

# 黄土固结蠕变特性试验研究\*

王松鹤 骆亚生 李 焱

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院 杨凌 712100)

**摘 要** 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,由试验数据整理分析出不同含水率、不同固结压力下的固结蠕变曲线簇,根据蠕变曲线形态特征,推导出单向固结条件下黄土的应变-时间关系并拟合得到该关系中的参数,在分析参数与固结压力之间关系的基础上推导出黄土的一维固结蠕变本构关系,经试验证明,该关系能较好的描述杨凌地区黄土的固结蠕变特性。另外,基于试验资料以及 Buisman 次固结系数的概念,分析出次固结系数与固结压力之间的定量关系,为确定固结压力对黄土次固结特性的影响提供了一种新途径。

**关键词** 黄土 固结蠕变 本构关系 次固结系数

中图分类号: TU432 文献标识码: A

## LABORATORY TEST OF LOESS FOR CONSOLIDATION CREEP BEHAVIOR

WANG Songhe LUO Yasheng LI Yan

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100)

**Abstract** An one - dimensional consolidation test under separated loads is conducted to obtain the characteristic creep curves of loess in Yangling Distirct. According to the typical behavior of stress - strain curves of loess under one - dimensional consolidation, an one - dimensional consolidation creep constitutive model is obtained from the relation of parameters and consolidation stress. The relation better simulates the creep characteristics of loess in Yangling District with model test. Besides, based on the experimental results and the secondary consolidation coefficient proposed by Buisman, the relation between the secondary consolidation coefficient and the consolidation stress is obtained. Therefore, a new method of confirming the influence of consolidation stress on the secondary consolidation characteristics is suggested.

**Key words** Loess, Consolidation creep behavior, Constitutive relation, Secondary consolidation coefficient

### 1 引 言

黄土高原地区建筑物的长期沉降、基坑开挖临空面的缓慢侧向位移以及地下工程引起的地面沉降

等均与黄土的蠕变特性密切相关。长期以来,许多学者致力于以上问题的研究,并取得了许多研究成果<sup>[1-6]</sup>。然而,传统的固结理论不考虑土体蠕变的影响,因而在计算和分析土体变形时出现了较大的误差。一般认为固结过程中土体的蠕变就是土体的

\* 收稿日期: 2008 - 12 - 12;收到修改稿日期:2009 - 04 - 01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50578134).

第一作者简介:王松鹤,岩土工程专业. Email:wangsonghe888@yahoo.com.cn

次固结现象,次固结效应的研究逐渐受到了国内外学者的重视,并开展了大量的研究。Taylor 和 Merchant<sup>[7]</sup>在固结变形分析中考虑了土的流变特性,用元件模型模拟土骨架的变形。陈宗基<sup>[8]</sup>研究了软土固结过程中的次固结效应问题。Bjerrum - Gallager<sup>[9]</sup>提出了固结时间线理论,探讨了软土固结变形计算的方法。王常明等<sup>[10~11]</sup>根据多级加荷压缩试验资料,建议了考虑非线性蠕变特性的单向固结本构模型。

黄土是一种结构性较强的土,具有柱状节理和大孔隙结构,其独特的物质组成和结构特性使得黄土的蠕变特性研究具有非常重要的理论和现实意义。目前,我国在黄土蠕变研究中还处于初步发展阶段,全面认识黄土的蠕变特性,深入了解和有效控制蠕变特性的影响因素,不仅可以逐步完善和发展流变理论,也可以有效预防和减少工程失稳、滑坡等工程事故的发生。

本文通过对不同初始条件下杨凌地区黄土的单向固结试验,整理分析得到了固结蠕变曲线和蠕变特征参数,进而推导出杨凌地区黄土的一维固结蠕变本构关系,并研究了次固结系数与固结压力的关系。

## 2 试验材料与方法

表1 黄土的物理性质指标

Table 1 The physical indexes of loess

取样地点	比重	液限/ (%)	塑限/ (%)	塑性指数/ (%)	按塑性 图分类	颗粒组成/(%)		
						>0.075mm	0.075~0.005mm	<0.005mm
杨凌	2.70	28.7	17.5	11.2	CL	16.5	62.8	20.7

## 3 试验结果分析

### 3.1 固结蠕变本构关系建立

通过对原始试验资料整理分析,笔者获得了不同固结压力下黄土的固结蠕变曲线(以  $w = 16\%$  扰动黄土、 $w = 16\%$  原状黄土为例)(图1)。

由图1可知,各级固结压力下的黄土固结蠕变曲线均呈明显的非线性关系,并且具有衰减蠕变阶段和稳定蠕变阶段两个阶段,其中衰减蠕变是指材料的硬化流动过程,此阶段应变率随时间推移而降

试验选用陕西杨凌某砖厂黄土边坡的黄土土样作为蠕变试验试样,取土深度3.5~4m,属 $Q_3$ 黄土,土料的物理性质指标见表1。试样分为原状、扰动和饱和3种;原状试样由所取原状黄土直接削制而成,扰动试样由黄土风干、碾碎、过筛后的土料压制而成,饱和试样在单向固结仪上直接浸水饱和。采用水膜转移法调整非饱和试样的含水率,目标含水率为12%、16%和24%,并在保湿缸中放置48h以上,以使水分扩散均匀。

为了较好的揭示黄土在各级固结压力下的固结变形规律,本次室内试验采用分别加荷固结蠕变试验,以避免分级加荷方式所造成的误差。试验采用固结不排水方式,在南京土壤仪器厂生产的GDG系列型高压固结仪上进行,所用黄土试样面积为 $50\text{cm}^2$ ,高为2cm。仪器所配备的加压砝码及位移量测传感器均经过国家计量认证。为保证试验过程试样含水率的恒定,本试验通过给储水盒外部加一密闭塑料薄膜进行保湿,经试验验证,该方法符合试验要求。试验选取一组(7个)相同的试样,分别施加不同的固结压力。固结压力分为7级,50kPa、100kPa、200kPa、400kPa、800kPa、1200kPa、1600kPa,变形稳定以每级固结压力下,定时观测变形持续到稳定(一般以 $0.01\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )为准。

低<sup>[12]</sup>。

将图1中固结蠕变曲线在双对数坐标上表示(图2),各级固结压力下的垂直应变对数 $\ln \varepsilon$ 与时间对数 $\ln t$ 之间均具有较好的线性关系,可表示为:

$$\ln \varepsilon = a + b \ln \frac{t + t_1}{t_1} \quad (1)$$

式中, $\varepsilon$ 为各级固结压力下的垂直应变(%), $t$ 为固结蠕变经历的时间(h), $t_1$ 为单位时间( $t_1 = 1\text{h}$ ), $a$ 、 $b$ 为参数,可以通过试验资料拟合得到(图3和图4)。

通过拟合结果发现,不同含水率,不同试样类型下, $a \sim \sigma_n$ 在用对数函数拟合时均具有较高的精

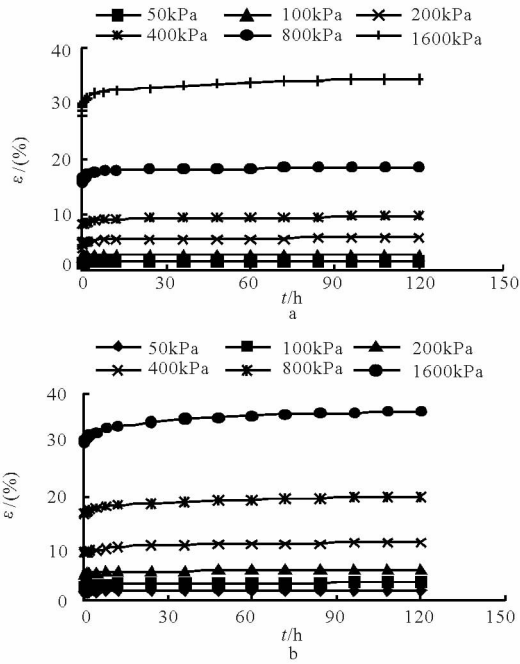


图1 固结蠕变试验结果

Fig. 1 Experimental result of consolidation creep  
a.  $w = 16\%$ , 原状黄土; b.  $w = 16\%$ , 扰动黄土

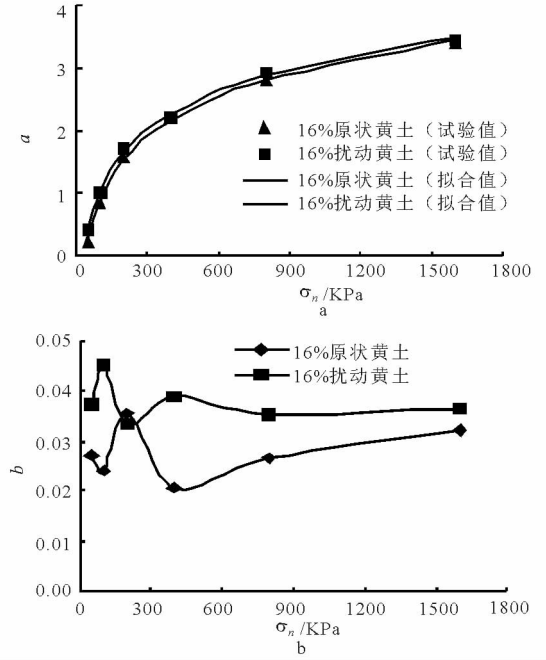


图3 参数拟合结果( $w = 16\%$ )

Fig. 3 Fitting results of parameters( $w = 16\%$ )  
a.  $a \sim \sigma_n$ ; b.  $b \sim \sigma_n$

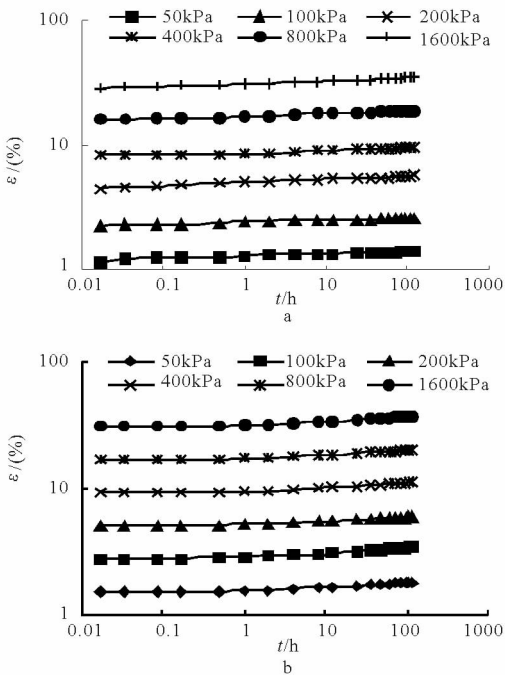


图2 双对数坐标下的固结蠕变曲线

Fig. 2 Consolidation creep curves of log-log coordinates

a.  $w = 16\%$ , 原状黄土; b.  $w = 16\%$ , 扰动黄土

动状态下,其  $b$  值均在某一个固定值上下波动,可以选用各固结压力下  $b$  值的平均值表示。将拟合得到的参数代入式(1)中,即可得杨凌地区黄土的固结蠕变本构关系,如下:

$$\varepsilon = \alpha \sigma_n^\beta \left( \frac{t + t_1}{t_1} \right)^\mu \quad (2)$$

式中,  $\sigma_n$  为所施加的固结压力(kPa),  $\varepsilon$  为  $t$  时刻黄土的垂直应变(%),  $t$  为固结蠕变试验经历的时间(h),  $t_1$  为单位时间( $t_1 = 1\text{h}$ ),  $\alpha, \beta, \mu$  为模型参数,可由试验数据拟合得到(表2)。

表2 参数拟合结果

Table 2 Fitting results of parameters

参数	12% 原状	16% 原状	24% 原状	饱和 原状	12% 扰动	16% 扰动	24% 扰动
$\alpha$	0.0566	0.0344	0.0652	0.1636	0.1030	0.0484	0.1222
$\beta$	0.7798	0.9210	0.8678	0.7473	0.6923	0.8821	0.7733
$\mu$	0.0460	0.0277	0.0315	0.0372	0.0515	0.0378	0.0334

用  $\sigma_n = 1200\text{kPa}$  的试验数据验证式(2)(图4)。

图4为黄土固结蠕变关系的验证结果。由图4知,试验曲线与拟合曲线在曲线形态上很相似,并且二者的数值吻合都很好,说明式(2)可以很好的描

度; $b \sim \sigma_n$  关系受土样结构状态和含水率等因素影响表现得较为复杂,通过分析发现,黄土在原状或扰

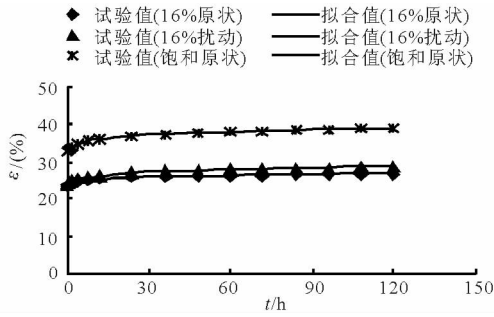


图4 模型验证

Fig. 4 Model validation

述杨凌地区黄土的固结蠕变特性。该关系具有较少的参数,并且参数获取的途径也较为简便。

### 3.2 次固结系数与固结压力的关系

大量扫描电子显微镜的观察结果证实:次固结产生的机理为土骨架的蠕变变形<sup>[13]</sup>。次固结是土体在有效应力基本不变情况下,变形随时间增长而产生的压缩变形,一般用 Busiman 提出的次固结系数描述,如下式:

$$C_a = -\Delta e / (\lg t - \lg t_p) \quad (3)$$

式中,  $\Delta e$  为次固结阶段的孔隙比变化;  $t_p$  为主固结完成的时刻;  $t$  为次固结量的计算时刻。

研究证实<sup>[14]</sup>,在一定时间对数周期内,孔隙比  $e$  与时间对数  $\ln t$  具有严格的线性关系,并以  $e - \ln t$  曲线的第二个折线段的斜率作为次固结系数  $C_a$ 。基于本次试验资料和文献[15]中提出的天津软土固结压力  $\sigma_n$  与次固结系数  $C_a$  之间的关系,笔者拟合得到杨凌地区黄土的次固结系数  $C_a$  与固结压力  $\sigma_n$  的关系(图5)。

由图5a知,在固结压力较小时,次固结系数  $C_a$  随固结压力的增大而增大,在  $\sigma_n = 800\text{kPa}$  时达到最大值;  $\sigma_n > 800\text{kPa}$  时,由于粘土颗粒间联结破坏和调整的逐步完成,次固结量趋于稳定,导致次固结系数趋于一稳定值。

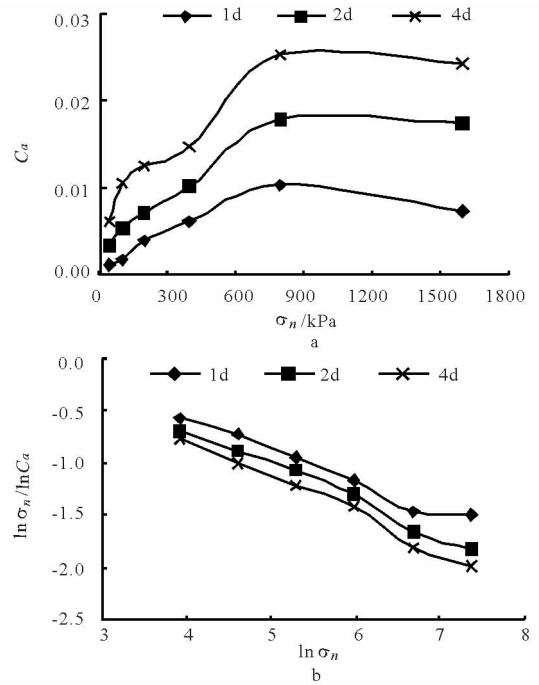
由图5b知,  $\ln \sigma_n / \ln C_a \sim \ln \sigma_n$  具有较好的线性关系,可以表示为:

$$\ln \sigma_n / \ln C_a = a + b \ln \sigma_n \quad (4)$$

对式(4)进行变换,可知  $\ln C_a$  与  $\ln \sigma_n$  之间的关系呈双曲线型,如下式:

$$\ln C_a = \frac{\ln \sigma_n}{a + b \ln \sigma_n} \quad (5)$$

式中,  $\sigma_n$  为固结压力(kPa);  $a$ 、 $b$  为模型参数,拟合结果见表3。

图5 次固结系数  $C_a$  与固结压力  $\sigma_n$  的关系Fig. 5 Relation between  $C_a$  and  $\sigma_n$ 

a.  $\sigma_n \sim C_a$ ; b.  $\ln \sigma_n / \ln C_a \sim \ln \sigma_n$

表3 模型参数拟合结果

Table 3 Fitting results of model parameters

时间/d	1	2	4
参数 a	0.5594	0.6708	0.6546
参数 b	-0.2882	-0.3384	-0.3582

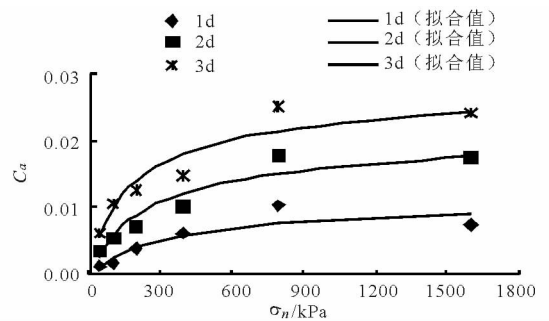


图6 试验值与拟合值的比较

Fig. 6 Comparison of experimental and fitting results

经相关性检验,采用式(5)提出的  $\ln C_a$  与  $\ln \sigma_n$  之间的关系拟合出的次固结系数与试验资料分析值吻合很好,相关系数均在 0.90 以上。表明式(5)可以较好拟合次固结系数与固结压力的关系(图6)。

## 4 结 论

通过采取分别加载的单向固结蠕变试验,对杨凌地区黄土的固结蠕变特性进行了研究,分析得到了蠕变曲线和蠕变特征参数,采用经验模型拟合得到黄土的固结蠕变本构关系,并拟合出参数,经过验证,该本构关系能够较好的模拟杨凌地区黄土的固结蠕变特性。另外,基于试验资料分析得到次固结系数与固结压力的关系。

然而,土体固结蠕变特性的研究仍然面临着很大的困难,主次固结的划分标准和次固结计算公式不统一,地区性差异、次固结过程中时间、加载比等因素的影响仍然需要岩土工作者做出进一步的努力。

## 参 考 文 献

- [1] 程海涛,刘保健,谢永利. 重塑黄土变形特性[J]. 长安大学学报(自然科学版),2008,28(5):31~34.  
Cheng Haitao, Liu Baojian, Xie Yongli. Deformation characteristics of remolded loess. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2008,28(5):31~34.
- [2] 吴燕开,陈红伟,张志征. 饱和黄土的性质与非饱和黄土流变模型[J]. 岩土力学,2004,25(7):1143~1146.  
Wu Yankai, Chen Hongwei, Zhang Zhizheng. Characteristics of saturated loess and rheological model of unsaturated loess in Xi'an. Rock and Soil Mechanics, 2004,25(7):1143~1146.
- [3] 刘保健,张晓荣,程海涛. 应变控制下压实黄土的动三轴试验研究[J]. 岩土力学,2007,28(6):1073~1076.  
Liu Baojian, Zhang Xiaorong, Cheng Haitao. Study on compacted loess under strain control at dynamic triaxial test. Rock and Soil mechanics, 2007, 28(6):1073~1076.
- [4] 汪斌,朱杰兵,唐辉明,等. 黄土坡滑坡滑带土的蠕变特性研究[J]. 长江科学院院报,2008,25(1):49~52.  
Wang Bin, Zhu Jiebing, Tang Huiming, et al.. Study on creep behavior of slip band soil of Huangtupo landslide. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(1):49~52.
- [5] 严绍军,项伟,唐辉明,等. 大岩溜滑坡滑带土蠕变性质研究[J]. 岩土力学,2008,29(1):58~62.  
Yan Shaojun, Xiang Wei, Tang Huiming, et al.. Research on creep behavior of slip band soil of Dayantang landslide. Rock and Soil Mechanics, 2008,29(1):58~62.
- [6] 蒋甫,应荣华. 黄土粘弹性性质的室内外试验分析[J]. 地下空间与工程学报,2008,4(2):269~273.  
Jiang Fu, Ying Ronghua. Analysis on loess viscoelasticity by laboratory and field tests. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(2):269~273.
- [7] 维亚洛夫 C. C. 土力学的流变原理[M]. 北京:科学出版社,1987.  
SERGEI S VYALOV. Rheological fundamentals of soil mechanics. Beijing: Science Press, 1987.
- [8] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京:水利电力出版社,1988.  
Huang Wenxi. Engineering characteristics of soil. Beijing: Hydraulic and Electric Press, 1988.
- [9] Bjerrum L. Engineering geology of normally - consolidated marine clays as related to the settlement of buildings[J]. Geotechnique, 1967, 17(2):83~118.
- [10] 王常明,肖树芳,夏玉斌等. 海积软土的固结蠕变性状[J]. 长春科技大学学报,2000,30(1):57~60.  
Wang Changming, Xiao Shufang, Xia Yubin, et al.. On consolidation creep behavior of marine soft soil. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2000, 30(1):57~60.
- [11] 王常明,陈英姿,张淑华. 软土非线性蠕变压缩模型[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2004,34(3):420~424.  
Wang Changming, Chen Yingzi, Zhang Shuhua. A one - dimensional compression model considering nonlinear creep characteristics of marine soft soil. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2004, 34(3):420~424.
- [12] 刘雄. 岩石流变学概论[M]. 北京:地质出版社,1994.  
Liu Xiong. An introduction to rock rheology. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [13] 张军辉,缪林昌,黄晓明. 连云港软黏土次固结变形研究[J]. 水利学报,2005,36(1):116~119.  
Zhang Junhui, Miao Linchang, Huang Xiaoming. Study on secondary consolidation deformation of soft soil. Shuili Xuebao, 2005, 36(1):116~119.
- [14] 张卫兵,谢永利,杨晓华. 压实黄土的一维次固结特性研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(5):765~768.  
Zhang Weibing, Xie Yongli, Yang Xiaohua. Research on 1D secondary consolidation characteristics of compacted loess. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007,29(5):765~768.
- [15] 雷华阳,肖树芳. 天津软土的次固结变形特性研究[J]. 工程地质学报,2002,10(4):385~389.  
Lei Huayang, Xiao Shufang. Study on secondary - consolidation deformation characteristics of soft soil in Tianjin. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(4):385~389.