

基于图像测量的非饱和土 p-s 平面屈服轨迹研究

董建军¹, 邵龙潭¹, 刘永禄²

(1. 大连理工大学 工程力学系, 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学 物理系, 辽宁 大连 116024)

摘要: 运用数字图像测量方法, 测量非饱和土试样的整体变形和试样受端部约束影响较小的中部 1/3 区域的变形. 控制吸力的非饱和压实土各向等压试验结果表明, 试样整体与中部 1/3 区域的比体积与平均净应力的试验关系曲线存在明显差异, 据此确定的 LC 屈服曲线也有差别. 无论是试验值还是数值模型预测的结果, 都是测量试样整体变形所得的弹性区较大.

关键词: 非饱和土; 吸力; 数字图像测量; 屈服轨迹; 变形

中图分类号: TU411.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2007)03-0006-06

Yield locus of unsaturated soils on p-s plane based on digital image measurement method

DONG Jian-jun¹, SHAO Long-tan¹, LIU Yong-lu²

(1. Department of Engineering Mechanics, State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Department of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A new means of deformation measurement is introduced for unsaturated soil specimen in suction-controlled isotropic compression tests based on the digital image measurement method. The deformation of the whole unsaturated specimen and the middle section that is relatively little influenced by the end restraint can be measured by this method. Results of suction-controlled unsaturated compacted soil isotropic compression tests show that the $v-p$ and $v-\ln p$ curves of the middle section are evidently different, that the LC locus of two kinds of model parameters are also different, and that the elastic range based on the whole specimen deformation is bigger than that on the middle section in both tests and model prediction.

Key words: unsaturated soil; suction; digital image measurement; yield locus; deformation

在非饱和土弹塑性模型的研究中, 屈服特性是重要内容. E. E. Alonso 等^[1]在已提出的非饱和土弹塑性模型(Barcelona 弹塑性模型)中认为: 在 p-s 平面上有两条屈服线, 即 LC 和 SI 屈服线, 其中 LC 屈服线是指

收稿日期: 2006-12-27

基金项目: 国家自然科学基金专项基金项目(编号:50527803)

作者简介: 董建军(1978-), 男, 辽宁绥中人, 博士研究生, 主要从事非饱和土本构关系方面的试验研究.

E-mail: dongjnjn@163.com

增大荷载或减小吸力使土屈服,为一曲线;SI 屈服线是指增加吸力使土屈服,假设为一直线. 两条屈服线所包围的区域是弹性区,当应力路径超越这两条屈服线时,土将发生屈服. 针对这两条屈服线,S. J. Wheeler 和 V. Sivakumar^[2]通过控制吸力的三轴试验证明 p-s 平面内的 LC 屈服曲线是存在的. 陈正汉等^[3,4]采用一系列控制吸力和平均净应力试验不仅验证了 LC 屈服曲线,还将 SI 屈服线的屈服条件由 $s=s_0$ (s_0 为土的历史最大吸力,为一常数)修改为 $s=s_y$ (s_y 为屈服吸力). 但目前的研究基础是通过测量试样整体变形获得的试验数据. 由于试样受到端部效应的影响,试样的整体变形结果不能真实反映土的变形性质,从而影响研究结果. 针对以上问题,在一系列控制吸力的各向同性等压试验中采用了数字图像测量方法作为试样变形的测量手段,同时测量试样的整体和受端部效应影响较小的试样中部 1/3 区域的变形,由所得到的试验结果分别确定 Barcelona 弹塑性模型中确定 LC 屈服曲线的基本参数,对端部效应所导致的试样整体与中部 1/3 区域 LC 屈服曲线的差异进行了探讨性研究.

1 研究方法

1.1 理论基础

E. E. Alonso 等提出,p-s 平面能够合理描述非饱和土的各向等压状态的应力空间状态. 平均净应力 $p (= \frac{1}{3}\sigma_{ii} - u_a)$ 为超过孔隙气压力的平均总应力,s 为吸力.

与饱和土完全一样,比体积 $v=1+e$ 与平均净应力 p 的关系可表示为:

$$v = N(s) - \lambda(s) \ln \frac{p}{p^c} \quad (1)$$

式中: $\lambda(s)$ 为压缩指数; p^c 为参考应力. 对于恒定吸力下的卸载和重加载,回弹比体积增量

$$dv = -\kappa \frac{dp}{p} \quad (2)$$

$\lambda(s)$ 和 $N(s)$ 取决于吸力, κ 取常量,以确保模型的弹性部分稳定.

两个经受不同吸力值试样的 $v-\ln p$ 曲线如图 1(a) 所示,吸力分别为 0 (饱和土) 和一个较大的值. 饱和土的前期固结压力记为 p_0^* (图 1(a) 中点 3),而第二个试样将在较大的各向等压应力 p_0 (点 1) 下屈服. 如果点 1 和点 3 都位于 (p,s) 应力平面 (图 1(b)) 内的同一屈服线上,则由 1,3 两点的比体积可获得屈服应力 p_0 和饱和土的 p_0^* 二者之间的关系,即通过实际应力路径,包括恒定吸力下从 p_0 到 p_0^* 的卸载,随后在恒定应力 p_0^* 下吸力从 s 到 0 的吸力减小过程. 试样初始状态为点 1,应力路径为 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$.

根据比体积的变化,可得:

$$v_1 + \Delta v_p + \Delta v_s = v_3 \quad (3)$$

式中 v 的不同量表示见图 1(a).

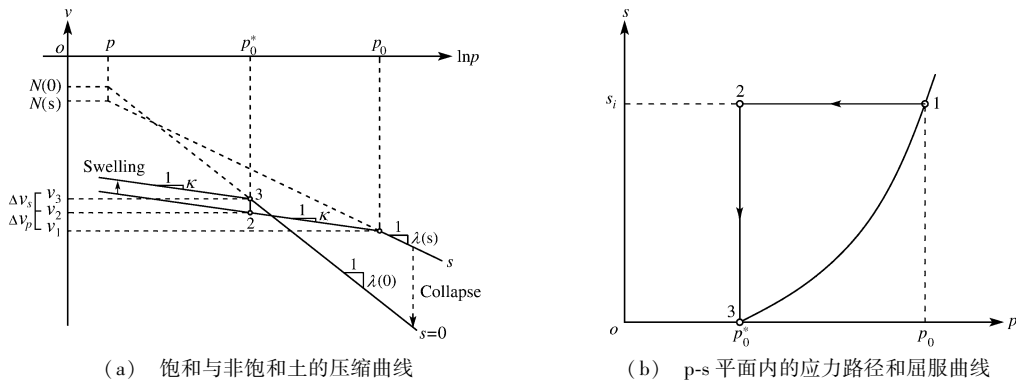


图 1 前期固结应力 p_0 与 p_0^* 的关系

Fig. 1 Relationship between preconsolidation stresses p_0 and p_0^*

从点 2 到点 3 吸力减小(湿化过程)发生在弹性区内. 湿化过程中比体积的变化为:

$$dv = -\kappa_s \frac{ds}{s + p_{at}} \quad (4)$$

式中: p_{at} 为大气压力, 分母加上 p_{at} 是避免当 s 趋向于 0 时, 上式为无穷大.

方程(3)可表示为

$$N(s) - \lambda(s) \ln \frac{p_0}{p^c} + \kappa \ln \frac{p_0}{p_0^*} + \kappa_s \ln \frac{s + p_{at}}{p_{at}} = N(0) - \lambda(0) \ln \frac{p_0^*}{p^c} \quad (5)$$

为简化(5)式, 假定:

$$\Delta v(p^c) \big|_s^0 = N(0) - N(s) = \kappa_s \ln \frac{s + p_{at}}{p_{at}} \quad (6)$$

把(6)式代入(5)式, 可得:

$$\frac{p_0}{p^c} = \left(\frac{p_0^*}{p^c} \right)^{[\lambda(0) - \kappa] / [\lambda(s) - \kappa]} \quad (7)$$

每个吸力对应一组屈服应力 p_0 . 饱和条件下前期固结平均净应力 p_0^* 就是(7)式中的硬化参数. 此屈服线称为 LC 屈服线(Loading Collapse). 图 1(b)所示为一个通过点 1 和点 3 的 LC 屈服线. 当 $p_0^* = p^c$ 时, LC 屈服线为一直线 $p_0 = p^c$.

在 (p, s) 平面, 最终比体积 $v = 1 + e$ 可以写成:

$$v(p, s) = v(p^c, s_i) + \Delta v(p^c) \big|_{s_i}^s + \lambda(s) \ln \frac{p}{p^c} \quad (8)$$

(8)式中假定平均净应力 p 的加载从初始状态开始.

E. E. Alonso 等提出下式预测压缩指数变化:

$$\lambda(s) = \lambda(0) [(1 - r) \exp(-\beta s) + r] \quad (9)$$

式中: r 为与土的最大压缩指数有关的常量(吸力无穷大), $r = \lambda(s \rightarrow \infty) / \lambda(0)$; β 为控制压缩指数随吸力增加而增加的速率参数.

1.2 试 验 设 备

试验设备为经过改装后配套数字图像测量系统^[5-8]的英国 GDS 公司生产的、采用轴平移技术控制吸力的非饱和土三轴试验系统(见图 2).

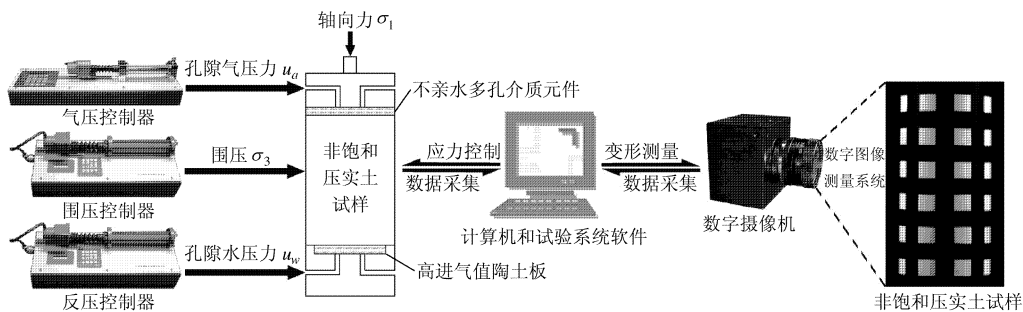


图 2 基于数字图像测量方法的非饱和土三轴试验系统

Fig. 2 Unsaturated soil triaxial test system based on the digital image measurement method

基于亚像素角点检测方法的数字图像测量系统^[8]由基于 USB2.0/1394 数据传输技术的 CMOS 摄像机(分辨率为 1280 像素×1024 像素)、计算机和计算机图像处理软件组成. 土工三轴试验设备也做了相应改进: 将三轴试验中用于包裹试样的橡皮膜加工成黑色并在表面印刷白色方块状标志; 压力室改造成立方体形状; 采用平面光源照明; 安装黑色背景. 在规定视场范围内(165 mm×124 mm), 镜头畸变率最大值仅为 -0.1%, 可不计镜头畸变对变形测量精度的影响. 所使用的 CMOS 摄像机的每个像素的物理尺寸为 5.2 μm×5.2 μm, 纵向和横向的测量精度相同. 该系统的轴向和径向测量精度可达到 0.02 个像素.

1.3 体积变形的测量计算方法

在非饱和土 LC 屈服曲线控制吸力的各向等压试验中, 计算比体积需要测量试样的体积变形. 试验中所

测试样区域内角点的分布见图3. 根据各个时刻角点的像素坐标可以计算出试样的径向变形、轴向变形以及体积变形. 考虑到试样表面是曲面,其上角点变形不是平面变形,因而在应变计算时不选用试样表面的角点数据,只选用试样径向边缘和轴向两端处于同一平面内物距相同的角点数据计算变形.

试样体积的计算是基于试样各向同性变形的假设,其计算方法是将测量区域分割成多个小圆台,分别计算每个小圆台的体积再求和得到测量区域内的试样体积(见图4).

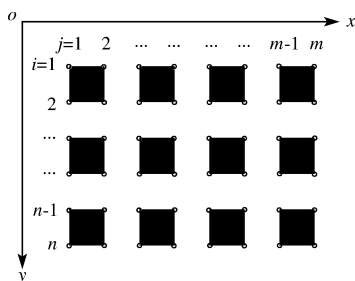


图3 角点分布位置

Fig. 3 Distribution of the corners

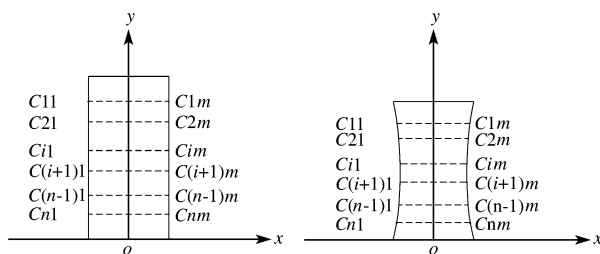


图4 各向等压试验前后试样变形及角点位置变化示意图

Fig. 4 Corner location before and after suction-controlled isotropic compression tests

由于试样变形不完全遵循各向同性变形,特别是原状样,因而所计算的体积变形是平均估算值. 但对于压实土试样,其变形接近各向同性,故采用此方法获得的体积变形相对准确,基本可反映压实土的变形性质,能够满足研究需要.

由于数字图像测量方法测得的试验数据原始值是像素单位的数据,计算体积时需将其换算成国际单位的实际值. 试验开始时刻和试验中时刻试样的平均体积可由(10)和(11)式得到:

$$\text{初始时刻的平均体积} \quad V_0 = \frac{\pi}{8} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{im}^0 - x_{il}^0) \right]^2 [(y_{n1}^0 - y_{11}^0) + (y_{nm}^0 - y_{1m}^0)] \quad (10)$$

$$\begin{aligned} t \text{ 时刻的平均体积} \quad V^t = & \frac{\pi}{24} \left[\sum_{i=1}^{n-1} (x_{im}^t - x_{il}^t)^2 + (x_{im}^t - x_{il}^t)(x_{(i+1)m}^t - x_{(i+1)l}^t)^2 + \right. \\ & \left. (x_{(i+1)m}^t - x_{(i+1)l}^t)^2 (y_{(i+1)1}^t - y_{il}^t)^2 + (y_{(i+1)m}^t - y_{im}^t)^2 \right] \quad (11) \end{aligned}$$

具体的体积计算过程根据选取的测量区域而定,可同时测量试样的整体和局部变形. 局部变形测量通常以选取试样中间 1/3 区域测量较为适宜^[9,10]. 因这个区域内试样受端部约束的影响相对较小,试样中的应力分布比较均匀,变形比较充分.

2 试验方案

该试验所用土的砂粒($d > 0.05 \text{ mm}$)、粉粒($d = 0.05 \sim 0.005 \text{ mm}$)和粘粒($d < 0.005 \text{ mm}$)的平均含量分别为 9.3%、80.2% 和 10.5%. 为适应压实土三轴试验对试样的要求,野外取回的土样首先在室内条件下自然风干,然后通过 2 mm 的筛. 在最优含水量条件下湿化制样,小心洒水于干土的粉样至目标含水量,密封静置 24 h 以上使土样完全湿化均衡. 为尽量使土样达到均一化,在直径 39.1 mm、高为 80 mm 击实筒内分 5 层均匀击实. 表 1 列出了试验土主要的物理指标特性和击实后土样的特性. 所用 3 个试样的初始平均含水量为 13.8%,平均干密度为 1.50 g/cm^3 .

表 1 试验土主要的物理指标

Tab. 1 Physical properties of compacted soil

$\rho_{dmax} / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$W_p / \%$	$W_L / \%$	$I_p / \%$	$W_{opt} / \%$
1.73	18.2	32.4	14.2	17.8

试验内容为控制吸力 50、100 和 200 kPa 条件下的各向等压试验(平均净应力试验). 由于控制吸力的平

衡稳定时间较长,每个试验完成的时间平均约为 18 d. 试验路径如图 5 所示,试样制备完成后自身存在一个初始吸力点 o ,然后通过施加围压 σ_3 、孔隙气压力 u_a 与孔隙水压力 u_w ,控制试样中的吸力 $s=u_a-u_w$ 到所设定的值点 A 、 B 和 C ,同时保持平均净应力的初始值为 10 kPa. 这是为了防止孔隙气压力 u_a 超过围压而导致试样充气鼓胀. 待吸力稳定以后连续施加平均净应力到目标值点 A' 、 B' 和 C' . 在各向等压压缩试验中,由于非饱和土中的超孔隙压力消散速度非常慢,因而平均净应力必须以一个较慢的速率施加. 本文试验中控制平均净应力的连续施加速率为 $\Delta p/\Delta t=6\text{ kPa/h}$,最终施加到目标值 310 kPa.

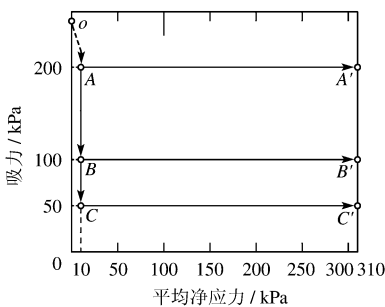


图 5 试验路径
Fig. 5 Stress path

3 试验结果及分析

3.1 试验结果

各向等压压缩试验比体积($v=1+e$)与平均净应力 p (对数坐标)的关系曲线见图 6. 从图 6 可见,在各向等压压缩状态下,试样中部 1/3 区域与试样整体的变形趋势一致,同一平均净应力下前者变形大于后者. 这是由于试样中部 1/3 区域受到端部约束较小,相同加载条件下变形相对充分所致.

根据图 6 的 $v-p$ (对数坐标)关系曲线,采用 Casagrande 法可确定各吸力下试验土样的屈服应力值. 当吸力为 50、100 和 200 kPa 时,由试样整体变形确定的屈服应力分别为 158、206 和 227 kPa;由试样中部变形确定的屈服应力分别为 152、192 和 219 kPa. 前者的屈服应力值大于后者,但二者都随着吸力的增加而增大,表明吸力对非饱和土的强度是有贡献的.

由试样屈服后的 $v-\ln p$ 关系曲线(见图 7)可见,无论是测量试样的整体变形还是中部 1/3 区域的变形,二者的试验结果都表明,随着吸力 s 的增加,压缩指数 $\lambda(s)$ 逐渐减小. 当吸力为 50、100 和 200 kPa 时,由测量试样整体变形确定的 $\lambda(s)$ 分别为 $\lambda(50)=0.135$ 、 $\lambda(100)=0.095$ 和 $\lambda(200)=0.070$;由测量试样中部变形确定的 $\lambda(s)$ 分别为 $\lambda'(50)=0.151$ 、 $\lambda'(100)=0.113$ 和 $\lambda'(200)=0.085$. 进而由(7)和(9)式可以求出与 LC 屈服曲线直接相关的模型参数(见表 2).

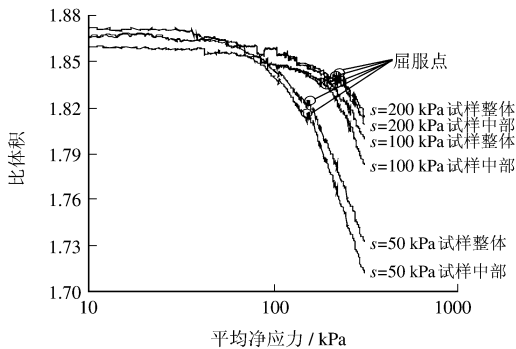


图 6 $v-p$ 关系曲线
Fig. 6 Relation curves of $v-p$

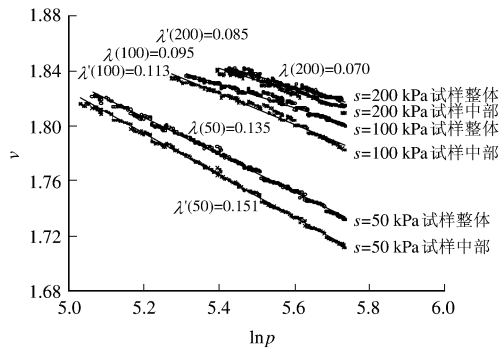


图 7 $v-\ln p$ 关系曲线(屈服后)
Fig. 7 Relation curves of $v-\ln p$ after yielding

表 2 Barcelona 模型部分参数
Tab. 2 Parameters of Barcelona model

参 数	由试样整体变形确定	由试样中部变形确定
$\lambda(0)$	0.224	0.226
κ	0.010	0.013
$\beta(\text{MPa}^{-1})$	16.353	13.744

(续表)		
参 数	由试样整体变形确定	由试样中部变形确定
r	0.284	0.332
p^c (MPa)	0.125	0.115
p_0^* MPa	0.148	0.144

3.2 LC 屈服曲线的探讨

根据试验结果获得的参数(见表 2)能够确定出 Barcelona 弹塑性模型的 LC 屈服曲线的模型形式(见图 8).从图 8 可见,由测量试样整体变形的试验数据得到的模型参数所确定的 LC 屈服曲线与测量受端部效应影响较小的试样中部 1/3 区域变形所确定的 LC 屈服曲线相比,两者存在差别,无论是试验值还是模型计算值,都是前者的弹性区域明显大于后者.这表明,由于受到端部约束的影响,试样本身的强度被提高,其屈服应力也相应提高,这就高估了非饱和土的强度,低估了其变形,从而使本构模型的数值计算结果与实际情况存在较大差异.

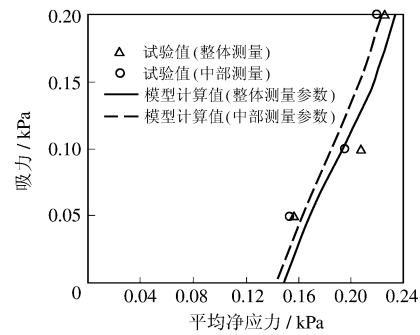


图 8 LC 屈服曲线
Fig.8 Yield locus of loading collapse

4 结 语

(1)在控制吸力的各向等压压缩状态下,试样整体与试样中部 1/3 区域的变形趋势一致;同一平均净应力下,前者变形小于后者;前者的屈服应力值大于后者,二者的屈服应力都随着吸力的增加而增大.

(2)运用数字图像测量方法测量试样的整体变形和中部 1/3 区域变形的试验结果都表明,随着吸力 s 增加,该种土的压缩指数 $\lambda(s)$ 逐渐减小.

(3)试样整体与受端部效应影响较小的试样中部 1/3 区域的 LC 屈服曲线模型参数差别较大,使得确定的 LC 屈服曲线的形式也存在差别,前者的弹性区域明显大于后者,从而高估了非饱和土的强度,低估了其变形.

参 考 文 献:

[1] Alonso E E, Gens A, Josa A. A constitutive model for partially saturated soils[J]. **Geotechnique**, 1990, 40(3): 405-430.

[2] Wheeler S J, Sivakumar V. An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil[J]. **Geotechnique**, 1995, 45(1): 35-53.

[3] 陈正汉. 重塑非饱和黄土的变形、强度、屈服和水量变化特性[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 82-90.

[4] 黄 海, 陈正汉, 李 刚. 非饱和土在 p-s 平面上屈服轨迹及土-水特征曲线的探讨[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 316-321.

[5] 邵龙潭, 王助贫, 韩国城, 等. 三轴试验土样径向变形的计算机图像测量[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 337-341.

[6] 邵龙潭, 王助贫, 刘永禄. 三轴土样局部变形的数字图像测量方法[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 159-163.

[7] 王助贫. 三轴试验土样变形的数字图像测量方法及其应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.

[8] LongTan Shao, YongLu Liu, JianJun Dong. Strain Measurement of Soil Specimen in Triaxial Test with Digital Image Processing Technology[C]//Wen TD. **6th International Symposium on Test and Measurement**. Beijing: Beijing World Publishing Corporation. 2005: 4368-4371.

[9] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983: 390-391.

[10] 陈春霖, 张惠明. 饱和砂土三轴试验中的若干问题[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 659-663.