西元模型变为弹性体与黏弹性体串联,其三维本构方程同式 (14);

当  $F > 0$  时,  $\left(\frac{F}{F_0}\right)^m = \frac{F}{F_0}$ ,且  $F_0 = 1, m = 1$ ,则模型

即为改进西元模型,其三维本构方程为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1(t) &= \frac{\sigma_1 + 2\sigma_2}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{3G_0} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{3G_1}(1 - e^{-\frac{c_1}{H_1}t}) + \\ &\frac{t}{2H_2} F \left( \alpha + \frac{\sqrt{3}}{3} \right) + \frac{F}{2G_2} \left( \alpha + \frac{\sqrt{3}}{3} \right) (1 - e^{-\frac{c_2}{H_3}t}) \end{aligned} \quad (25)$$

于是,不同应力水平下的三维蠕变本构方程均已求得,如式 (26) 所示:

$$\varepsilon(t)=\frac{\sigma_1+2\sigma_2}{9K}+\frac{\sigma_1-\sigma_2}{3G_0}+\frac{\sigma_1-\sigma_2}{3G_1}(1-e^{-\frac{c_1}{H_1}t})(\text{低应力})$$

$$\varepsilon(t)=\frac{\sigma_1+2\sigma_2}{9K}+\frac{\sigma_1-\sigma_2}{3G_0}+\frac{\sigma_1-\sigma_2}{3G_1}(1-e^{-\frac{c_1}{H_1}t})+\frac{F}{2G_2}(\alpha+\frac{\sqrt{3}}{3})(1-e^{-\frac{c_2}{H_3}t})(\text{较高应力})$$

$$\varepsilon(t)=\frac{\sigma_1+2\sigma_2}{9K}+\frac{\sigma_1-\sigma_2}{3G_0}+\frac{\sigma_1-\sigma_2}{3G_1}(1-e^{-\frac{c_1}{H_1}t})+\frac{t}{2H_2}F(\alpha+\frac{\sqrt{3}}{3})+\frac{F}{2G_2}(\alpha+\frac{\sqrt{3}}{3})(1-e^{-\frac{c_2}{H_3}t})(\text{高应力})$$

(26)

其参数辨识采用夏才初提出的对统一流变基

本模型的参数辨识方法<sup>[4]</sup>,得到不同围压下三维

本构方程参数,如表 2~4。将其所得本构方程绘制的

曲线与试验数据点进行对比分析,如图 6 所示。

表 2 100 kPa 围压下的三维本构方程参数表

Table 2 Three-dimensional constitutive equation parameters table under 100 kPa confining pressure							
应力	弹性参数		黏弹性参数		黏塑性参数	黏弹塑性参数	
$\sigma/\text{kPa}$	$G_0/\text{kPa}$	$K/\text{kPa}$	$G_1/\text{kPa}$	$H_1/(\text{kPa}\cdot\text{h}^{-1})$	$H_2/(\text{kPa}\cdot\text{h}^{-1})$	$G_2/\text{kPa}$	$H_3/(\text{kPa}\cdot\text{h}^{-1})$
43.33	103.39	252.73	1 579.89	2 330.88	—	—	—
93.33	114.55	280.00	1 579.89	2 330.88	—	654.27	1 931.15
143.33	120.48	294.52	1 579.89	2 330.88	—	1 105.27	11 555.40
193.33	109.30	267.18	1 579.89	2 330.88	—	1 040.12	7 944.04
243.33	90.49	221.19	1 579.89	2 330.88	—	526.10	8 709.08
293.33	66.83	163.36	1 579.89	2 330.88	—	392.25	1 336.33
376.67	32.89	80.40	1 579.89	2 330.88	—	399.72	1 537.96
460.00	—	—	—	—	729.53	—	—
平均值	91.13	222.77	—	—	—	686.29	5 502.33

表 3 200 kPa 围压下的三维本构方程参数表

Table 3 Three-dimensional constitutive equation parameters table under 200 kPa confining pressure							
应力	弹性参数		黏弹性参数		黏塑性参数	黏弹塑性参数	
$\sigma/\text{kPa}$	$G_0/\text{kPa}$	$K/\text{kPa}$	$G_1/\text{kPa}$	$H_1/(\text{kPa}\cdot\text{h}^{-1})$	$H_2/(\text{kPa}\cdot\text{h}^{-1})$	$G_2/\text{kPa}$	$H_3/(\text{kPa}\cdot\text{h}^{-1})$
29.19	27.34	117.90	491.11	1 285.86	—	—	—
76.67	48.40	118.32	491.11	1 285.86	—	79.19	683.38
135.00	56.63	138.43	491.11	1 285.86	—	34.59	128.45
170.83	43.43	106.16	491.11	1 285.86	—	37.21	93.82
228.83	27.81	67.98	491.11	1 285.86	—	32.43	68.67
251.67	—	—	491.11	1 285.86	571.43	—	—
平均值	40.72	109.76	—	—	—	45.86	243.58

表 4 300 kPa 围压下的三维本构方程参数表

Table 4 Three-dimensional constitutive equation parameters table under 300 kPa confining pressure							
应力	弹性参数		黏弹性参数		黏塑性参数	黏弹塑性参数	
$\sigma/\text{kPa}$	$G_0/\text{kPa}$	$K/\text{kPa}$	$G_1/\text{kPa}$	$H_1/(\text{kPa} \cdot \text{h}^{-1})$	$H_2/(\text{kPa} \cdot \text{h}^{-1})$	$G_2/\text{kPa}$	$H_3/(\text{kPa} \cdot \text{h}^{-1})$
29.16	14.29	34.92	305.64	1 485.19	—	—	—
137.50	18.98	46.40	305.64	1 485.19	—	57.01	183.11
245.83	23.08	56.41	305.64	1 485.19	—	51.98	198.88
354.16	31.55	77.13	305.64	1 485.19	—	69.20	220.11
487.50	40.72	99.54	305.64	1 485.19	—	83.85	294.36
570.83	27.89	68.18	305.64	1 485.19	—	65.44	142.61
862.50	—	—	—	—	90.74	—	—
平均值	26.09	63.77	—	—	—	65.50	207.81

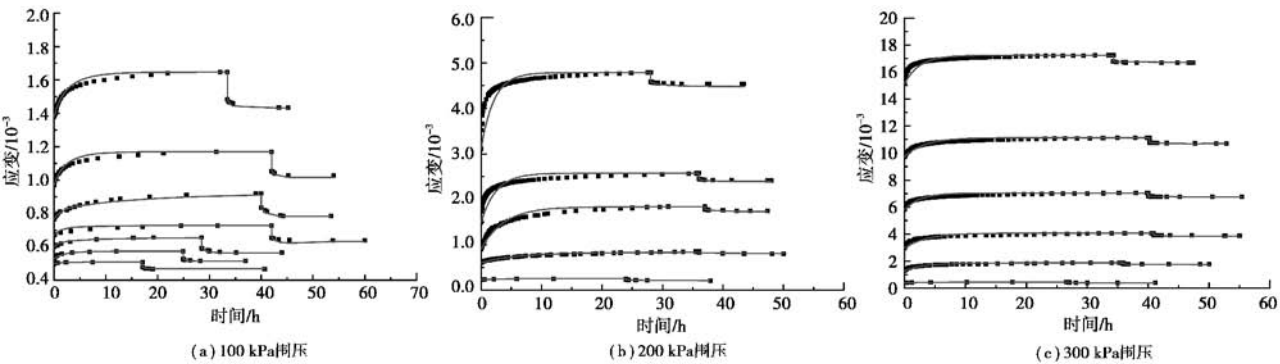


图 6 不同围压下模型曲线与试验数据点对比

Fig. 6 Model curve and test data points contrast under different confining pressure

图 6 为不同围压下模型曲线与试验数据点对比图。从图中可以看出,模型曲线与试验数据点拟合得较好,说明通过辨识后选取的模型较好。

3 结论

在蠕变试验基础上建立了能够较好描述西安地区地裂缝带 Q<sub>3</sub>原状黄土蠕变特性的本构模型,即“改进西元模型”。基于统一流变力学模型理论,对西安地区地裂缝带 Q<sub>3</sub>原状黄土的蠕变本构方程进行辨识,得到以下结论:

(1)首先对“改进西元模型”的两种蠕变曲线形式的一维本构方程分别进行求解辨识。根据试验结果,选择了适于西安地区地裂缝带 Q<sub>3</sub>原状黄土蠕变曲线特征的一维本构方程:

$$\varepsilon(t)=\frac{\sigma_0}{E_0}+\frac{\sigma_0}{E_1}\{1-e^{-\frac{E_1}{\eta_1}t}\} \text{ (低应力)}$$
$$\varepsilon(t)=\frac{\sigma_0}{E_0}+\frac{\sigma_0}{E_1}\{1-e^{-\frac{E_1}{\eta_1}t}\}+\frac{\sigma_0-\sigma_{s2}}{E_2}\{1-e^{-\frac{E_2}{\eta_3}t}\} \text{ (较$$

高应力)

$$\varepsilon(t)=\frac{\sigma_0}{E_0}+\frac{\sigma_0}{E_1}\{1-e^{-\frac{E_1}{\eta_1}t}\}+\frac{\sigma_0-\sigma_{s1}}{\eta_2}t+\frac{\sigma_0-\sigma_{s2}}{E_2}\{1-e^{-\frac{E_2}{\eta_3}t}\} \text{ (高应力)}$$

(2)考虑到实际工程问题及室内试验状态均为三维状态,在已知一维本构方程的基础上,屈服准则及相关联流动法则,得到了西安地区地裂缝带 Q<sub>3</sub>原状黄土的三维蠕变本构方程:

$$\varepsilon(t)=\frac{\sigma_1+2\sigma_2}{9K}+\frac{\sigma_1-\sigma_2}{3G_0}+\frac{\sigma_1-\sigma_2}{3G_1}(1-e^{-\frac{c_1}{H_1}t}) \text{ (低应力)}$$
$$\varepsilon(t)=\frac{\sigma_1+2\sigma_2}{9K}+\frac{\sigma_1-\sigma_2}{3G_0}+\frac{\sigma_1-\sigma_2}{3G_1}(1-e^{-\frac{c_1}{H_1}t})+\frac{F}{2G_2}(\alpha+\frac{\sqrt{3}}{3})(1-e^{-\frac{c_2}{H_3}t}) \text{ (较高应力)}$$

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_2}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{3G_0} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{3G_1}(1 - e^{-\frac{c_1}{H_1}t}) + \frac{t}{2H_2}F\left(\alpha + \frac{\sqrt{3}}{3}\right) + \frac{F}{2G_2}\left(\alpha + \frac{\sqrt{3}}{3}\right)(1 - e^{-\frac{c_2}{H_2}t})$$
 (高应力) (3)

采用夏才初提出的参数辨识方法对本构模型方程的参数进行辨识,从而绘制出了本构方程曲线,与试验所得蠕变曲线进行对比分析,模型曲线与试验数据点拟合得较好,说明通过辨识后选取的模型较好,进而表明所选本构方程较为准确地反映了西安地区地裂缝带 Q<sub>3</sub>原状黄土的流变性能。

参考文献(References)

[1] 何青峰. 延安 Q<sub>2</sub>黄土的力学及流变特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2008. (He Qingfeng. Research on mechanical and rheological properties of Yan'an Q<sub>2</sub> loess[D]. Xi'an: Chang'an university, 2008. (in Chinese))

[2] 周德培. 流变力学原理及其在岩土工程中的应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1995. (Zhou Depei. The rheological mechanics principle and its application in the geotechnical engineering [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1995. (in Chinese))

[3] 夏才初, 王晓东, 许崇帮, 等. 用统一流变力学模型理论辨识流变模型的方法和实例[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 426-432. (Xia Caichu, Wang Xiaodong, Xu Songbang, et al. The method and instance to identify the rheological model with the theory of uniform rheological mechanics model[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 426-432. (in Chinese))

[4] 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): 53-55. (Xia Caichu, Xu Chongbang, Wang Xiaodong, et al. The method for determining uniform rheological mechanics model parameters[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 53-55. (in Chinese))

[5] 夏才初, 孙钧. 统一流变力学模型的若干问题研究[A]//第六次全国岩石力学与工程学术大会论文

集, 2000, 10:199-202. (Xia Caichu, Sun Jun. Study several issues on the uniform rheological mechanics model [C]//Sixth National Rock Mechanics and Engineering Academic Conference Proceedings [C]. 2000, 1010:199-202. (in Chinese))

[6] 郭增玉, 刘守慧, 张朝鹏, 等. 高湿度 Q<sub>2</sub>黄土的非线性流变本构模型及参数[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 780-784. (Guo Zengyu, Liu Shouhui, Zhang Chaopeng. Nonlinear rheological constitutive model and parameters of the high moisture Q<sub>2</sub> loess[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 780-784. (in Chinese))

[7] 丁志坤, 吕爱钟. 岩石黏弹性非定常蠕变方程的参数辨识[J]. 岩土力学, 2004, 25(增): 37-40. (Ding Zhikun, Lü Aizhong. The rock parameters identification of the visco-elastic unsteady creep equations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Supp.): 37-40. (in Chinese))

[8] 王艳婷. 黄土流变特性试验分析及本构模型的研究[D]. 西安: 长安大学, 2006. (Wang Yanting. The loess rheological properties test analysis and the study of constitutive model[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006. (in Chinese))

[9] 李良全, 徐卫亚, 李伟. 基于西元模型的非线性黏弹塑性流变模型[J]. 力学学报, 2009, 41(5): 671-679. (Li Liangquan, Xu Weiya, Li Wei. Based on the glue in the model of the nonlinear elastoplastic rheological model [J]. Journal of Mechanics, 2009, (5): 671-679. (in Chinese))

[10] 王芝银, 李云鹏. 岩体流变理论及其数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2008. (Wang Zhiyin, Li Yunpeng. Rock mass rheological theory and numerical simulation [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese))

[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. (Sun Jun. Geotechnical material rheological and its engineering application[M]. Beijing: China Building Industry Press, 1999. (in Chinese))

[12] 郑颖人, 孔亮. 岩土塑性力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (Zheng Yingren, Kong Liang. Geotechnical plastic mechanics [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2010. (in Chinese))