

# 新双室三轴仪用于非饱和土体积变化的连续测量和三轴压缩试验

## A new double cell triaxial system for continuous measurement of volume changes of an unsaturated or saturated soil specimen in triaxial test

殷建华

(香港理工大学 土木及结构工程系, 香港)

**摘要:**介绍一台新双室三轴仪用于非饱和土体积变化的连续测量和三轴压缩试验。该双室三轴仪是对现有的内置开顶圆筒三轴仪和双室三轴试验仪的重大改进,克服了存在的缺点。试验结果表明,体积测量相对误差不超 1.93%,该双室三轴仪能可靠和相当准确地自动测量土样三轴试验中的体积变化。

**关键词:**三轴试验;土样;体变;非饱和土;压缩

**中图分类号:**TU 411

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-4548(2002)05-0552-04

**作者简介:**殷建华,男,博士,香港理工大学副教授,土力学试验室负责人,岩土工程技术中心主任。中科院武汉岩土力学研究所、河海大学、同济大学、重庆交通学院兼职教授。香港工程师学会岩土分会委员,香港力学学会委员(1996)和司库(1997-1999),香港岩土专业协会理事(1998-现在),中国力学学会岩土力学专业委员会。加拿大岩土工程学报副编,美国岩土力学杂志编委、东南亚岩土工程学报、岩土工程学报(中国)、岩石力学与工程学报(中国)和结构工程进展(国际杂志)编委。

YIN Jian-hua

(Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

**Abstract:** This paper introduces a new double cell triaxial system (DCTS) for continuous measurement of the volume change of an unsaturated or saturated soil specimen in triaxial test. The DCTS overcomes two critical shortcomings of the conventional triaxial system and the existing modified triaxial cells. It is found that the relative error for the test result of the new DCTS is less than 1.93%. The calibrated results using both the solid copper specimen and the saturated marine clay specimen show that the DCTS is accurate and reliable for continuously measuring the volume changes of unsaturated or saturated soil specimens during consolidation and compression.

**Key words:** triaxial test; soil specimen; volume change; unsaturated soil; compression

## 1 前言\*

三轴试验中,土样的体积变化是个重要的测量参数。体积变化可用来解释土的压缩性、剪胀剪缩等。对饱和土样,通常用测量土体排出的水的体积并认为土样的体积变化与排出的水的体积相等;但是,对非饱和土样,因土中含有气体,其土样的体积变化与排出的水的体积不相等。怎样测非饱和土的体变是一大难题。殷宗泽介绍了一有内筒的三轴室<sup>[1]</sup>,参见图 1。内筒顶是开的,内筒装满水到顶部位置,内筒外与外室间是空气,空气压与水压相等,这样内筒不会有变形。在加压下,当土样体积减小时,内室的水面会下降,这时内筒/隔离室水供应管会进水,以致内室的水面回到原位置,这时进入的水的体积等于土体压缩的体积。图 1 的方法是对常规三轴仪不能测非饱和土体变的重大改进,但是,测量操作是手动的,不方便自动化,而且,水面的位置由人眼观测,影响精度。

图 1 的设计与 Bishop and Donald 的方案<sup>[2]</sup>有相同之处。Bishop and Donald 将内室装水银,而外室与内室间装水,一钢球放在水银表面上,钢球的高程变化用

高程仪测量,钢球的高程变化反应土样体积的变化。

陈正汉等报导了一双室三轴装置<sup>[3]</sup>,见图 2。该双室三轴室的特点是内筒/墙与顶盖直接相连,内室和外室都装满水。图 2 装置是对图 1 装置的改进,但仍有一些缺点:①顶盖受到内室水压力  $\sigma_{i-cell}$  和外室水压力  $\sigma_{o-cell}$  ( $\sigma_{o-cell} = \sigma_{i-cell}$ ) 的作用而受张力并会伸长,这样的伸长会引起用内室水体变化来测土样体积变化的误差;②见图 2 的点 1 和点 2,点 1 的压力是  $\sigma_{i-cell}$ ,而点 2 的压力是零,压力差是  $\sigma_{i-cell}$ ,这样内室的水容易沿点 1 与点 2 的路径流出,从而影响体积的测量精度。

图 2 的双室设计与 Wheeler 的双室三轴仪<sup>[4]</sup>有类似之处。陈正汉等<sup>[3]</sup>和 Wheeler<sup>[4]</sup>的设计都没有用三轴室内的荷载传感器,因此垂直加荷轴与顶盖间的摩擦力会影响土样上力的测量,当然,摩擦力可以通过标定减去。另外其体积的变化用水体变管测量或百分表测量,不方便计算机数据的自动采集。

\* 基金项目:香港特别行政区政府 RGC 基金资助项目 (PolyU 5041/01E and PolyU Account Q414)

收稿日期:2001-11-05

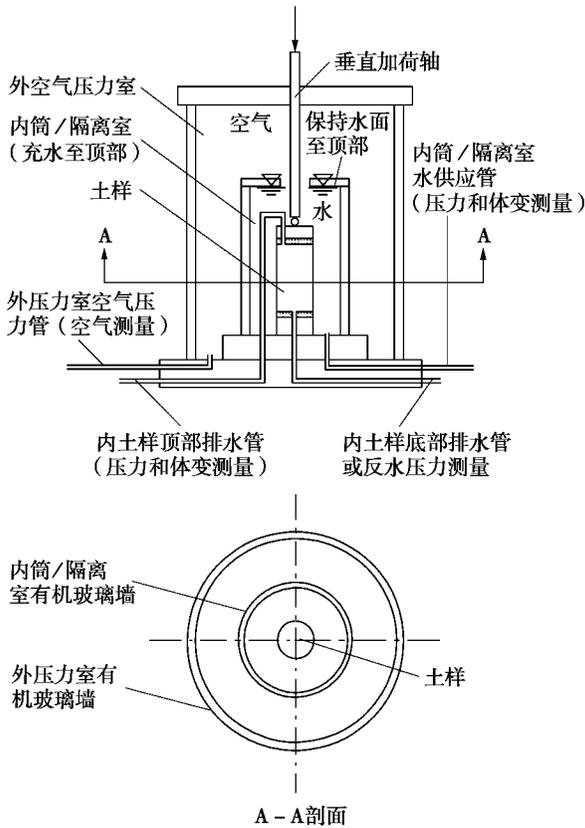


图1 带有内筒的三轴室装置

Fig.1 Triaxial system with open inner cylindrical container

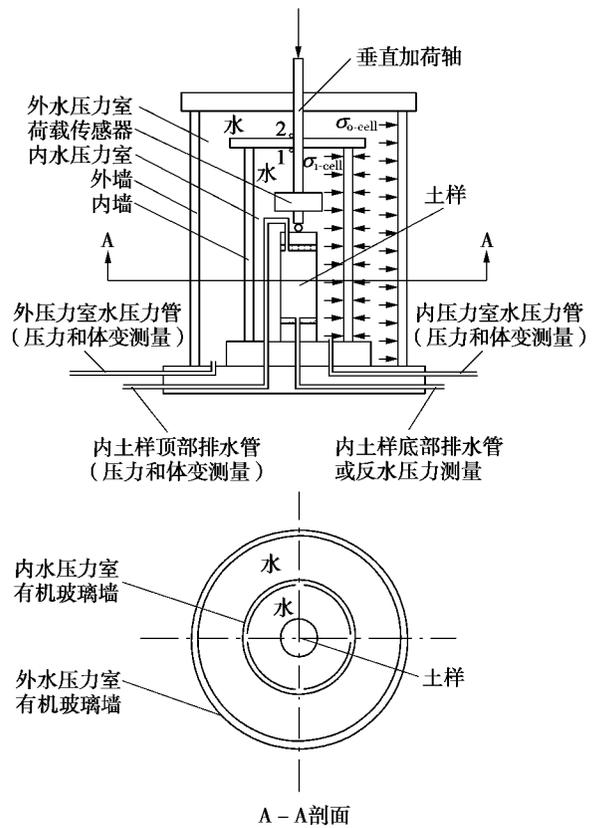


图3 新双室三轴试验装置

Fig.3 New double cell triaxial system

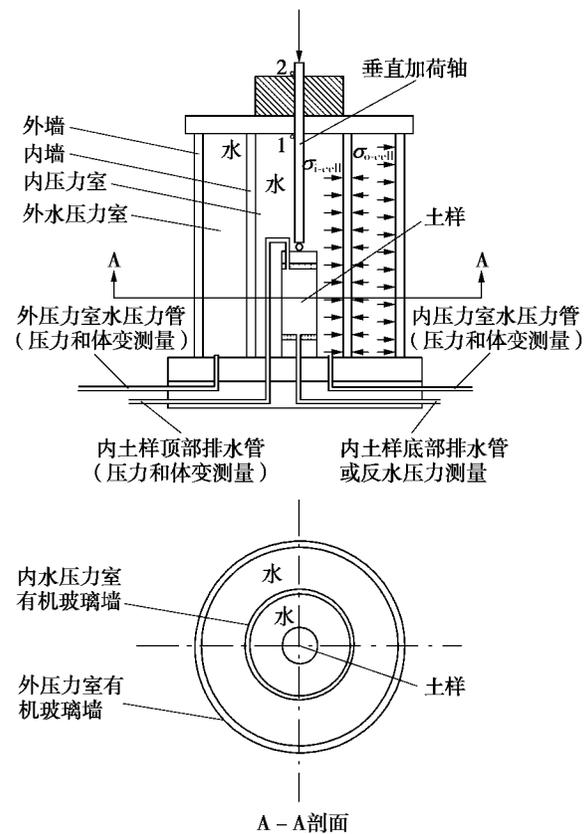


图2 双墙三轴试验装置

Fig.2 Double wall triaxial cell system

## 2 新双室三轴仪

图3是笔者设计和改进的新双室三轴仪(double cell triaxial system—DCTS)示意图,该双室三轴仪与众不同的特点是:

(1)内压力室完全包含在外压力室之内,内室和外室都充满排了气的水。

(2)内室和外室的水受同一压力,  $\sigma_{i-cell}$  (内室) =  $\sigma_{o-cell}$  (外室)。

(3)由于内室墙和顶盖的内外受同一压力  $\sigma_{i-cell}$  (内室) =  $\sigma_{o-cell}$  (外室),所以内室墙和顶盖的压缩变形和伸长变形几乎为零,这样可避免内室体积测量误差。

(4)由于内室和外室的水受同一压力,图3中内室顶盖内点1的压力是  $\sigma_{i-cell}$  (内室),而顶盖外的点2是  $\sigma_{o-cell}$  (外室)。由于  $\sigma_{i-cell}$  (内室) =  $\sigma_{o-cell}$  (外室),所以点1到点2的路径没有水力梯度,因而水不可能沿着从点1到点2的路径渗透,这样可避免内室体积的测量误差。事实上内顶盖和外顶盖与加荷轴之间有O形橡皮止水圈。

(5)电子荷载传感器直接放在内室内,直接测量土样上的荷载,这样可避免由于顶盖与加荷轴之间的摩擦引起的力测量误差。

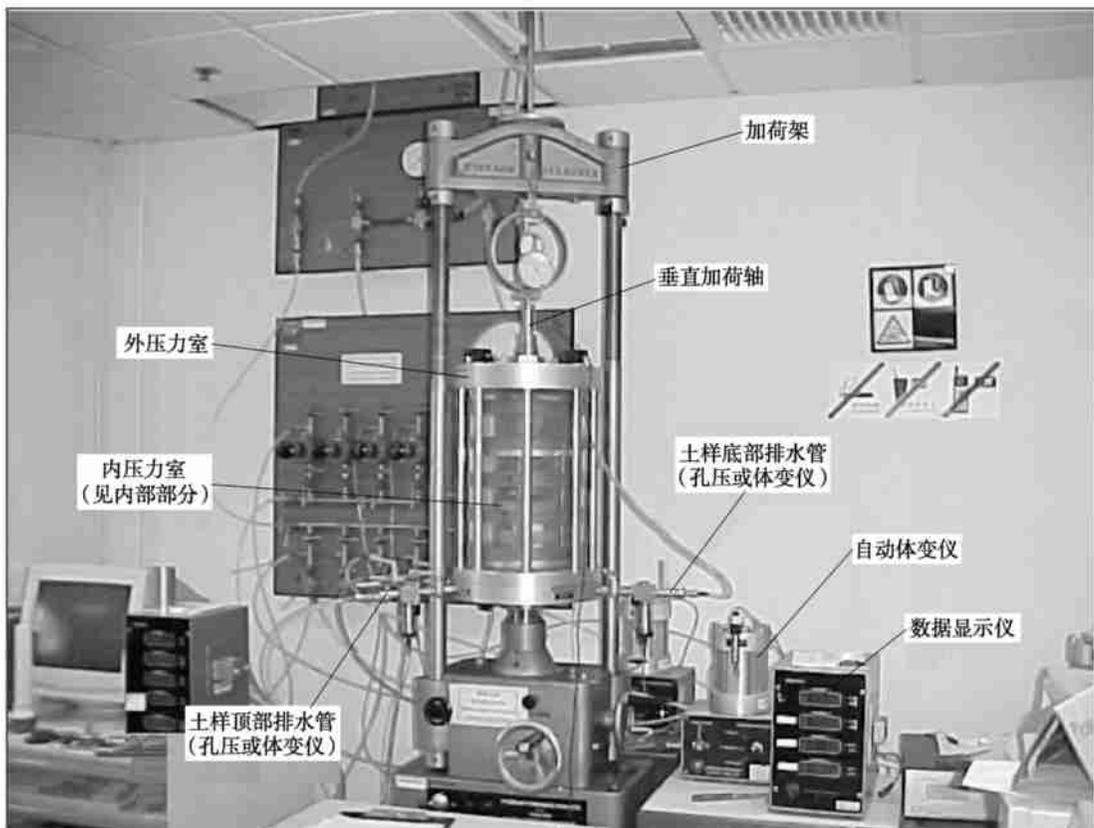


图4 新双室三轴装置安装图

Fig. 4 The real set-up of the double cell triaxial system

(6)所有水的体积由电子体变仪测量,所有测量数据(体积,垂直荷载,土样垂直变形和水压力)都由计算机采集。

上述改进的双室三轴仪(DCTS)一年半以前已经做成。图4是该仪器安装于试验室的情况。图5(a)是内压力室,可以看见荷载传感器和土样;图5(b)是外压力室,内压力室已经在里面。图4和图5的外压力室的内直径 $D=230\text{ mm}$ ,内室间高度 $H=425\text{ mm}$ ,墙厚度 $T=8\text{ mm}$ 。内压力室的内直径 $d=90\text{ mm}$ ,内室间高度 $h=235\text{ mm}$ ,墙厚度 $t=6\text{ mm}$ 。荷载传感器的厚度为 $30\text{ mm}$ ,直径为 $65\text{ mm}$ 。垂直加荷轴的直径为 $20\text{ mm}$ 。土样的直径为 $50\text{ mm}$ ,高度为 $100\text{ mm}$ 。

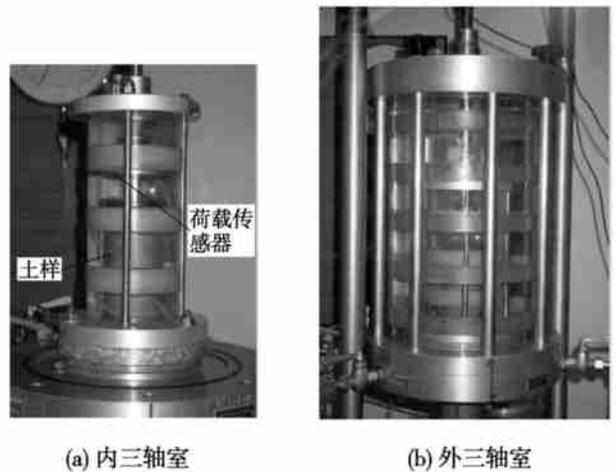


图5 三轴压力室

Fig. 5 Triaxial cell

### 3 新双室三轴仪体积测量的检定

#### 3.1 用实体铜样

实体铜样用来标定内外室体积测量的误差。实体铜样的直径为 $50\text{ mm}$ ,高度为 $100\text{ mm}$ 。在低压(小于 $1000\text{ kPa}$ )下,铜样可被认为是不可压缩的。按照通常的土样安装程序把铜样装在内室里。施加 $100\text{ kPa}$ 反压在铜样橡皮膜之内,其目的是增加水的饱和度,相对应,内室和外室的围压加到 $105\text{ kPa}$ ,所测的 $B$ 值为 $0.99$ 。

当做围压增加的压缩试验时,铜样的所有排水管都关闭,其目的是要保持橡皮膜内的铜样和水的体积不变,这样内室和外室体积变化是真实的误差。

图6是测到的内室体变 $V_{i\text{-cell}}$ 和外室体变 $V_{o\text{-cell}}$ 与有效室压 $S_{e\text{-cell}}$ 的关系(有效室压 $S_{e\text{-cell}}$ 是内外室压与反压之差)。由图可见,外室体变是内室体变的 $3\sim 4$ 倍,而且关系是非线性的。对比之下,内室体变与有效压力的关系是线性的。在有效压力 $400\text{ kPa}$ 下,外室

体变为  $1.523 \text{ cm}^3$ , 而内室体变仅  $0.4 \text{ cm}^3$ 。Wheeler 报导的内室体变, 在有效压力  $400 \text{ kPa}$  下是  $0.7 \text{ cm}^3$ , 而且其关系是非线性的<sup>[4]</sup>。可见笔者的新双室三轴仪体积测量误差较小, 并且其关系是线形的。

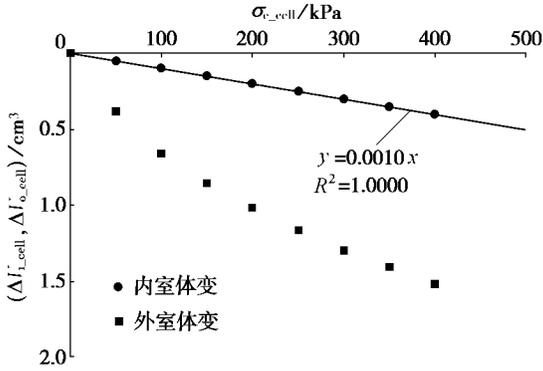


图6 围压下铜样的体积变化(反压  $100 \text{ kPa}$ , 铜样的排水阀关闭)

Fig.6 Volume changes of a copper specimen under isotropic compression measured with back pressure equal to  $100 \text{ kPa}$  and the specimen drainage valve closed

用直线拟合图6中的内室体变与压力的关系, 有

$$\Delta V_{i\text{-cell}} = 0.001 \sigma_{e\text{-cell}} \quad (1)$$

式中  $\Delta V_{i\text{-cell}}$  为内室体变 ( $\text{cm}^3$ );  $\sigma_{e\text{-cell}}$  为有效室压 ( $\text{kPa}$ )。

总铜样的体积是  $196.25 \text{ cm}^3$ , 内室的体积误差是  $0.4 \text{ cm}^3$ , 只引起体积应变误差  $0.4/196.26 = 0.20\%$ , 这个误差是相当小的。

### 3.2 用饱和和海洋黏土样

土样直径是  $50 \text{ mm}$ , 高度是  $100 \text{ mm}$ 。反压  $200 \text{ kPa}$  用来使土样饱和, 相应的围压加到  $205 \text{ kPa}$ , 测到的  $B$  值是  $0.99$ 。

图7是用两种方法测到的在有效围压  $50 \text{ kPa}$  下固结的土体积变化与时间的关系。方法A是常规方法, 即用土样排出的水的体积代表土的体积变化; 方法B是用内室的体积变化来代表土的体积变化。由图7可见, 方法B测到的体变比方法A的体变大一点。在时间  $1569 \text{ min}$ , 用方法B测的体积  $\Delta V_{i\text{-cell}} = 21.1 \text{ cm}^3$ ; 而方法A的  $\Delta V_{w\text{-cell}} = 20.7 \text{ cm}^3$ , 其相对误差是  $1.93\%$ 。土样的体积是  $V_0 = 196.25 \text{ cm}^3$ 。引起的体积应变误差是  $0.20\%$ , 可以说是相当小。

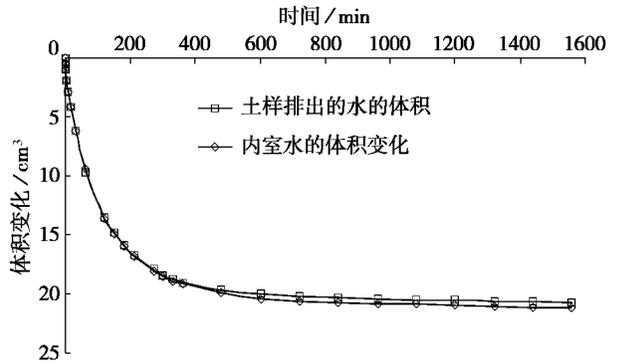


图7 饱和和海洋黏土试样的体积变化

Fig.7 Volume changes of a saturated marine clay measured during consolidation

## 4 结 论

(1) 笔者设计和制作的新双室三轴仪克服了现有仪器的缺点, 可用于非饱和土体变的连续、可靠和相当准确的测量。

(2) 用铜样, 在有效压力  $400 \text{ kPa}$  下内室的体变仅  $0.4 \text{ cm}^3$ , 是铜样总体积体变的  $0.20\%$ , 误差相当小, 而且体变与压力的关系是线性的。

(3) 用饱和和黏土样, 常规方法A与内室体积大的方法B所测的体变非常接近, 两方法的相对误差仅是  $1.93\%$ , 对总体积应变的误差只有  $0.20\%$ , 误差可以说是相当小的。

本研究得到香港理工大学的支持, 新双室三轴仪的制作得到朱俊高博士和 Mr. Y.P. Leung 的协助, 标定试验得到 Miss Wong Mung Sze 和 Mr. Y.P. Leung 的帮助, 在此表示感谢。

### 参考文献:

[1] 殷宗泽. 土体的沉降与固结[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.  
 [2] Bishop A W, Donald I B. The experimental study of partly saturated soils in the triaxial apparatus[A]. Proc 5th Int Conf Soil Mech and Found Engineering[C]. Paris, 1961. 13-21.  
 [3] 陈正汉, 卢再华, 蒲毅彬. 非饱和土三轴仪的CT机配套及其应用[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 387-392.  
 [4] Wheeler S J. The undrained shear strength of soils containing large gas bubbles[J]. Geotechnique, 1988, 28(3): 399-413.