

DOI: 10.11779/CJGE2021S1003

人工制备遗址土非线性蠕变本构模型研究

胡再强¹, 王 凯^{1,2}, 李宏儒¹, 梁志超¹, 焦韩伟¹, 吴 朋¹, 陈振鹏¹

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 中国有色金属工业西安勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要:通过三轴蠕变试验,研究了糯米浆掺入量对人工制备遗址土三轴蠕变特性的影响。试验结果表明,在添加了一定量的糯米浆后,人工制备遗址土三轴蠕变量明显减小,稳定时间增长。随着添加糯米浆质量的增加,人工制备遗址土的蠕变量呈现出先减小后增大的趋势,在土与糯米浆质量比为90:10时,蠕变量达到最小。人工制备遗址土三轴蠕变具有明显的非线性,时间越长,非线性越强。将总的变形分解为线性黏弹性变形、线性黏塑性变形和非线性黏塑性变形,利用模型理论描述其线性应变部分,非线性部分采用经验公式,建立了适合人工制备遗址土三轴蠕变特性的非线性半经验半理论黏弹塑性蠕变本构模型。该模型能较好的描述人工制备遗址土三轴蠕变特性,此非线性蠕变模型以元件模型为骨架,经验公式是对理论模型的非线性修正,具有较高的适用性。

关键词:人工制备遗址土;蠕变;非线性半经验半理论;黏弹塑性蠕变本构模型

中图分类号:TU411 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-4548(2021)S1-0013-06

作者简介:胡再强(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事黄土力学与工程及数值计算方面的教学与研究工作。
E-mail: huzq@xaut.edu.cn。

Nonlinear creep constitutive model for artificially prepared site soil

HU Zai-qiang¹, WANG Kai^{1,2}, LI Hong-ru¹, LIANG Zhi-chao¹, JIAO Han-wei¹, WU Peng¹,
CHEN Zhen-peng¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Xi'an Engineering Investigation & Design Research Institute of China National Nonferrous Metals Industry Co. Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: Through the triaxial creep tests, the influences of the mixing amount of glutinous rice slurry on the triaxial creep characteristics of artificially prepared relic soil are studied. The test results show that after adding a certain amount of glutinous rice slurry, the triaxial creep of the artificially prepared ruins soil is significantly reduced, and the stable time increases. With the increase in the quality of the glutinous rice slurry, the creep value of the artificially prepared ruins soil shows a trend of first decreasing and then increasing. When the mass ratio of soil to glutinous rice slurry is 90:10, the creep value reaches the minimum. The triaxial creep of artificially prepared relic soil has obvious nonlinearity, and the nonlinearity becomes stronger with time. The total deformation is decomposed into linear viscoelastic deformation, linear viscoplastic deformation and nonlinear viscoplastic deformation. The linear strain part is described by the model theory, and the nonlinear part adopts empirical formulas to establish the nonlinear, semi-empirical and semi-theoretical viscoelastic-plastic creep constitutive model, suitable for artificial preparation of site soil. This model can better describe the triaxial creep characteristics of artificially prepared site soils. This nonlinear creep model is based on the element model. The empirical formula is a nonlinear correction of the theoretical model and has high applicability.

Key words: artificially prepared site soil; creep; nonlinear semi-empirical semi-theory; visco-elastoplastic creep constitutive model

0 引言

谢定义认为随着建筑工程对耐久性要求的日益重视,土力学中对于因时间因素而出现的流变特性,必将比以往更加显示出深入研究的必要性^[1]。国外对其也有相应的研究^[2-3]。在国内,朱才辉等^[4]通过单轴蠕变试验,研究了不同含水率,不同压实度下,不同排水条件对黄土蠕变特性的影响,根据试验结果提出了等效蠕变模量的概念。何青峰^[5]对延安Q₂黄土进行了一系列的单轴、三轴蠕变试验。研究了不同围压和含水率对黄土蠕变特性的影响,根据试验结果,建立了相应的蠕变模型。陈亮等^[6]根据Riemann-Liouville分数阶微积分理论,借鉴经典元件组合的建模思路,提出了采用

列的单轴、三轴蠕变试验。研究了不同围压和含水率对黄土蠕变特性的影响,根据试验结果,建立了相应的蠕变模型。陈亮等^[6]根据Riemann-Liouville分数阶微积分理论,借鉴经典元件组合的建模思路,提出了采用

基金项目:陕西省自然科学基础项目(2017JM5059);陕西省黄土力学与工程重点实验室项目(13JS073);西北旱区生态水利国家重点实验室项目(QNZX-2019-07)

收稿日期:2020-12-15

表1 土样基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of soil samples

天然干密度 /(g·cm ⁻³)	天然含水率/%	湿陷系数	液限 /%	塑限 /%	塑性指数 I _p	土粒相对质量密度	颗粒组成/%		
1.28	15.2	0.080	28.6	19.0	9.6	2.71	>0.075 mm	0.05~0.075 mm	<0.005 mm
1.28	15.2	0.080	28.6	19.0	9.6	2.71	10.2	74.3	15.5

基于分数阶微积分形式的四元件非线性黏弹塑性流变模型。郭增玉等^[7]对宝鸡火车站地下商场的土样进行了室内单轴和三轴流变试验,建立了高湿度 Q₂ 黄土的非线性流变本构模型。

目前,中国对糯米灰浆进行了大量的研究。李广燕等^[8]利用现代化手段研究了糯米在传统灰浆中的生物矿化作用。谌文武等^[9]通过研究煮糯米浆的温度对糯米灰浆强度的影响,得出糯米浆温度在 75℃~80℃ 范围时糯米灰浆加固遗址土的效果相对较好的结论。胡再强等^[10]通过大量的室内试验,研究了糯米浆密度,糯米浆掺入量对人工制备遗址土渗透性,抗剪强度的影响。认为糯米浆密度为 1.04 g/cm³,土与糯米浆质量比 90:10 时为人工制备遗址土的最优配比。杨华山等^[11]等通过对糯米-石灰砂浆的研究,提出了刻画糯米-石灰砂浆的非线性结构模型,该非线性模型认为糯米-石灰砂浆的性能与其结构直接相关,断裂能在其中的分叉和偏转是其强韧化的两个最为关键的要素。

然而,以上对土遗址修复材料的研究均停留在一般强度的研究,关于土遗址修复材料蠕变特性的研究还很少。本文基于三轴蠕变试验,研究了糯米浆掺入量对人工制备遗址土三轴蠕变特性的影响。根据试验结果,建立适合人工制备遗址土蠕变规律的非线性半经验半理论黏弹塑性蠕变本构模型,为古遗址的修复提供理论支撑。

1 试样制备及试验方案

1.1 试验土样及试样制备

(1) 土样性质

本试验土样取自陕西富平县某建筑基坑。取土深度为 6 m 左右,系 Q₃ 黄土,颜色为黄色,土质较为坚硬,质地均匀。土样基本物理性质指标见表 1。

(2) 糯米浆及遗址土的制备

称取 150 g 糯米粉,加入 1000 mL 水,搅拌煮沸约 60 min,使溶液成黏稠状。倒入量筒冷却至室温,然后使用密度计测其密度,控制糯米浆密度为 1.04 g/cm³。本文通过高精度液体密度计控制糯米浆密度,通过量筒控制加入糯米的体积配备遗址土。将取回的土样过 2 mm 筛后烘干备用。由于本次试验中采用的糯米浆密度为 1.04 g/cm³,与水的密度相差甚微,故计算其质量时,认为糯米浆质量与同体积水质量相同。

1.2 试验方案

试验仪器采用 SYL-2 型应力路径三轴仪,该仪器能对竖向压力进行精准控制,可以进行各种应力路径试验。本次试验采用自定义应力路径,保持竖向应力不变,进行三轴蠕变试验。取干密度为 1.65 g/cm³,含水率为 17%,围压为 100 kPa,土与糯米浆质量(S:R)比分别为 100:0,97:3,90:10,87:13,探讨糯米浆掺入量对人工制备遗址土三轴蠕变特性的影响。试验室采用空调控温,室温稳定在 25 ℃ ± 1 ℃。

2 试验结果分析和讨论

2.1 土与糯米浆质量比对人工制备遗址土三轴蠕变特性的影响

图 1 为不同糯米浆掺入量下人工制备遗址土在不同偏应力下的三轴蠕变曲线。

由图 1 可知,糯米浆掺入量对人工制备遗址土三

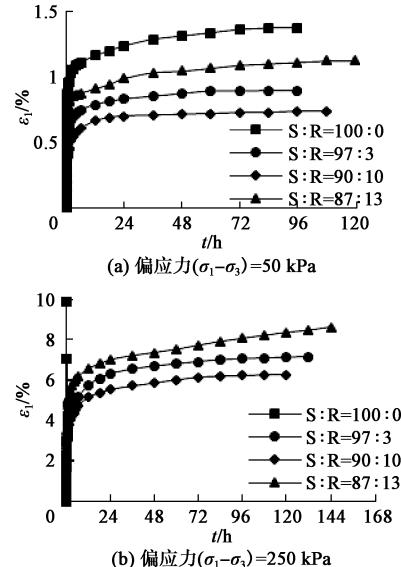


图 1 糯米浆含量对人工制备遗址土三轴蠕变特性影响

Fig. 1 Influences of glutinous rice pulp content on triaxial creep properties of artificially prepared site soil

轴蠕变特性影响显著。在添加了一定量的糯米浆之后,试样蠕变量明显减小,稳定时间增长。随着掺入糯米浆质量的增加,蠕变量呈现出现先减小后增大的规律,在土与糯米浆质量比为 90:10 时蠕变量最小。在偏应力较小时,不同糯米浆掺入量下均呈现出衰减蠕变特性。随着偏应力的增大,不同糯米浆掺量下的试样蠕变量均有不同程度的增加。当偏应力增加到 250 kPa 时,土与

糯米浆质量比为 100:0 的试样迅速发生破坏, 土与糯米浆质量比为 87:13 的试样出现了明显的蠕变 3 个阶段, 衰减蠕变阶段, 等速蠕变阶段, 加速蠕变阶段, 土与糯米浆质量比为 97:3 和 90:10 的试样仍表现出衰减蠕变特性。

2.2 等时应力应变曲线

图 2 为土与糯米浆质量比为 90:10 时不同时刻下人工制备遗址土三轴蠕变等时应力应变曲线。

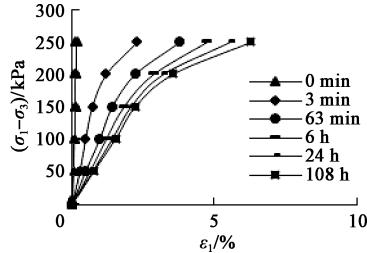


图 2 人工制备遗址土等时应力应变曲线

Fig. 2 Isochronous stress-strain curve of artificially prepared site soil

由图 2 可知, 不同时刻下, 人工制备遗址土等时应力应变曲线不同, 除过在 $t=0$ 时刻, 应力应变曲线表现出线性外, 其余时刻均表现出明显的非线性, 且随着时间的增长, 曲线越靠近应变轴, 非线性越强。在除初始时刻外的每条曲线上均有一个明显的拐点, 此拐点所对应的应力 ($\sigma_1 - \sigma_3 = 150$ kPa) 可认为是屈服极限值。小于此应力时, 只发生黏弹性变形, 大于此应力时, 开始发生黏塑形变形。

3 非线性蠕变本构模型的建立

所谓线性流变, 指的是虽然物体的本构关系在不同的时刻是不同的, 但在同一时刻, 本构关系是线性的。反映在应力应变关系图上就是不同时刻下的每条应力应变等时曲线都是直线或者折线(当发生黏塑性变形时为折线)。线性流变体的本构关系可以表示为

$$\varepsilon = J(t)\sigma \quad , \quad (1)$$

式中, $J(t)$ 是线性蠕变柔量, 其只为时间 t 的函数, 而对于非线性流变体, 在同一时刻, 本构关系表现出曲线形态。其本构关系可以表示为

$$\varepsilon = J(t, \sigma)\sigma \quad , \quad (2)$$

式中, $J(t, \sigma)$ 是非线性蠕变柔量, 其不仅与时间有关, 还与应力水平有关。

如图 3 所示, 曲线 OA, OB 分别表示 $t=0$ 和 $t=t_1$ 时刻的黏弹性应力-应变等时曲线。 OA_1, OB_1 分别为曲线 OA, OB 的切线。由图可知, $t=0$ 在时刻, 总的应变 ε^0 可由线性应变 ε_l^0 和非线性应变 $\varepsilon_{n,ve}^0$ 两部分组成。在经过一段时间 ($t=t_1$) 后, 总的黏弹性应变 $\varepsilon_{ve}(t_1)$ 仍可分解为线性黏弹性应变 $\varepsilon_{l,ve}(t_1)$ 和非线性黏弹性应变 $\varepsilon_{n,ve}(t_1)$ 。故黏弹性应变可以表示为

$$\varepsilon_{ve} = \varepsilon_{l,ve} + \varepsilon_{n,ve} = J_{l,ve}(t)\sigma + J_{n,ve}(t, \sigma)\sigma, \quad (3)$$

式中, $J_{l,ve}(t)$ 为黏弹性线性蠕变柔量, 其仅与时间有

关。 $J_{n,ve}(t, \sigma)$ 为黏弹性非线性蠕变柔量, 其与时间和应力水平有关。

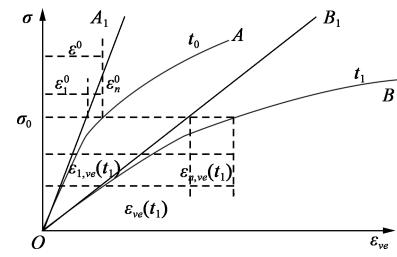


图 3 黏弹性应变的线性分量和非线性分量

Fig. 3 Linear and nonlinear components of viscoelastic strain

对于黏塑性变形, 运用类似的方法也可将黏塑性应变 ε_{vp} 分解为线性黏塑性应变 $\varepsilon_{l,vp}$ 和非线性黏塑性应变 $\varepsilon_{n,vp}$, 即

$$\begin{aligned} \varepsilon_{vp} &= \varepsilon_{l,vp} + \varepsilon_{n,vp} = J_{l,vp}(t)(\sigma - \sigma_s) + \\ &\quad J_{n,vp}(t, \sigma - \sigma_s)(\sigma - \sigma_s) \quad , \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $J_{l,vp}(t)$ 为黏塑性线性蠕变柔量, 其仅与时间有关。 $J_{n,vp}(t, \sigma - \sigma_s)$ 为黏塑性非线性蠕变柔量, 其与时间和过应力水平有关。 σ_s 为屈服极限强度。 $\sigma - \sigma_s$ 为超过屈服极限强度的应力值, 称为过应力。

流变材料可以视为黏弹塑性体, 则可以认为总的应变量是黏弹性应变和黏塑性应变的叠加, 见式(5)。从图 2 中分离出黏弹性和黏塑性部分, 如图 4 和图 5 所示。

$$\begin{aligned} \varepsilon_v &= \varepsilon_{ve} + \varepsilon_{vp} = \varepsilon_{l,ve} + \varepsilon_{n,ve} + \varepsilon_{l,vp} + \varepsilon_{n,vp} \\ &= [J_{l,ve}(t) + J_{n,ve}(t, \sigma)]\sigma + [J_{l,vp}(t) + \\ &\quad J_{n,vp}(t, \sigma - \sigma_s)](\sigma - \sigma_s) = [J_{l,ve}(t)\sigma + \\ &\quad J_{l,vp}(t)(\sigma - \sigma_s)] + [J_{n,ve}(t, \sigma)\sigma + \\ &\quad J_{n,vp}(t, \sigma - \sigma_s)(\sigma - \sigma_s)] = \varepsilon_{l,v} + \varepsilon_{n,v}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $\varepsilon_{l,v}$ 为线性黏弹塑性应变。 $\varepsilon_{n,v}$ 为非线性黏弹塑性应变。

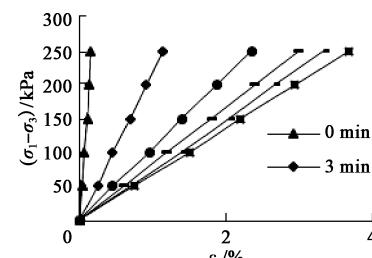


图 4 不同时刻下黏弹性应力-应变曲线

Fig. 4 Viscoelastic stress-strain curves at different moments

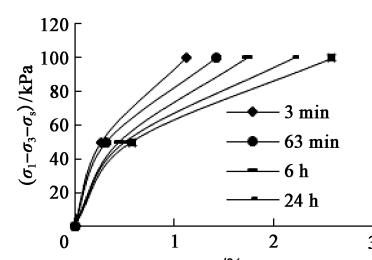


图 5 不同时刻下黏塑性过应力-应变曲线

Fig. 5 Viscoplastic overstress-strain curves at different time

由图 4 绘制线性黏塑性蠕变柔量 $J_{1,vp}(t)$ 与时间 t 的关系, 如图 6 所示。由图可知, $J_{ve}(t)$ 随着时间的增长呈现出衰减趋势, 故可用广义开尔文模型描述其线性流变现象。经过多次拟合, 最终采用二次广义开尔文模型描述其线性流变行为。其连接方式如图 7 所示。其本构关系可以表示为

$$\begin{aligned}\varepsilon_{ve}(t) &= \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-\lambda_1 t}) + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{E_3} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \right] (\sigma_1 - \sigma_3) \\ &= J_{ve}(t) (\sigma_1 - \sigma_3) \quad \circ \quad (6)\end{aligned}$$

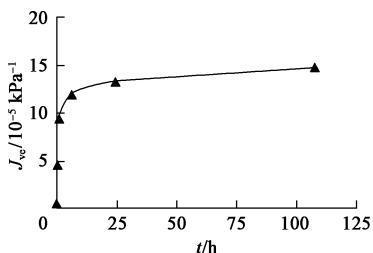


图 6 线性黏塑性蠕变柔量和时间的关系曲线

Fig. 6 Relation curve between linear viscoplastic creep compliance and time

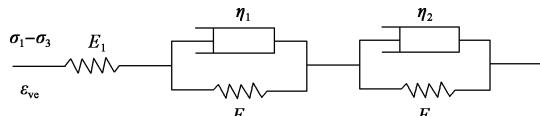


图 7 黏弹性蠕变模型

Fig. 7 Viscelastic creep model

将图 6 中的黏塑性变形分解为线性部分和非线性部分, 如图 8,9 所示。

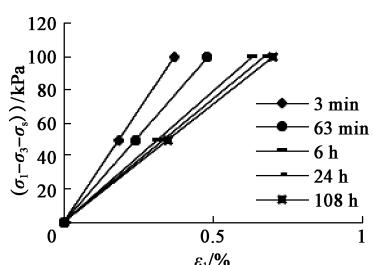


图 8 不同时刻线性黏塑性应力-应变曲线

Fig. 8 Linear viscoplastic stress-strain curves at different time

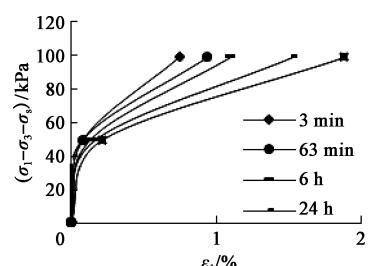


图 9 不同时刻下非线性黏塑性过应力-应变曲线

Fig. 9 Nonlinear viscoplastic overstress-strain curves at different time

图 10 为线性黏塑性蠕变柔量 $J_{1,vp}(t)$ 与时间 t

的关系。线性黏塑性蠕变柔量 $J_{1,vp}(t)$ 随着时间的增长呈现出衰减趋势, 且衰减程度低于黏弹性蠕变柔量, 在初始时刻 ($t = 0$), $J_{1,vp}(t) = 0$ 故可以采用一个开尔文体描述其蠕变行为, 其连接方式如图 11 所示。

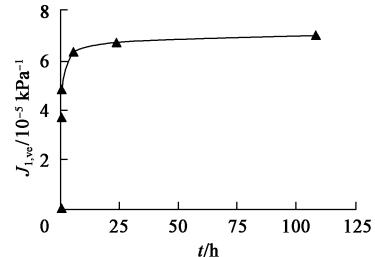


图 10 线性黏塑性蠕变柔量和时间的关系曲线

Fig. 10 Relation curve between linear viscoplastic creep compliance and time

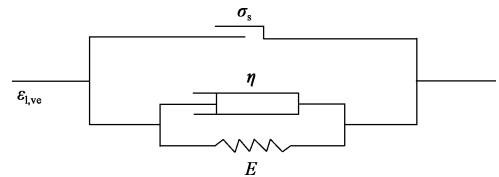


图 11 线性黏塑性蠕变模型

Fig. 11 Linear viscoplastic creep model

其本构关系可以表示为

$$\varepsilon_{1,vp}(t) = \begin{cases} \frac{1}{E} (1 - e^{-\lambda t}) (\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_s) & \sigma > \sigma_s \\ 0 & \sigma < \sigma_s \end{cases} \quad (7)$$

对于非线性黏塑性应变, 笔者采用经验蠕变模型来描述其蠕变行为。通过大量的试验数据发现, 非线性黏塑性应变和过应力具有截距为 0 的二次函数关系。由于应力和应变相差好几个数量级, 直接拟合求解出来的参数将会很小, 如果小数点保留不当, 将会造成很大的误差, 故笔者将应变扩大 1000 倍进行拟合, 其本构关系可以表示为

$$\varepsilon_{n,vp}(t) = \frac{1}{1000} [A (\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_s)^2 + B (\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_s)] \quad (8)$$

参数 A 随着时间的增大而增大, 且增幅越来越小, 参数 B 随着时间的增大而减小, 且减小幅度越来越小。 A/B 变化幅度较小, 可取为平均值 $A/B = -0.0269$ 。即

$$B = -\frac{A}{0.0269} \quad (9)$$

参数 A 随着时间的变化可以用一幂函数来表示, 拟合程度较高, 如图 12 所示。即

$$A = Ct^p \quad (10)$$

式(8)可以表示为

$$\varepsilon_{n, vp}(t) = \frac{1}{1000} [C t^D (\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_s)^2 - \frac{C t^D}{0.0629} (\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_s)] \quad (11)$$

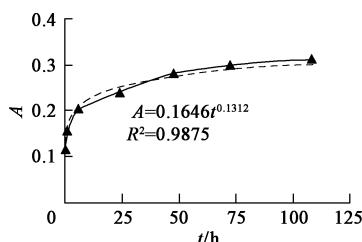
图 12 参数 A 和时间 t 关系拟合曲线

Fig. 12 Fitting curves of relationship between parameter A and time t

以上分别建立了黏弹性部分和黏塑性部分的蠕变模型, 将两者叠加就可以得到表示人工制备遗址土半经验半理论的非线性黏弹塑性蠕变本构模型。其连接方式如图 13 所示。

其本构方程可以表示为

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \varepsilon_{ve}(t) + \varepsilon_{vp}(t) \\ &= \begin{cases} \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-\lambda_1 t}) + \frac{1}{E_3} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \right] \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) & ((\sigma_1 - \sigma_3) < \sigma_s) \\ \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-\lambda_1 t}) + \frac{1}{E_3} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \right] \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{E_4} (1 - e^{-\lambda_3 t}) (\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_s) + \frac{1}{1000} [C t^D (\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_s)^2 - \frac{C t^D}{0.0629} \cdot (\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_s)] & ((\sigma_1 - \sigma_3) > \sigma_s) \end{cases}. \quad (12) \end{aligned}$$

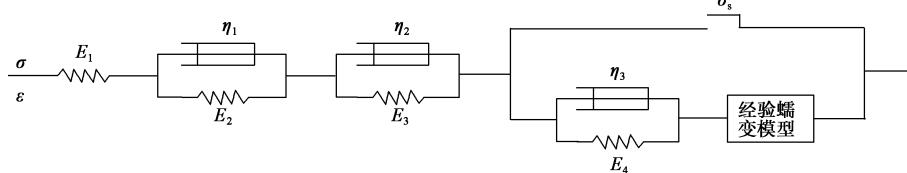


图 13 半经验半理论的非线性黏弹塑性蠕变本构模型

Fig. 13 Semi-empirical and semi-theoretical nonlinear viscoelastic-plastic creep constitutive model

表 2 不同糯米浆掺入量下半经验半理论黏弹塑性蠕变本构模型拟合参数

Table 2 Fitting parameters of semi-empirical and semi-theoretical viscoelastic-plastic creep constitutive model for different glutinous rice milk incorporations

土与糯米浆量比 S:R	模型参数								
	黏弹性部分					黏塑性部分			
	$E_1/10^5 \text{ Pa}$	$E_2/10^5 \text{ Pa}$	$\lambda_1/10^2 \text{ h}^{-1}$	$E_3/10^5 \text{ Pa}$	$\lambda_2/10^2 \text{ h}^{-1}$	$E_4/10^5 \text{ Pa}$	$\lambda_3/10^2 \text{ h}^{-1}$	C	D
100:0	702.93	107.19	0.13	61.49	46.30	54.14	1.56	0.01	-0.52
97:3	1448.1	201.84	190.09	92.19	0.95	171.38	12.55	0.07	0.66
90:10	1464.8	127.13	0.33	182.99	41.25	155.04	17.05	0.17	0.13
87:13	3230.3	138.31	142.20	79.12	1.08	175.29	9.99	0.028	0.89

式中, $\lambda_1 = \frac{E_2}{\eta_1}, \lambda_2 = \frac{E_3}{\eta_2}, \lambda_3 = \frac{E_4}{\eta_3}$ 。

表 2 列取了不同糯米浆掺入量下该半经验半理论黏弹塑性蠕变本构模型的拟合参数。

图 14 为不同偏应力下试验值和模型拟合值的对比, 图中离散点表示试验值, 实线表示模型拟合值。

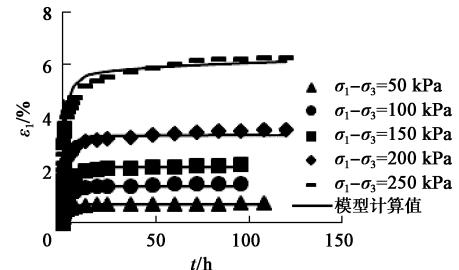


图 14 不同偏应力下试验值和模型拟合值的对比

Fig. 14 Comparison between test and model fitting values under different deviator stresses

由图 14 可知, 该黏弹塑性模型能较好的描述人工制备遗址土三轴蠕变特性。

在黏弹性阶段, 拟合效果最佳, 当发生黏塑性应变时, 拟合效果相对减弱。该模型共 9 个参数, 分别为 $E_1, E_2, \lambda_1, E_3, \lambda_2, E_4, \lambda_3, C, D$ 。其中前 5 个参数描述的是黏弹性变形, E_4 和 λ_3 描述的线性黏塑性变形, C 和 D 描述的是非线性黏塑性变形。

4 结 论

(1) 随着添加糯米浆质量的增加, 人工制备遗址土三轴蠕变量呈现出先减小后增大的规律。在土与糯米浆质量比为 90:10 时, 蠕变量最小。

(2) 人工制备遗址土三轴蠕变具有明显的非线性,将总的变形分解为线性黏弹性变形,线性黏塑性变形,非线性黏塑性变形,利用模型理论描述其线性应变部分,非线性部分采用经验公式,建立了适合人工制备遗址土三轴蠕变特性的非线性半经验半理论黏弹塑性蠕变本构模型。该模型能较好的描述人工制备遗址土三轴蠕变特性,此非线性蠕变模型以元件模型为骨架,经验公式是对理论模型的非线性修正,具有较高的适用性。

参考文献:

- [1] 谢定义. 21世纪土力学的思考. 岩土工程学报, 1997, **19**(4): 111–114. (XIE Ding-yi. Thoughts on soil mechanics in the 21st Century [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, **19**(4): 111–114. (in Chinese))
- [2] BOWMAN E T, SOGA K. Creep, ageing and microstructural change in dense granular materials [J]. Soils and Foundations, 2003, **43**(4): 107–117.
- [3] ZARETSKII Y S. S. Vyalov's role in the establishment and development of soil rheology [J]. Soil Mechanics & Foundation Engineering, 2010, **47**(5): 175–179.
- [4] 朱才辉, 李宁, 刘俊平. 压实 Q_3 马兰黄土蠕变规律研究 [J]. 西安理工大学学报, 2011, **27**(4): 392–399. (ZHU Cai-hui, LI Ning, LIU Jun-ping. Research on the creep behavior of compacted Q_3 Malan loess [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, **27**(4): 392–399. (in Chinese))
- [5] 何青峰. 延安 Q2 黄土的力学及流变特性研究 [D]. 西安: 长安大学, 2008. (HE Qing-feng. Research on Mechanical and Rheological Properties of Yan'an Q_2 Loess [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese))
- [6] 陈亮, 陈寿根, 张恒, 等. 基于分数阶微积分的非线性黏弹塑性蠕变模型 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, **45**(3): 7–11. (CHEN Liang, CHEN Shou-geng, ZANG Heng, et al. A nonlinear viscoelasto-plastic creep model based on fractional Calculus [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, **45**(3): 7–11. (in Chinese))
- [7] 郭增玉, 张朝鹏, 夏旺民. 高湿度 Q_2 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 Zeng-yu, ZHANG Chao-peng, XIA Wang-min. Nonlinear rheological constitutive models and their parameters of high moisture Q_2 loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(6): 780–784. (in Chinese))
- [8] 李广燕, 刘红霞, 徐明霞. 以糯米灰浆为代表的传统灰浆在古城墙修复中的应用探讨 [J]. 四川水泥, 2018(2): 346. (LI Guang-yan, LIU Hong-xia, XU Ming-xia. Discussion on the application of traditional mortar represented by glutinous rice mortar in the restoration of ancient city walls [J]. Sichuan Cement, 2018(2): 346. (in Chinese))
- [9] 谌文武, 张起勇, 刘宏伟, 等. 糯米浆温度对糯米灰浆加固遗址土的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(增刊2): 4244–4250. (CHEN Wen-wu, ZHANG Qi-yong, LIU Hong-wei, et al. Influence of temperature on glutinous rice slurry strengthening site soil by sticky rice-lime mortar [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(S2): 4244–4250. (in Chinese))
- [10] 胡再强, 于淼, 李宏儒, 等. 人工制备遗址土力学特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(9): 1914–1923. (HU Zai-qiang, YU Miao, LI Hong-ru, et al. Experimental study on characteristics of artificial soil ruins [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(9): 1914–1923. (in Chinese))
- [11] 杨华山, 车玉君, 马小满. 中国传统糯米-石灰砂浆的原材料和结构 [J]. 混凝土, 2015(1): 131–135, 139. (YANG Hua-shan, CHE Yu-jun, MA Xiao-man. Raw materials and structure of traditional Chinese glutinous rice-lime mortar [J]. Concrete, 2015(1): 131–135, 139. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)