

DOI: 10.11779/CJGE201610003

锚-土界面剪切蠕变试验及其经验模型研究

陈昌富, 刘俊斌, 徐优林, 张根宝

(湖南大学岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

摘要: 为了研究土层灌浆锚杆锚-土界面剪切蠕变特性, 提出了一种新颖的锚-土界面蠕变试验方法, 并设计制作了相应的试验装置。通过分级加载蠕变试验, 得到了锚-土界面剪切蠕变曲线, 采用“陈氏加载法”将分级加载曲线转化为分别加载曲线。分析试验结果发现, 锚-土界面衰减蠕变阶段的位移-应力关系采用幂函数、位移-时间关系采用改进双曲线函数拟合效果最好。由此建立了适合锚-土界面衰减蠕变阶段的经验蠕变模型, 该模型可更好地拟合并预测衰减蠕变曲线。同时, 在该衰减蠕变模型基础上, 引入 Kachanov 损伤因子考虑加速蠕变损伤, 建立了适合锚-土界面加速蠕变阶段的加速(损伤)蠕变模型。

关键词: 锚杆; 锚-土界面; 蠕变模型; 损伤蠕变

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)10-1762-07

作者简介: 陈昌富(1963-), 男, 湖南祁东人, 博士, 教授, 主要从事边坡工程及支护工程、地基处理等方面的研究。

E-mail: cfchen@163.com。

Tests on shearing creep of anchor-soil interface and its empirical model

CHEN Chang-fu, LIU Jun-bin, XU You-lin, ZHANG Gen-bao

(Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: A novel creep test method for anchor-soil interface is proposed to investigate the shearing creep characteristic of anchor-soil interface for grouted anchors in soil. The corresponding test apparatus is also designed and manufactured. The shearing creep curves of anchor-soil interface in multi-stage loading are obtained, and they can be transformed to the creep curve at each specific loading level by employing Chen's method. The results suggest that the power function and modified-hyperbolic function demonstrate good performance in the fitting of displacement-stress and displacement-time relationships respectively. A novel empirical creep model for anchor-soil interface is established based on these fitting techniques, capable of fitting and predicting the decayed creep curve at each stress level in a better agreement. On the basis of this decayed creep model, the accelerating (damage) creep model applicable to accelerating creep phase is proposed by introducing the Kachanov damage factor to represent the accelerating creep damage for anchor-soil interface.

Key words: anchor; anchor-soil interface; creep model; creep damage

0 引言

土层灌浆锚杆广泛应用于岩土工程各领域的加固和支护, 其锚固能力决定于两个界面——即杆体(钢筋或钢绞线)-锚固体(水泥砂浆)界面和锚固体-土体界面(简称锚-土界面)的抗剪切性能。由于杆体-锚固体之间粘结强度高, 所以土层锚杆的锚固能力主要取决于锚-土界面的抗剪性能。

大量工程实践表明: 预应力土层锚杆几乎都存在不同程度的应力松弛和蠕变现象。为此, 国内外学者^[1-5]通过现场试验和理论分析研究了土层锚杆的蠕变特性及相应的蠕变模型。但深入分析发现, 现有蠕变试验得到的土层锚杆的蠕变, 实际上是锚-土界面蠕变和周围土体蠕变的综合, 由此建立的蠕变模型

自然是这两者的综合反映。在对实际锚固工程的蠕变进行理论和数值分析时, 若锚杆的蠕变模型采用上述模型, 同时还考虑其周围土体的蠕变, 则会高估锚固工程的蠕变; 若不考虑土体的蠕变, 则可能低估锚固工程的蠕变。因此, 若要深入了解锚固工程的蠕变规律, 则应对锚-土界面和周围土体的蠕变分别进行深入研究。

有关土体蠕变的研究成果相对较多, 国内外建立了各种蠕变模型, 主要分为两大类^[6]: 元件蠕变模型和经验蠕变模型。元件蠕变模型具有较明确的物理意义, 但经验蠕变模型因其能较好地描述非线性蠕变,

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878082, 41572298)

收稿日期: 2015-09-08

应用较广。比较有代表性的经验蠕变模型有 Singh-Mitchell 模型^[7]、Mesri 模型^[8]以及卢萍珍等^[9]提出的改进模型。

但是, 目前针对锚-土界面的蠕变试验和蠕变模型的研究成果很少。为此, 本文提出一套新的锚-土界面室内剪切蠕变试验方法和装置; 通过室内锚-土界面的剪切蠕变试验, 获得不同荷载下剪切蠕变曲线; 根据试验结果, 分别建立出衰减蠕变阶段的经验蠕变模型和加速蠕变阶段的损伤蠕变模型; 最后, 根据试验结果验证模型的预测精度。

1 锚-土界面剪切蠕变试验

1.1 试验装置及试样制作

为测试锚-土界面的剪切蠕变特性, 自行设计并制作了如图 1 所示的蠕变试验装置, 它主要包括试验架、加载系统和量测系统。量测系统由位移传感器、数据采集器和计算机组成, 试验时, 位移传感器实时量测锚杆位移, 并通过数据采集器采集到计算机中。

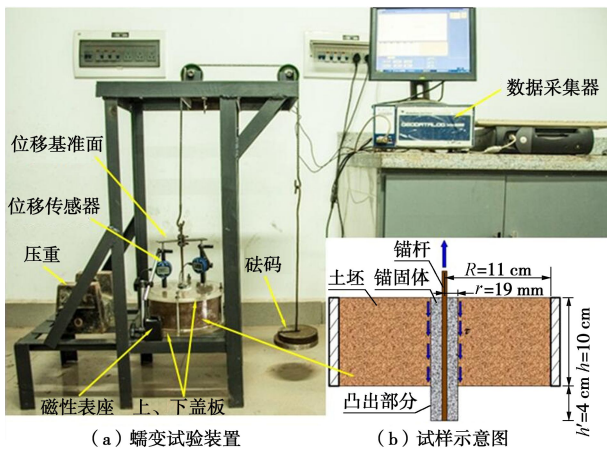


图 1 锚-土界面蠕变试验系统

Fig. 1 Creep test system of anchor-soil interface

本次试验用土取自湘江河漫滩淤泥质土。经测定^[10]: 土粒相对密度为 2.7, 液限为 45.2%, 塑限为 25.6%。属于低液限黏土。

本试验所用试样(如图 1 (b))采用自行研发的制样装置和方法^[11-13]制作, 先制备试样的土坯, 再在土坯中制作锚固体。本试验共需要制作 2 个尺寸和性质相同的平行试样, 分别用来做瞬时拉拔和蠕变试验。制好后的 2 个试样直径为 22 cm、高度为 10 cm, 锚固体直径为 3.8 cm, 土体的密度为 1.91 g/cm³、含水率为 32.2%和 32.1%, 其不固结不排水抗剪强度指标 $c_u=42.98$ kPa, $\phi_u=9.79^\circ$ 。

1.2 试验方法

(1) 试验采用分级加载方式, 分 8 级加载, 每级荷载大小根据预先制作的试样测试得到的瞬时极限抗拔荷载来确定。采用文献^[13]方法测得锚-土界面瞬时

极限抗拔荷载为 0.20 kN, 对应的锚-土界面瞬时抗剪强度(为拉拔荷载与锚-土界面的剪切面面积之比) $\tau_0=16.76$ kPa。8 级加载值分别为 0.046, 0.066, 0.086, 0.106, 0.126, 0.146, 0.166, 0.186 kN, 每级加载对应的剪切应力: $\tau_1=3.86$ kPa, $\tau_2=5.53$ kPa, $\tau_3=7.21$ kPa, $\tau_4=8.88$ kPa, $\tau_5=10.56$ kPa, $\tau_6=12.24$ kPa, $\tau_7=13.91$ kPa 和 $\tau_8=15.59$ kPa。

(2) 将预先制作的用于蠕变试验的试样按照图 1 所示固定于试验架上, 安装并调整好测试系统和加载装置; 按照上述设定的各级加载值逐级加载, 若在本级荷载下连续 24 h 内蠕变位移增量小于 0.01 mm^[6]则施加下一级荷载, 直至试样达到蠕变破坏。

(3) 由于蠕变试验时间较长, 为防止试样土体水分蒸发, 土体暴露部分以及可能引起水分蒸发的缝隙均用凡士林密封, 同时保证实验室温度基本恒定。

2 试验结果

蠕变试验得到的不同剪切应力作用下锚-土界面蠕变分级加载曲线如图 2 所示。

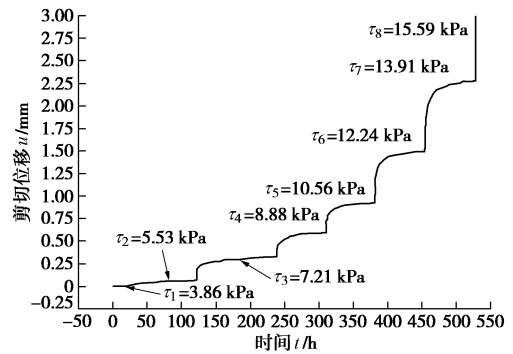


图 2 锚-土界面剪切蠕变分级加载曲线

Fig. 2 Shearing creep curve of anchor-soil interface

运用非线性处理方法“陈氏加载法”^[14]对蠕变分级加载曲线进行处理, 得到分别加载下的曲线如图 3 (其中 τ_8 荷载下加速蠕变曲线还可参见图 7) 所示。由于各级荷载经历时间不等, 在数据处理过程中, 先采用文献^[15]方法, 将较短的曲线按其稳定后的曲线

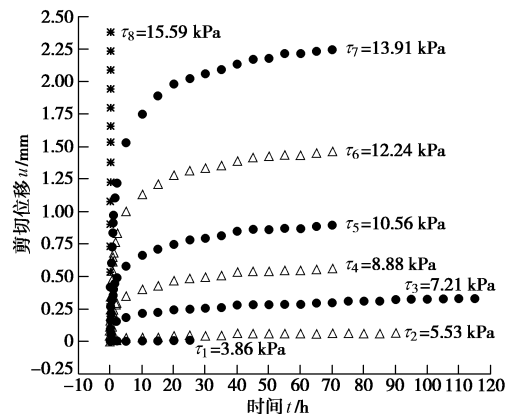


图 3 分别加载剪切蠕变曲线

Fig. 3 Shearing creep curves revised by Chen's method

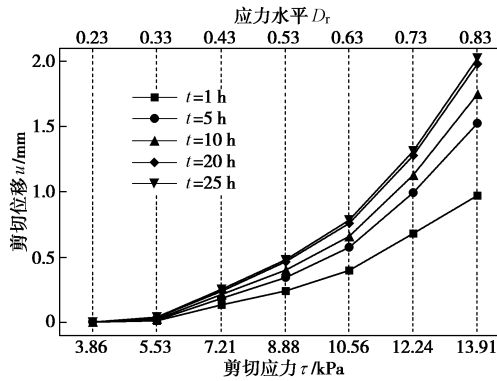


图4 位移-剪应力等时曲线

Fig. 4 Isochronous curves of displacement-shearing stress

斜率延长至与最长曲线等长后,再按照“陈氏加载法”处理。“陈氏加载法”原理详见文献[14]。在图3中 $t=1, 5, 10, 20, 25$ h 处作平行于纵轴的直线与各级蠕变曲线相交,利用各交点的位移、应力值可绘制出位移-应力等时曲线,如图4。

由图3可知,剪切位移-时间曲线在衰减蠕变阶段(即第1~7级荷载)时,其蠕变位移初期增长很快,后期趋近于一稳定值 u_{∞} ,该值由应力水平所决定。进入加速蠕变阶段(即第8级荷载)后,蠕变位移将快速增加直至破坏。而由图4可知,位移-应力关系始终呈现非线性关系,因此利用传统的元件模型理论建立一个统一的适应各级应力水平的蠕变模型较复杂,不如采用经验模型建模简单方便。

3 经验蠕变模型方程建立

根据上述试验结果(图3)发现,锚-土界面蠕变可分为衰减蠕变(如第1~7级荷载蠕变曲线)和加速蠕变(如第8级荷载蠕变曲线)两个阶段,为此,以下分别建立其蠕变模型。

3.1 衰减蠕变阶段的蠕变模型

由各级加载蠕变曲线(图2和图3)可知,锚-土界面剪切蠕变位移不仅是时间 t 的函数,而且还是剪切应力水平 D_r (D_r 为各级荷载对应的剪应力与锚-土界面瞬时抗剪强度的比值,即 $D_{r,i}=\tau_i/\tau_0, i=1, 2, \dots, 8$)的函数,因此锚-土界面蠕变位移可表示为如下形式:

$$u = f(D_r) \cdot g(t) \quad (1)$$

分别考察图3和图4曲线的变化规律发现,式(1)中 $f(D_r)$ 和 $g(t)$ 可分别采用幂函数和改进双曲线函数形式:

$$\left. \begin{aligned} f(D_r) &= B_1 \cdot D_r^n \\ g(t) &= \frac{B_2 \sqrt{t}}{\sqrt{t} + T} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

将其代入式(1),可得锚-土界面在衰减蠕变阶段的经验蠕变模型为

$$u = BD_r^n \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{t} + T} \quad (3)$$

式中, $B (=B_1B_2)$, n , T 为模型参数。

一个好的经验蠕变模型不仅应有很好的拟合功能,而且应具备较强的扩展(即预测)性能。为此,本文先取图3中 τ_1, τ_3, τ_5 和 τ_7 荷载对应的蠕变试验曲线来建立锚-土界面蠕变模型;再用建立的蠕变模型计算 τ_2, τ_4 和 τ_6 荷载的预测蠕变曲线;然后用 τ_2, τ_4 和 τ_6 荷载的试验蠕变曲线检验所建蠕变模型的预测精度。

为便于回归分析,将式(3)改写成如下线性方程:

$$\frac{\sqrt{t}}{u} = \frac{1}{BD_r^n} \sqrt{t} + \frac{T}{BD_r^n} \quad (4)$$

因衰减蠕变最终位移 $u_{\infty} = BD_r^n$,故式(4)简化为

$$\frac{\sqrt{t}}{u} = \frac{\sqrt{t}}{u_{\infty}} + \frac{T}{u_{\infty}} \quad (5)$$

由 τ_1, τ_3, τ_5 和 τ_7 荷载下的蠕变曲线(图3)变换得 $\sqrt{t}/u - \sqrt{t}$ 关系如图5。

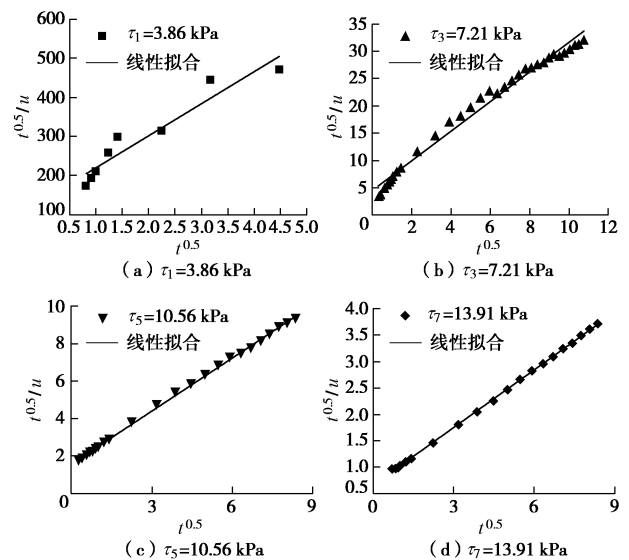


图5 $\sqrt{t}/u - \sqrt{t}$ 关系图

Fig. 5 Relationship curves of \sqrt{t}/u and \sqrt{t}

由图5可发现,各级荷载下的 $\sqrt{t}/u - \sqrt{t}$ 线性关系良好, $1/u_{\infty}$, T/u_{∞} 分别为拟合直线的斜率和截距,简单换算可得 u_{∞} 和 T 值(详见表1)。各级荷载下的 T 值稍有差异,在此取平均值。

表1 本文蠕变模型的过程参数

Table 1 Progress data of creep model

剪切应力 τ /kPa	应力水平 D_r	$\frac{1}{u_{\infty}}$	$\frac{T}{u_{\infty}}$	u_{∞}	T	\bar{T}
3.86	0.23	82.1056	139.0466	0.0122	1.6935	1.7283
7.21	0.43	2.7038	4.6444	0.3698	1.7177	1.7283
10.56	0.63	0.9409	1.5751	1.0628	1.6740	1.7283
13.91	0.83	0.3632	0.6639	2.7532	1.8279	1.7283

由表 1 绘出 $u_\infty - D_r$ 关系曲线并以幂函数进行拟合 (图 6), 得到 $u_\infty = 5.0958D_r^{3.3200}$ 。

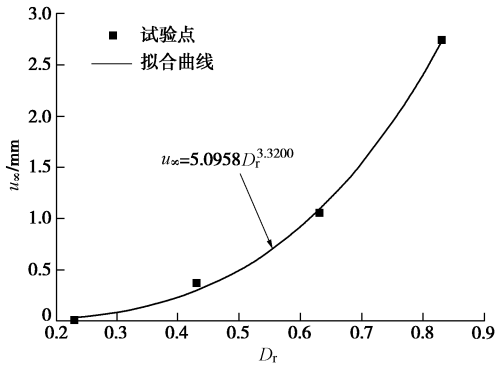


图 6 $u_\infty - D_r$ 关系曲线

Fig. 6 Relationship curve of u_∞ and D_r

于是, 建立的衰减蠕变阶段的锚-土界面剪切蠕变模型为

$$u = 5.0958D_r^{3.3200} \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{t} + 1.7283} \quad (6)$$

3.2 加速蠕变阶段的蠕变模型

上节建立了衰减蠕变阶段的蠕变模型, 对于加速蠕变阶段 (τ_8 级荷载), 则引入损伤力学原理来建模。

目前研究^[16-18]认为, 小于屈服应力时, 蠕变逐渐衰减直至稳定, 损伤不会发生; 超过屈服应力后才会产生损伤变形, 最终导致加速蠕变破坏。因此, 加速蠕变阶段的蠕变变形 u' 可视为衰减蠕变变形 u 与损伤变形 u_s 的迭加, 即

$$u' = u + u_s \quad (7)$$

衰减蠕变变形 u 已在上文中确定, 而损伤变形 u_s 可表示为

$$u_s = kt \quad (8)$$

式中, k 为损伤变形发展速率, 是与蠕变时效损伤变量 ω 成正比关系的变量, 损伤程度越大, 则蠕变发展越快, 假定

$$k = k_0 / (1 - \omega) \quad (9)$$

那么加速蠕变阶段的蠕变方程可表示为

$$u' = BD_r^n \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{t} + T} + \frac{k_0}{1 - \omega} t \quad (10)$$

因此, 问题的关键在于蠕变时效损伤变量 ω 表达式的确定。引入 Kachanov 蠕变损伤率表达式^[19]:

$$\dot{\omega} = A\tau^V (1 - \omega)^{-V} \quad (11)$$

式中, A, V 均为材料性能参数。

设破坏时间为 t_0 , 对应的 $\omega=1$, 对式 (11) 从 0 到 t_0 积分得

$$t_0 = [A(V+1)\tau^V]^{-1} \quad (12)$$

对式 (11) 从 0 到 t 积分, 并将式 (12) 代入可得蠕变时效损伤变量 ω 的表达式

$$\omega = 1 - (1 - t/t_0)^{\frac{1}{V+1}} \quad (13)$$

将该式代入式 (10) 得加速蠕变方程最终表达式:

$$u' = BD_r^n \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{t} + T} + k_0 \left(1 - \frac{t}{t_0}\right)^{-\alpha} t \quad (14)$$

式中 B, n, T 为已知的衰减蠕变参数, 与式 (6) 同值; k_0, t_0, α ($=1/(V+1)$) 为加速 (损伤) 蠕变参数, 由加速蠕变曲线 (即图 3 中 τ_8 级荷载蠕变试验曲线) 确定。

为更好辨识, 将 τ_8 级荷载 (其对应的应力水平 $D_{r,8} = \tau_8/\tau_0 = 0.93$) 对应的加速蠕变试验曲线从图 3 中分离出来, 如图 7。由此可回归得到 k_0, t_0, α 参数值, 将之代入式 (14), 同时将式 (6) 中 B, n, T 值以及 $D_{r,8}$ 值代入, 可得锚-土界面加速蠕变阶段损伤蠕变模型:

$$u' = \frac{4.0047\sqrt{t}}{\sqrt{t} + 1.7283} + 5.8996 \left(1 - \frac{t}{0.8322}\right)^{-0.6308} t \quad (15)$$

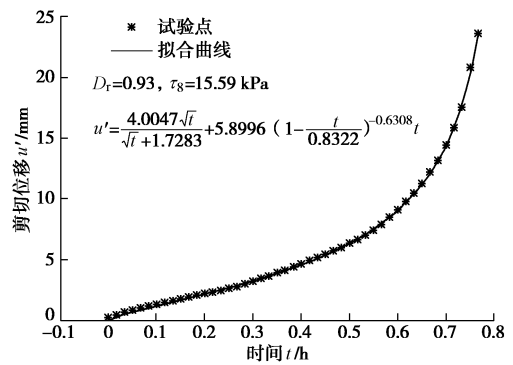


图 7 加速蠕变阶段试验曲线与模型曲线

Fig. 7 Test data and model curve at accelerating stage

由图 7 可知, 本文建立的加速 (损伤) 蠕变模型计算曲线与试验曲线吻合很好。

4 本文模型与其他模型对比

下面将本文模型与几个典型的经验蠕变模型 (即 Singh-Mitchell 模型^[7]、Mesri 模型^[8]和文献[9]模型) 进行对比分析, 以证明本文模型的合理性和可靠性。

4.1 拟合效果对比

同样, 取图 3 中 τ_1, τ_3, τ_5 和 τ_7 荷载对应的蠕变试验曲线来建模, 分别得到用于描述锚-土界面衰减蠕变规律的 Singh-Mitchell 模型、Mesri 模型和文献[9]模型以及其模型曲线如图 8 (b) ~ 图 8 (d) 所示。图 8 (a) 示出了本文建立的经验蠕变模型及其模型曲线。

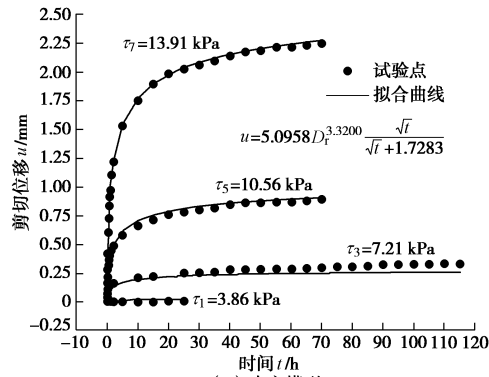
表 2 给出了本文模型与上述几个典型蠕变模型的拟合曲线与试验曲线的平均绝对误差。

分析图 8 和表 2 可知, 本文模型无论是在蠕变位移的拟合精度上, 还是在对蠕变曲线形状的刻画上, 均优于上述 3 种典型的经验蠕变模型。

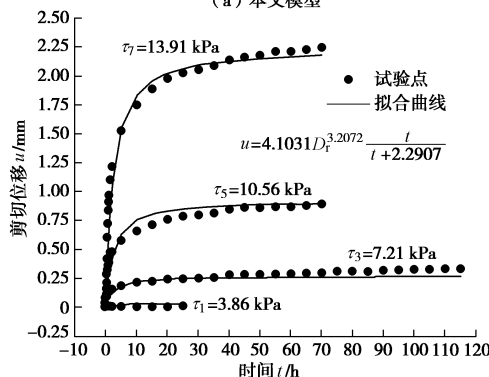
表 2 拟合曲线与试验曲线平均绝对误差

Table 2 Mean deviations between fitting curves and test data

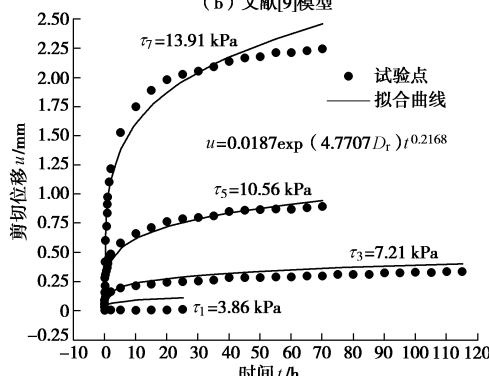
蠕变模型	平均绝对误差/mm			
	τ_1	τ_3	τ_5	τ_7
本文模型	0.01	0.04	0.02	0.04
文献[9]模型	0.01	0.04	0.08	0.13
Singh-Mitchell 模型	0.06	0.04	0.03	0.11
Mesri 模型	0.07	0.08	0.03	0.11



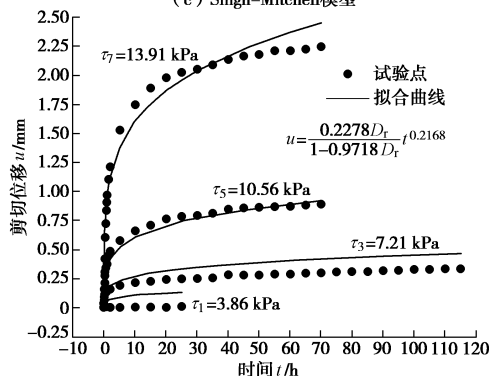
(a) 本文模型



(b) 文献[9]模型



(c) Singh-Mitchell模型



(d) Mesri模型

图 8 各模型拟合曲线与试验曲线对比

Fig. 8 Comparison between fitting curves and test data

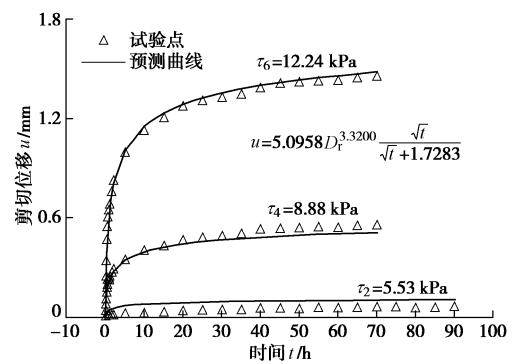
文献[9]模型的拟合精度和蠕变曲线形状刻画虽不如本文模型，但优于 Singh-Mitchell 模型和 Mesri 模型（参见图 8）。比较图 8 (a) 和图 8 (b) 可知，在前两级应力水平下，本文模型和文献[9]模型的误差相差不大，但在高应力水平下，本文模型的优势开始显现：拟合误差小于文献[9]模型（表 2），且蠕变曲线形状与实际曲线几乎完全吻合。

由图 8 (c)、8 (d) 和表 2 可知，无论是 Singh-Mitchell 模型还是 Mesri 模型，对试验曲线（尤其是在高应力水平时）的拟合精度和形状刻画均较差。由此说明：锚-土界面的位移-应力关系（图 4）采用指数或双曲线函数不如采用幂函数合适；位移-时间关系（图 3）采用幂函数不如采用双曲线函数合适，因为幂函数型位移-时间关系曲线将随时间增长而持续上升，这一点在应力水平较高时显得尤为明显，这显然不符合衰减蠕变的特点。

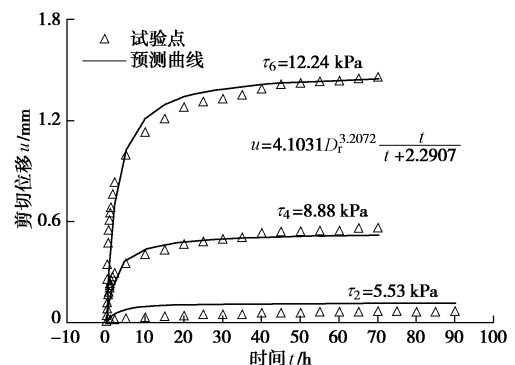
由式 (1) ~ (3) 知，本文模型中位移-应力关系采用幂函数，位移-时间关系采用改进双曲线函数，由此耦合得到的蠕变模型曲线随时间增长而减速增加，并趋于稳定，这与试验曲线的衰减蠕变特征吻合，因此，它对试验曲线（尤其高应力水平时）拟合效果最佳。

4.2 预测效果对比

将由 4.1 节建立的 Singh-Mitchell 模型、Mesri 模型和文献[9]模型以及本文模型对 τ_2 、 τ_4 和 τ_6 荷载下的蠕变曲线进行预测，预测结果如图 9，预测误差见表 3。



(a) 本文模型



(b) 文献[9]模型

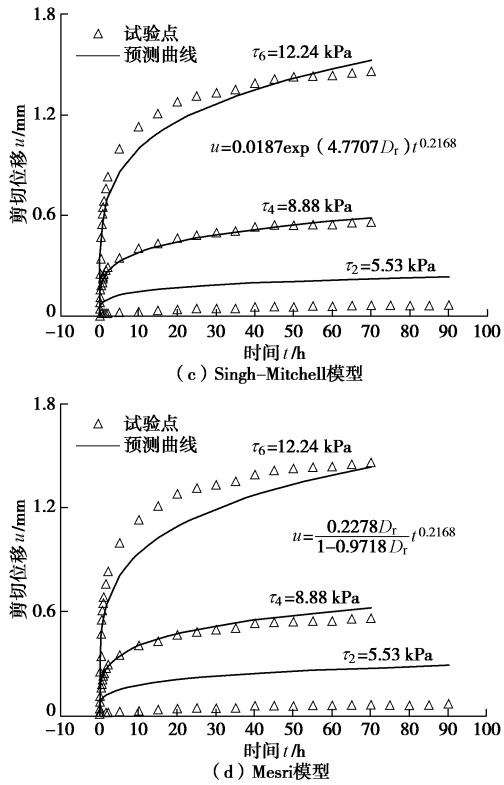


图 9 各模型预测曲线与试验曲线对比

Fig. 9 Comparison between predicted curves and test data

表 3 预测曲线与试验曲线平均绝对误差

Table 3 Mean deviations between predicted curves and test data

蠕变模型	平均绝对误差/mm		
	τ_2	τ_4	τ_6
本文模型	0.04	0.03	0.02
文献[9]模型	0.04	0.05	0.11
Singh-Mitchell 模型	0.12	0.01	0.07
Mesri 模型	0.15	0.02	0.11

由图9和表3可知,与Singh-Mitchell模型和Mesri模型相比,无论是在预测精度还是在蠕变曲线形状的刻画上,本文模型的预测能力明显优于前两者;而本文模型与文献[9]模型相比,在低应力水平下,两者预测效果相差不大(本文模型预测效果略好些),但在高应力水平下,本文模型预测效果明显占优(尤其是在蠕变曲线形状刻画上)。

根据以上分析,本文建立的锚-土界面经验蠕变模型不仅对蠕变试验曲线拟合精度高,而且具备较强的预测能力,也就是说,根据有限级加载蠕变试验曲线回归得到的蠕变模型可预测任意应力水平下蠕变曲线,这说明由有限试验得到的经验蠕变模型完全可用于解决工程实际问题。

5 结 论

(1)现有土层锚杆蠕变试验得到的锚杆蠕变是锚

-土界面剪切蠕变和周围土体蠕变的综合反映。为深入了解锚杆或者锚固工程的蠕变机理,本文提出了应对锚-土界面和周围土体的蠕变特性和蠕变模型分别展开研究的思路,并据此提出了一套新的锚-土界面剪切蠕变测试方法和装置。

(2)根据锚-土界面在衰减蠕变阶段的蠕变规律,采用幂函数来描述蠕变位移-应力关系,采用经改进的双曲线函数来描述蠕变位移-时间关系,并将两者耦合,构建了具有良好拟合和预测性能的锚-土界面衰减蠕变经验模型。

(3)将衰减蠕变经验模型与可描述加速蠕变的损伤蠕变模型迭加,形成了一个新的加速蠕变模型,克服了传统经验模型难以描述加速蠕变的缺点,从而可以模拟蠕变全过程。

(4)本文采用的建模方法是,先根据一部分应力水平下的试验曲线建模,再用另一部分应力水平下的试验曲线来验证和检验所建模型。基于此法建立的锚-土界面经验蠕变模型具有良好的预测性能,可较好地预测实际工程中任意荷载下的蠕变位移,提高了所建模型的工程应用可靠性,可为锚固工程的设计计算及长期性能评估提供较可靠的理论依据。

(5)本文模型适用于黏土层中采用钻孔无压力注浆方式施工的黏结型锚杆,在下一步的试验研究中将考虑土类、钻孔方式、注浆工艺参数等因素的影响,力求得到更具针对性和普适性的蠕变模型。

参考文献:

[1] 侯学渊, 李象范. 饱和软地层中土锚的时间效应[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1987, 15(2): 147 - 156. (HOU Xue-yuan, LI Xiang-fan. Time-effect of soil anchors in submerged soft ground[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 1987, 15(2): 147 - 156. (in Chinese))

[2] 许宏发, 卢红标, 钱七虎. 土层灌浆锚杆的蠕变损伤特性研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 61 - 63. (XU Hong-fa, LU Hong-biao, QIAN Qi-hu. Creep damage effects of pulling grouting anchor in soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(1): 61 - 63. (in Chinese))

[3] GURINSKY M A, MICHAEL A. Long-term strength of prestressed ground anchors in creep-sensitive soils[J]. Geotechnical Special Publication, ASCE, 2002, 116(I): 37 - 52.

[4] KIM NAK-KYUNG. Performance of tension and compression anchors in weathered soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(12): 1138 - 1150.

[5] XU Hong-fa, WANG Fa-jun, CHENG Xue-xin. Pullout creep

- properties of grouted soil anchors[J]. Journal of Central South University of Technology, 2007, **14**: 474 - 477.
- [6] 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. Rheological behavior of geomaterials and its engineering applications[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999. (in Chinese))
- [7] SINGH A, MITCHELL J K. General stress-strain-time function for soils[J]. Geotechnical Special Publication, ASCE, 1968, **94**(1): 21 - 46.
- [8] MESRI G, FEBRES-CORDERO E, SHIELDS D R, et al. Shear stress-strain-time behaviour of clays[J]. Géotechnique, 1981, **31**(4): 537 - 552.
- [9] 卢萍珍, 曾 静, 盛 谦. 软黏土蠕变试验及其经验模型研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(4): 1041 - 1052. (LU Ping-zhen, ZENG Jing, SHENG Qian. Creep tests on soft clay and its empirical models[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(4): 1041 - 1052. (in Chinese))
- [10] 徐优林. 土层锚杆蠕变特性及工程应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014: 9 - 29. (XU You-lin. Creep properties of soil anchor and application research[D]. Changsha: Hunan University, 2014: 9 - 29. (in Chinese))
- [11] 陈昌富, 梁冠亭, 刘晓明, 等. 一种用于锚或桩与土界面摩阻性能试验的样坯制作装置及方法: 中国专利, 2014 10176979.8[P]. 2014-07-23. (CHEN Chang-fu, LIANG Guan-ting, LIU Xiao-ming, et al. A apparatus and method for producing adobe used to test frictional behavior of anchoring or pile solid-soil interface: Chinese Patent, 201410176979.8[P]. 2014-07-23. (in Chinese))
- [12] 梁冠亭, 陈昌富, 罗 宏, 等. 一种用于锚或桩与土界面摩阻性能试验的试样制作装置及方法: 中国专利, 2014 10176977.9[P]. 2014-08-06. (LIANG Guan-ting, CHEN Chang-fu, LUO Hong, et al. A apparatus and method for producing sample used to test frictional behavior of anchoring or pile solid-soil interface: Chinese Patent, 2014 10176977.9[P]. 2014-08-06. (in Chinese))
- [13] 陈昌富, 梁冠亭, 汤 宇, 等. 锚杆锚固体与土体界面特性室内测试新方法[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(6): 1115 - 1122. (CHEN Chang-fu, LIANG Guan-ting, TANG Yu, et al. Anchoring solid-soil interface behavior using a novel laboratory testing technique[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(6): 1115 - 1122. (in Chinese))
- [14] 陈宗基, 康文法. 岩石的封闭应力、蠕变和扩容及本构方程[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, **10**(4): 299 - 312. (TAN Tjongkie, KANG Wen-fa. On the locked in stress, creep and dilatation of rocks, and the constitutive equations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1991, **10**(4): 299 - 312. (in Chinese))
- [15] 杨文东, 张强勇, 陈 芳, 等. 辉绿岩非线性流变模型及蠕变加载历史的处理方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(7): 1405 - 1413. (YANG Wen-dong, ZHANG Qiang-yong, CHEN Fang, et al. Research on nonlinear rheological model of diabase and treatment for creep loading history[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(7): 1405 - 1413. (in Chinese))
- [16] 张久鹏, 黄晓明, 马 涛. 沥青混合料损伤蠕变特性及模型研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(12): 1867 - 1871. (ZHANG Jiu-peng, HUANG Xiao-ming, MA Tao. Damage-creep characteristics and model of asphalt mixture[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(12): 1867 - 1871. (in Chinese))
- [17] 余成学. 岩石非线性黏弹塑性蠕变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(10): 2006 - 2011. (SHE Cheng-xue. Research on nonlinear viscoelasto-plastic creep model of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(10): 2006 - 2011. (in Chinese))
- [18] 曹文贵, 袁靖周, 王江营, 等. 考虑加速蠕变的岩石蠕变过程损伤模拟方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, **40**(2): 15 - 20. (CAO Wen-gui, YUAN Jing-zhou, WANG Jiang-ying, et al. A damage simulation technique of the full rock creep process considering accelerated creep[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, **40**(2): 15 - 20. (in Chinese))
- [19] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. (YU Shou-wen, FENG Xi-qiao. Damage mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. (in Chinese))