

平面变形超固结软黏土蠕变模型研究

李国维^{1,2}, 李响^{1,3}, 阮玉胜^{1,3}, 侯宇宙^{1,3}, 殷建华⁴

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 道路与铁道工程科学研究所, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 4. 香港理工大学 土木及工程结构系, 香港)

摘要: 通过对原状软土进行平面蠕变实验, 研究平面变形条件下超固结软黏土的蠕变特征。研究表明, 研制的量测装置能独立量测平面应变超固结软土的侧向变形, 可规避实验过程体积变形测量精度对侧向变形数据的影响; 软土的侧向变形与超固结剪应力比 OCR_q 具有良好的对应关系, OCR_q 能同时反映剪应力和应力历史对软土侧向变形的影响。平面应变状态下体积蠕变系数和轴向蠕变系数均与 OCR_q 有一一对应关系, 依据不同主应力比下的超固结软土平面变形蠕变实验, 建立以主应力比和超固结剪应力比为变量的四参数经验模型。所建经验模型包含软土的正常固结状态, 可合理反映了主应力比和应力历史对平面变形软土蠕变过程的影响。

关键词: 土力学; 平面应变; 超固结软土; 侧向变形; 经验模型

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2016)11 - 2307 - 09

Creep model of over-consolidated soft clay under plane strain

LI Guowei^{1,2}, LI Xiang^{1,3}, RUAN Yusheng^{1,3}, HOU Yuzhou^{1,3}, YIN Jianhua⁴

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Highway and Railway Research Institute, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 3. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 4. Department of Civil Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract: The creep behavior of over-consolidated soft clay was studied through plane strain tests for undisturbed soft clay using a new measuring device. The results show that the new measuring device can measure the lateral deformation of over-consolidated soft soil under plane strain and eliminate the influence of the accuracy in volumetric deformation measurement. There is a good correlation between the lateral deformation and the over-consolidation shear stress ratio (OCR_q), and the OCR_q reflects the effects of shear stress and stress history on the lateral deformation. Both the volumetric creep coefficient and the axial creep coefficient have a good correlation with the OCR_q . On the basis of the plane strain creep tests to the over-consolidated soft soil under different principal stress ratios, an empirical model with four parameters was developed. The variables in the model are the principal stress ratio and OCR_q . The empirical model takes into consideration of the normally consolidated state of soft soils and reflects reasonably the influence of principal stress ratio and stress history in the creep process under plane strain condition.

Key words: soil mechanics; plane strain; over-consolidation soft clay; lateral deformation; empirical model

收稿日期: 2015 - 10 - 11; **修回日期:** 2015 - 11 - 21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41272327); 江苏省自然科学基金项目(BK2011747); 高校业务费专项(2014B04914)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 41272327), Natural Science Foundation of Jiangsu Province(Grant No. BK2011747) and Fundamental Research Funds for the Central Universities of China(Grant No. 2014B04914)

作者简介: 李国维(1964 -), 男, 博士, 1986年毕业于华北水利水电大学工程地质与水文地质专业, 现任研究员、博士生导师, 主要从事软基路堤变形和高边坡稳定性等方面的教学与研究工作。E-mail: lgnwj@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.1395

1 引言

在我国的沿海、沿江以及内陆湖区，软黏土层广泛分布。深厚软土地基上存在的工后沉降问题给其公路、铁路、港口码头和机场等带来了一系列安全隐患。在实际工况中，为有效控制工后沉降，排水固结联合超载预压法被广泛使用。用超载预压处理后软基的工后沉降主要来自软土的蠕变变形。

工程地基不同位置的软土受力条件有所差异。处于路基中线附近的软土用一维方法计算其后期变形，实际上是对软基二维蠕变问题的简化。路堤边缘地基软土和桥头地基软土的后期变形则分别需要采用二维和三维方法处理。软基侧向位移产生的附加沉降会大幅降低设计预估沉降的精度，还会对路堤本身的稳定性产生一定影响^[1-3]。

侧向变形贯穿于软黏土蠕变整个过程中，掌握侧向变形对沉降影响的规律十分必要^[3-4]。软土的蠕变特征与土体的受力状态及应力历史都有一定关系^[5-6]。众多考虑流变的本构模型都需要确定较多的参数^[7-8]，且都未和应力历史直接相关，在一定程度上限制了模型的推广应用。而通过实验建立的蠕变经验模型，如 A. Singh 和 J. K. Mitchell^[9]提出的三维蠕变经验模型等，具有参数少拟合效果好的特点，但却不能反映应力历史上的影响。

本文通过平面变形超固结软土的蠕变实验，利用改造后的实验装置，分析了平面变形软土蠕变过程中侧向变形的规律及剪应力和超固结剪应力比 OCR_q 对其的影响；依据不同主应力比下的超固结软土平面蠕变实验，建立了以主应力比和超固结剪应力比为变量的四参数经验模型。

2 实验介绍

2.1 实验仪器

平面蠕变三轴仪。本文所述实验在平面蠕变三轴仪中进行，实验所采用仪器与李国维等^[10-11]中的一致。

侧向变形量测装置。平面蠕变三轴仪压力室通过两侧柔性水囊给试样施加侧向压力。处理数据时，用试样排水体积代替试样体积压缩量，进而换算出体积应变；侧向应变可通过体积应变减去轴向应变得到。此方法存在以下不足：只能在试样完全饱和时使用；轴向变形的测量误差会传递到侧向变形；

蠕变后期体变的增量趋于零，而轴向变形还在增加，导致换算的侧向变形不收缩反而膨胀，但实际情况中蠕变后期的侧向变形是不断收缩的，与换算结果矛盾。为独立测量试样在平面应变中侧向变形的蠕变过程，本实验使用了在原仪器基础上研发的试样侧向变形量测装置。图 1 即为该侧向变形装置的结构示意图，此装置已获得国家发明专利授权^[12]。

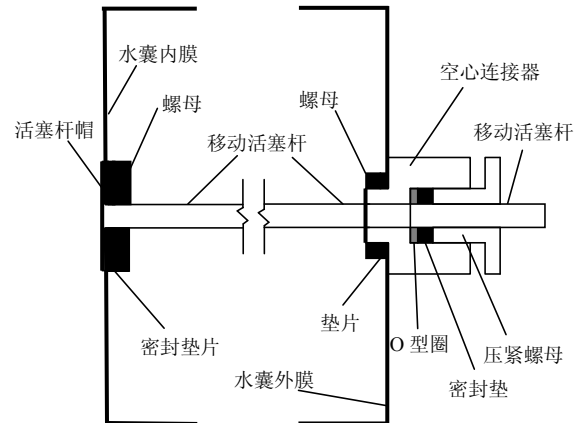


图 1 侧向变形装置结构示意图

Fig.1 Structure of lateral deformation measurement

在水囊内膜、外膜中心各开一圆孔，活塞杆依次穿过弹性水囊的外膜、内膜以及活塞杆通孔，用密封垫片及螺母密封活塞杆和橡皮膜的各个连接处(见图 1)。在实验中，当水囊施压于试样时，囊膜和试样侧面耦合为一体。试样产生侧向收缩变形时，囊膜带动活塞杆向试样移动；试样产生侧向膨胀变形时，囊膜带动活塞杆远离试样。活塞杆运动变形的大小可以通过相应的位移传感器测量出来，测量的结果就可以表征平面应变实验中试样的侧向变形。

活塞杆帽对试样的摩擦影响。试样发生轴向变形时，理论上活塞杆帽和试样侧面之间的摩擦会影响轴向变形的发展。但由于试样外包橡皮膜，且实验装样时在橡皮膜外层涂抹一层凡士林，有效降低了活塞杆帽与试样之间的摩擦。因此认为，这种影响可以忽略。

活塞杆的截面积影响试样侧面承受水囊压力的均匀性。活塞杆直径 $R_1 = 3 \text{ mm}$ ，活塞杆帽直径 $R_2 = 30 \text{ mm}$ ，在相同囊内压力 p_0 下，活塞杆帽对试样的平均压力 p_1 约为 p_0 的 99%，计算公式如下：

$$p_1 = \frac{p_0 \left(\frac{1}{4} \pi R_2^2 - \frac{1}{4} \pi R_1^2 \right)}{\frac{1}{4} \pi R_2^2} = p_0 \left(1 - \frac{R_1^2}{R_2^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{p_1}{p_0} = \left(1 - \frac{R_1^2}{R_2^2}\right) = 1 - \frac{3^2}{30^2} \approx 0.99 \quad (2)$$

活塞杆帽为刚性材料，帽下的压力均匀分布。计算表明帽下压力和帽周边压力差别为囊内压力的 1%，因此认为，这种差别对试样侧向变形的影响可以忽略。

改造后的侧向变形装置具有的优点包括：对于非饱和土也适用；便于对实验过程中试样侧向变形的发展过程直接观测；侧向变形数据独立于轴变数据和体变数据，能从多种方向获取试样的变形规律；侧向变形数据不受体变量测精度的影响，通过与根据理论关系获得的数据进行校对，可以对实验数据歧义点进行甄别。

实验过程中试样的尺寸及受力方向如图 2 所示。分别对试样 x 方向和 z 方向施加水平应力和竖直应力， y 方向为受刚性限位板限制方向，无应变。

在对平面应变流变仪改造之后，本流变仪可以对试样的体积排水量、轴向变形、侧向变形、 y 方向上的应力 σ_y 进行实时监测。

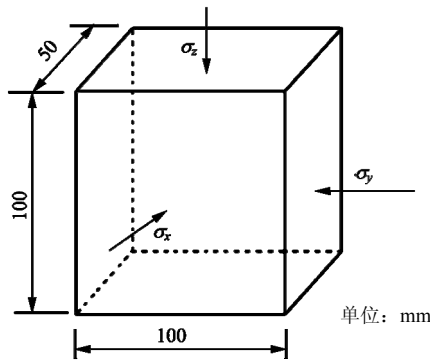


图 2 实验试样尺寸及受力方向

Fig.2 Sample dimensions and stress conditions in tests

2.2 实验方案

表 1 为实验土样的基本物理参数，为按照规程^[13]进行实验所得。本实验采用汕汾高速公路附近的原状均匀软黏土。土样的制取过程与李国维等^[10-11]中的一致。

表 1 土样物理参数

Table 1 Basic physical parameters of soil

编号	ω / %	ρ' / (g · cm ⁻³)	e	G_s	c / kPa	ϕ' / (°)	C_c	C_s	I_L	I_p	k / (10 ⁻⁶)
I	58.0	1.56	1.74	2.67	16.0	23.0	0.65	0.07	1.1	32	3.1
II	81.4	1.52	2.20	2.67	12.9	19.4	0.84	0.17	1.5	35	3.6
III											
IV	84.4	1.52	2.25	2.67	20.3	21.7	0.72	0.09	1.5	36	3.7

注： C_c 、 C_s 分别为压缩指数和回弹指数； I_L 、 I_p 分别为液性指数和塑性指数； k 为渗透系数。

本实验一共分为 4 组，其中 I、II 和 III 组来自李国维等^[10-11]中的实验成果，实验所有过程均在排水条件下进行。每组实验都限制试样的侧向压力与轴向压力的比值，即主应力比 K 为一恒定值。4 组实验的主应力比 K 值分别为 1/2、1/3、1/2.67 和 1/2.22。在实验开始前，所有试样均在(25 kPa, 25 kPa)的应力下预固结 24 h，此过程目的是为消除试样的初始差异性，保证每组试样的初始状态一致。准备过程后正式对各组试样进行逐级加载 - 回弹 - 再加载，让试样在不同主应力比和不同应力历史状态下进行蠕变。表 2 为 4 组试样的实验方案。

3 实验结果与分析

3.1 侧向变形量测装置的可靠性

第 IV 组试样采用改造后的平面应变流变仪进行实验，土体在平面应变中侧向变形的数据可直接通过传感器采集，为侧向应变实测值 ε_x 。侧向应变还可以通过换算得出：

$$\varepsilon'_x = \varepsilon_v - \varepsilon_z \quad (3)$$

式中： ε'_x 、 ε_v 和 ε_z 分别为侧向应变换算值、试样体积应变和轴向应变。图 3 为各试样同一荷载等级蠕变过程中 2 种侧向应变值的比较。

由从图 3(a)可知，同一土样中侧向应变的实测值和换算值数值相差不大，曲线变化趋势基本一致。在图 3(b), (c), (d)中也有相同现象。

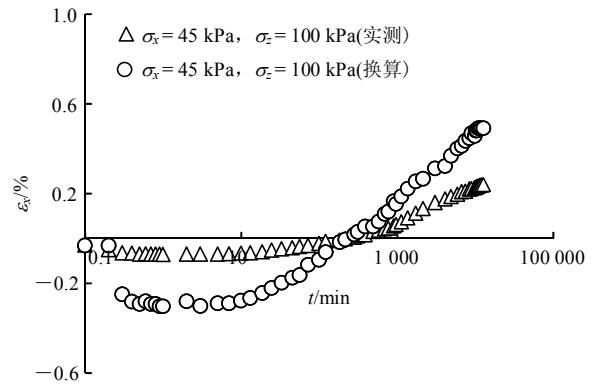
从实验结果来看，当主应力比为 1/2.22 时，超固结软黏土的侧向变形最终都表现为收缩变形。在试样加载初期侧向首先出现鼓胀变形，侧向变形的实测值和换算值均反映出这一点。这是因为轴向变形在加载初期有突变，此时土体未能迅速排水而表现为不排水固结，体变不变导致侧向表现为鼓胀变形。鼓胀过后进入稳定阶段，此时土体进入排水固结阶段，当 $t = 10 \text{ min}$ 左右时侧向开始收缩，并持续至蠕变结束，最终总体都变现为收缩变形。

图 4(a), (b)分别为 $\sigma_x/\sigma_z = 1/2.22$ ， $\sigma_{z\max} = 112.5 \text{ kPa}$ ， $\sigma_{z\max} = 250 \text{ kPa}$ 时，实验 IV - 3 中侧向变形的实测值和换算值，其中 q_0 为当前广义剪应力。

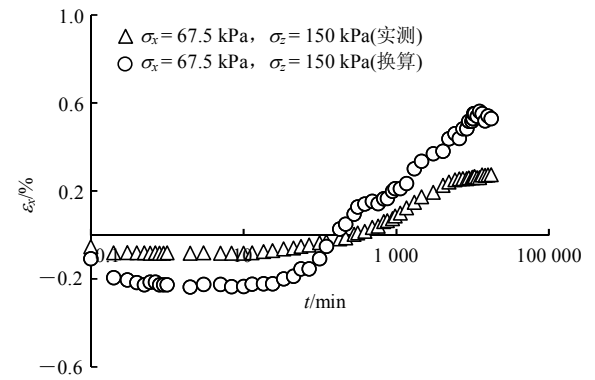
从图 4(a)可以看出，平面蠕变超固结软土侧向最终都表现为收缩变形。但每一荷载等级中侧向应变值却不尽相同。随着荷载等级的增加，侧向的瞬时鼓胀在增加，后期收缩变形也随之减小。而图 4(b)中侧向应变换算值却未能反映此规律，且平滑性较差。

表2 土样平面蠕变实验方案
Table 2 Plane strain creep tests scheme

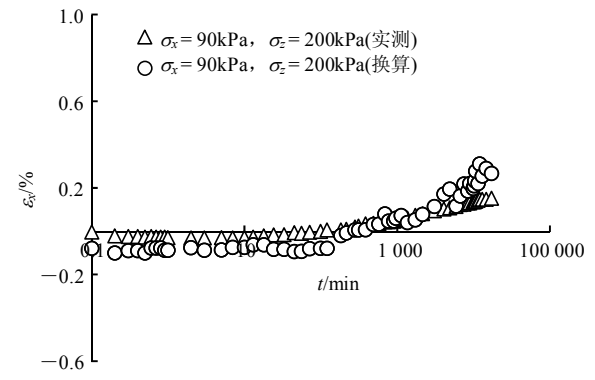
编号	σ_x/σ_z	荷载等级(σ_x, σ_z)/(kPa, kPa)	加载状态	时间/h
I-1		(25, 25) →	固结	24
		(50, 100) → (100, 200) →	加载	24
		(25, 25) →	回弹	24
		(50, 100) → (100, 200)	蠕变	168
I-2	1/2	(25, 25) →	固结	24
		(50, 100) → (100, 200) → (150, 300) →	加载	24
		(25, 25) →	回弹	24
		(50, 100) → (100, 200) → (150, 300)	蠕变	168
I-3		(25, 25) →	固结	24
		(50, 100) → (100, 200) → (150, 300) →	加载	24
		(200, 400) →	回弹	24
		(25, 25) →	蠕变	168
II-1		(25, 25) →	固结	24
		(40, 120) → (60, 180) →	加载	24
		(25, 25) →	回弹	24
		(40, 120) → (60, 180)	蠕变	360
II-2	1/3	(25, 25) →	固结	24
		(40, 120) → (60, 180) → (80, 240) →	加载	24
		(25, 25) →	回弹	24
		(40, 120) → (60, 180) → (80, 240)	蠕变	360
II-3		(25, 25) →	固结	24
		(40, 120) → (60, 180) → (80, 240) →	加载	24
		(100, 300) →	回弹	24
		(25, 25) →	蠕变	360
III	1/ 2.67	(25, 25) →	固结	24
		(45, 120) → (67.5, 180) →	加载	24
		(25, 25) →	回弹	24
IV-1		(45, 120) → (67.5, 180)	蠕变	360
		(25, 25) →	固结	24
		(45, 100) → (67.5, 150) →	加载	24
		(25, 25) →	回弹	24
IV-2	1/ 2.22	(45, 100) → (67.5, 150)	蠕变	300
		(25, 25) →	固结	24
		(45, 100) → (67.5, 150) → (90, 200) →	加载	24
		(25, 25) →	回弹	24
IV-3		(45, 100) → (67.5, 150) → (90, 200) →	蠕变	300
		(25, 25) →	固结	24
		(45, 100) → (67.5, 150) → (90, 200) →	加载	24
		(112.5, 250) →	回弹	24
IV-3		(25, 25) →	蠕变	300
		(45, 100) → (67.5, 150) → (90, 200) →	蠕变	300
		(112.5, 250)		



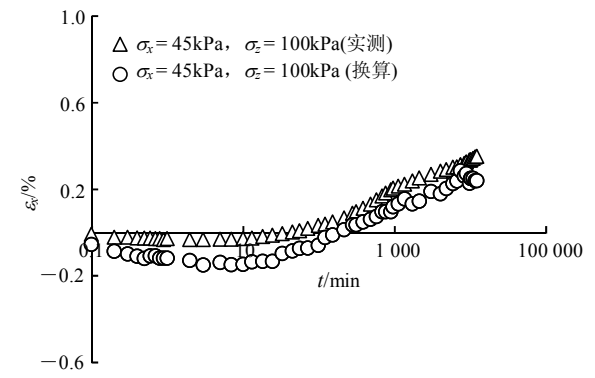
(a) $\sigma_x/\sigma_z = 1/2.22, \sigma_{zmax} = 67.5 \text{ kPa}, \sigma_{xmax} = 150 \text{ kPa}$



(b) $\sigma_x/\sigma_z = 1/2.22, \sigma_{zmax} = 67.5 \text{ kPa}, \sigma_{xmax} = 150 \text{ kPa}$



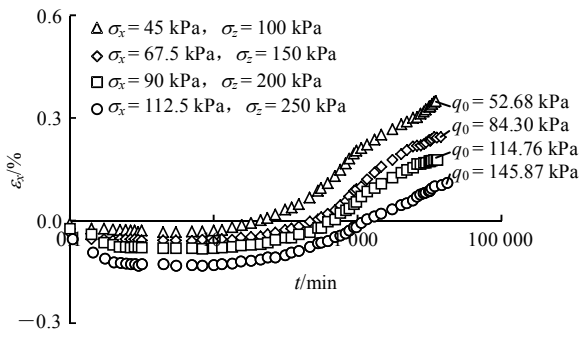
(c) $\sigma_x/\sigma_z = 1/2.22, \sigma_{zmax} = 90 \text{ kPa}, \sigma_{xmax} = 200 \text{ kPa}$



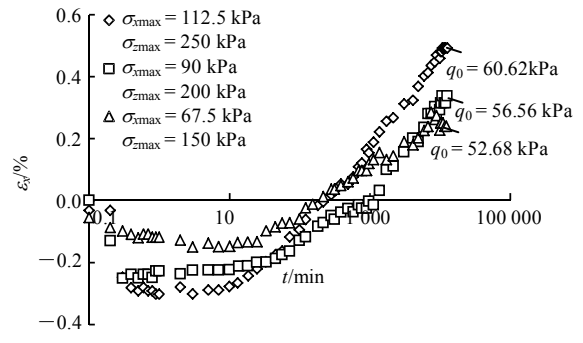
(d) $\sigma_x/\sigma_z = 1/2.22, \sigma_{zmax} = 112.5 \text{ kPa}, \sigma_{xmax} = 250 \text{ kPa}$

图3 2种侧向应变的比较

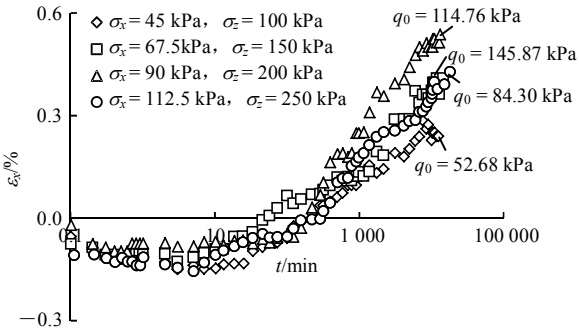
Fig.3 Comparisons of two lateral strains



(a) 侧向应变实测值



(b) 侧向应变换算值



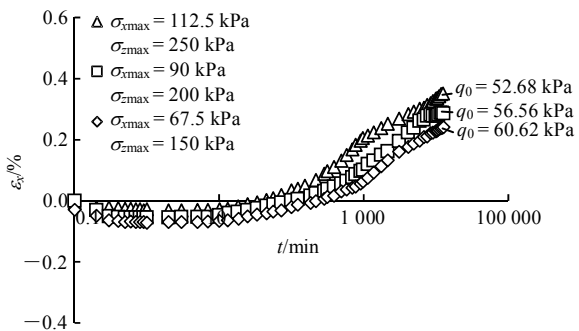
(b) 侧向应变换算值

图 4 同一土样各荷载等级侧向应变实测值和换算值

Fig.4 Measured and calculated values of lateral strain in the same sample

图 5(a)为 $\sigma_x/\sigma_z = 1/2.22$, $\sigma_x = 45 \text{ kPa}$, $\sigma_z = 100 \text{ kPa}$ 时, 当前应力相同而前期固结应力不同的各个土样侧向应变实测值, 由图可得, 前期固结应力的不同可导致土样的侧向变形有细微差别。土样的瞬时鼓胀随前期固结应力的增加而减小, 最终收缩量随前期固结应力的增加而增加。图 5(b)中的换算值同样未能反映相同的规律, 且平滑性较差。

由前人研究可知, 正常固结土体在平面蠕变过程中, 侧向变形是膨胀与收缩的结合, 剪应力是引起侧向变形的主要因素。而在超固结土体中也存在这种现象。侧向变化的变化与剪应力密切相关, 剪应力越大, 侧向初期鼓胀越大, 后期收缩越小。图 4(a)和 5(a)的实验结果也恰好说明了这一点。



(a) 侧向应变实测值

图 5 当前应力相同各土样侧向应变实测值和换算值

Fig.5 Measured and calculated values of lateral strain under the same current stress

图 4(b)和 5(b)未能反映出相同的规律, 说明了侧向应变换算值的不准确性。侧向应变实测值是通过直接量测土样在加载过程中侧向的变化所取得, 而侧向应变换算值则是通过排水量与轴向变形的差值换算得出, 有一定误差。在实际过程中, 侧向变形的换算值受体变值和轴变值影响较大, 若两者之一不准确, 就会影响侧向应变换算值的规律。因此, 本实验中侧向应变换算值未能完整体现其应有的规律性。

综上所述, 研制的侧向装置能独立量测平面应变超固结软土的侧向变形, 能较好地反映出超固结软土平面蠕变侧向变形的规律。由于受到实验过程体积变形测量精度的影响, 试样侧向变形的换算值存在规律失真现象, 采用侧向变形实测数据很有必要。

3.2 平面应变超固结土体侧向变形特征

李国维等^[11]采用剪应力反映平面变形土体的超固结程度, 定义:

$$OCR_q = \frac{q_c}{q_0} \quad (4)$$

式中: OCR_q 为以广义剪应力定义的平面变形条件下的超固结比, 称之为超固结剪应力比; q_c 为前期广义剪应力; q_0 为当前广义剪应力^[11]。

图 6 为各荷载等级中侧向应变实测值与超固结剪应力比 OCR_q 的对应关系。图 6 显示, OCR_q 越大, 土样加载初期鼓胀越小, 后期收缩越大。

图 7 为 OCR_q 与侧向变形中最大鼓胀应变和最大收缩应变的关系。从图中可以看出, 最大鼓胀应变随 OCR_q 的增加而减小, 最大收缩应变随 OCR_q 的增加而增加。因此, 在超载预压中, 合理控制超载比可以减小侧向鼓出变形, 增加侧向收缩变形, 从而减小地基土的沉降。

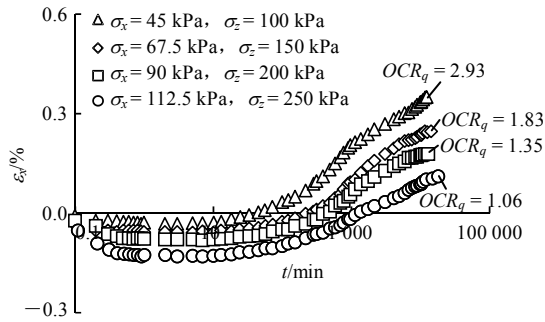


图6 侧向应变实测值与 OCRq

Fig.6 Measured lateral strain for various OCRq

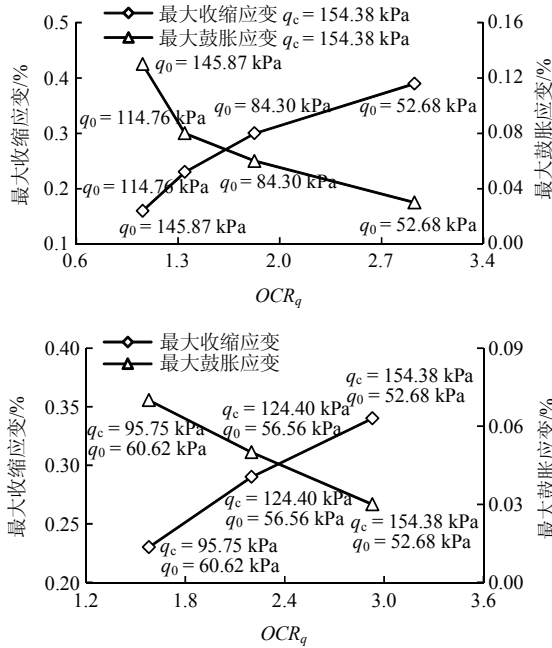


图7 OCRq与最大鼓胀应变及最大收缩应变的关系

Fig.7 Relationship between OCRq and maximum expansion strain and maximum shrinkage strain

综上所述，软土的侧向变形与 OCRq 具有对应关系，OCRq 不仅能反映剪应力对软土侧向变形的影响，还能反映应力历史的影响。软土的侧向鼓胀变形随 OCRq 的增加而减小，侧向收缩变形随 OCRq 的增加而增加，软土地基超载预压中合理控制超载比可限制侧向变形减小地基沉降。

3.3 平面变形超固结软土体积蠕变模型

前人研究得出，平面变形软土超固结剪应力比能更全面地反映土体的应力历史过程^[10]。

本实验中试样在 3 个方向上受到的应力为主应力，由广义剪应力的定义有

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma'_x - \sigma'_y)^2 + (\sigma'_y - \sigma'_z)^2 + (\sigma'_z - \sigma'_x)^2} \quad (5)$$

将根据式(4)，(5)计算得出的土样的超固结参数列入表 3。表 3 包含李国维等^[10-11]数据，其中：Cα 为体积蠕变系数，β 为轴向蠕变系数。

表 3 试样的蠕变系数和超固结剪应力比

Table 3 Over-consolidation shear stress ratio and creep coefficient of the samples

σx/σz 试样 编号	前期应力/kPa			当前应力/kPa			OCRq	Cα/ 10 ⁻²	β/ 10 ⁻²
	σzc	σzc	σyc	σx	σz	σy			
I-1	100	200	61	50	100	35	2.11	0.386	0.047
	100	200	61	100	200	64	1.02	0.657	0.173
	150	300	100	50	100	46	3.46	0.269	0.035
I-2	150	300	100	100	200	79	1.61	0.457	0.085
	150	300	100	150	300	109	1.04	0.815	0.216
1/2	200	400	158	50	100	59	4.85	0.192	0.026
	200	400	158	100	200	91	2.14	0.355	0.064
I-3	200	400	158	150	300	133	1.41	0.584	0.096
	200	400	158	200	400	175	1.05	0.685	0.150
	200	400	158	200	400	175	1.05	0.685	0.150
II-1	60	180	54	40	120	37	1.51	0.693	0.184
	60	180	54	60	180	56	1.01	0.706	0.431
	80	240	76	40	120	43	2.04	0.570	0.099
II-2	80	240	76	60	180	59	1.35	0.812	0.287
	80	240	76	80	240	80	1.01	0.991	0.573
1/3	100	300	88	40	120	41	2.59	0.513	0.059
	100	300	88	60	180	60	1.72	0.638	0.159
	100	300	88	80	240	78	1.28	0.913	0.484
II-3	100	300	88	100	300	92	1.01	1.173	0.683
	100	300	88	100	300	92	1.01	1.173	0.683
	100	300	88	100	300	92	1.01	1.173	0.683
1/2.67	67.5	180	61	45	120	44	1.53	0.590	0.150
	67.5	180	61	67.5	180	64	1.01	1.022	0.321
IV-1	67.5	150	45	45	100	35	1.58	0.469	0.121
	67.5	150	45	67.5	150	48	1.02	0.580	0.190
IV-2	90.0	200	65	45	100	42	2.20	0.390	0.066
	90.0	200	65	67.5	150	56	1.40	0.514	0.143
1/2.22	90.0	200	65	90	200	73	1.04	0.787	0.321
	112.5	250	83	45	100	50	2.93	0.302	0.053
IV-3	112.5	250	83	67.5	150	64	1.83	0.471	0.112
	112.5	250	83	90	200	81	1.35	0.594	0.149
	112.5	250	83	112.5	250	97	1.06	0.875	0.401

图 8 为主应力比为 1/2.22 条件下平面变形超固结软土在前期固结应力相同下的体积应变曲线。从图 8 可以看出，体积蠕变在蠕变后期呈近似直线趋势发展，直线的斜率随 OCRq 不同而不同。

图 9 为主应力比为 1/2.22 条件下平面变形超固结土体在当前固结应力相同下的体积应变曲线。从

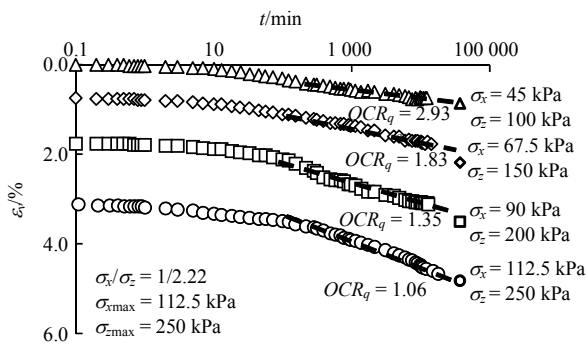


图 8 实验 IV-3 土体体积应变曲线

Fig.8 Volumetric strain curves of sample IV-3

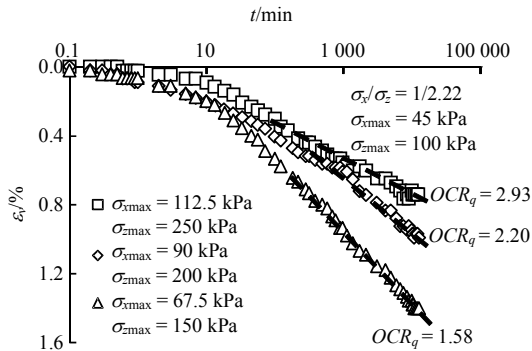


图 9 相同当前固结应力体积应变曲线

Fig.9 Curves of volumetric strain under the same current consolidation stresses

图 9 可以看出，在相同当前应力条件下，体积蠕变的发展在后期也呈近似直线趋势发展，直线的斜率随 OCR_q 不同而不同。

由图 8, 9 可得，平面变形超固结土体积蠕变在后期均呈近似直线发展，直线的斜率与 OCR_q 一一对应。为比较试样在不同主应力比条件下的体积蠕变特征，定义参数 C_α 为体积蠕变应变增量与对应时段的时间对数增量之比，即为图 8, 9 中蠕变后期近似直线段的斜率：

$$C_\alpha = \frac{\Delta \varepsilon_v}{\Delta \lg t} \quad (6)$$

根据式(6)可得各组实验中体积蠕变的蠕变系数，列入表 3。

体积蠕变系数与超固结剪应力比关系的经验模型通式为

$$C_\alpha = A_1 + B_1 \exp[C_1(1 - OCR_q)] \quad (7)$$

式中： A_1, B_1, C_1 为根据实验结果拟合得到的参数，均与主应力比有关。

图 10 为 4 组不同主应力比实验中体积蠕变系数与 OCR_q 的关系。其中曲线为根据式(7)拟合实验数据点得到的体积蠕变系数曲线。

图 10 显示，主应力比不同则 C_α 与 OCR_q 的对应关系也不同。当主应力比相同时，体积蠕变系数

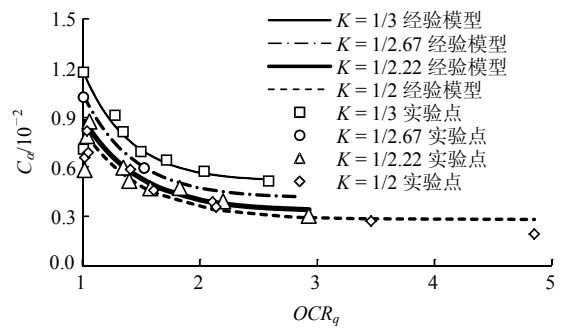


图 10 不同主应力比下 OCR_q 与体积蠕变系数

Fig.10 Volumetric creep coefficient versus OCR_q under different principal stress ratios

C_α 与超固结剪应力比 OCR_q 呈负相关关系，即超固结剪应力比 OCR_q 变大会导致体积蠕变系数 C_α 减小。当超固结剪应力比相同时，主应力比 K 越大， C_α 越小，即侧向压力变大会导致体积蠕变系数减小。将拟合得出的各个模型参数 A_1, B_1, C_1 数值列入表 4 中。

表 4 主应力比与体积蠕变系数经验通式参数

Table 4 Principal stress ratio and parameters of volumetric creep coefficient in empirical formula

主应力比 $K = \sigma_x / \sigma_z$	体变通式参数		
	A_1	B_1	C_1
1/2	0.28	0.55	1.98
1/2.22	0.33	0.57	2.10
1/2.67	0.41	0.64	2.34
1/3	0.51	0.68	2.52

定义 $C_{\alpha O}$ 为超固结土体积蠕变系数， $C_{\alpha N}$ 为正常固结土体积蠕变系数，则有下式^[10]：

$$\frac{C_{\alpha O}}{C_{\alpha N}} = a_1 + (1 - a_1) \exp[b_1(1 - OCR_q)] \quad (8)$$

式中： $C_{\alpha N}$ 为式(7)中参数 A_1, B_1 之和； a_1, b_1 为与主应力比有关的参数。

图 11 为由经验通式计算得出的正常固结软土体积蠕变系数与主应力比的关系，从图中可以得出，与超固结软土类似，主应力比 K 越大，正常固结软土的体积蠕变系数 $C_{\alpha N}$ 越小。

同样用式(8)对 4 组实验数据进行拟合，可得不同主应力比条件下参数 a_1, b_1 的数值(见表 5)。

若线性拟合上述参数，可分别得出 a_1, b_1 与主应力比的关系(见图 12)。

从图 12 可以看出，主应力比 K 与模型参数 a_1, b_1 有一一对应关系。将上述关系代入模型经验通式中，可得

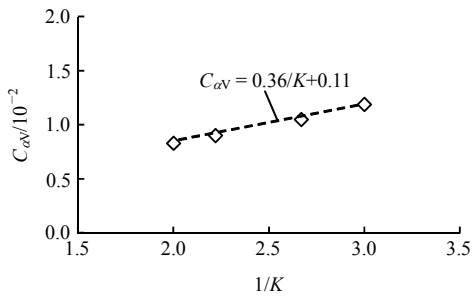


图 11 主应力比与正常固结软土体积蠕变系数
Fig.11 Principal stress ratio and volumetric creep coefficient of normally consolidated clay

表 5 主应力比与体积蠕变经验模型参数
Table 5 Principal stress ratio and parameters in volumetric creep empirical model

主应力比 $K = \sigma_x / \sigma_z$	模型参数	
	a_1	b_1
1/2	0.30	1.60
1/2.22	0.33	1.90
1/2.67	0.37	2.34
1/3	0.45	2.52

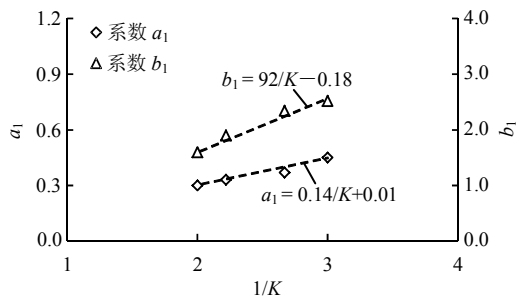


图 12 主应力比与体积蠕变经验模型参数
Fig.12 Principal stress ratio and parameters of volumetric strain in empirical model

$$\frac{C_{\alpha 0}}{C_{\alpha N}} = 1 - \left(0.99 - \frac{0.14}{K} \right) \left\{ 1 - \exp \left[\left(0.18 - \frac{0.92}{K} \right) (OCR_q - 1) \right] \right\} \quad (9)$$

此经验模型中 $C_{\alpha 0}$ 仅与主应力比 K 和超固结剪应力比 OCR_q 有关。

3.4 平面变形超固结软土轴向蠕变模型

实验结果显示，试样轴向蠕变的发展在后期同样呈近似直线规律，直线的斜率随 OCR_q 不同而不同。与定义 C_{α} 类似，定义参数 β 为轴向蠕变应变增量与对应时段的时间对数增量之比，即为蠕变后期

近似直线的斜率。

$$\beta = \frac{\Delta \varepsilon_z}{\Delta \lg t} \quad (10)$$

采用相同方法整理轴向蠕变实验数据，得到轴向蠕变系数模型为

$$\frac{\beta_0}{\beta_N} = 1 - \left(0.96 - \frac{0.02}{K} \right) \left\{ 1 - \exp \left[\left(1.43 - \frac{1.55}{K} \right) (OCR_q - 1) \right] \right\} \quad (11)$$

式中： β_0 为超固结土轴向蠕变系数， β_N 为正常固结土轴向蠕变系数。模型中 β_0 仅与主应力比 K 和超固结剪应力比 OCR_q 有关。 β_N 为软土与 K 有关的实验指标。

3.5 经验模型的合理性

由式(9)和(11)可知，当 $OCR_q=1$ 时， $C_{\alpha 0} = C_{\alpha N}$ ， $\beta_0 = \beta_N$ ，说明所建经验模型包含了正常固结状态，说明对于应力历史的考虑是闭合的。

模型中含有正常固结状态下软土的蠕变性指标 $C_{\alpha N}$ 和 β_N ，均和主应力比 K 相关。当 OCR_q 较大时， $C_{\alpha 0}/C_{\alpha N}$ 与 β_0/β_N 的值均很小，这时 K 值的变化对 $C_{\alpha 0}$ 和 β_0 的影响均很小，即超固结土的应力历史为其蠕变特征的主要影响因素，这也是合理的。

将所建经验模型与实验数据点对比(见图 13, 14)，可以看出，不同条件下的模型曲线和实验点具有较好的拟合度，说明该模型具有较好的适用性。

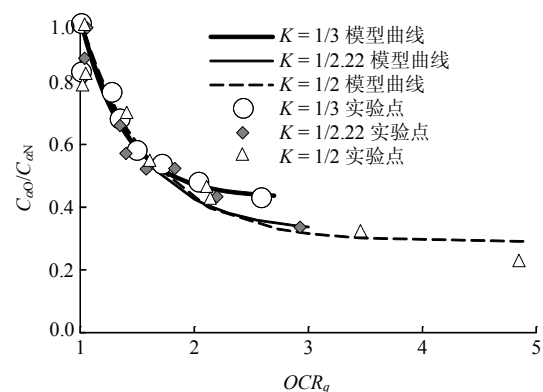


图 13 体变模型曲线与实验点
Fig.13 Volumetric strain of model and test

综上所述，所建经验模型包含了软土的正常固结状态，合理反映了主应力比和应力历史对平面变形下软土蠕变过程的影响，与实验结果具有较高的拟合度，由此说明，所建模型具有较好的适用性。

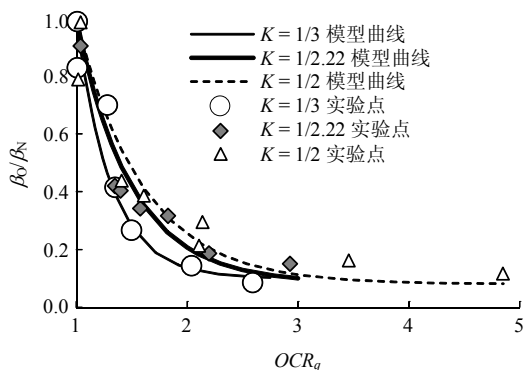


图 14 轴变模型曲线与实验点

Fig.14 Axial strain of model and test

4 结 论

(1) 研制的侧向装置能独立量测平面应变超固结软土的侧向变形，规避了实验过程中体积变形测量精度对侧向变形数据的影响，采用侧向变形实测数据对于研究软土侧向变形规律意义重大。

(2) 软土的侧向变形与 OCR_q 具有良好的对应关系， OCR_q 不仅能反映剪应力对软土侧向变形的影响，也反映应力历史对侧向变形的影响。软土的侧向鼓胀变形随 OCR_q 的增加而减小，侧向收缩变形随 OCR_q 的增加而增加。

(3) 平面应变状态下体积蠕变系数与轴向蠕变系数均与超固结剪应力比 OCR_q 有一一对应关系，同时受主应力比影响。依据实验建立的以主应力比和超固结剪应力比为变量的四参数经验模型，包含了正常固结状态，合理反映了主应力比和应力历史对平面变形下软土蠕变过程的影响，与实验结果具有较高的拟合度，具有较好的适用性。

致谢 本项研究得到了河海大学土木与交通学院岩土力学与堤坝工程实验室和道路与铁道工程科学研究所的技术人员的大力帮助，在此一并致谢！

参考文献(References):

[1] TAVENAS F, MIEUSSENS C, BOURGES F. Lateral displacement in clay foundation under embankment[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16(3): 532 - 550.

[2] 马时冬. 路堤下软土地基的侧向位移[J]. 华侨大学学报, 1995, 16(2): 165 - 167.(MA Shidong. Lateral deformation of soft clay foundation under embankment[J]. Journal of Huaqiao University, 1995, 16(2): 165 - 167.(in Chinese))

[3] 李国维, 蒋华忠, 杨涛, 等. 路堤下深厚软土侧向变形的沉降影响研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2 817 - 2 822.(LI Guowei, JIANG Huazhong, YANG Tao, et al. Influence of lateral deformation

on settlement of thick soft soil underlying embankment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2 817 - 2 822.(in Chinese))

[4] 陈宗基. 黏土层沉降(由于固结和次时间效应)的二维问题[J]. 力学学报, 1958, 2(1): 1 - 10.(TAN Tjongkie. Two dimensional problem of settlement of clay layers due to consolidation and secondary time effect[J]. Acta Mechanica Sinica, 1958, 2(1): 1 - 10.(in Chinese))

[5] 殷宗泽, 张海波, 朱俊高, 等. 软土的次固结[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 521 - 526.(YIN Zongze, ZHANG Haibo, ZHU Jungao, et al. Secondary consolidation of clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(5): 521 - 526.(in Chinese))

[6] YIN J H, ZHU J G, GRAHAM J. A new elastic viscoplastic model for time-dependent behavior of normally and over consolidated clays: theory and verification[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(1): 157 - 173.

[7] KUTTER B L, SATHIALING N. Elastic-viscoplastic modeling of the rate-dependent behavior of clays[J]. Géotechnique, 1992, 42(3): 427 - 441.

[8] 詹美礼, 钱家欢, 陈绪禄. 软土流变特性试验及流变模型[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(3): 55 - 62.(ZHAN Meili, QIAN Jiahuan, CHEN Xulu. Tests on rheological behavior of soft soil and rheologic model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(3): 55 - 62.(in Chinese))

[9] SINGH A, MITCHELL J K. General stress-strain-time function for soils[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, 1968, 94(1): 21 - 46.

[10] 李国维, 周洋, 阮玉胜, 等. 平面应变超固结软黏土蠕变特征[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1 028 - 1 034.(LI Guowei, ZHOU Yang, RUAN Yusheng, et al. Plane strain tests on creep behavior of over-consolidated clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(6): 1 028 - 1 034.(in Chinese))

[11] 李国维, 黄凯, 阮玉胜, 等. 主应力比对超固结软黏土平面蠕变的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(12): 2 250 - 2 258.(LI Guowei, HUANG Kai, RUAN Yusheng, et al. The effect of principal stress ratio on creep behavior of over-consolidated clay under plane strain[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(12): 2 250 - 2 258.(in Chinese))

[12] 李国维, 周洋, 贺冠军, 等. 一种平面应变三轴流变仪的侧向变形量测量装置[P]. 中国: 103353421A, 2013 - 10 - 16.(LI Guowei, ZHOU Yang, HE Guanjun, et al. An lateral deformation measuring device of plane strain in triaxial rheometer[P]. China: 103353421A, 2013 - 10 - 16.(in Chinese))

[13] 中华人民共和国行业标准编写组. JTG E40—2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 156 - 162.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTGE40—2007 Highway soil test procedures[S]. Beijing: China Communications Press, 2007: 156 - 162.(in Chinese))