

文章编号: 1000 - 7598 (2014)增 2 - 0053 - 08

不同应力状态下软黏土蠕变特性试验研究

杨爱武^{1,2}, 张兆杰¹, 孔令伟²

(1. 天津城建大学 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384;
2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 土的蠕变性质受到许多因素的影响, 在不同的应力条件下土会呈现出不同的性状。天津滨海吹填软土同样具有一般软土的蠕变特性, 以其为研究对象, 利用土体三轴流变试验机进行了三轴不固结不排水蠕变试验和单轴压缩蠕变试验, 并选取了 10 个时间节点取样进行微型十字板剪切试验, 研究抗剪强度变化规律。试验结果表明, 单轴压缩蠕变和三轴蠕变历时曲线都具有非线性的特征, 随应力水平的提高, 单轴压缩蠕变的应力-应变等时曲线向应力轴靠拢, 三轴蠕变的应力-应变等时曲线向应变轴靠拢; 线性蠕变变形的情况下黏滞系数主要与时间有关, 非线性的情况下与时间和应力水平都相关; 在三轴蠕变状态下压缩模量随时间增长而减小, 长期强度随时间先降低再趋于稳定; 单轴压缩时压缩模量随时间增长而提高, 长期强度随时间先增长后稳定。最后经过推导得出了不同应力状态下的长期强度随时间、偏应力的函数关系式。

关 键 词: 软黏土; 蠕变; 黏滞系数; 长期强度

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Experimental study of creep property of soft clay under different stress conditions

YANG Ai-wu^{1,2}, ZHANG Zhao-jie¹, KONG Ling-Wei²

(1. Key Laboratory of Soft Soil Engineering Character and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The creep of soil is affected by many factors, behaving variable under different conditions. Tianjin Binhai dredger fill also has soft soil creep characteristics possessed by the general. Unconsolidated and non-drained triaxial tests and uniaxial compression creep tests were carried out with the soil triaxial rheological testing machine to study the creep characteristics of soft dredger fill, 10 time node samplings during creep have been selected for miniature vane shear test to study the variation of long-term strength. The results showed that: uniaxial compression creep and triaxial creep duration curve has a nonlinear characteristic, the isochronous curves deviated to the stress axis with the improvement of stress in uniaxial compression creep, while the isochronous curves deviated to the strain axis in triaxial creep. Viscosity coefficient is merely relative with the time under the linear condition, while associating with time and stress level on the nonlinear condition. In the three axis creep condition, the compression modulus decreases with the time increasing, the long-term strength firstly decreases and then tends to be stable over time. The uniaxial compression modulus increases with time increasing, Therefore the functional relations of the long-term strength are derived with time and deviatoric stress under different states of stress.

Key words: soft clay; creep; viscosity coefficient; long-term strength

1 引 言

软土的力学特性不同于一般黏性土, 具有高含水率、高孔隙比、高压缩性、低强度和低渗透性等特点, 蠕变性是其基本特性之一。土的蠕变特性对于土体固结、土坡稳定以及地基承载力具有显著影

响, 因而一直是土力学中关注的焦点, 国内外的学者针对软土蠕变特性开展了诸多研究^[1-6]。

简单的蠕变试验可以在压缩仪以及直剪仪中进行, 陈晓平等^[7]通过一维固结试验建立了实用的非线性弹黏性固结模型。马莉英等^[8]、骆亚生等^[9]对陕西黄土进行一维剪切蠕变试验研究, 从土微观结

收稿日期: 2013-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51179186, No. 41372291, No. 41102200)。

第一作者简介: 杨爱武, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 从事软土地基处理及土体微观结构研究。E-mail: tulilab@163.com

构角度分析黄土蠕变特性。雷华阳等^[10]利用单向固结仪和改进的直剪蠕变仪分析其蠕变性状的结构性效应和影响因素,建立了相应的蠕变模型。张先伟等^[11-12]对结构性软土进行直接剪切蠕变试验研究,探讨了土的黏滞系数并提出了求长期强度的方法。由于一维剪切蠕变试验是在有侧限条件下进行,为了获得接近实际应力条件下土的蠕变规律,一些研究者开展了三轴剪切蠕变试验,王常明^[13]对滨海软土的蠕变规律进行三轴蠕变试验,证明了滨海相沉积软土的非线性,并提出了修正的Singh-Mitchell模型。Bhat等^[14]通过改良的三轴扭转剪切仪研究了软黏土的蠕变特性。Leoni等^[15]提出了关于软土各向异性的蠕变模型。闫澍旺等^[16]、杨爱武等^[17]对天津滨海吹填软土进行三轴蠕变试验研究,提出了天津滨海新区软黏土的无屈服面蠕变模型以及蠕变条件下结构强度变化特性。孔令伟等^[18]、何利军等^[19]对湛江黏土进行三轴剪切蠕变试验研究,分析了蠕变性状的结构性效应并分别建立了蠕变模型。刘汉龙等^[20]采用可施加负压的三轴仪开展了真空预压、堆载预压以及真空-堆载联合预压作用下软土的固结蠕变试验,研究加载率、应力比和时间等对软土蠕变特性的影响。上述研究推动了软土蠕变特性的研究,然而多是考虑土在单一受力状态下的蠕变试验。事实上,鉴于土的蠕变现象多表现为黏弹塑性特征,应力状态对于土的蠕变特性具有显著影响,进行不同应力状态软土的蠕变特性研究具有重要意义。

随着天津滨海新区基本建设的发展,在吹填场地上兴建公路、铁路、高层建筑以及大面积堆载等日益增多,这些荷载长期作用下引发的地面不均匀沉降灾害日益显现。不同的应力状态下土体长期变形、强度变化趋势具有差异性,本研究以吹填软土为研究对象,对其进行单轴压缩蠕变和三轴蠕变试验,对比分析其长期蠕变变形特性,通过微型十字板测定不同时刻的抗剪强度,分析其黏滞性和长期强度变化趋势,为选择合适的蠕变模型参数及预测天津地区吹填软土地基的长期沉降提供参考。

2 试验土样与试验方案

吹填土是人工参与制造的一种特殊土,天津滨海新区属于典型的淤泥质海岸,吹填物质中黏土矿物所占比例高达50%以上,并以伊利石、伊蒙混层为主,是我国东部沿海地区吹填造陆中比较特殊的吹填物源。试验土样取于天津滨海新区临港工业区吹填场地,取土深度为3.0~5.0 m,其基本物理力学

性质统计见表1。由表可见,天津吹填软土含水率较高,孔隙比较大,接近1.5,原状土的压缩性亦较大,具有典型软土特征。

表1 现场吹填土基本物性指标
Table 1 Basic physical parameters of in-situ dreger fill

含水率 w/%	密度 ρ /(g/cm ³)	孔隙 比	液限 w_L /%	塑限 w_p /%	塑性 指数 I_p	压缩 系数 a_{1-2} /MPa ⁻¹	压缩 模量 E_s /MPa
55.5	1.72	1.495	42.4	21.4	21.0	1.279	1.713

三轴蠕变试验采用长春机械科学研究院有限公司生产的TSS10型土体三轴流变试验机。土样是直径为39.1 mm,高80 mm的原状土,土样的取土深度在5 m左右,为了使研究的成果更符合现场工程实际,试验围压为50 kPa。由于吹填软土为高塑性指数的黏土,且现场实际中排水条件有限,本次开展不固结不排水蠕变试验。根据三轴剪切试验确定加载水平为5、10、15、20、25 kPa,采用分别加载的方式。同时,为了研究土体抗剪强度随时间的变化规律,试验进行到1、2、4、8、24、48、72、96、120、144 h时停止试验,取出土样,切取高度为2 cm的试验土样进行微型十字板剪切,测定其抗剪强度。取样方案如图1所示。图中,实心黑圆点代表取样时间点。

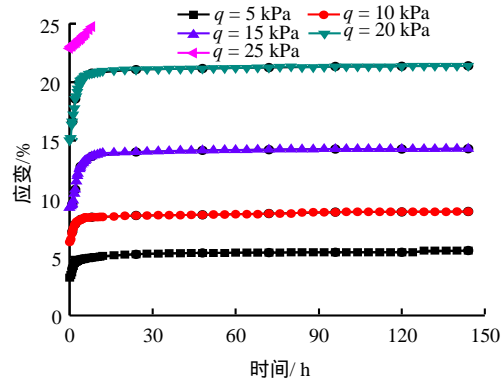


图1 取样示意图

Fig.1 Sketch of select samples

单轴压缩蠕变试验采用分别加载的方式,对原状土样分别施加25、50、100、200、400 kPa的荷载,选取与三轴蠕变试验相同时间点的样本用微型十字板测定其抗剪强度。

3 试验结果与分析

3.1 蠕变曲线分析

按照上述试验方案,得到每一级应力水平下应变与时间的完整蠕变曲线,试验结果如图2所示。

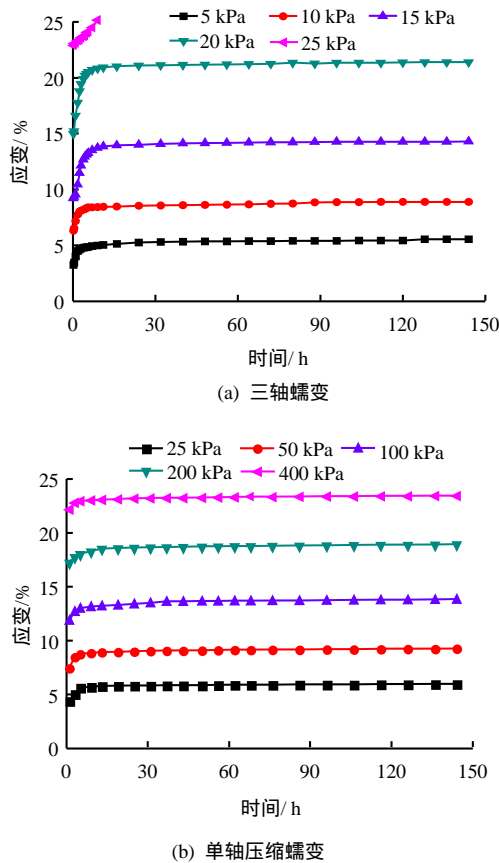


图2 蠕变历时曲线
Fig.2 Creep diachronic curves

由图 2(a)蠕变曲线可知，吹填软土不排水三轴蠕变具有非线性特征，随着偏压的增大，变形斜率逐渐增大，最终趋于加速破坏。应力水平较低时，蠕变曲线主要为衰减型蠕变，变形最终趋于一个稳定值；应力水平达到破坏强度时，土样经过短暂的黏滞流动后进入加速蠕变阶段最终发生破坏。由图 2(b)可知，单轴压缩蠕变曲线呈衰减型蠕变，说明随着应力水平的提高，侧限条件下土体的变形主要由土颗粒之间的挤压、镶嵌产生。在同一级应力水平下，单轴压缩产生的蠕变变形明显小于三轴蠕变的变形值。同时，由于受侧限限制，即使在高应力水平下，试样也没有出现明显剪切破坏。

3.2 应力-应变等时曲线分析

由于图 2 中蠕变曲线无法直观观察土的非线性蠕变形态，而应力-应变等时曲线能够反映这一特征，绘制应力-应变等时曲线如图 3 所示。

图 3(a)的三轴蠕变应力-应变等时曲线具有应变硬化的特征，在三轴不排水蠕变试验中，随着荷载的增加，结构被破坏，土体变形以非线性为主，因而应力-应变等时曲线逐渐向应变轴靠拢。在小应力情况下，应力-应变等时曲线为一簇放射状的直

线；应力水平越高，应力-应变等时曲线的非线性明显，曲线偏离直线的程度越大，说明非线性程度随应力水平的提高而明显。图 3(b)的单轴蠕变应力-应变等时曲线具有非线性的特征 随着荷载的增加，曲线向应力轴靠拢。在侧限条件下，土样变形受到束缚，应力水平较低时曲线簇近似为一条直线；随着应力水平的提高，蠕变变形越大，时间作用越显著。

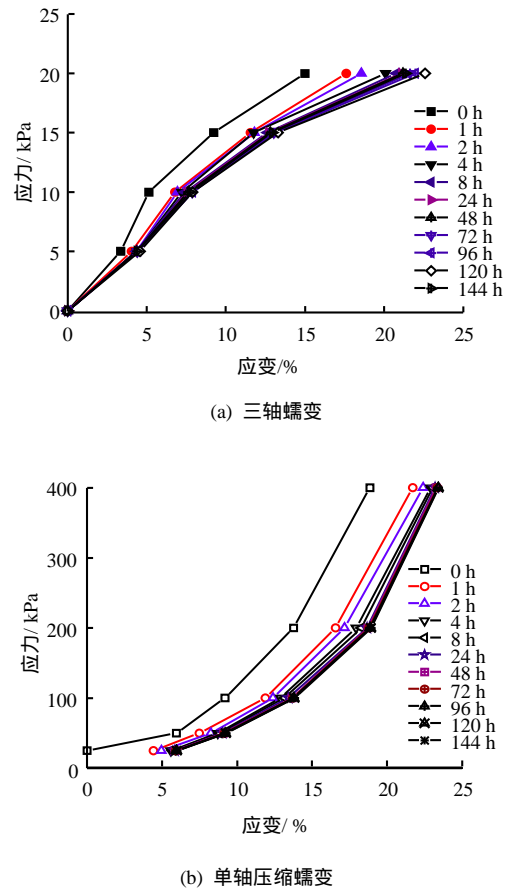


图3 应力-应变等时曲线
Fig.3 Isochronous creep curves of stress-strain

3.3 压缩模量分析

压缩模量为土体在完全侧限条件下的竖向附加应力与相应的应变增量之比，是反映土体性能的评价指标之一。对于大多数土体，尤其是软土，在外荷载作用下其体积压缩是有时间性的，是一个逐渐发展的过程，这一过程中土体的各种压缩性指标是不断变化的^[21]，因此，在等时曲线的基础上可以绘制出压缩模量随时间的关系曲线，如图 4 所示。

由图4(a)可以看出，三轴蠕变中偏应力较小时，压缩模量较高，说明土体刚度随应力水平的提高而减小；在某一级给定的偏应力下，压缩模量随时间先降低，最终趋于一个常数，这是由于在应力水平较高时，土颗粒之间的作用增强，黏滞性增加，流

动性降低。由图4(b)可知，单轴压缩过程中，同一荷载作用下压缩模量随时间的增加不断增大，说明在侧限条件下，孔隙体积减小，土体密度不断增大，抗剪强度逐渐增强。

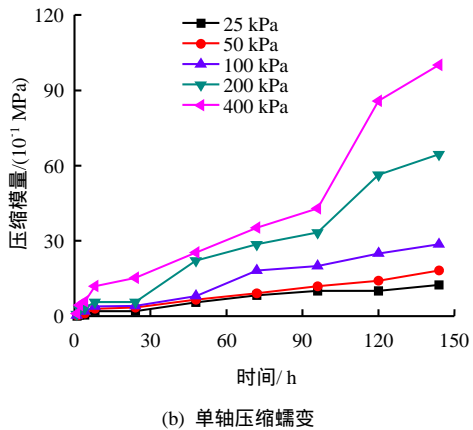
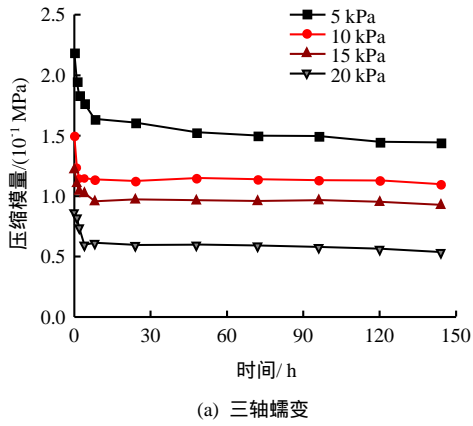
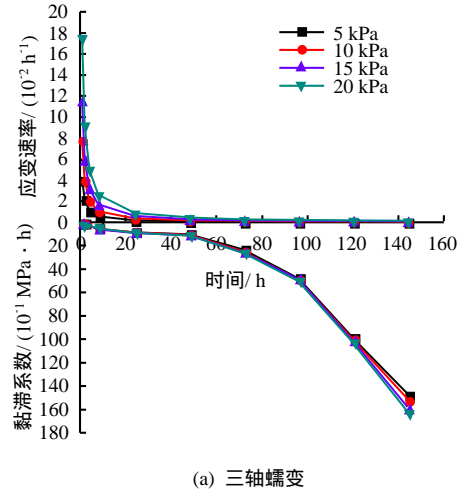


图4 压缩模量与时间关系曲线
Fig.4 Curves of compression modulus with time

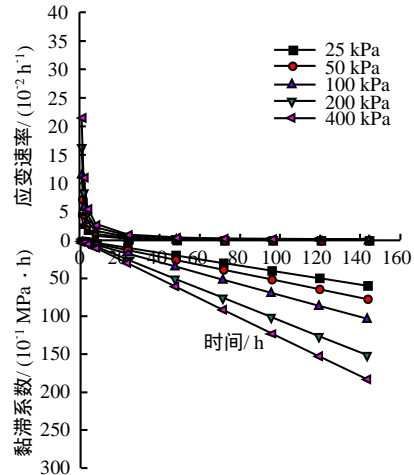
3.4 黏滞系数分析

用流变学的观点分析土体的变形时通常假定土体为某种黏弹、黏塑或是其他各种组合体，并都采用了这样一个假定：土具有黏滞性。按照黏滞系数 η 最基本的定义： $\tau \propto v, \tau \propto \frac{1}{\theta}$ 。于是， $\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt} = \eta \dot{\gamma}$ ，在等时曲线的基础上，整理出 $\sigma - \dot{\epsilon}$ 关系曲线，由此来得到 η 值。研究吹填软土的黏滞系数随时间和应力的变化规律，可以分为黏弹性和黏塑性两种情况进行讨论。根据文献[1]的方法将等时曲线划分为弹性流变阶段和塑性流变阶段并按照黏滞系数的定义整理，线性阶段结果如图5所示，黏塑性阶段结果如图6、7所示。黏弹性阶段黏滞系数反映了黏弹性应变速率的变化情况，由图5可知，黏滞系数随时间的增加而增加，且以加速的形式发展，并很快达到相对很大的值，线性黏弹性应变速率随时间的增加而减少，并很快成为一小值，直至趋于0，

即在线性黏弹性阶段黏滞系数主要与时间有关。当侧向变形受限制线性黏弹性应变达到稳定所需要的时间比三轴蠕变状态下需要的时间要少。



(a) 三轴蠕变



(b) 单轴压缩蠕变

图5 黏弹性阶段应变速率及黏滞系数与时间关系曲线
Fig.5 Curves of viscosity coefficient and strain rate with time of viscoelastic stage

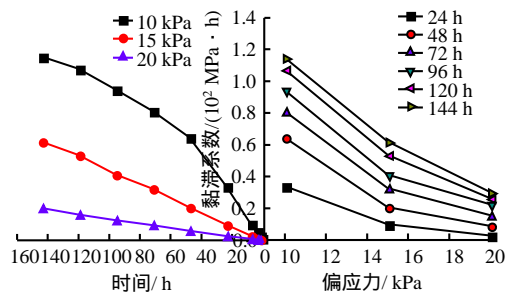


图6 三轴蠕变黏塑性阶段黏滞系数与时间及偏应力变化关系

Fig.6 Curves of viscosity coefficient with time and deviatoric stress of viscoplastic stage of triaxial rheological

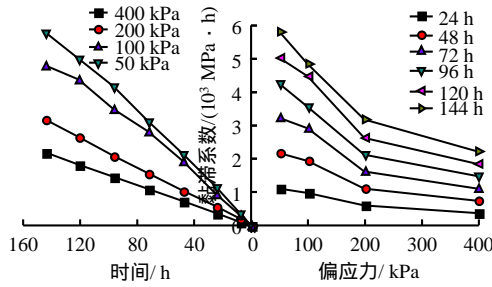


图 7 单轴压缩蠕变黏塑性阶段黏滞系数与时间及偏应力变化关系

Fig.7 Curves of viscosity coefficient with time and deviatoric stress of viscoplastic stage of uniaxial compression creep

由图 6 可知，在黏塑阶段黏滞系数反映了塑性黏滞流动的情况。非线性黏塑性黏滞系数不仅与时间有关，还随应力水平变化。三轴蠕变过程中，黏滞系数在不同应力水平下都随着时间增长，而且在小应力下变化比较明显。非线性黏塑性黏滞系数随应力水平的提高而减小，且当应力水平较高时，黏滞系数随应力水平的变化近乎是线性衰减。

图 7 表明，单轴压缩过程中非线性黏塑性黏滞系数在不同荷载作用下随时间近乎呈线性增长。黏滞系数随着应力水平的提高先减小而后趋于一个常数，并且荷载作用时间越长，这种变化越明显。

3.5 蠕变试验强度变化分析

通过微型十字板剪切试验测得到的不同时间点的抗剪强度如图 8 所示。由图 8(a)可知，单轴压缩蠕变状态下土样抗剪强度随着应力水平的提高而增长，且在同一应力水平下抗剪强度随时间增长呈现衰减型增长，最后趋于稳定。由图 8(b)可知，三轴蠕变状态下抗剪强度随着时间的增长先减小，最终趋于一个常数。根据上面的分析，在单轴压缩蠕变中，土的长期抗剪强度与时间 t 的关系可用对数函数拟合：

$$P = \lambda \ln(t / t_0 + 1) + \mu \quad (1)$$

式中： P 为长期抗剪强度； λ 、 μ 分别为函数关系式中的参数；参数 t_0 是为了使等式满足初始时刻的要求，并且对试验的结果影响不大，拟合结果列于表 2， λ 、 μ 与偏应力 σ_d 的关系如图 9 所示。

由图 9 可知，采用对数函数拟合 λ -偏应力关系、一次函数拟合 μ -偏应力关系，效果较好，将其代入对数关系式中可得长期抗剪强度 P 与时间 t 及偏应力 σ_d 的关系为

$$P = (\alpha \ln \sigma_d + \beta) \ln(t / t_0 + 1) + \alpha_1 \sigma_d + \beta_1 \quad (2)$$

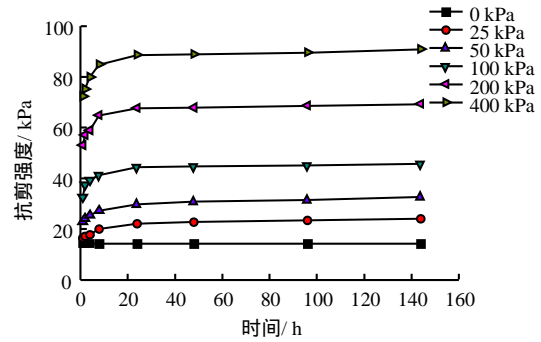
式中： α 、 β 、 α_1 、 β_1 均为参数， $\alpha = 0.8296$ ， $\beta =$

-1.199 ， $\alpha_1 = 0.19448$ ， $\beta_1 = 13.74787$ ， $t_0 = 1$ h。

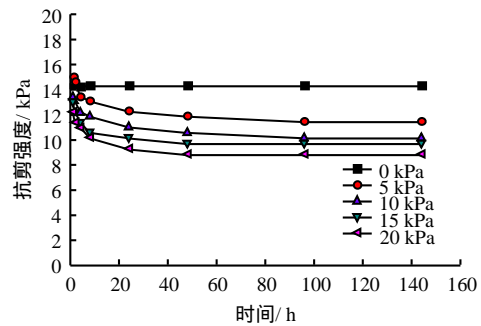
在三轴蠕变中，长期抗剪强度 P 与时间 t 的关系用幂函数表示为

$$P = \lambda(t / t_0 + 1)^{-\mu} \quad (3)$$

式中： λ 、 μ 为参数，拟合结果见表 3。 λ 、 μ 与偏应力 σ_d 的关系如图 10 所示。



(a) 单轴压缩蠕变



(b) 三轴蠕变

图 8 抗剪强度与时间关系曲线

Fig.8 Curves of shear strength with time

表 2 单轴试验参数拟合值

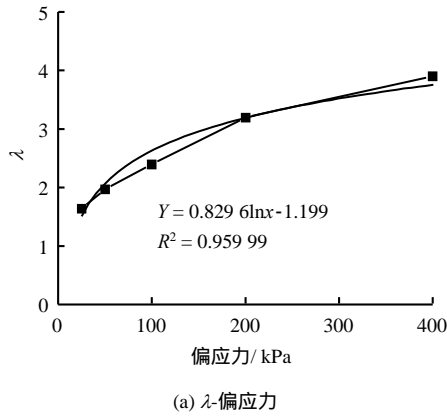
Table 2 Fitting results of parameters in uniaxial test

偏应力/ kPa	λ	μ	回归系数
25	1.639 49	16.262 91	0.976
50	1.972 53	22.911 89	0.990
100	2.395 54	35.117 64	0.913
200	3.194 25	55.140 51	0.922
400	3.904 04	90.026 43	0.956

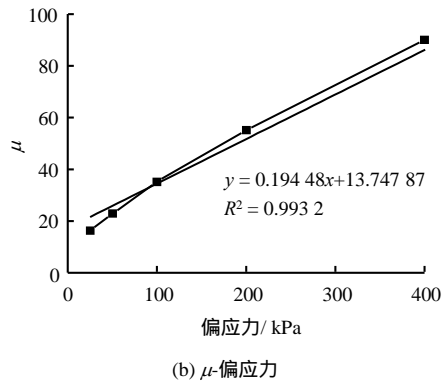
由图 10 可知，可以采用一次函数拟合 λ -偏应力关系、指数函数拟合 μ - σ 偏应力关系。将其代入对数关系式中可得长期强度 P 与时间 t 及偏应力 σ_d 的关系如下：

$$P = (\alpha + \beta \sigma_d)(t / t_0 + 1)^{-\alpha_1 e^{\sigma_d / \beta_1} + \gamma_1} \quad (4)$$

式中： α 、 β 、 α_1 、 β_1 、 γ_1 均为参数， $\alpha = 15.63459$ ， $\beta = -0.18412$ ， $\alpha_1 = 0.0000110787$ ， $\beta_1 = 3.72371$ ， $\gamma_1 = 0.005954$ ， $t_0 = 1$ h。



(a) λ -偏应力



(b) μ -偏应力

图9 单轴试验参数 λ 、 μ 与偏应力的关系

Fig.9 Curves of λ , μ with deviatoric stress in uniaxial test

表3 三轴试验参数拟合值

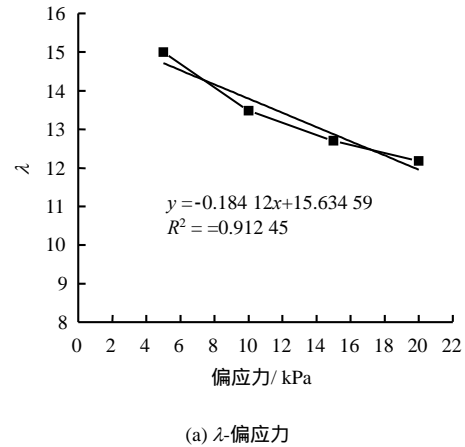
Table 3 Fitting results of parameters in triaxial test

偏应力/ kPa	λ	μ	回归系数
5	14.989 13	0.059 71	0.978
10	13.468 14	0.061 54	0.993
15	12.698 10	0.065 61	0.949
20	12.177 22	0.083 38	0.994

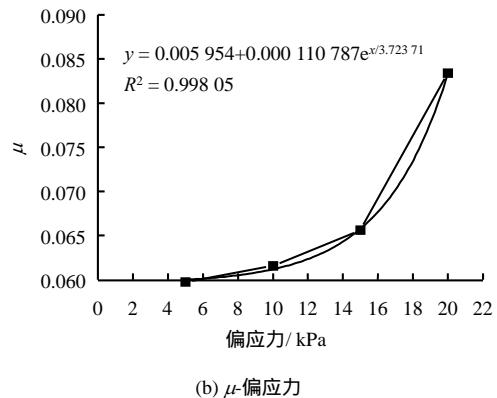
4 讨论

关于土的单轴压缩蠕变问题着重研究土体在有效应力不变的情况下土的变形与时间的关系，可以反映大面积堆载预压等工程场地的土体沉降。三轴不固结不排水蠕变是在土体体积不变的条件下产生的变形，可以模拟排水条件差的场地因建筑等荷载引起的沉降。

不同的应力状态对吹填土的非线性蠕变特性有所影响，在三轴蠕变试验中，无孔隙水的排出，总应力不变，有效应力逐渐减小，土体的变形与施加的偏应力大小有关。当应力水平较低时，土体表现为黏弹性特性，其蠕变呈衰减稳定型；当应力水平较高时，土体表现为黏塑性特性，其蠕变曲线具有明显的非线性，且应力水平越高，作用时间越长，



(a) λ -偏应力



(b) μ -偏应力

图10 三轴试验参数 λ 、 μ 与偏应力的关系

Fig.10 Curves of λ , μ with deviatoric stress in triaxial test

非线性蠕变越明显。在单轴压缩蠕变试验中，在应力水平较低时，孔隙水的排出量是土体变形的主要原因。加荷初期，土体产生一定的固结变形，随着时间的增长，孔隙水不断排出，其蠕变变形明显；在应力水平较高时，加荷瞬时，土体产生较大的瞬时变形，然后随着时间的增长，孔隙水的排出量逐渐减少，其蠕变变形也随之减小。

不同的应力状态影响土体的黏滞性，在黏弹性阶段，单轴压缩蠕变试验中土的黏弹性应变速率比其在三轴蠕变中衰减的快，黏滞系数随时间增长的速度也快。原因是由于在单轴压缩蠕变试验中，双面排水，土体在压缩过程中也逐渐压密，胶结性增大。而在三轴不排水蠕变试验中，在荷载的作用下土体产生侧向变形，结构变松散，出现黏滞流动。黏塑性阶段，当应力水平很高或时间很长时，不同时间或不同应力水平下的非线性黏塑性黏滞系数都较小，且两种应力状态下结果比较接近，说明此时的非线性黏塑性应变很大，土体内部结构发生改变。

不同的应力状态对吹填土的长期强度也有所影响，在双面排水条件下，单轴压缩蠕变随着荷载

等级的提高,有效应力增加,土体密度不断增大,抗剪强度呈增长趋势。三轴不排水蠕变试验中,土样无侧向变形限制,随着应力水平的提高,土体不是被压密,而是形状发生改变,结构破坏,土颗粒之间重新形成定向排列,导致土的强度会随时间增长而降低。

5 结 论

(1) 单轴压缩蠕变为衰减型蠕变,在侧限条件下随着应力水平的提高应力-应变等时曲线向应力轴靠拢。三轴蠕变在小应力下呈衰减型蠕变,大应力下呈非衰减型蠕变,应力-应变等时曲线中随着应力水平的提高曲线向应变轴靠拢。

(2) 线性蠕变阶段黏滞系数主要与时间有关,而非线性阶段与时间、应力水平都有关,并且在土体的整个变形过程中黏滞系数随时间增大,应变速率随时间减小最终趋于 0,但三轴蠕变状态下黏滞系数随偏应力、时间变化比单轴压缩蠕变状态快。

(3) 在三轴蠕变过程中剪切模量、长期强度均随时间先降低再趋于稳定,单轴压缩状态下压缩模量随时间增长而提高,长期强度随时间先增长后稳定。数据经过拟合,得出了不同应力状态下的长期强度随时间、偏应力的函数关系式,这对预测天津地区吹填软土的长期强度具有一定的理论意义。

参 考 文 献

[1] 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: 75 - 80.

[2] BIPUL C. HAWLADER, MUHUNTHAN B, et al. Viscosity effects on one-dimensional consolidation of clay[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2003, 3(1): 99 - 110.

[3] LI Shu-cai, HUANG mao-song. Undrained long-term cyclic degradation characteristics of offshore soft clay[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 37(5): 263 - 271.

[4] DiAZ J A Rodríguez, LEROUÉIL S, LEMÁN D. Yielding of Mexico City clay and other natural clays[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1992, 118(7): 981 - 995.

[5] 杨爱武, 杜东菊, 卢力强. 天津吹填软土沉积特性及其微观结构研究[J]. *水文地质工程地质*, 2010, 37(5): 83 - 87.

YANG Ai-wu, DU Dong-ju, LU Li-qiang. Study on sediment characteristics and micro-structure of soft dredger soil of Tianjin[J]. *Hydrogeology and Engineering*

Geology, 2010, 37(5): 83 - 87.

- [6] 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 Hua-yang, XIAO Shu-fang. Study on secondary-consolidation deformation characteristics of soft soil in Tianjin[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2002, 10(4): 385 - 389.
- [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 Xiao-ping, BAI Shi-wei. 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] 马莉英, 肖树芳, 王清. 黄土的流变特性模拟与研究[J]. *实验力学*, 2004, 19(2): 178 - 182.
- Ma Li-ying, XIAO Shu-fang, WANG Qing. Simulation and study on rheological behavior of[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2004, 19(2): 178 - 182.
- [9] 王松鹤, 骆亚生, 董晓宏, 等. 黄土剪切蠕变特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(5): 3088 - 3092.
- WANG Song-he, LUO Ya-sheng, DONG Xiao-hong, et al. Experimental study of shear creep characteristics of loess[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(5): 3088 - 3092.
- [10] 雷华阳, 贾亚芳, 李肖. 滨海软土非线性蠕变特性的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(增刊 1): 2806 - 2816.
- LEI Hua-yang, JIA Ya-fang, LI Xiao. Experimental study of nonlinear creep property of soft soil in littoral area[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(Supp.1): 2806 - 2816.
- [11] 张先伟, 王常明. 结构性软土的黏滞系数[J]. *岩土力学*, 2011, 32(11): 3276 - 3282.
- ZHANG Xian-wei, WANG Chang-ming. Viscosity coefficient of structural soft clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(11): 3276 - 3282.
- [12] 张先伟, 王常明. 漳州软土直接剪切蠕变特性及蠕变参数的研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2011, 43(4): 71 - 76.
- ZHANG Xian-wei, WANG Chang-ming. Study on direct shearing creep characteristics of Zhangzhou soft clay and creep parameters[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2011, 43(4): 71 - 76.
- [13] 王常明, 王清, 张淑华. 滨海软土蠕变特性及蠕变模

- 型[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 227 - 230.
WANG Chang-ming, WANG Qing, ZHANG Shu-hua. Creep characteristics and creep model of marine soft soils[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(2): 227 - 230.
- [14] BHAT D R, BHANDARY N P, YATABE R, et al. A new concept of residual-state creep test to understand the creeping behavior of clayey soils[C]//GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering. Reston: [s. n.], 2012.
- [15] LEONI M, KARSTUNEN M, VERMEER P A. Anisotropic creep model for soft soils[J]. **Géotechnique**, 2008, 58(3): 215 - 226.
- [16] 闫澍旺, 刘克瑾, 李伟, 等. 天津滨海新区软黏土的蠕变特性及无屈服面模型研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1431 - 1436.
YAN Shu-wang, LIU Ke-jin, LI Wei, et al. Study of creep properties of soft clay in Tianjin Binhai new area and no-yield-surface constitutive model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(5): 1431 - 1436.
- [17] 杨爱武, 闫澍旺, 杜东菊. 蠕变条件下吹填软土结构强度形成研究[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(6): 62 - 83.
YANG Ai-wu, YAN Shu-wang, DU Dong-ju. A study of the formation of structure yield stress subject to creep of the soft dredger fill[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2011, 38(6): 62 - 83.
- [18] 孔令伟, 张先伟, 郭爱国, 等. 湛江强结构性黏土的三轴排水蠕变特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 365 - 372.
KONG Ling-wei, ZHANG Xian-wei, GUO Ai-guo, et al. Creep behavior of Zhanjiang strong structured clay by drained triaxial test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(2): 365 - 372.
- [19] 何利军, 孔令伟, 张先伟, 等. 湛江软黏土蠕变特性及经验模型[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(1): 59 - 64.
HE Li-jun, KONG Ling-wei, ZHANG Xian-wei, et al. Creep properties and empirical model of soft clay in Zhanjiang[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2011, 38(1): 59 - 64.
- [20] 刘汉龙, 扈胜霞. 真空-堆载预压作用下软土蠕变特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 6 - 12.
LIU Han-long, HU Sheng-xia. Test study on creep characteristics of soft clayey soils under consolidation by vacuum-surchage combined preloading method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 6 - 12.
- [21] 周翠英, 林春秀, 林鲁生, 等. 外荷载作用下软土压缩模量的动态演化规律研究[J]. 岩土力学, 2010, 32(7): 2040 - 2044.
ZHOU Cui-ying, LIN Chun-xiu, LIN Lu-sheng, et al. Research on dynamic evolution law of compression modulus of softclay under external loads[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 32(7): 2040 - 2044.