

一种伺服液压加载双室三轴仪的研制与开发

邵生俊^{1,2}, 褚 峰^{1,2}, 陆 媛^{1,2}, 李玮峰²

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘 要: 三轴试验是土力学领域控制试样固结条件和加载剪切排水条件测试土的强度、变形特性参数的常用试验,也是研究土的强度及本构关系的重要手段。针对国产三轴试验中分别通过压力室体积变化和密封轴向传力杆量测试样应变和轴向荷载的不足,研制了试样的双室压力室,3组独立的伺服步进电机驱动液压缸活塞的液压体变控制器,开发了能够控制不同加载方式、加载或变形速率的自动控制系统和计算控制程序及操作界面。双室压力室的内外腔各自由一组伺服步进电机驱动液压缸活塞的液压体变控制器施加与固结围压相同的液压;试样上端部轴向传力轴固定于压力室顶部,且连接荷载传感器量测试样承受的轴向荷载,试样下端部承受竖向加载轴作用,且与压力室底座密封,竖向加载轴的荷载由一组独立的伺服步进电机驱动液压缸活塞的液压体变控制器控制竖向加载轴下端连接的液压缸加载。该仪器能够自动量测轴向荷载、轴向变形、试样外体变、试验孔隙水压力、压力室内外腔压力。试验验证表明,该仪器系统性能稳定,提高了量测精度,具有构造简单、操作简便、自动化程度高、生产成本低等特点。

关 键 词: 新型三轴仪; 伺服液压控制; 体变量测

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2015) 增 1—0691—06

Development of new double cell triaxial apparatus controlled by hydraulic servo

SHAO Sheng-jun^{1, 2}, CHU Feng^{1, 2}, LU Yuan^{1, 2}, LI Wei-feng²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Triaxial test is an important mechanical test in geotechnical testing and also in study of strength and constitutive relation. Soil test procedures put triaxial tests as the major experimental projects at home and abroad. Triaxial research and development of triaxial tests are carried out simultaneously. In light of the deficiencies of the existing triaxial apparatus a new triaxial apparatus controlled by hydraulic servo is introduced. The apparatus has a double pressure chamber, surrounded pressures inside and outside the chamber and axial loads is imposed by the hydraulic controller using servo stepper motor drives ball screw pushes the piston to produce hydraulic pressure. Volume deformation measurement is using a stepper motor servo ball screw piston movement displacement to calculate. Data acquisition is controlled by computer. Experimental results show that the deformation of the instrument and volume deformation is measured accurately; instrument system performance is stable. The new triaxial apparatus has the characteristics of a simple structure, easy to operate, the true state of stress, high degree of automation, low production costs, etc. It played a relevant role in promoting the popularity and development of triaxial tests.

Keywords: new triaxial apparatus; controlling by hydraulic servo; volume deformation measurement

1 引 言

土工试验是土力学发展的基础,试验仪器的开发在土工试验中具有重要的地位。三轴试验是土工试验中一项重要的力学试验,自 1934 年美国人 Rendulic 首先用这种方法测定土的强度参数以来,迄今已有 70 余年的历史,有关试验的测试技术有了

很大发展。三轴试验现已成为测定土的静力特性,动力特性和研究砂土液化的主要试验方法,是研究土本构关系的主要手段。用三轴试验测定的土的参数已成为重要岩土工程设计的主要依据,国内外的土工试验规程均把三轴试验列为主要试验项目,我国三轴试验的发展是与三轴仪的研制发展同步进行的。我国于 20 世纪 50 年代开始研制三轴仪,南京

电力自动化设备厂首先制造了用磅称施加轴向力的三轴仪,而后又仿制了应变式三轴仪,为我国当时的科学研究提供了良好的试验手段,促进了当时科研的发展进步,成为测试土工性质指标的通用设备。随着时代的进步,普通静三轴仪可测量指标已不能满足科研的需求,因大部分仪器为人工读数,较大的误差不可避免,多功能新型三轴仪的研制就成为各大研究机构努力的目标。近年来,国内一些有代表性的三轴仪相继问世,有香港理工大学研制的新双室三轴仪^[1]、河海大学三轴仪^[2]、后勤工程学院三轴仪^[3]和上海交通大学三轴仪^[4]等。

各种新型三轴仪的功能各异,基本上都实现了对试样各指标较精确的量测,很大程度上推动了三轴仪的发展,但还存在各种不足,如体变量测精度不够高、仪器自动化程度不高、造价较高、占地面积较大、不易推广等。本文介绍了西安理工大学岩土所研制的新型伺服液压加载双室三轴仪,很大程度上克服前述的一些不足,实现了试样应力、应变以及体变的精确量测。

2 新型三轴仪的研制

新研制的三轴仪主要由主机、伺服步进电机液压加载系统和计算机自动控制系统三部分构成。主机双室压力室呈圆柱体,内室和外室充满蒸馏水,内室和外室在试验过程中分别施加相同的围压,即内外室的水承受同一围压作用,由于内压力室壁内外承受同一压力,即内压力室壁的压缩变形和鼓胀变形几乎为 0,这样可以有效地减小内压力室体积测量的误差。压力室顶盖上方设有加载反力架,反力架上设有荷载传感器,伺服步进电机液压加载系统能够控制轴向荷载、内室压力、外室压力的三系统独立加载,伺服步进电机驱动滚珠丝杆推动液压缸活塞产生液压源,分别与压力室底座下轴向活塞和压力室底座侧面的内、外压力室加压口相连接,通过液压传感器和位移传感器,既可以实现轴向、内外压力室的独立加载,也能够量测试样的体积变化。同时,还实现了自动控制与数据采集。新型双室三轴仪系统及工作原理见图 1,整体图见图 2。

2.1 压力室结构

压力室由底座、顶盖板、双层有机玻璃腔组成。压力室有机玻璃腔形状呈圆柱形,双层有机玻璃腔中设置有外室加压口,压力室底座中设置内室加压口,具体形状见图 3。压力室横截面外室直径为 200 mm,内室直径为 160 mm,有机玻璃壁厚 5 mm,压力室高 219 mm。

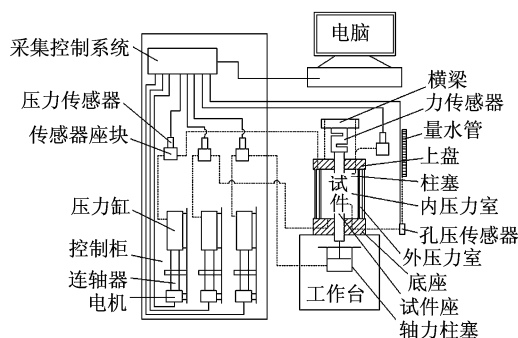


图 1 新型三轴仪结构

Fig.1 Structure of a new triaxial apparatus



图 2 新型三轴仪系统

Fig.2 A new triaxial apparatus system

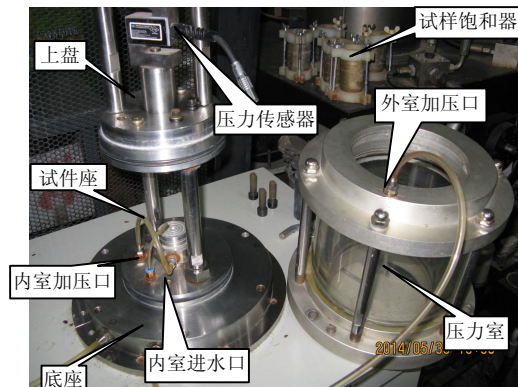


图 3 压力室及其内部结构

Fig.3 Pressure cell and Internal structure of cell

试样尺寸直径为 39.1 mm、高为 80 mm。为便于控制排水条件,试样底座和顶盖内均开设排水孔,橡皮膜密封的试样放置于刚性底座与刚性帽之间。试验的工作原理是试样的围压 σ_3 以及外室压力分别由一组伺服步进电机驱动液压缸活塞的液压体变控制器施加,为减小内压力室体积测量(试样外体变)的误差,于试验过程中保证内室与外室施加相同的压力,试样上端部轴向传力轴固定于压力室顶部,且连接荷载传感器量测试样承受的轴向荷载,试样下端部承受竖向加载轴作用,且与压力室底座密封,竖向加载轴的荷载由一组独立的伺服步进电

机驱动液压缸活塞的液压体变控制器控制竖向加载轴下端连接的液压缸加载。

2.2 加载系统

如图 4 所示, 控制柜中部有 3 套伺服步进电机驱动/体变控制器, 试样固结时能实现内外室及轴向应力的单独施加, 压缩剪切时主应力之间也互不干扰和影响。侧向围压的液压/体变控制器均在液压缸和移动活塞上装有液压传感器和位移传感器, 分别用于控制侧向围压的大小及液压缸的体变; 轴向荷载和试样变形分别由反力架上的荷载传感器和加载液压缸上的位移传感器测量, 并反馈于轴向加载的液压/体变控制器。对试样施加轴向荷载, 分为应变控制式和应力控制式两种。应变控制是试样按规定的变形速率产生轴向变形, 测定产生某一轴向变形所需要的轴向力; 应力控制式则是分级加载, 测量每级荷载作用下试样的变形量, 分别由轴向荷载传感器和位移传感器量测, 并通过自动控制系统反馈于伺服步进电机液压/体变控制器控制应力和位移。

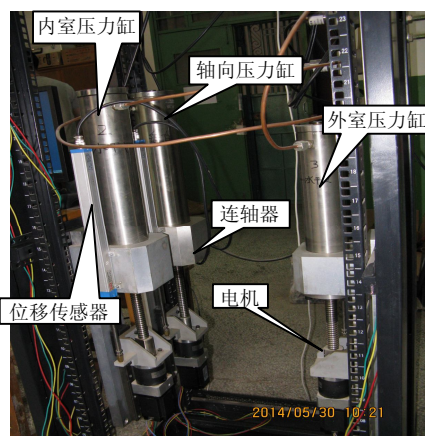


图 4 伺服步进电机

Fig.4 Servo stepper motor

2.3 量测系统

量测系统包括应力量测、变形量测和孔隙水压力量测。轴向荷载为刚性试样底座加压, 应力传感器直接安装于压力室顶部固定的反力架上, 竖向位移传感器通过试样底座活塞截面积与加载液压缸截面积转换, 接于加载液压缸侧面。侧向围压和变形通过伺服步进电机加载系统上安装的压力传感器和位移传感器量测。外室压力也通过伺服步进电机加载系统上安装的压力传感器量测。孔隙水压力在排水通道处安装孔压传感器量测。

2.4 排水系统

土样在固结和试验时采用上下双面排水, 在与试样直接接触的顶板和底座上设有排水口, 通过透水石可以进行排水。进行固结排水试验时, 可以通

过排水量测试样在试验时的排水量, 进行固结不排水试验时可关闭排水阀, 测量试样的孔隙水压力。

2.5 自动控制系统

新型三轴仪的控制系统由各种传感器、数据采集系统、控制柜组成。传感器包括压力传感器、位移传感器、荷载传感器, 利用数据采集系统收集各个传感器所测得的试样的应力值和变形值, 并进行数据输出控制, 通过计算机完成控制试验, 采集数据和处理数据的全过程。主机部分中的压力传感器、位移传感器以及荷载传感器分别与控制柜中的 PCB 板连接, 连接均采用航插形式, 其优点在于不仅大大简化了仪器的装卸步骤, 而且减少了由于经常拆卸传感器造成与 PCB 板接口的磨损, 从而使得信号处理系统更加耐用, 信号传递可靠。开发的控制界面如图 5 所示, 能够控制不同加载方式、加载或变形速率的试验。



图 5 控制界面

Fig.5 Control interface

3 试验验证

3.1 试验土样

试验土样为 Q₃ 黄土, 取自陕西省西安市南郊航天城, 取土深度为 10~16 m。经室内常规试验测定, 该黄土天然干密度为 1.42 g/cm³, 天然含水率为 19.8%。利用三轴削样器将原状土块切削成高 8 cm、直径为 3.91 cm 的圆柱形试样。将原状试样分别配制成 10、13、16、20、24% 五个不同的含水率。对低于天然含水率的试样采用风干法, 让水分蒸发至所需含水率。对高于天然含水率的试样采用水膜转移法, 用滴管滴定至所需含水率。配好水的试样放置在保湿缸中静置 48 h, 保证水分运移均匀。

为了对比原状土与正常固结土的强度特性, 利用自制的正常固结土制备器 (见图 6), 制备若干饱和和正常固结土试样。具体制备步骤为: 先将原状土过 0.5 mm 筛, 其次在土中加入蒸馏水搅拌成泥浆, 倒入正常固结土制备器, 待泥浆自由沉积形成正常

固结土,最后削取正常固结土试样并饱和。



图6 正常固结土制备器

Fig.6 Preparation apparatus of normally consolidated soil

3.2 试验步骤

试验的步骤:①将制备好的三轴试样安装于压力室的底座与顶盖之间;②将双室压力室安装并将蒸馏水注入内外压力室;③打开控制柜电源及自动控制程序,各传感器初始读数调0;④输入固结应力条件,打开步进伺服电机,启动固结控制程序,施加固结压力;⑤固结完成后,输入加载控制方式,启动加载程序进行剪切试验,达到应变控制条件后,停止试验;⑥卸除步进伺服电机液压加载系统液压缸的压力;⑦排出压力室中蒸馏水,移除压力室,拆除试样。

3.3 应力应变测试结果

为了考察新型三轴仪测试结果的合理性,利用原状黄土在不同围压下进行三轴剪切试验,图7为不同固结围压下不同含水率条件下原状黄土的应力-应变关系。从图中可以看出,(1)在较低的固结围压(100 kPa)、不同含水率(10%~24%)下曲线均呈现应变软化趋势;(2)随着固结围压的增大(200、300 kPa),在较低含水率下(10%、13%),曲线呈现软化趋势,在较高含水率下(16%、20%、24%)呈现硬化趋势;(3)在较大的固结围压下(400、500 kPa)、不同含水率条件下曲线均呈现硬化趋势。

3.4 体变测试结果

图8为不同固结围压下不同含水率条件下原状黄土的体变关系曲线。从图中可以看出,(1)在较低的固结围压(100 kPa)、在较低含水率下(10%~16%),试样随着剪切轴向应变的增大出现体胀趋势,较高含水率下(20%、24%)试样发生体缩;(2)随着固结围压的增大(200~500 kPa),不同含水率下试样均呈现体缩趋势,这与黄土的力学特性基本一致^[5]。

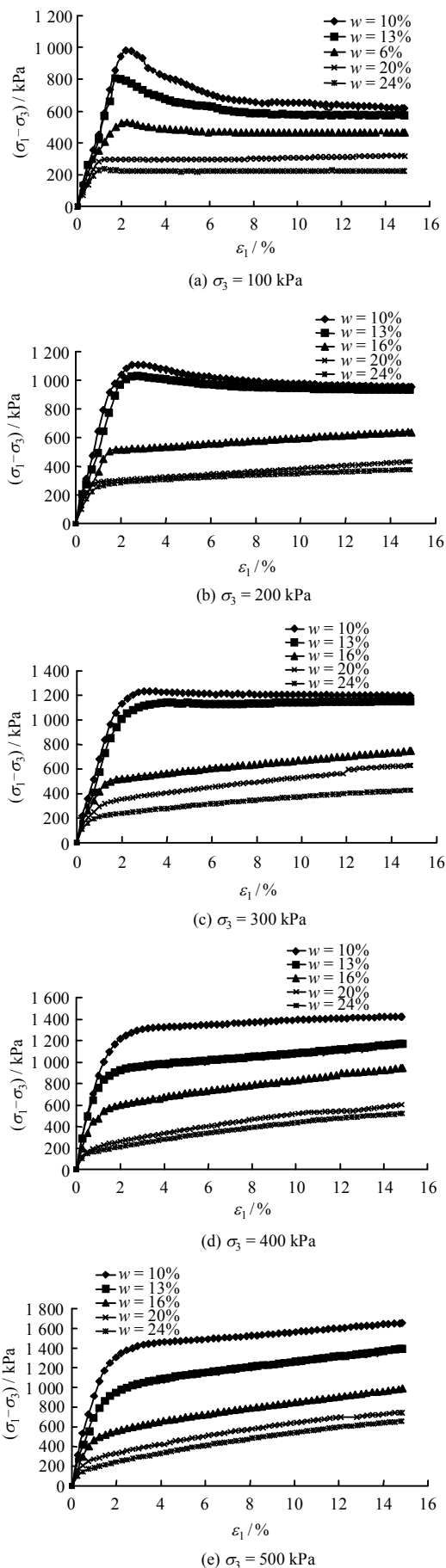


图7 不同围压下黄土应力-应变关系
Fig.7 Stress-strain relationships of loess under different consolidation pressure

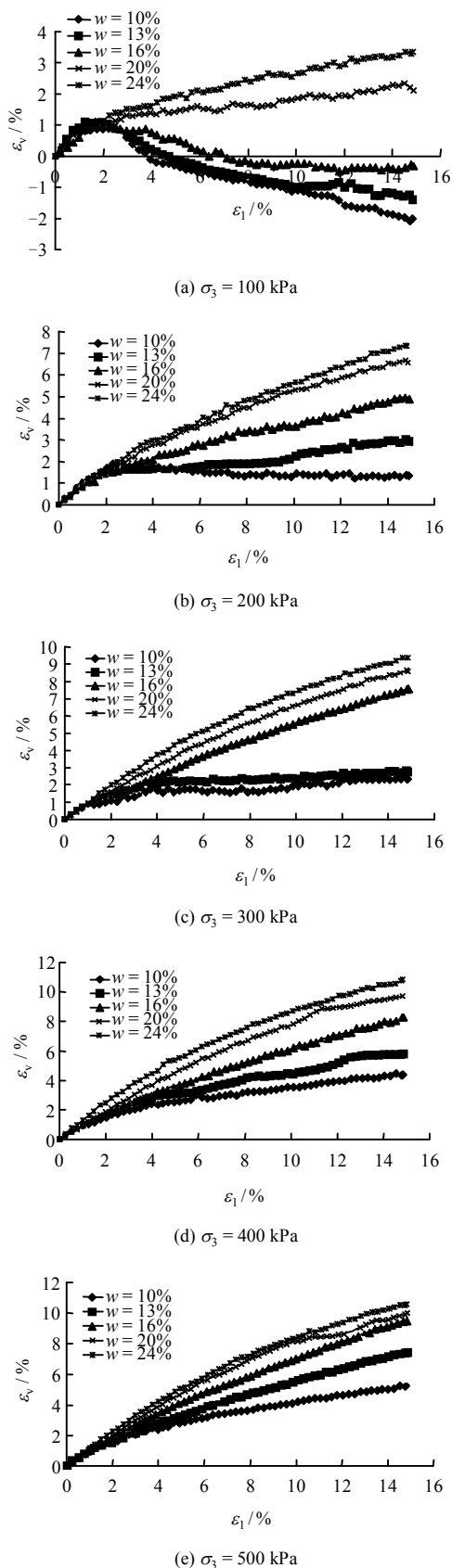


图 8 不同围压下黄土体变关系
Fig.8 Volume change relationships of loess under different consolidation pressure

3.5 强度测试结果

图 9 为 p - q 坐标上不同含水率原状黄土与饱和

正常固结土的强度曲线。从图中可以看出，饱和和正常固结土曲线交于坐标原点，随着含水率的降低曲线逐渐上移，即与 q 轴的截距逐渐增大，在 q 轴上的截距表示原状结构土的初始抗剪强度，原状结构土的初始抗剪强度随着含水率的增大而逐渐降低，并随着结构性的破坏最终趋近于饱和正常固结土。这同样符合原状结构性黄土的基本特性。

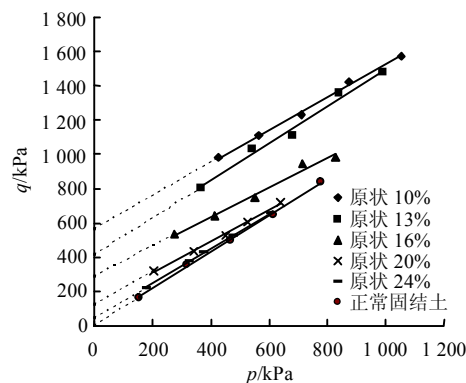


图 9 不同含水率下黄土强度关系
Fig.9 Strength relationships of loess under different water content

表 1 列出原状黄土与参考文献[6]中近似物性试验黄土强度指标黏聚力 c 、内摩擦角 φ 值，文献中所用土为兰州 Q_3 黄土，干密度为 1.38 g/cm^3 ，含水率为 $5\% \sim 6\%$ 。从表中可以看出，兰州 Q_3 黄土黏聚力 $c = 27.2 \text{ kPa}$ ，内摩擦角 $\varphi = 31.2^\circ$ 。本次试验所用黄土在含水率为 10% 、 13% 、 16% 、 20% 、 24% 时，黏聚力 c 分别为 25.7 、 22.6 、 20.3 、 17.5 、 15.5 kPa ，内摩擦角 φ 分别为 26.4° 、 24.9° 、 21.5° 、 20.3° 、 19.9° 。这一试验结果也比较符合黄土“当干密度相同时，黏聚力 c 值随含水率的增大而减小，内摩擦角 φ 值也随含水率的增大而略有减小”这一规律，试验结果中的误差可能是兰州 Q_3 黄土与西安 Q_3 黄土的性质差异所致。

表 1 黄土强度指标
Table 1 Strength index of loess

强度指标	含水率/%					兰州黄土
	10	13	16	20	24	
黏聚力 c/kPa	25.7	22.6	20.3	17.5	15.5	27.2
内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	26.4	24.9	21.5	20.3	19.9	31.2

3 类曲线和相关图表反映了原状黄土的基本力学特性。从试验曲线的形态和试验结果看，仪器整体系统非常稳定，试验曲线光滑平顺。

4 系统误差分析

新型双室三轴仪的体变量测通过伺服步进电机

驱动液压缸活塞的液压体变控制器进行,前文体变曲线可见曲线较为光滑,证明仪器系统较为稳定,现通过以下试验测试仪器的系统体变,证明本仪器的合理性。

利用实体钢样来标定内外室系统体变的误差,标定用钢样的尺寸与试验土样相同,钢样可以认为是不可压缩的,让钢样在与试验条件相同的情况下固结,测得在不同固结围压作用下仪器的内室体变与外室体变,绘出体变随固结围压的变化曲线如图 10 所示。随着固结围压的增大,仪器系统的内外室体变均在增大,根据计算在固结围压在 500 kPa 时,外室系统体变为 3.06%,内室系统体变仅为 0.406%,折算成体积分别为 3.200 cm³和 0.425 cm³,由此可以认为,内室的系统体变很微小,证明了使用双层压力室的合理性。

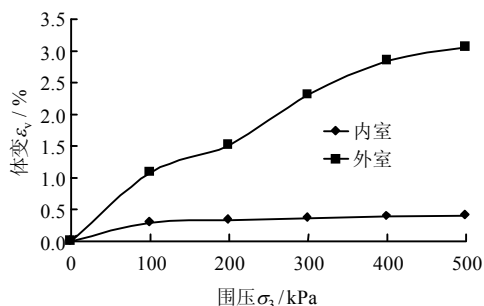


图 10 不同围压下钢样体变关系
Fig.10 Volume change relationships of steel specimen under different consolidation pressures

利用人工制备的饱和和正常固结土试样,在固结围压为 400 kPa 时进行均压固结,得到排水管(试样内体变)与内压力室水(外体变)随着时间的变化曲线如图 11 所示。从图中可以看出,随着时间的增长,曲线逐渐增长最后至平缓,说明内体变与外体变均随着时间增长逐渐增大,且两者的曲线非常接近,说明固结过程中系统误差很小,内体变曲线低于外体变曲线,这是由于饱和试样时,饱和度没有达到 100%所致,可以证明系统体变对试验造成的误差很小,亦证明新仪器的合理性。

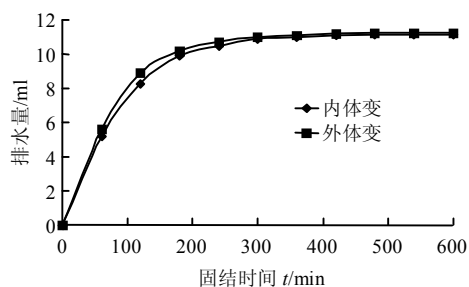


图 11 饱和正常固结土体积变化
Fig.11 Volume change of saturated loess during consolidation

5 结 论

(1) 研制开发的新型三轴仪具有双室压力室,3 组独立的伺服步进电机驱动液压缸活塞的液压体变控制器,开发了能够控制不同加载方式、加载或变形速率的自动控制系统和计算控制程序及操作界面。

(2) 双室压力室的内外腔各自由一组伺服步进电机驱动液压缸活塞的液压体变控制器施加与固结围压相同的液压;试样上部轴向传力轴固定于压力室顶部,且连接荷载传感器量测试样承受的轴向荷载,试样下部承受竖向加载轴作用,且与压力室底座密封,竖向加载轴的荷载由一组独立的伺服步进电机驱动液压缸活塞的液压体变控制器控制竖向加载轴下端连接的液压缸加载。

(3) 通过黄土的三轴试验,测试得到了符合黄土变形特性的应力-应变关系曲线以及体应变的关系曲线,验证了仪器系统的稳定性和测试结果的合理性。通过对仪器系统体变的标定,证明仪器系统较为稳定,证明了新仪器的合理性。

(4) 新型三轴仪系统性能稳定,具有构造简单、操作简便、自动化程度高、生产成本低等特点,便于以后进一步推广。

参 考 文 献

- [1] 殷建华. 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[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 552—555.
YIN Jian-hua. A new double cell triaxial system for continuous measurement of volume change of an unsaturated or saturated soil specimen in triaxial test[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(5): 552—555.
- [2] 殷宗泽. 土体的沉降与固结[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [3] 陈正汉, 谢云, 孙树国, 等. 温控土工三轴仪的研制及其应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 928—933.
CHEN Zheng-han, XIE Yun, SUN Shu-guo, et al. Temperature controlled triaxial apparatus for soils and its application[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(8): 928—933.
- [4] 叶冠林, 武朝军, 盛佳初, 等. 既有三轴剪力仪的自动化改造及应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2295—2299.
YE Guan-lin, WU Chao-jun, SHENG Jia-ren, et al. Reformation for automation of existed triaxial apparatus and its application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(8): 2295—2299.
- [5] 邢义川, 谢定义, 李振. 非饱和黄土的破坏条件[J]. 工程力学, 2004, 21(2): 167—172.
XING Yi-chuan, XIE Ding-yi, LI Zhen. A failure criterion for unsaturated loess[J]. *Engineering Mechanics*, 2004, 21(2): 167—172.
- [6] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 陕西: 陕西科学技术出版社, 1997.