

文章编号: 1006-4710(2011)04-0392-08

# 压实 $Q_3$ 马兰黄土蠕变规律研究

朱才辉, 李宁, 刘俊平

(西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 为了研究压实  $Q_3$  马兰黄土的蠕变特性, 开展不同压实度、不同含水量下压实土的单轴排水与不排水蠕变试验, 得到其轴向应变-应力-时间关系, 采用已有的经验模型及 H-K、Burgers、M-B 元件模型分别描述其蠕变规律并对比分析其适宜性, 采用能综合反映蠕变特性参数的等效蠕变模量  $E(t)$  来分析不同因素对蠕变规律敏感性。研究结果表明:  $Q_3$  马兰黄土的蠕变特性对含水量敏感程度较大, 对压实度次之, 排水条件对低含水量和低压实度土体的蠕变特性敏感程度较大; 采用 M-B 元件模型能够较准确地描述其瞬时弹性应变、衰减蠕变和稳定粘滞流动三个阶段, 通过等效蠕变模量  $E(t)$  能够较好地反映不同初始条件下的蠕变效应, 得到了  $E(t)$  与含水量  $w$  和轴向荷载  $\sigma_0$  的经验公式。

**关键词:** 压实  $Q_3$  马兰黄土; 单轴压缩蠕变试验; 应力-应变-时间关系; 含水量; 压实度; M-B 蠕变模型; 等效蠕变模量

中图分类号: TU45

文献标志码: A

## Research on the Creep Behavior of Compacted $Q_3$ Ma-Lan Loess

ZHU Caihui, LI Ning, LIU Junping

(Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to study the creep behavior of compacted  $Q_3$  Ma-Lan loess, the axial creep tests under different drainage condition, compacted degree and moisture content are performed by high pressure oedometer test system, and the laws of stress-strain-time relationships are obtained. The empirical and component models and H-K, Burgers and M-B element models are used to depict the creep behaviors, and the feasibility of these models are analyzed too. The equivalent elastic modulus  $E(t)$  is adopted to analyze the creep sensibility of different factors. The results obtained from research show that the moisture content is sensitive to creeping effect more than compacted degree and the low moisture content with high compacted degree under different drainage conditions are largely sensitive to the creep behaviors. The adoption of M-B element model is able to describe the instance elastic strain, attenuation creep and stable sticking flow of three stages. The equivalent elastic modulus  $E(t)$  is able to reflect the creep effect under the different initial conditions, whereby obtaining the empirical formula of  $E(t)$ , water contents  $w$  and axial loading  $\sigma_0$ .

**Key words:** compacted  $Q_3$  Ma-Lan loess; axial compacted creep test; stress-strain-time relationship; moisture content; compacted degree; Modified Burgers model (M-B); equivalent elastic modulus

目前, 国内外对于软岩土流变特性进行了大量的研究<sup>[1-11]</sup>, 包括蠕变试验方法、蠕变本构模型及

参数的辨识等已经取得了较为丰富的研究资料, 文献[12]、[13]对黄土的结构性和工程特性进行了大

收稿日期: 2011-08-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50479023); 高等学校博士点学科基金资助项目(20040700001)。

作者简介: 朱才辉(1983-), 男, 陕西西安人, 博士生, 研究方向为岩土数值仿真。E-mail: zhucaihui123@163.com。

李宁(1959-), 男, 陕西西安人, 教授, 博导, 研究方向为岩体动力学、地下洞室、边坡稳定性分析与冻土工程等。  
E-mail: ningli@xaut.edu.cn。

量的研究,提出了较为系统的理论和研究思路,但对于黄土的蠕变理论研究尚处在初步发展阶段。文献[14]对原状黄土进行了侧限条件下单轴蠕变试验,认为蠕变量在总压缩变形量中占有非常可观的比例,值得在工程实际中考虑。文献[15]基于杨凌地区黄土的单向固结试验资料,分别研究了加载条件下原状黄土和扰动黄土的固结蠕变特性,分析了不同含水率、不同固结压力下的应变-时间关系及蠕变本构关系。文献[16]通过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,并确定了相应的模型参数。文献[17]基于室内一维固结试验研究了陇西  $Q_3$  压实黄土的应力-应变-时间特性,并提出了压实黄土的 Singh-Mitchell 修正模型,分析了干密度与含水质量分数对参数的影响规律。

$Q_3$  马兰黄土是一种结构性较强的土,其柱状节理和大孔隙结构使得黄土具有特殊的工程力学性质。尤其在西北黄土地区进行工程建设遇到的工程问题,如黄土填方地基的不均匀沉降和工后沉降特性、湿陷性、边坡失稳,所有关于工程的变形稳定性问题,都不可避免地涉及到岩土体的应力-应变-时间的关系。本文以山西吕梁机场试验段 80.0 m 高的黄土高填方工程为研究对象,开展室内单轴压缩蠕变试验,研究压实状态下和原状  $Q_3$  马兰黄土在不同含水量、不同压实度和不同排水条件下的蠕变性质,采用常用的 H-K 模型、Burgers 模型和经验模型来获取蠕变参数,最后提出拟合度更高的修正 Burgers 模型(M-B 模型)来描述  $Q_3$  马兰黄土蠕变特性,并利用等效蠕变模量  $E(t)$  来定量分析含水量、压实度及排水条件等因素对蠕变参数的影响程度,从而更全面地认识黄土的蠕变特性,进一步完善和发展黄土的蠕变理论,预防和减少工程失稳事故的发生。

## 1 土样性质及蠕变试验方案

### 1.1 土样性质

本文以山西吕梁机场试验段为研究对象,试验土样取自试验段场区黄土梁,取土深度为 1.0~3.0 m,  $Q_3$  马兰黄土以粉土为主,辅以少量粉质粘土,结构疏松,具大孔隙,垂直节理发育,稍密~中密,干强度低;中下部常含有钙质结核,粒径一般小于 5 cm,现场钻孔取样揭露厚度为 5.0~30.0 m。

原状  $Q_3$  马兰黄土的物理指标见表 1 所示。通过室内轻型击实试验可得到  $Q_3$  马兰黄土的最大干密度和最优含水量分别为  $1.82 \text{ g/cm}^3$  和 12.5%。

表 1 原状  $Q_3$  马兰黄土物理指标

Tab. 1 Physical indices of  $Q_3$  Ma-Lan loess

含水量 $w/\%$	干密度 $\rho_d/(g/cm^3)$	饱和度 $S_r/\%$	孔隙比 $e$	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_p/\%$
13.50	1.50	47.87	0.805	25.5	16.3

### 1.2 试验注意事项及试验方案

试验仪器采用 YS 系列高压固结试验仪(见图 1),试样尺寸为圆柱形  $50 \text{ cm}^2 \times 2 \text{ cm}$ 。试样的加载等级是按 25 kPa 预压稳定后(保证试样与加载系统接触完好),再按照 100 kPa、200 kPa、400 kPa、800 kPa、1 200 kPa、1 600 kPa 进行逐级施加。加下级荷载的稳定标准是以本级荷载的竖向变形速率在连续 24 h 内的累积压缩蠕增量不大于 0.005 mm,读数过程为 3 min 内按照 5 s、10 s、15 s、20 s、30 s、40 s、50 s、60 s、70 s、80 s、90 s、100 s、110 s、120 s、150 s、180 s 读数,此后 1 h 内每隔 5 min 读一次数据,6 h 内每隔 1 h 读 1 次,12 h 以内每隔 6 h 读 1 次数据,变形稳定后,施加下一级荷载,实验室内采用空调控温,保持室内温度在  $(21 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。

取压实度为 0.90 时,进行不同含水量蠕变试验,含水量分别为 13.0%、14.5%、17.0%、19.0%、21.0%;取压实度分别为 0.90、0.93、0.98,最优含水量 12.5%,进行不同压实度蠕变试验。



图 1 高压固结仪

Fig. 1 High pressure consolidometer

## 2 蠕变试验结果与分析

### 2.1 不同含水量下压实 $Q_3$ 马兰黄土的轴向应变-时间关系

当压实度  $k=0.90$  时,分别研究压实  $Q_3$  马兰黄土在不同含水量和不同排水条件下的蠕变性质,限于篇幅文中仅给出含水量为 13.0%、14.5% 时在不同级别荷载下的蠕变试验结果。

1) 由图 2 可知,每级荷载下,排水条件的竖向

应变总体上比不排水的大,主要原因是在排水时,其瞬时应变主要由排水主固结完成,其瞬时应变远大于不排水时的应变,而不排水条件下的应变主要是由于土体颗粒之间的瞬间流动、剪切摩擦所致,自由水无法排出,表现为在荷载作用下,其大部分压实功耗散在土体孔隙水里,但随着时间的延长,自由水加强了土颗粒之间的润滑作用,加强了土体颗粒间的流动性,表现为蠕变效应相比排水更为明显。

2) 从试验结果中还可以看出,随着荷载的增加,土体结构性迅速发生变化,表现为排水与不排水两种条件下的总应变差异逐渐增大,但随着含水量的增大,这种差异在逐渐缩小,表明排水条件对含水量较小的土体蠕变效应敏感性较强。

3) 从双电层理论的扩散膜厚度变化角度分析可知,含水量越高,则自由水越多,扩散膜厚度越厚,土体颗粒之间的静电吸力相对较小,则在外界恒载作用下,土颗粒之间的作用力容易被破坏而产生土体的滑移或错动现象,土体的蠕变效应更为明显。

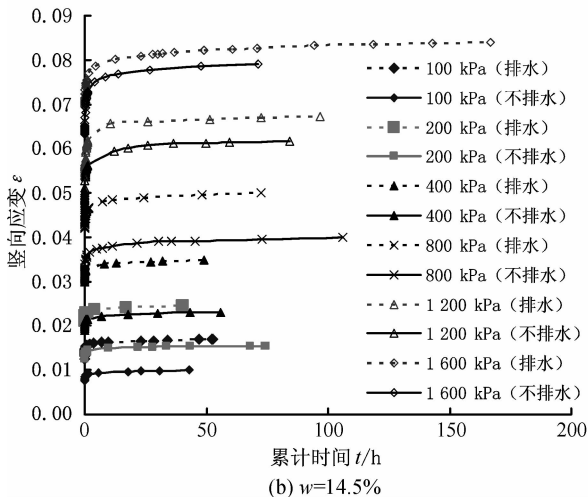
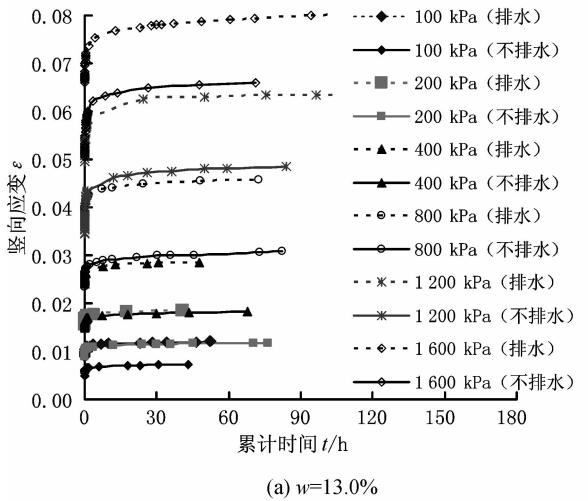


图2 不同含水量下排水和不排水时轴向应变-时间曲线  
Fig. 2 Axial strain-time curves of drained and undrained creep in different moisture content

## 2.2 不同压实度下 $Q_3$ 黄土的轴向应变-时间关系

取压实度分别为 0.90、0.93、0.98 (即干密度分别为 1.64、1.69、1.78  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) 时,在最优含水量为 12.5% 的初始条件下研究压实  $Q_3$  马兰黄土在不同排水条件下的蠕变性质。

图3为压实度分别为 0.93、0.98 时的蠕变试验结果。

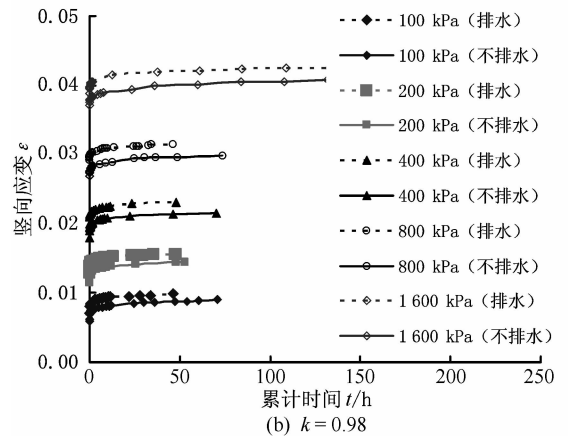
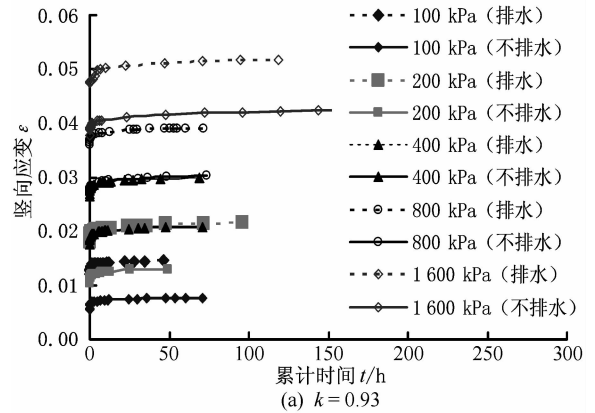


图3 不同压实度下排水和不排水时轴向应变-时间曲线  
Fig. 3 Axial strain-time curves of drained and undrained creep in different compaction degree

从图3可看出以下两点。

1) 从图3可以看出随着土体整体压实度的增大,不排水和排水两种条件下的总应变差异逐渐缩小,表明压实度越高,排水条件对其最终稳定后的蠕变应变变得越来不敏感。其主要原因是土体在逐渐达到最佳压实状态过程中,土体内部的自由水充填孔隙更充分,水分不易排出,故造成二者差异逐渐缩小。

2) 从双电层理论的扩散膜厚度变化角度分析可知,压实度越大,土体空隙比越小,则自由水含量越少,扩散层膜厚度越薄,土体颗粒之间的静电吸力相对很大,在外荷载作用下很难发生破坏或改变土颗粒之间的作用力,则表现为其蠕变效应较差的现象。

### 3 蠕变模型的辨识及参数的求取

#### 3.1 R-Q-λ 三参数经验模型

根据文献[17]提出的基于 Singh-Mitchell 修正模型(本文称为 R-Q-λ 三参数经验模型)进行蠕变模型参数求取的步骤如下。

以含水量为 13.0%、压实度为 0.90 的 Q<sub>3</sub> 压实黄土室内不排水蠕变试验数据为基础,首先建立应变与时间的  $\ln(\varepsilon/t) - \ln(t)$  双对数曲线关系,从图 4 可知,不同荷载条件下,  $\ln(\varepsilon/t) - \ln(t)$  曲线的各斜率  $(\lambda - 1)$  之间相互平行,基本为一固定值,可以用式(1)表示为:

$$\ln(\varepsilon/t) = G + (\lambda - 1)\ln(t) \quad (1)$$

式中  $G$  为  $\ln(\varepsilon/t) - \ln(t)$  曲线的截距。

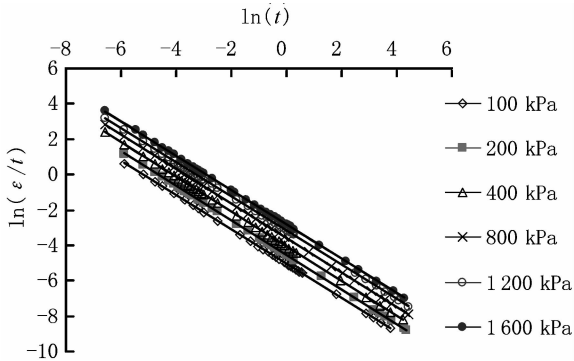


图 4  $\ln(\varepsilon/t) - \ln(t)$  曲线  
Fig. 4 Curves of  $\ln(\varepsilon/t) - \ln(t)$

从图 5 可知,参数  $G$  为轴向应力  $\sigma_0$  的线性函数,用式(2)表示为:

$$G = Q\ln(\sigma_0) + R \quad (2)$$

由此可得到 R-Q-λ 三参数经验蠕变模型的表达式(3):

$$\varepsilon(\sigma_0, t) = \sigma_0^Q e^R t^\lambda \quad (3)$$

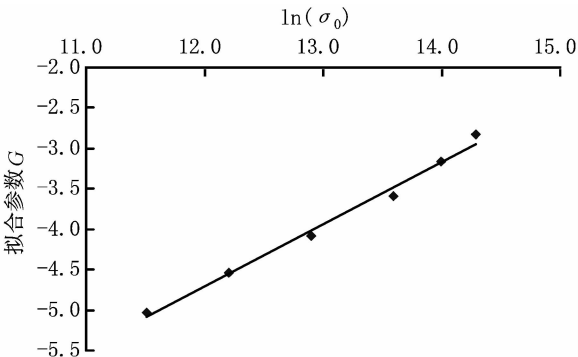


图 5  $G - \ln(\sigma_0)$  曲线  
Fig. 5 Curve of  $G - \ln(\sigma_0)$

其中参数  $Q$  决定着单位时刻应变随着应力的

变化趋势,  $Q$  值基本相同,表征相同时段内蠕变实验的应力 - 应变曲线形状相同,不存在突变现象。截距  $R$  为单位时刻、单位应力时割线应变速率对数。 $\lambda$  反映了应变速率随时间变化的双对数关系,将实验数据整理可知,  $\lambda$  基本处于一个固定的变化范围: 0.018 3 ~ 0.034 7,  $Q = 0.773 8$ ,  $R = -13.997 0$ 。根据该三参数进行计算可得到其计算结果与试验结果对比(见图 6)。

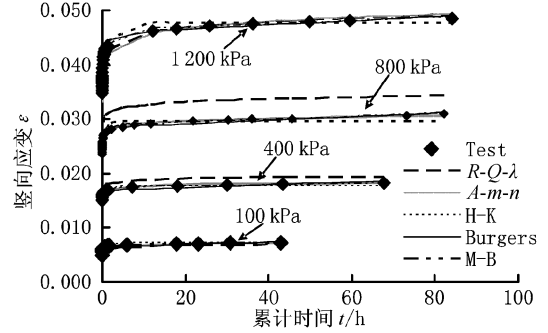


图 6 模型计算值与实测值对比

Fig. 6 Comparison of calculation and measured value

#### 3.2 A-m-n 三参数经验模型

根据文献[18]提出的关于饱和砂土的蠕变经验模型(本文称为 A-m-n 三参数经验模型),仍以含水量为 13.0%、压实度为 0.90 的 Q<sub>3</sub> 压实黄土室内蠕变试验数据为依据,首先建立如下两个轴向应力 - 应变 - 时间曲线,分别可以得到模型参数  $m$  和  $n$ , 曲线关系描述如公式(4)和(5)所示。

$$\lg \varepsilon(\sigma_0, t) - \lg \varepsilon(\sigma_0, t_0) = m[\lg(t) - \lg(t_0)] \quad (4)$$

$$\lg \varepsilon(\sigma_0, t) - \lg \varepsilon(\sigma_r, t) = n[\lg(\sigma_0) - \lg(\sigma_r)] \quad (5)$$

上述两个曲线均经过(0,0)点,参数  $m$  和  $n$  的求取分别如图 7 和图 8 所示。则由公式(4)和(5)可以得到包含参数  $A$ 、 $m$ 、 $n$  的蠕变模型经验公式。

$$\varepsilon_{\text{total}}(\sigma_0, t) = A \left( \frac{t}{t_0} \right)^m \left( \frac{\sigma_0}{\sigma_r} \right)^n \quad (6)$$

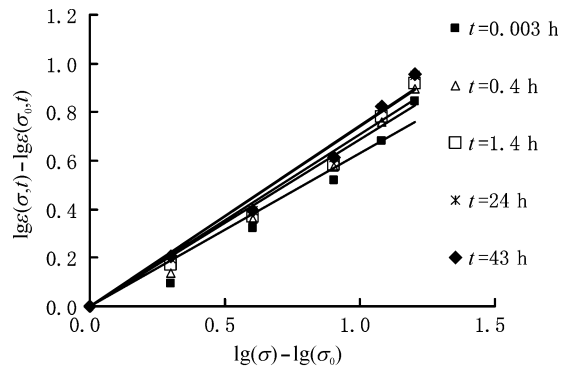


图 7  $\lg(\varepsilon) - \lg(\sigma_0)$  曲线  
Fig. 7 Curves of  $\lg(\varepsilon) - \lg(\sigma_0)$

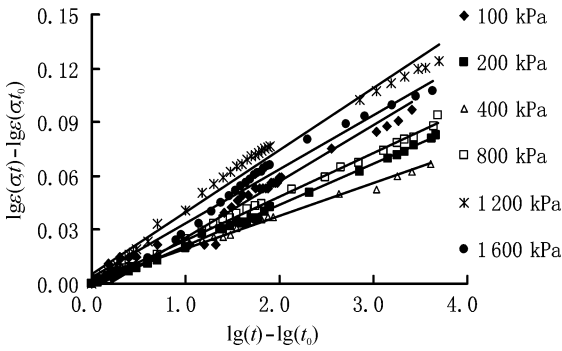


图8 lg(ε)-lg(t) 曲线  
Fig. 8 Curves of lg(ε)-lg(t)

根据该三参数进行计算可得到其计算结果与试验结果对比如图6所示,拟合参数见表2。

表2 A-m-n 经验模型参数

Tab. 2 The parameters of A-m-n empirical model

A	m	σ₀/kPa	n	t/h
0.005 8	0.028 70	100	0.629 4	0.003
0.006 0	0.022 10	200	0.688 7	0.4
0.005 9	0.018 99	400	0.706 7	1.4
0.005 8	0.024 13	800	0.739 4	24.0
0.006 2	0.039 04	1 200	0.743 9	43.0
0.007 4	0.032 70	1 600		

其中A是指t = 1 min,应力σ₀ = 100 kPa的应变值,该参数与轴向荷载σ₀的大小呈线性关系,基本在0.005 8 ~ 0.007 4之间,斜率m和n可以通过双对数等时曲线得到,其中参数m与轴向荷载σ及参考时间t₀有关,本文取t₀ = 1 min,参数n与试验时间t及参考应力σᵣ有关,本文取参考应力σᵣ = 100 kPa。

### 3.3 M-B 蠕变模型的建立及参数的求取

从图6可知,前述两个三参数经验模型拟合精度相对较低,为了更好地描述Q₃黄土的蠕变特性,本文再以H-K(Merchant)模型、Burgers模型和M-B模型(是以Burgers模型为依托,再串联一个Kelvin模型,如图9所示)来拟合Q₃黄土的蠕变试验曲线,模型方程分别如公式(7)、(8)、(9)所示。

$$\varepsilon(t) = \left\{ \frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} t\right) \right] \right\} \sigma_0 \quad (7)$$

$$\varepsilon(t) = \left\{ \frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t\right) \right] \right\} \sigma_0 \quad (8)$$

$$\varepsilon(t) = \left\{ \frac{1}{E_m} + \frac{t}{\eta_m} + \frac{1}{E_{k1}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_{k1}}{\eta_{k1}} t\right) \right] + \frac{1}{E_{k2}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_{k2}}{\eta_{k2}} t\right) \right] \right\} \sigma_0 \quad (9)$$

式(7)中,E₀、E₁、η₁为H-K模型参数;式(8)中,E₁、E₂、η₁、η₂为Burgers模型蠕变参数;式(9)中,Eₘ、Eₖ₁、Eₖ₂、ηₘ、ηₖ₁、ηₖ₂为M-B模型蠕变参数;式(7)、(8)、(9)中,σ₀为轴向荷载(kPa),ε(t)为任意时刻t的应变。t的单位为h。

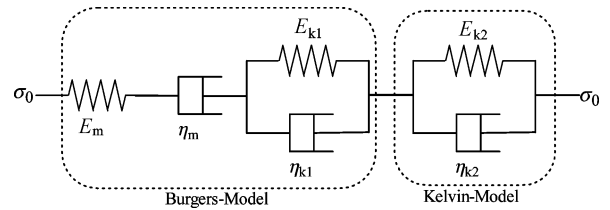


图9 M-B模型  
Fig. 9 Modified Burgers model

为了得到蠕变参数,本文利用Matlab6.5中的Curve fitting tool工具箱,综合使用鲁棒(Robust)非线性最小二乘法和Levenberg-Marquardt(L-M法)、高斯-牛顿(Gauss-Newton)等非线性回归运算法则来拟合蠕变参数,蠕变模型参数的求取过程如图10所示。则有M-B模型拟合平均相关系数R² = 0.996,而H-K模型的R² = 0.931,Burgers模型的R² = 0.961,R-Q-λ经验模型的R² = 0.894,A-m-n经验模型的R² = 0.942,其中M-B模型的蠕变参数如表3和图6所示(其他模型蠕变参数从略)。

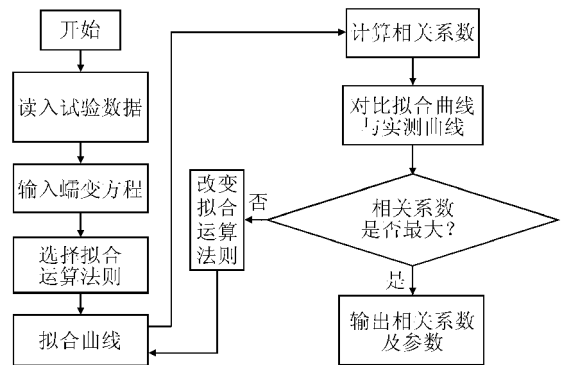


图10 蠕变模型参数求取过程

Fig. 10 Procedures for creep parameters solution

表3 M-B模型蠕变参数

Tab. 3 The creep parameters of M-B model

Eₘ/ MPa	ηₘ/ MPa·h	Eₖ₁/ MPa	ηₖ₁/ MPa·h	Eₖ₂/ MPa	ηₖ₂/ MPa·h	σ₀/ kPa	R²
22.7	8 382.2	64.6	0.4	121.2	22.7	100	0.997 6
22.7	19 758.9	170.9	160.9	176.4	22.7	200	0.993 1
26.5	34 746.4	385.7	12.1	314.7	26.5	400	0.994 6
33.5	29 368.6	348.7	13.2	306.4	33.5	800	0.992 4
34.6	37 397.2	224.0	11.7	198.7	34.6	1 200	0.997 7
31.4	36 724.2	311.3	44.4	222.2	31.4	1 600	0.998 5

可见采用修正后的Burgers模型能更准确地反

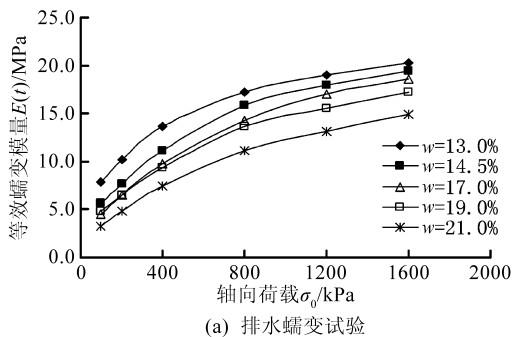
映  $Q_3$  压实黄土的应力-应变-时间蠕变特性,反映了初始阶段加速蠕变和之后的稳定蠕变两个阶段。

#### 4 蠕变参数影响因素分析

为了宏观分析压实黄土不同初始条件下的蠕变特性,采用蠕变柔度综合性参数来描述,等效蠕变模量  $E(t)$  是一种可以反映压实黄土不同初始条件的蠕变参数综合性指标,其表达式为式(10)。

$$E(t) = \frac{1}{\left\{ \frac{1}{E_m} + \frac{t}{\eta_m} + \frac{1}{E_{k1}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_{k1}}{\eta_{k1}} t\right) \right] + \frac{1}{E_{k2}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_{k2}}{\eta_{k2}} t\right) \right] \right\}} \quad (10)$$

以 M-B 模型为参考,根据实验数据可知,试样



在某级荷载作用下,基本在 3 天左右,其变形速率基本可控制在  $0.005 \text{ mm/d}$ ,故取时间  $t = 72 \text{ h}$ 。

再将不同级别荷载  $\sigma_0$  下的蠕变参数  $E_m$ 、 $E_{k1}$ 、 $E_{k2}$ 、 $\eta_m$ 、 $\eta_{k1}$ 、 $\eta_{k2}$  代入到公式(10)中,得到等效蠕变模量  $E(t)$ ,反映了土体在一定荷载作用下,土体“硬化”或最终发生结构性恢复的综合性参数,总体上可以认为: $E(t)$  越小,说明蠕变效应越强,趋于稳定的时间越长,变形越大; $E(t)$  越大,蠕变效应越弱,趋于稳定的时间越短,变形越小。

#### 4.1 不同含水量蠕变规律分析

根据压实度为 0.90,含水量分别为 13.0%、14.5%、17.0%、19.0% 和 21.0% 时,在排水与不排水条件下的单轴蠕变试验结果,即  $E(t)$  与含水量  $w$  和轴向荷载  $\sigma_0$  的关系曲线如图 11 所示。

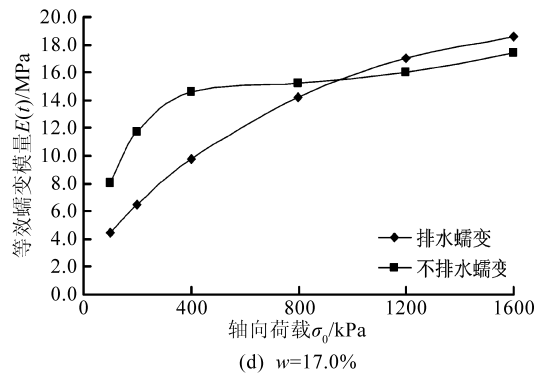
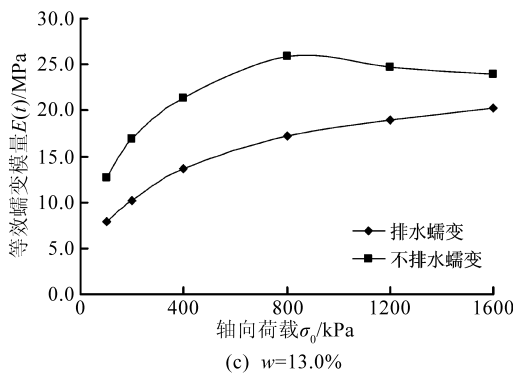
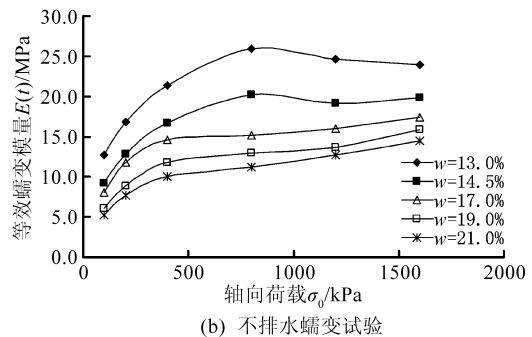


图 11 不同排水条件和含水量下  $E(t)-w-\sigma_0$  关系曲线

Fig. 11 The curves of  $E(t)-w-\sigma_0$  under different drainage conditions and moisture content

从图 11 可看出压实  $Q_3$  马兰黄土的如下蠕变特性。

1) 在同一压实度和荷载条件下,含水量越高,其等效蠕变模量  $E(t)$  越小,相当于土体的结构性不变而进行增湿,含水量的增加使得土体内部自由水增多,土颗粒之间的摩擦力减小,流动性增强,表现为蠕变性越强。随着含水量的持续增加,对于不排水蠕变, $E(t)$  随含水量  $w$  的增加,其减小速率较大;对于排水蠕变, $E(t)$  随含水量  $w$  的增加其减小速率相对较小。可见,对于同一种结构性和含水量的土

体,在相同的荷载作用下,排水降低了土颗粒之间的流动性,则蠕变性将大大降低,不排水则自由水增强了土颗粒之间的流动性。

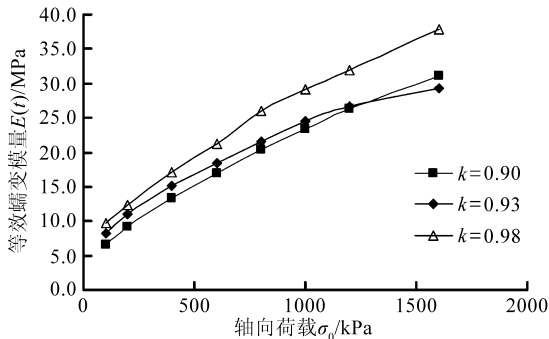
2) 在同一含水量,随着轴向荷载的增大,土体在逐渐被压密, $E(t)$  在荷载较小时增加较快,后期增速较慢,说明在同样的荷载增量下,孔隙的减小、水分的迁移或排出及土颗粒之间的相对滑动也逐渐降低,蠕变性减弱。对比排水与不排水蠕变两种情况可知:在含水量较小时,排水条件下  $E(t)$  比不排水条件下较小,而在含水量较大时,二者比较接近,说明

排水条件对含水量较低的土体的蠕变影响较大。

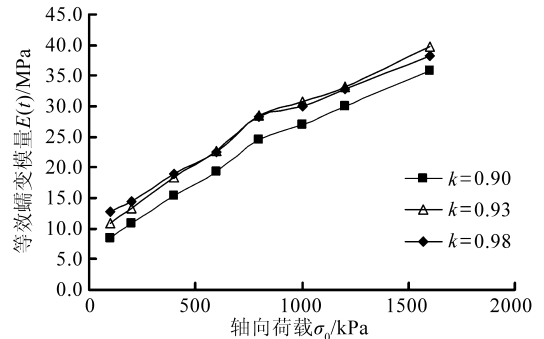
3) 在相同荷载量下,不排水蠕变  $E(t)$  总体大于排水蠕变  $E(t)$ ,即表明蠕变稳定后不排水蠕变较排水的变形量小,当排水条件发生变化时,排水条件较差的土体其蠕变将继续增长,蠕变效应较强,而排水蠕变在主固结完成之后,由于孔隙水的排出和土骨架的压密,黏土颗粒排列更为紧密,同时弱结合水膜的厚度变薄,从而削弱了蠕变效应。

4) 综合  $E(t)-w-\sigma_0$  的关系可知,等效蠕变模量  $E(t)$  与含水量  $w$  及轴向荷载  $\sigma_0$  可以用经验公式(11)描述:

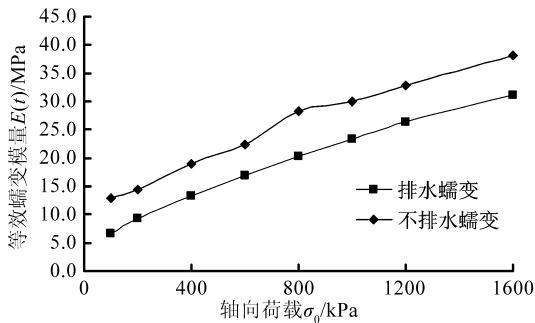
$$E(t) = Ke^{-\alpha w} \sigma_0^\beta \quad (11)$$



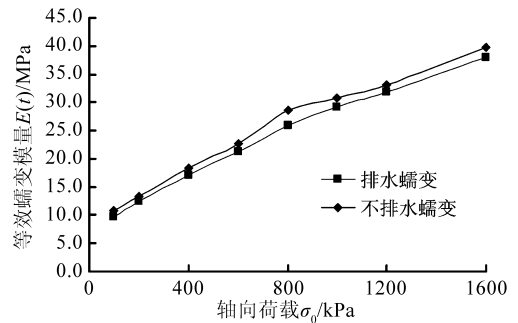
(a) 排水蠕变试验



(b) 不排水蠕变试验



(c)  $k=0.90$



(d)  $k=0.98$

图12 不同排水条件和压实度下  $E(t)-k-\sigma_0$  关系曲线

Fig. 12 The curves of  $E(t)-k-\sigma_0$  under different drainage conditions and compaction degree

从图12可看出压实  $Q_3$  马兰黄土的以下蠕变特性。

1) 在最优含水量下,随着轴向荷载  $\sigma_0$  的增加,等效蠕变模量  $E(t)$  呈非线性增加;压实度  $k$  越大,  $E(t)$  越大,压实度反映了土体的压密程度,  $k$  越大,则土体颗粒之间的摩擦力越大,流动性越差,表明其蠕变效应在减弱,表现为等效蠕变模量  $E(t)$  的增大。

2) 随着压实度的增加,排水蠕变条件下的  $E(t)$  总体较不排水蠕变下的  $E(t)$  小,且压实度较小时,排水蠕变的  $E(t)$  与不排水蠕变  $E(t)$  之间的差异较大,而压实度较大时,情况相反。表明在最优含水量下,土体达到最佳压实度过程中,排水条件对其变形效果影响不大,其主要原因是,在最优含水量下,压实度越

式中,  $K$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  均为土性参数,其中  $K=4.0 \sim 4.5$ ,  $\alpha=6.2 \sim 6.6$ ,  $\beta=0.34 \sim 0.35$ 。

从式(11)可知,等效蠕变模量  $E(t)$  随着含水量  $w$  增大而减小,随轴向荷载  $\sigma_0$  的增大而增大,反映了  $Q_3$  压实黄土在受到递增荷载作用下被逐渐压密的“硬化”和增湿之后的“软化”现象,由于本文进行的是单轴压缩蠕变,故未见破坏现象。

#### 4.2 不同压实度蠕变规律分析

含水量为 12.5%,压实度分别为 0.90、0.93、0.98 时,在排水与不排水条件下的单轴蠕变试验,得到等效蠕变模量  $E(t)$  与含水量  $w$  和轴向荷载  $\sigma_0$  的关系曲线(见图12)。

大,孔隙内自由水不但不会排出,反而增加了土颗粒之间的润滑作用,更有利于土体压密,故表现为高压实度下,排水条件对其影响相对较弱的特性。

## 5 结论

1) 从结合水、自由水的类型变化和双电层理论的扩散膜厚度变化的角度对  $Q_3$  黄土的蠕变特性及机理进行了解释,认为  $Q_3$  黄土的蠕变特性对含水量敏感程度较大,对压实度次之,排水条件对低含水量和低压实度土体的蠕变特性敏感程度较大。排水条件下蠕变总应变总体大于不排水蠕变应变,且随着轴向荷载的增加这种差异在增大。

2) 采用 M-B 元件模型能够较准确地描述压实  $Q_3$  马兰黄土的蠕变特性, 即应力-应变-时间关系, 得到了等效蠕变模量  $E(t)$  与含水量  $w$  和轴向荷载  $\sigma_0$  的经验公式, 表明含水量  $w$  与  $E(t)$  反相关, 而随着荷载  $\sigma_0$  的增大, 呈现非线性增大趋势。

3) 实际填方工程中, 一般设计中某压实度下填土的含水量要求在(最优含水量  $\pm 2\%$ ) 以内, 但实际工程中往往难以精确控制, 最终导致压实度不达标, 工后沉降量和不均匀沉降过大甚至地基失稳等事故。本文开展某一压实度下不同含水量及在最优含水量下不同压实度的蠕变特性试验研究, 对实际工程具有一定的指导意义。

### 参考文献:

- [1] Singh A, Mitchell J K. General stress-strain-time function for clay[J]. Journal of the Clay Mechanics and Foundation Division, 1968, 94(SM1): 21-46.
- [2] Mesri G, Rebres-Cordero E, Shields D R, et al. Shear stress-strain-time behavior of clays [J]. Geotechnique, 1981, 31(4): 537-552.
- [3] Anders Augustesen, Morten Liingaard, Poul V L, et al. Evaluation of time-dependent behavior of soils [J]. International Journal of Geomechanics, 2004, 4(3): 137-156.
- [4] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1081-1106.  
Sun Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1081-1106.
- [5] 赵维炳, 施健勇. 软土固结与流变[M]. 南京: 河海大学出版社, 1996.
- [6] 陈晓平, 朱鸿鹄, 张芳枝, 等. 软土变形时效特性的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2142-2148.  
Chen Xiaoping, Zhu Honghu, Zhang Fangzhi, et al. Experimental study on time-dependent deformation of soft soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2142-2148.
- [7] 陈晓平, 白世伟. 软土蠕变-固结特性及计算模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 728-734.  
Chen Xiaoping, Bai Shiwei. Research on creep consolidation characteristics and calculating model of soft soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 728-734.
- [8] 朱鸿鹄, 陈晓平, 程小俊, 等. 考虑排水条件的软土蠕变特性及模型研究 [J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 694-698.  
Zhu Honghu, Chen Xiaoping, Cheng Xiaojun, et al. Study on creep characteristics and model of soft soil considering drainage condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 694-698.
- [9] 王国欣, 黄宏伟, 肖树芳. 软土微结构特征的试验研究 [J]. 水利学报, 2005, 36(2): 190-196.  
Wang Guoxin, Huang Hongwei, Xiao Shufang. Experimental study on micro-structural characteristics of soft soil [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(2): 190-196.
- [10] 李军霞, 王常明, 张先伟. 不同排水条件下软土蠕变特性与微观孔隙变化 [J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3493-3498.  
Li Junxia, Wang Changming, Zhang Xianwei. Creep properties and micropore changes of soft soil under different drainage conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3493-3498.
- [11] 周秋娟, 陈晓平. 软土蠕变特性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28(5): 626-630.  
Zhou Qiujuan, Chen Xiaoping. Experimental study on creep characteristics of soft soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(5): 626-630.
- [12] 刘祖典. 黄土力学与工程 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1996.
- [13] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向 [J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 1-13.  
Xie Dingyi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 1-13.
- [14] 罗汀, 姚仰平, 蔡东艳. 黄土蠕变的试验研究 [J]. 西安建筑科技大学学报, 1995, 27(3): 304-308.  
Luo Ting, Yao Yangping, Cai Dongyan. Experimental investigation of loess creep [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology, 1995, 27(3): 304-308.
- [15] 王松鹤, 骆亚生, 李焱. 黄土固结蠕变特性试验研究 [J]. 工程地质学报, 2009, 17(5): 643-647.  
Wang Songhe, Luo Yasheng, Li Yan. Laboratory test of loess for consolidation creep behavior [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(5): 643-647.
- [16] 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 Zengyu, Zhang Chaopeng, Xia Wangmin. 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.
- [17] 程海涛, 刘保健, 谢永利. 压实黄土应力-应变-时间特性 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(1): 6-9.  
Cheng Haitao, Liu Baojian, Xie Yongli. Stress-strain-time behavior of compacted loess [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science), 2008, 28(1): 6-9.
- [18] Zhang Y, Xue Y Q, Wu J C, et al. Creep model of saturated sands in oedometer tests [J]. Soil and Rock Behavior and Modeling, 2006, 150: 328-335.

(责任编辑 王卫勋)