

自动控制真三轴仪的研制及验证

叶冠林, 盛佳韧, 武朝军, 王建华

(上海交通大学土木工程系, 上海 200240)

摘要: 真三轴仪在土工理论研究与实际应用上有着广泛的应用。在研究黏土的长期力学特性时, 需要进行长时间的固结排水试验, 这就要求实现试验过程的全自动控制, 以提高试验可靠性, 并减轻操作人员的劳动负担。本文介绍全自动真三轴仪的系统组成和加压方法, 自动控制系统和测量系统, 以及控制程序。然后给出试验方法。最后用橡胶块试验和重塑土试验来验证设备的准确性和适用性。

关键词: 真三轴仪; 自动控制; 电空调压阀; 验证试验

中图分类号: TU411.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2011)03-0380-06

作者简介: 叶冠林(1975-), 男, 海南文昌人, 副教授, 主要从事岩土工程数值计算、盾构隧道的研究。E-mail: ygl@sjtu.edu.cn。

Design and verification of automatic true triaxial apparatus

YE Guan-lin, SHENG Jia-ren, WU Chao-jun, WANG Jian-hua

(Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 20040, China)

Abstract: True triaxial apparatus (TTA) is widely used in theoretical research and engineering application. When dealing with long-term mechanical properties of clay, engineers should conduct time-cost consolidated drained tests. In this situation, automatic apparatus is necessary to improve the reliability of the tests and reduce the burden of the operator. The components of the TTA, the loading devices, the automatic control system, the measurement system and the control program are introduced. The test procedure is given. Finally, the tests on elastic dummy blocks and remolded clay to verify the apparatus are described.

Key words: true triaxial apparatus; automatic control; E/P regulator; verification test

0 引言

真三轴仪是一种通过对土样施加3个独立的、互相垂直的应力来模拟土体真实受力情况的试验仪器, 主要用于研究土体的变形规律、各向异性特征、应力应变特性以及验证和发展土体本构模型等, 应用范围广泛。研究黏土边坡的长期稳定性问题时, 黏土在排水条件下的一般力学特性是关键。但大多数黏土的真三轴试验都是非排水试验, 这主要是因为黏土的排水试验耗时长、难以控制。本研究的目的是开发出真三轴的自动控制系统, 用于进行黏土的固结排水试验。

我国的真三轴仪发展始于20世纪80年代, 至今已有较多积累。清华大学^[1]1985年研制的真三轴仪利用普通电机为大主应力加压, 加载速度需要手动调整; 其中主应力、小主应力由手动控制。同济大学^[2]1987年研制的真三轴仪大主应力采用伺服电机等应变速率自动加载, 中主应力、小主应力仍然是手动加载; 吉林工业大学^[3]1990年研制的真三轴仪采用单板机控制的步进电机自动进行大主应力方向的机械加载与中、小主应力方向上的液压加载, 基本实现了自动实时控

制; 河海大学在1995年开发了第一代真三轴仪^[4], 在2003年研制的ZSY-1型真三轴仪^[5]的大主应力和中主应力由微机控制的步进电机自动调节, 小主应力仍需通过气压调压阀手动控制。国外对自动控制的研究较多, 如Williams^[6]研制了基于Labview和电控液压千斤顶的自动控制系统。

本次研制的自动控制系统不同于以往国内外的真三轴仪利用电机控制三向应力加载, 而用电-空调压阀(E/P regulator)实时的、无级的自动控制三个主应力的实际大小。这样能较好地发挥电-空调压阀控制精度高的优点, 能进行精细而复杂的应力路径试验。同时, 电-空调压阀相对电机尺寸较小, 设计的控制系统占用空间小, 外观简洁明了。

本文首先介绍自动控制真三轴仪的主要结构和3个主应力的独立加载方法、自动控制系统、量测系

基金项目: 上海市科学技术委员会项目(08PJ1406600); 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGDE08008B); 上海市重点学科建设项目(B208)

收稿日期: 2009-10-28

统、数据采集系统和控制软件; 然后介绍真三轴仪的试验步骤; 最后, 通过弹性橡胶块和重塑黏土试验来检验仪器的性能。

1 仪器构成

本次研制的自动控制真三轴仪是在日本诚研社制造的手动控制真三轴仪的基础上改造而成的, 主要由三轴室、加压装置、控制装置与测量装置组成, 其中三轴室和加压气缸等机械传动部件仍沿用原设备。

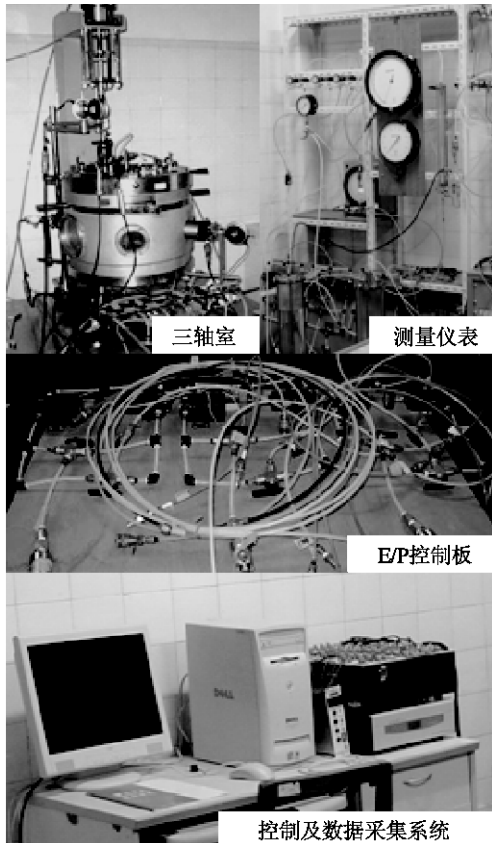


图1 真三轴仪主要构成部分

Fig. 1 Main components of true triaxial apparatus

真三轴仪的三轴室由外筒、盖板和底板等组成, 使用橡胶圈等实现密封性。中主应力加压装置为三轴室内的三缸气缸, 压力杆一端连接中主应力压力板, 另一端与三轴室外筒上的位移测杆接触。轴向压力由三轴室上部的双缸气缸提供, 传力杠上有位移测量装置。背压, 两个气缸的平衡压因为在试验过程中一般不变化, 因此通过手动调压阀施加, 并可以通过压力表直接读出压力值。自动控制系统主要由微机、D/A 转换板、电 - 空调压阀和控制软件组成。自动测量装置包括荷载、位移、体变、孔压和气压等 12 个传感器和 TDS300 数据采集仪。微机通过 TDS300 数据采集仪获得 12 个传感器的读数并保持在指定文件中。

仪器主要性能指标如下: 标准试样尺寸为 80

mm×80 mm×50 mm; 3 个主应力最大均可达 1.0 MPa; 可通过气压来控制 3 个主应力, 或通过台架上的电机实现大主应力方向的应变控制加载。

2 三向主应力的加压方法

本真三轴仪的动力源是由空气压缩机提供空气压力。控制方法与 Nakai^[7]开发的钢柔复合型真三轴仪相同, 即“两个方向刚性加载, 一个方向柔性加载”: 大主应力由轴向气缸施压, 通过传力杆和刚性板将压力传递到试样上; 中主应力由在压力室内的水平气缸施加压力, 与中主应力相似, 也是通过刚性板将压力传到试样上; 小主应力则由三轴压力室的液压施加, 通过调整接入压力室的气压来控制液压。三向应力试块的受力示意图可见图 2, 实物图见图 3。3 个方向的主应力均独立地由微机控制的电 - 空调压阀施加。

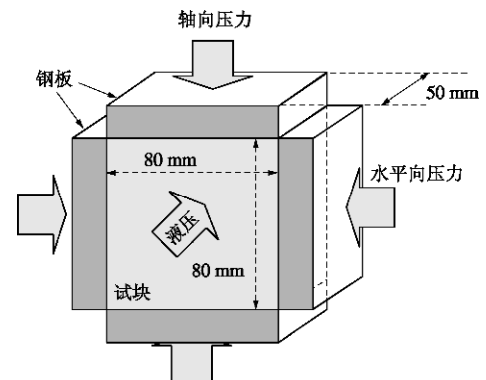


图2 试块三向加载示意图

Fig. 2 Three-directional loading in true triaxial tests



图3 试块三向加载实物图

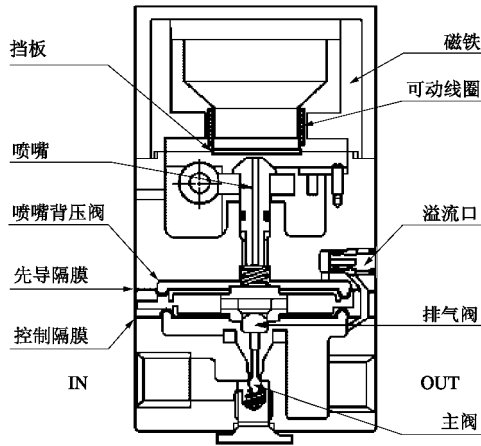
Fig. 3 Photo of loading frame in true triaxial apparatus

3 自动控制与量测系统

3.1 三向应力控制系统

本真三轴仪采用微机控制的电 - 空调压阀来实现自动控制。电 - 空调压阀采用精密电 - 空变换器, 该

设备能通过电压值精确控制输出压力值。原理基本为：如图4^[8]所示，计算机给电-空调压阀输入电压信号，使内置的可动线圈输出增加，将挡板压入；挡板和喷嘴间间距变窄，使喷嘴变压阀上升，从而控制压力上升，主阀打开，使二次压力上升。当线圈的输出和（喷嘴带来的承压力+挡板反作用力）平衡后，压力调节完成。以上方法实现了用电压信号来控制二次压力。注：电-空调压阀的英文名称为 E/P regulator，也可译为电气比例阀或电空变化器。



注：摘自某日本公司产品目录

图4 电-空调压阀内部构造图

Fig. 4 Inner structure of E/P regulator

3个方向主应力的自动控制流程为：微机通过D/A转换板将电压信号传给各个电-空调压阀，调压阀根据电压信号的大小来调整输出空气压力大小，输出的

气压通过导管分别连接至轴压、中压所对应气缸和三轴室，通过气缸的传力杆和压力室内的水施加各个主应力。计算机软件自动计算每一时刻3个方向需要施加的压力大小，调整电压信号。此外，为例验证自动控制过程的准确性，并且防止当自动控制部分出现故障时还能够通过手动控制继续完成剩余实验过程，增加一个手动加压阀与电-空调压阀并联。控制系统如图5上半部分所示。

3.2 量测系统

如图5下半部分所示，测量系统由12个传感器和数据采集仪（TDS-300）组成。12个量测通道分别负责测量荷载、位移、体变、孔压和气压。其中，通道CH0测量垂直轴位移（左）、CH1测量垂直轴位移（右）；CH2测垂直轴荷载；CH3测水平轴位移（左），CH4测水平轴位移（右）；CH5测水平向荷载；CH6测液压；CH7测孔隙水压；CH8测体积变化量；CH12到14分别测量电-空调压阀输出的液压、轴压和中压大小。各个测量数据由数据采集仪发送到微机上。软件对12个原始数据进行处理后，得到相应的应力、应变、体变和孔压数据，并保存为文本文件，供绘制应力应变等图形使用。

需要指出的是，试块的竖向和水平向位移由安装在三轴压力室外的应变位移计测量，试块体积变化的大小由双重管体变计得到。用体积应变减去竖向和水平向应变就可得到液压方向的应变。

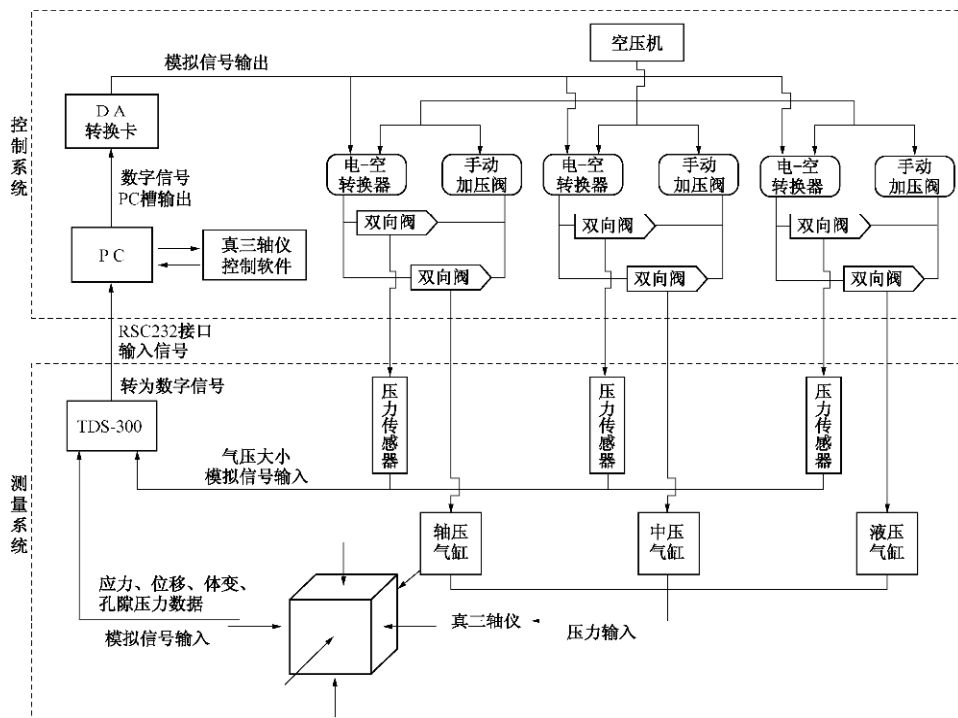


图5 控制、测量系统简图

Fig. 5 Diagram of control and measurement system

4 控制程序

控制程序用 VB 编制而成, 主界面见图 6。界面上主要显示试验过程中的应力、应变、位移、孔压的实测值等数据, 以及试验进度信息。程序的控制流程如图 7 所示。由于电 - 空调压阀的输入电压与输出气压之间并不是严格的线性关系, 而且供电设备和温度对它有影响, 因此每次在固结排水试验开始前, 程序从 0 到 0.8 MPa 分步加压, 以获得各个每一步的输入电压与输出气压之间的比例关系, 以用于试验过程中的压力精确控制; 试验开始后, 安装设定的时间按顺序进行等压固结和排水剪切; 试验结束后逐步手动卸压。

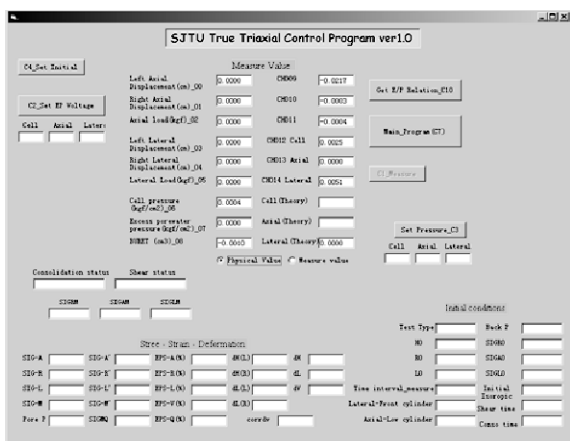


图 6 控制软件界面图

Fig. 6 Interface of control program

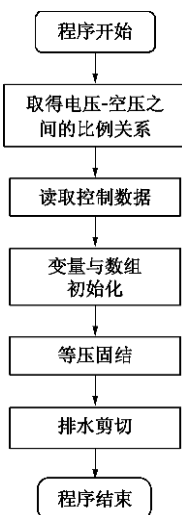


图 7 程序流程

Fig. 7 Flow chart of control program

在试验过程中, 控制程序首先计算出各时刻 3 个方向所需压力的理论值, 并向电 - 空调压阀发出电压信号。与此同时读取 CH12 到 14 (电 - 空调压阀输出

的液压、轴压和中压值) 的实测值, 比较实测值与理论值的差, 若差大于允许值, 程序调整输出电压。程序循环上述过程直到差小于允许值。程序在试验中同步输出试验数据。

5 试验方法

本仪器采用“两个方向刚性加载, 一个方向柔性加载”的加载方法, 其突出缺点是两个方向的加载钢板的相互顶托, 殷宗泽等在这方面做了很多工作^[8]。为了减少这个问题引起的边角效应, 经过摸索, 决定采用预留高度的方法, 具体措施为: 首先, 通过等向固结试验获得在不同固结压力下试样的体积压缩率, 反算出在每次试验中固结结束时钢板不托顶所需预留的土样尺寸; 接着, 以最容易出现钢板托顶的 Lode 角为 60 度的情况为标准, 用有限元估算出需要预留的土样尺寸; 制作土样时预留上述两项尺寸的总和, 后经过试验验证, 最终确定试样为 85 mm×85 mm×55 mm。具体试验操作方法如下:

- (1) 获取土样, 加工成所需大小。
- (2) 在试样表面上贴上滤纸和特氟龙薄膜。特氟龙薄膜贴于加压钢板表面, 用于减小摩擦; 滤纸贴于试块表面, 用于增加排水速度, 见图 8。
- (3) 在加压钢板之间拉好乳胶膜, 将试样放置在乳胶膜内, 用水并排出膜内空气, 见图 9。
- (4) 组装三轴室并向内注水, 接仪表和各类管线。
- (5) 在控制软件中设定试验的应力路径, 固结、剪切时间和测量时间间隔等参数。
- (6) 开始程序。按照软件提示, 先通过空载试验获得电 - 空调压阀的输入电压与输出气压之间的比值, 再开始进入正式试验程序, 按顺序进行固结与剪切试验。
- (7) 分析整理试验数据, 绘制相应图表。



图 8 贴特氟龙薄膜、滤纸

Fig. 8 Posting Teflon film and filter paper

6 验证试验

为了验证本此研制的自动控制真三轴仪的准确性

和适用性，分别用弹性材料橡胶块和重塑黏土进行了验证试验。试验应力路径设置在 p 面上，即试验过程中平均主应力 s_m 保持不变，而 Lode 角分别为 $0, 15, 30, 45$ 和 60 度。橡胶块试验的目标应力见表 1， p 面上应力路径见图 10。



图 9 挤出气泡

Fig. 9 Squeezing out air

表 1 三向目标应力值

Table 1 Targeting three-directional stresses under different conditions

角度	0°	15°	30°	45°	60°
σ_1	7.050	6.240	5.40	4.77	4.23
σ_2	0.975	2.130	3.00	3.65	4.23
σ_3	0.975	0.628	0.60	0.58	0.54

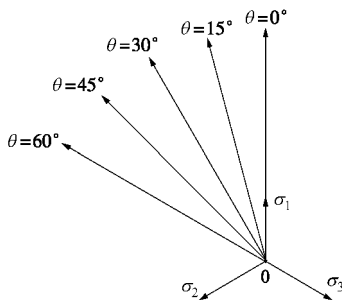


图 10 p 面上应力路径线状图

Fig. 10 Stress path in p plane

图 11 为橡胶块的试验结果。由图可见，各个应力随时间变化的曲线都为线形。应力从 0 开始施加，结束时应力值很好地符合了预设目标。应力随时间变化十分准确，说明自动控制系统对压力控制地很精确。对于应变随时间变化的曲线，从图中可以看出，3 个方向应变图线的斜率与所对应的应力图线斜率基本相同。对于橡胶块来说，由于其为弹性材料，其应力，应变应成一定比例关系，试验结果中应变曲线基本为线形且斜率与应力图线基本相同正说明了这一点。可以说，本次研制的自动控制真三轴仪在压力控制上的精度满足要求，测量系统也较为准确。

图 12 为正常固结重塑黏土的固结排水剪切试验结果。做了 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 三组试验，每组试验耗时约 8 d，应力值均符合预设目标。从图中可以看出，随着 Lode 角增加，中间主应变 e_2 由拉伸转向压缩，

同时排水强度下降，与 Nakai et al^[7]的试验结果的趋势相吻合，说明本真三轴仪的稳定性，并且能适用于一般软土试验。

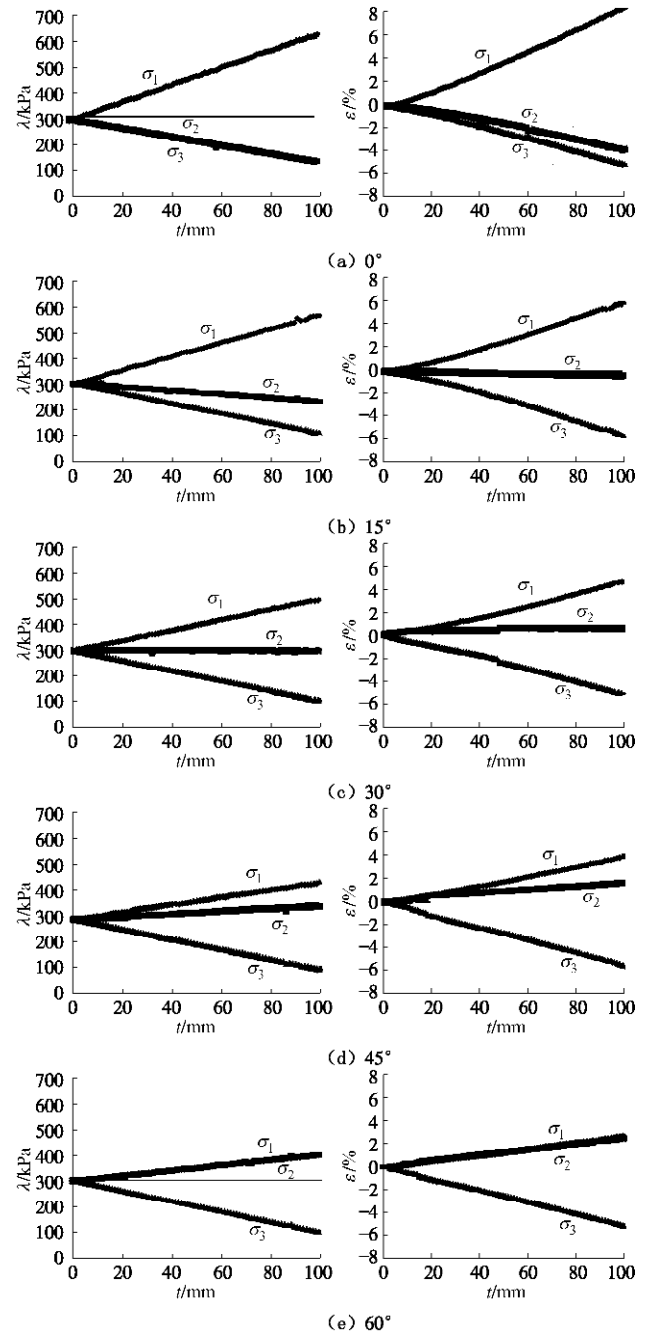
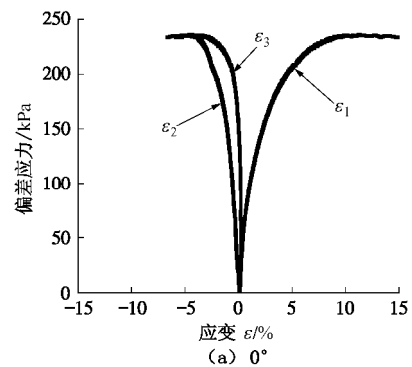


图 11 不同 Lode 角下橡胶块应力、应变时程图

Fig. 11 Time history of stress and strain under different Lode angle



(a) 0°

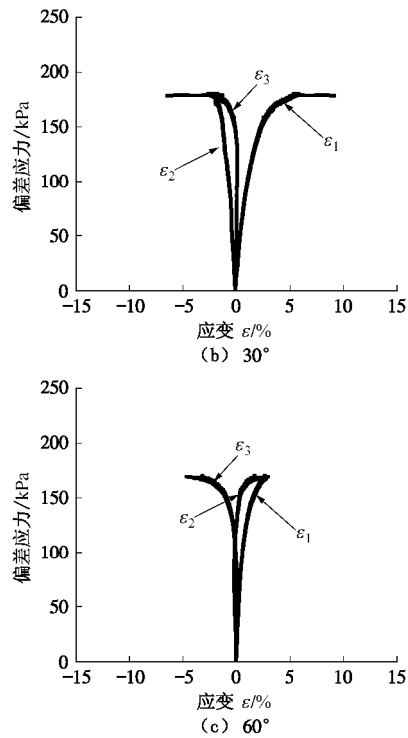


图 12 不同 Lode 角下重塑黏土应力、应变时程图

Fig. 12 Time history of stress and strain of remolded clay under different Lode angles

7 结 论

为了进行黏土的固结排水试验, 本研究采用硬件设计和软件开发相结合的方法, 研制出真三轴的自动控制系统。该系统具有如下特点:

(1) 新真三轴仪是在20年前的老设备上进行了自动化改造, 充分利用了原设备的优良机械性能。

(2) 电-空调压阀具有无级调压的优点, 而且体积小, 结合电脑D/A控制, 较容易实现土工试验仪器的压力自动控制。

(3) 通过开发控制程序, 将控制系统与测量系统进行整合, 实现了对真三轴仪的自动控制。

(4) 橡胶块和重塑黏土试验表明, 自动控制真三轴仪的性能是可靠的, 可用于真实土体试验。

最后, 笔者想强调的是, 要根据研究目的进行试验设备开发, 这样才能物尽其用, 并能得到最理想的试验数据。

致 谢: 感谢日本名古屋工业大学张锋教授和岐阜大学 YASHIMA Atsushi 教授在仪器设备上对第一作者的帮助。本文

部分试验由原上海交通大学学生庄泉洪提供, 在此感谢。

参考文献:

- [1] 李广信. 土的三维本构关系的探讨与模型验证[D]. 北京: 清华大学, 1985. (LI Guan-xin. Research on three dimensional constitute model of soil and its verification[D]. Beijing: Tsinghua University, 1985. (in Chinese))
- [2] 袁聚云, 赵锡宏, 杨熙章, 等. 真三轴仪的研制及其试验方法[J]. 水电自动化与大坝监测, 1992(5): 8 - 12. (YUAN Ju-yun, ZHAO xi-hong, YANG Xi-zhang, et al, Development of cubic triaxial apparatus and its test methods[J]. Automatic Hydro-electricity and Dam Monitoring, 1992(5): 8 - 12. (in Chinese))
- [3] 许东俊. 中间主应力对岩石变形及强度的影响[J]. 岩石力学, 1987(15/16): 90 - 98. (XU Dong-jun. Influence of intermediate principal stress on the deformation and strength of rock[J]. Rock Mechanics, 1987(15/16): 90 - 98. (in Chinese))
- [4] 殷宗泽, 王保田, 黄 炜, 等. 一种新型真三轴仪[C]// 中国土木工程学会第八届土力学及岩土工程学术会议. 1999: 1 - 4. (YIN Zong-ze, WANG Bao-tian, HUANG Wei, et al. A new type true triaxial apparatus[C]// 8th Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 1999: 1 - 4. (in Chinese))
- [5] 张坤勇, 殷宗泽, 徐志伟. 国内真三轴试验仪的发展及应用[J]. 岩土工程技术, 2003(5): 289 - 293. (ZHANG Kun-yong, YIN Zong-ze, XU Zhi-wei, Development and application of true triaxial apparatus in China[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2003(5): 289 - 293. (in Chinese))
- [6] HEATH S. Williams. Development of a true triaxial apparatus for soil testing[M]. Louisiana State University, 2004.
- [7] NAKAI T, MATSUOKA H, OKUNO N, et al. True triaxial tests on normally consolidated clay and analysis of the observed shear behavior using elastoplastic constitutive models[J]. Soils and Foundations, 1986, 26(4): 67 - 78.
- [8] 殷宗泽, 朱俊高. 真三轴仪的改进[C]// 第一届全国岩土本构理论研讨会论文集. 北京, 2008: 1 - 5. (YIN Zong-ze, ZHU Jun-gao. Improvement of true triaxial apparatus[C]// Proceeding of 1st Forum on Constitutive Theory of Geomaterials. Beijing, 2008: 1 - 5. (in Chinese))