HKUST 体变测量方法在动三轴中的应用①

崔 治，胡新江，肖 巍
（欧美大地仪器设备中国有限公司，香港）

摘要：动三轴试验是一种获得土体的动剪切强度、模量和阻力比的重要方法，三轴试验中试样的体变难以直接精确测量。本文总结当前动三轴试验中主要的体变测量方法，并分析这些方法在动三轴测试中的优缺点。结合 GDS 动三轴试验仪的特点，提出了基于 HKUST 双压力室体变测量装置的动三轴体变测量方法，通过改进试样底座，采用内压力室测量试样在动态试验过程中的体积变化。最后采用三轴试样进行测试，结果表明 HKUST 方法在动三轴体变测量中是可行的。该方法目前还不能够进行拉伸试验，同时振动对体变测量精度的影响也有待进一步研究。

关键词：动三轴试验；体变测量；HKUST 测量方法
中图分类号：TU411 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－0844(2014)04－1098－04
DOI:10.3969/j.issn.1000－0844.2014.04.1098

The Application of HKUST Volumetric Change Measuring Method in Dynamic Triaxial Test

CUI Zhi, HU Xin-jiang, XIAO Wei
(*Earth Products China Ltd.*, *Hong Kong*, *China*)

Abstract: Dynamic triaxial testing is an important method used to obtain the dynamic shear strength, modulus, and damping ratio of soil. However, it is often difficult to accurately measure volume change of a soil specimen in a triaxial test. This paper summarizes several commonly used methods of volumetric change measurement and analysis in dynamic tests in addition to their advantages and disadvantages. Combined with unique features of Geotechnical Digital Systems (GDS) dynamic triaxial test equipment, a novel method of using the total volume measuring wall device of Hong Kong University of Science and Technology (HKUST) is presented. In this novel method, inner cells are used to measure the volumetric change in a soil specimen during a dynamic test by improving the sample base. The accuracy and applicability of this new method are verified and illustrated by conducting tests on clay samples. The test results reveal that this novel method is feasible in dynamic triaxial testing. This method is not applicable for the pull test, and the influence of vibration on total volume measurement requires further research.

Key words: dynamic triaxial test; volumetric change measurement; Hong Kong University of Science and Technology (HKUST) measuring method

0 引言

近年来国民经济取得了重大成就，国家对基础设施建设的投入力度逐渐加大，工程建设过程中也遇到了许多复杂的岩土工程难题，地基土在动荷载作用下的稳定和变形问题日益受到重视，特别是变形造成的地基不均匀沉降问题。地震、机械振动、风荷载、波浪等动荷载都会对地基产生影响，如地震引起的砂土液化导致的地基土失效问题、高层建筑物基础在风荷载下的稳定问题、软土路基在周期性交通荷载下的不均匀沉降问题、油罐地基在充水排水的循环荷载下的稳定和变形问题、近海结构物在波浪荷载作用下的动力反应分析等，对这些复杂问题的研究主要还是结合工程实际情况通过试验来进行。在动荷载作用下土体变形发展规律对工程安全具有重要影响，特别是地基的不均匀变形可能会导致工程事故，所以动三轴体变测量对于解决这些工程问题具有重要的意义。对于静态饱和三轴试验，可以直接通过试验的排水情况作为体变测量的依据。但对于动三轴试验，规范要求都是在不排水的条件下进行[1]，无法通过试样中水体积的变化来确定试样体变，导致体变测量难度增加。虽然动三轴试验属于饱和三轴试验，但土的剪胀剪缩特性以及试验过程中承受拉伸力，试样仍然会有变形，如何准确测量体积变化是

① **收稿日期**：2014-08-20
作者简介：崔 治，男，事业部经理，主要从事室内岩土试验设备开发及试验培训方面的工作。E-mail：cuizhi@epc.com.hk

有待解决的问题。

1　三轴体变测量方法

目前三轴体变测量方法主要有以下三种[2]:

(1)流体法。围压采用水施加,通过测量试样周围水体积的变化来获取试样的体变。为了提高流体法测试样体变的精度,许多学者设计了各种不同的双压力室,按类型可以分为内外室连通型和内外室封闭型[3-4]。该方法准确测量体变的前提是采用除气水且水不能压缩、压力室为无线刚度、管路中无气泡、水不存在热胀冷缩。通常情况下水中存在一定量的气体,有机玻璃压力室刚度也较低,加压之后会发生膨胀,同时该类型设备的管路较长,接口也较多,很难做到管路中无气泡,室温的变化会导致水密度变化产生假体变,这些因素都会使得测量结果存在较大误差。

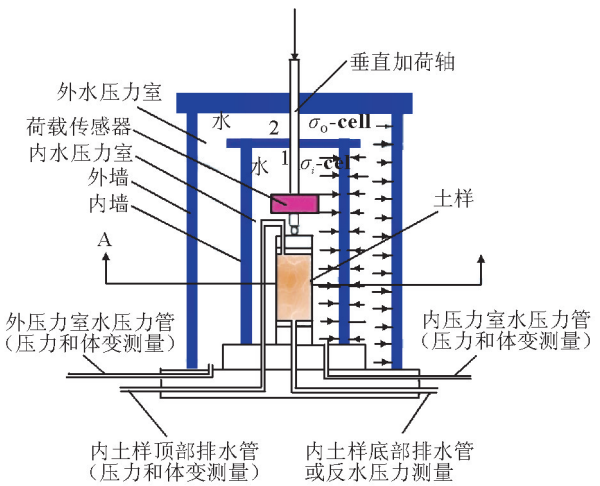
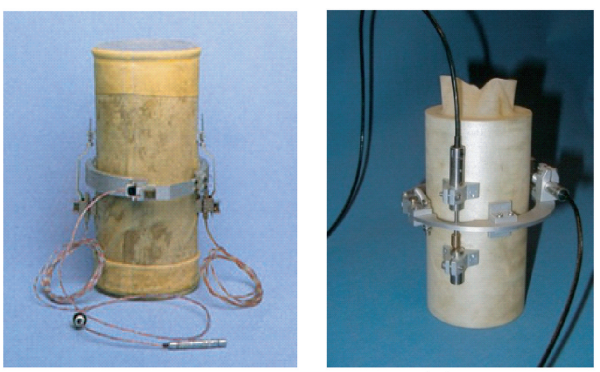


图 1　流体法—封闭型双室

Fig.1　Fluid method－enclosed double－cell



(a) 霍尔效应　　(b) LVDT

图 2　局部应变传感器

Fig.2　Local strain sensor

(2)局部应变传感器测量[5]。主要有霍尔效应局部应变传感器和 LVDT 局部应变传感器两种。该方法通常用于静态试验中试样体变的测量,但对于动态试验,特别是高频率试验,试验在振动过程中传感器振动可能致使传感器脱落、传感器固定位置密封不良等问题。局部应变传感器的量程较小,LVDT 的最大量程才 5 mm,霍尔效应局部应变传感器的量程更小,由于传感器量程的限制,不能够测量大的变形,而动三轴试验中大变形不可避免。该方法主要适用于测量局部应变或者试样体积变化较为规整的总体变,但由于土体在动荷载作用下会发生畸形形变,计算得到的试样总体变存在较大误差,局部应变传感器安装较为复杂,对试验技术人员的要求较高,这些因素使得该方法在实际应用中受到多重限制。

(3)非接触测量[6-7]。非接触测量是以光电、电磁等技术为基础,在不接触被测物体表面的情况下,得到物体表面参数信息的测量方法。非接触测量方法主要有激光测距技术、电磁波测距技术和数码摄像结合图像处理技术三种。非接触测量对于环境的要求较高,三轴压力室中水和有机玻璃的折射使得系统难以准确标定,与接触测量方法相比精度不是很高,设备价格也较昂贵。

2　HKUST 测量方法

2.1　基本原理

HKUST 测量方法是香港科技大学岩土工程团队共同研发的,其基本原理是[8]:设计一个瓶状室且上端开口的内压力室,试样安装在内压力室,内压力室和外压力室均装有不超过其顶部的除气水;同时在内压力室外部设置一参照管,参照管的截面积等于内压力室上部收缩断面面积与竖向加载轴截面积之差,参照管与内压力室固定在一起,试验时参照管水位与内压力室水位大致齐平,内压力室和参照管分别用细管与高精度差压传感器的两个端口连接;通过外压力室顶部的管路施加气压来控制围压,这保证了内压力室内外不存在压力差且内压力室不会发生变形;当试样体积变化时,内压力室的水位将发生变化,而参照管水位保持不变,两者之间产生一个小的压力差,通过高精度差压传感器测量压力差值,最后通过换算得到试样的总体变。其基本结构图如图 3 所示。

2.2　系统精度

水中存在一定量气体以及水具有热胀冷缩性质,昼夜温差和气温变化将导致测量结果包含假体变,围压变化将导致管路轻微膨胀或收缩。内压力室也具有一定的吸水性,管路不可避免地存在微漏现象,这些因素降低了系统的测量精度。通过上述一系列措施,相对于其它测量方法,HKUST 系统的精度显著提高,其精度对比表如表 1 所示[8]。

表 1　精度对比表

Table 1　The accuracy comparison table

体变系统	HKUST	Wheeler & Sivakumar	殷建华的系统
由围压变化引起的瞬时体积应变/%	0.5	1.5～2.0	0.6
由室温引起的体积应变/(%/℃)	±0.003－±0.005	±0.007	
蠕变/(%/周)	0.009	0.1～0.15	

2.3　注意事项

为了提高测试精度,尽量减小上述因素对试验结果的影

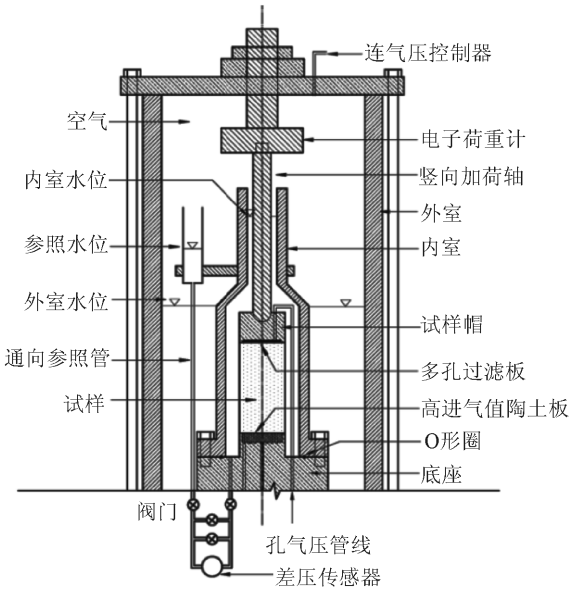


图 3 HKUST 结构图

Fig.3 HKUST structure diagram

响,需要注意:

(1) 内压力室和参照管中的水必须采用除气水;

(2) 内压力室和参照管装水时避免产生气泡,试验前排除系统中的气泡;

(3) 连接管路需要有足够的刚度以防止膨胀变形;

(4) 试验之前将内压力室在水中浸泡一段时间以减小其吸水;

(5) 控制实验时为恒温环境。

3 动三轴体变测量方法

3.1 DYNTTS

伺服电机控制的动三轴试验系统(DYNTTS)将三轴压力室和动力驱动器合为一体,从压力室底座施加轴向力和轴向变形。压力室由装有马达驱动的基座螺旋传动。当没有选择径向动力驱动器时,通过平衡锤消除动态试验对恒定围压的影响,系统由在 MS Windows ® 中运行的 GDSLAB 软件来控制,任一循环的数据都可以实时记录和显示出来。

该系统体变测量方法采用流体法。通过 GDS 200cc/2MPa 数字压力/体积控制器来精确控制压力,压力分辨率可以达到 1 kPa,体积分辨率 1 mm^3。动态试验中,平衡锤消除了由于轴向加压杆往复运动产生的压力室有效空间的变化,压力室与控制器之间水交换体积就是试样体变,通过围压控制器体积变化就能够直接获得试样的体变。当动荷载频率过高或者试样体变较大时,压力控制器可能存在来不及补/排水导致测量结果存在一定误差,流体法的缺点在该系统中同样存在。

3.2 设备改进

采用 HKUST 方法测量试样体变时需要对设备进行如下改进:

(1) 将饱和土底座改成能够安装内压力室的底座;

(2) 围压不再使用压力/体积控制器,改用气压来施加,需要增加一个气压控制器;

(3) 在压力室内部增加内压力室,在压力室外部安装一个高精度差压传感器,通过管路和密封装置将内压力室和参照管与差压传感器的端口进行连接;

(4) 数据采集盒上添加差压传感器端口,通过修改软件配置文件在采集系统中添加差压传感器。

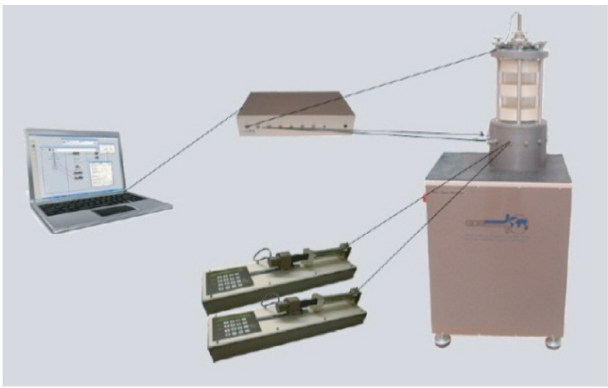


图 4 伺服电机控制的动三轴试验系统

Fig.4 DYNTTS

4 试验测试及结果分析

4.1 试验简介

试验采用砂土样进行,试样为 50 mm×100 mm 的干燥松散圆柱砂样。首先施加 500 kPa 围压和 100 kPa/200 kPa 的偏应力进行非等向固结,然后施加动态荷载进行试验,动态荷载采用正弦波。

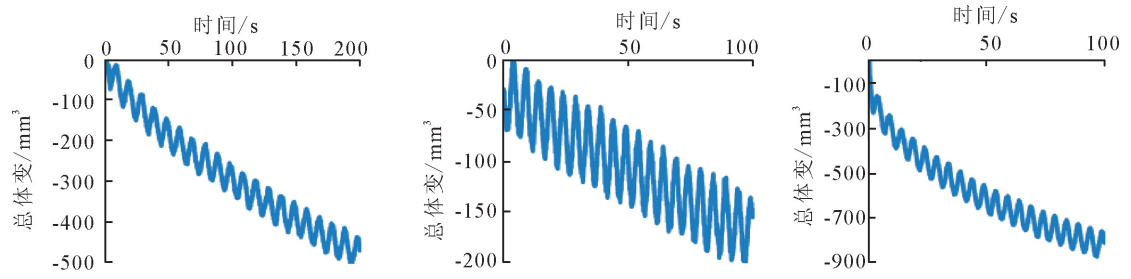
4.2 试验结果

由于振动过程中内压力室会随着底座一起振动,当频率太大会造成内压力室和参照管水位波动,所测得结果误差偏大,因此本次测试采用的频率为 0.1/0.2 Hz。总体变随时间变化曲线如图 5 所示,轴向位移随时间变化曲线如图 6 所示。由图可以看出,试样在振动过程中体积发生明显变化,试样体变由两部分构成:弹性体变和塑性体变。在同一个振动周期内,当轴向力增大时试样被压缩,体积减小;当轴向力减小时试样发生弹性回弹,体积增大。这一部分变形称为弹性变形,随着振动过程的持续进行,各个周期内的弹性变形呈现出增大的趋势。在振动过程中试样始终受到正的轴向力而处于压缩状态,试样体变曲线的基准线(波峰与波谷的中点)呈逐渐减小的趋势,这一部分变形是不可恢复的,称之为塑性变形。

由图 5、图 6 所示,当轴向力和振动幅值相同时,随着振动频率的增大试样的塑性变形减小,而弹性变形增大;当频率相同时,随着轴向力和幅值增大试样的塑性变形和弹性变形都明显增大。

4 结论

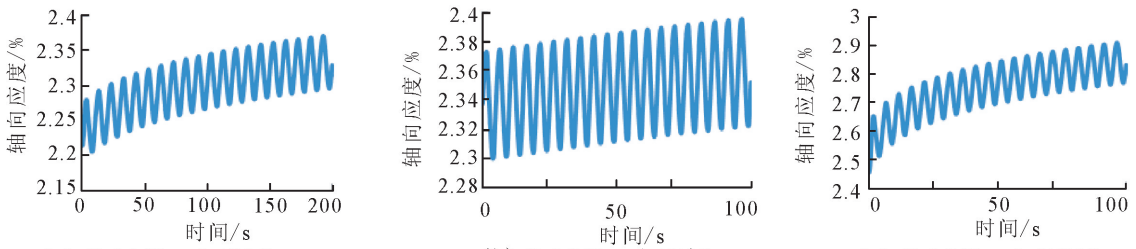
试验证明,HKUST 体变测量方法在动三轴试验中是可行的。即使是不排水试验,试样体积也会发生明显变化。动态荷载下试样体变包含弹性变形和塑性变形,弹性变形主要



(a) F=0.1 Hz; A=75 kPa　(b) F=0.2 Hz; A=75 kPa　(c) F=0.2 Hz; A=150 kPa

图 5　总体变曲线

Fig.5　Total volumetric change curves



(a) F=0.1 Hz; A=75 kPa　(b) F=0.2 Hz; A=75 kPa　(c) F=0.2 Hz; A=150 kPa

图 6　轴向位移曲线

Fig.6　The axial displacement curves

是由于周期性的动态荷载使得试样在压缩与回弹间变化引起的,塑性变形主要是由于振动过程中试样孔隙被压缩的结果。

由于目前 HKUST 方法主要在非饱和试验中应用,不会考虑试样被拉伸的情况,内压力室无法安装拉伸帽,不能进行拉伸试验,试样变形不是特别明显。在振动过程中内压力室随着一起振动,内压力室和参照管内的水经受相同的振幅和频率,在低频率下振动对试验结果影响有限,但高频率下影响不可忽略,这部分影响体现在周期性的弹性变形中,如何将真实的弹性形变与波动影响区分开来,还有待进一步通过试验和分析来解决。

参考文献(References)

[1] 南京水利科学研究院土工研究所.土工试验技术手册[S].北京:人民交通出版社,2003:164-175.
Nanjing Hydraulic Research Academy of Geotechnical Institute. Soil Test Technical Manuals[S].Beijing:China Communications Press,2003:164-175.(in Chinese).

[2] Geiser F,Laloui L,Vulliet L.On the Volume Measurement in Unsaturated Triaxial Test[J].Unsaturat Soill for Asia,Toll & Leonf(eds),2000:669-674.

[3] Bishop A W,Donald I B.The Experimental Study of Partly Saturated Soill in the Triaxial Apparatus[C]// Proc 5th Int Conf Soil Mech Found Eng.Paris:[s.n.],1961(1):13-21.

[4] Cui Y J,Delage P.Yielding and Plastic Behavior of an Unsaturated Compacted Silt[J].Geotechnique,1996,46(2):291-311.

[5] Ng C W W,Chiu C F.Behavior of Loosely Compacted Volcanic Soil[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2001,127(12):1027-1036.

[6] Romero E,Llorer F,Gen J,et al.A New Suction and Temperature Controlled Triaxial Apparatus[C]// Proc 14th Int Conf Soil Mech Found Eng.Hambourg:[s.n.],1997(1):185-188.

[7] Macari E J,Parker J K,Costes N C.Measurement of Volume Changes in Triaxial Tests Using Digital Imaging Techniques [J].Geotechnical Testing Journal,1997,20(1): 103-109.

[8] Ng C W W,Zhan L T,Cui Y J.A New Simple System for Measuring Volume Changes in Unsaturated Soil [J]. Can Geotech J,2002,39(2):757-764.