

国内真三轴试验仪的发展及应用

张坤勇 殷宗泽 徐志伟

(河海大学岩土工程研究所, 南京 210098)

【摘要】 简要回顾了国内真三轴试验仪的发展历史, 结合具体仪器对真三轴仪的典型类型、特点及试验分别作了描述; 详细介绍河海大学 ZSY-1 复合型真三轴仪的组成及其特点; 对真三轴仪在土体应力应变关系研究中的应用作了简要说明。

【关键词】 真三轴; 应力应变关系; 试验

【中图分类号】 TU 41

Development and Application of True Triaxial Apparatus in China

【Abstract】 Based on the history of the development of the true triaxial apparatus in China, the characters and tests of several kinds of typical true triaxial apparatus are described. The ZSY-1 true triaxial apparatus designed by Hohai University is introduced detailly with its advantage compared with other devices. The application of true triaxial to constitution of soil is discussed herein.

【key words】 true triaxial; constitution; test

0 引言

传统的普通三轴仪只能针对轴对称应力状态研究土体的力学特性, 而土体的真实的应力状态一般是不对称, 有时是三向应力状态的, 如平面应变等。随着土体本构理论研究的深入, 一些能够模拟土体在复杂应力条件下的试验仪器也得到发展, 如薄壁孔隙圆柱扭剪仪、真三轴仪、平面应变仪等。其中, 真三轴仪采用立方体试样, 从三个主应力方向分别加载, 可以研究复杂应力状态下土体的力学特性。真三轴仪自 1936 年 Kjellman 设计成功以来^[1], 国内外先后研制了多种真三轴仪, 按照中主应力的施加方式的不同, 一般可以分为三种: 刚性水平加压板真三轴仪、柔性水平加压板真三轴仪及刚柔复合加压真三轴仪。

1 国内真三轴仪发展

由于真三轴仪原理的复杂性、研制代价相

对比较昂贵、国内土力学和土工测试技术发展水平等诸多因素的限制, 我国 20 世纪 80 年代之前还没有自主研制和引进真三轴仪, 后来真三轴仪的研制和试验研究也主要是在清华大学、同济大学和河海大学进行的。

国内较早的真三轴仪是 1985 年清华大学研制的刚性水平加压板真三轴仪^[2], 采用矩形四棱柱试样, 通过在常规三轴仪的压力室内增加了一套侧压力装置, 并通过调压筒变化侧压力室内的压力来施加中主应力 σ_2 , 轴向压力(大主应力 σ_1) 和围压(小主应力 σ_3) 的施加与常规三轴仪相同, 中主应变 ϵ_2 是由水平加压板前后移动的位移量(通过计算侧压力室内水量的变化)推算, 这种真三轴仪的量测和控制系统自动化程度较低。李广信用这种真三轴仪针对承德中密砂进行了在 σ_3 不变, $\Delta\sigma_1$ 和 $\Delta\sigma_2$ 按一定比例变化, 保持 b 为常数的试

验, 得出在真三轴状态下, 砂土应力—应变关系曲线、强度、弹性参数的规律; 与三轴压缩试验不同, 在真三轴试验中, $(\sigma_1 - \sigma_2) - \varepsilon_1$ 的加卸载曲线更陡, 且峰值点提前, 卸载时试样的体积有些回弹; 随着 b 值的增大, 材料的破坏更接近于脆性破坏, 体积压缩量增加, 剪胀量减少; 从 π 平面上破坏轨迹更接近与 Lade-Duncan 破坏准则; 真三轴状态下的剪切模量要比常规三轴试验大得多。

1987 年同济大学赵锡宏等研制了刚柔复合型真三轴仪, 采用立方体试样^[3]。试样的大主应力由轴向一对水平刚性板施加, 小主应力由压力室气压施加, 中主应力由中主压力腔施加。中主应力压力腔由加压囊、刚性框架和盖板等组成。压力的施加是由气压经气压经气水转换装置转变成液压而施加到试样上。袁聚云利用此真三轴仪器分别对上海淤泥质粉质粘土和淤泥质粘土进行了 K_0 固结条件下的真三轴排水剪切试验和各向等压固结真三轴排水剪切试验^[4], 表明对于上海软土, 中主应力对土体应力应变关系是有影响的, 随着 b 值增加, 土体强度和初始切线模量也增加; K_0 固结真三轴排水试验的强度和初始切线模量大于各向等压固结真三轴排水试验的结果; 并在此基础上建立各向异性弹塑性本构模型, 应用于上部结构与地基基础共同作用的计算分析和基坑开挖的分析中。姜洪伟根据袁聚云试验所揭示的上海软粘土在 π 平面上的屈服轨迹形状, 通过引入形状函数, 在关口太田模型基础上建立了一个能够放映软土三维各向异性粘弹塑性模型, 并应用于深基坑坑底稳定分析^[5]。

1990 年吉林工业大学研制的真三轴仪属于刚性水平加压板类型^[6]。轴向大主应力靠机械加载, 中主应力和小主应力是靠液压加载。加压和控制系统采用 8 位 Z-80 A 芯片的单板机。对变形的量测采用了自制的光栅传感器, 不需要模/数(A/D)转换, 与其研制的

电路相匹配可以实现对所有测点的同一时刻采样, 没有时间延迟。这种真三轴仪采用了步进电机驱动的液压加荷系统、单板机控制系统和量测系统(三向主应力、主应变数据自动采集), 性能比较完备、自动化程度比较高, 但压力室相对比较简单, 中、小主应力只简单地在试样侧面与加压板接触面之间加了一层柔性膜片, 仍不可避免刚性加压板真三轴仪的边角效应等缺点。该真三轴仪除了对土体进行了一些真三轴试验常见的应力路径试验外, 其后未见在其它真三轴试验方面有进一步的研究。

1995 年, 河海大学殷宗泽教授主持开发的真三轴仪, 压力室是清华大学在日本诚研舍真三轴仪的基础上作了改进后设计的, 中科院科学仪器厂加工制造, 加压系统和数据采集系统由河海大学和南京电力自动化研究所共同研制, 试样为矩形四棱柱, 仍属于刚性水平加压板类型。压力室的筒身外壁镶嵌连接中主应力的压力室和侧向位移测试室, 中主应力压力室的气压通过与传压杆连接的刚性板将中主应力施加到试验侧表面, 小主应力是通过将压力室充水, 由水压提供, 轴向加荷是类似常规三轴仪的应变控制加荷台施加, 中主应变的量测是点接触的位移传感器, 在试验侧表面与中主应力活塞杆连接的加压钢板之间垫加一块高度略低于试样高度的有机玻璃板, 通过在有机玻璃板与包裹试样的橡皮膜之间涂抹凡士林, 尽可能地减少和避免因加压钢板直接与橡皮膜接触产生的摩擦力对试样变形的影响。尽管这种改进的真三轴仪加荷系统和量测系统自动化程度比较高, 但未克服刚性水平加压板真三轴仪的缺点, 除了边角效应以外, 许多三维应力路径, 如轴向加荷压缩到一定变形量后, 增加中主应力的试验, 往往由于有机玻璃板或刚性加压板高度的限制而无法进行。但朱俊高等利用该真三轴仪进行的土体侧向变形性状及其机理的真三轴试验研究在国内是较早的^[7], 揭示的土体侧向变形现象与规律与 Lade 的试验结果较吻合并在以后的试验中

得到验证^[8]。

2 河海大学 ZSY-1 型复合型真三轴仪

河海大学 ZSY-1 型复合型真三轴仪由河海大学与南京电力自动化研究所共同设计, 江苏溧阳市永昌土工试验设备厂加工制造的, 试样尺寸为 $7.0\text{ cm} \times 7.0\text{ cm} \times 3.5\text{ cm}$ 的矩形四棱柱, 对比于河海大学 1995 年研制的真三轴仪, ZSY-1 型复合型真三轴仪在压力室、加荷系统、控制和量测系统, 输出系统四个主要部分都有较大改进。

2.1 压力室

压力室见图 1, 由有机玻璃盖筒与底板组成, 有机玻璃盖筒的盖板、底板是铝合金板, 盖筒上部内含施加轴向应力 σ_1 的液压活塞、加压杆和压力传感器, 底板主要由试样底座、位移传感器固定杆、中主应力加压装置, 进、出试样的水管和小主应力 σ_3 进气管路组成, 有机玻璃盖筒与底板之间通过不锈钢拉杆螺丝紧固后, 使压力室处于密封状态。这种压力室的主要特点:

轴向加压支架, 轴向活塞的压力传感器只采集施加在试样上表面的“有效力”, 避免了中主应力方向的试样表面与复合加压板之间的摩擦力影响。这一设计是通过试样顶帽上的加压支架与试样侧向复合加压板联合实现的, 加压支架的上部可与轴向活塞的加压套筒紧密接触, 轴向活塞传力杆向下移动时, 与轴向活塞加压套筒同步向下移动。而轴向压力传感器安装在轴向活塞传力杆上, 所以, 只采集直接施加到试样顶部的力。国内外许多真三轴仪, 尽管通过在包裹试样的橡皮膜表面与中主应力加压板之间涂抹润滑材料, 但轴向总应力往往记入了侧向的摩擦力。

中主应力加压装置见图 2。复合加压板, 由薄铝板和小橡皮管逐层相间叠合而成, 是一种成层的复合材料, 水平向刚性, 可以传力, 橡皮管的压缩性又在竖向上最大约有 20% 的竖向变形, 可以随试样同步变形。试样顶部的轴向加压支架通过带有轴承的四个脚放置在复合加压板顶端, 复合加压板的底板托置在压力

室底板两排小轴承支撑的水平可自由移动铝板上, 因此复合加压板既可水平自由移动, 又可轴向压缩, 既可避免计入中主应力的摩擦力, 又可最大程度地减少边角效应。

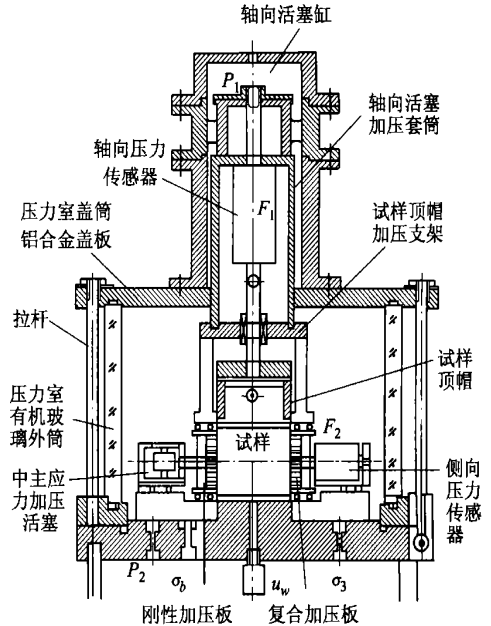


图 1 压力室

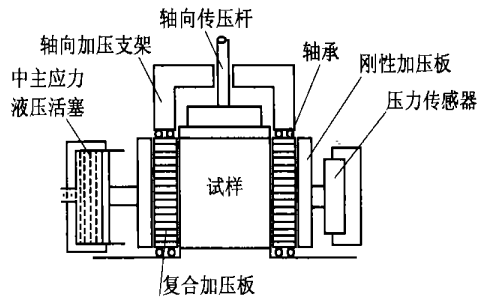


图 2 中主应力加压装置

试样用特制的长方体橡皮膜封闭, 上下两端开口, 下端用铝合金框与橡胶垫片密封, 用螺丝紧固, 上端置于试样帽上部, 用铝盖压紧, 用螺丝紧固, 使整个试样密封。试样帽与试样底座的压力室底板上都有排水管, 可以决定是否进行排水试验。

2.2 加荷系统

加荷系统主要完成对三向应力的施加, 三向荷载都来源于氮气瓶的气压源, 经过气液转

换装置,将气压转换成轴向和中主应力向的液压。小主应力 σ_3 通过气压调压阀,由压力室的气压手动直接施加,轴向大主应力 σ_1 和中主应力 σ_2 分别由微机控制的步进电机通过液压调压筒调节与试样接触的液压活塞,由传压杆加荷,维持恒定压力或卸荷。

加压接触方式是:轴向通过试样顶帽由透水石与铝合金板组成的刚性加压盒接触试样,由轴向活塞杆传递液压,中主应力向由复合加压板接触试样一对侧面,由活塞传递液压,试样小主应力向全部接触压力室的气压。在压力室内, σ_1 、 σ_2 是在 σ_3 的基础上再由液压活塞施加,因此仍然在 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ 的条件下,进行多种应力路径的真三轴试验。

2.3 控制和量测系统

控制系统由微机实时控制同步电机与步进电机,主要控制大、中主应力的施加速度、大小,以及控制轴向大、中主应变大小与应变速率,可以进行等应力控制、等应变控制、应力路径控制的试验(包括常见的平面应变试验)。

量测系统主要完成微机自动采集位移传感器的三向位移数据、压力传感器的轴向荷载和中主应力方向荷载数据、孔压数据以及体变数据。除了气压(包括小主应力 σ_3 和反压 σ_3)需人工手动施加与读取数据外,其它试验数据都可由微机自动采集、存储在计算机里,以便对试验结果进行分析。

2.4 输出系统

输出系统可以单独对相关试验数据及其图形、图表的显示与打印,通过与常用试验数据分析软件建立接口程序,可以对试验数据进行误差分析、曲线拟合、等值线绘制及参数选取等工作。

2.5 应用

徐志伟等利用河海大学真三轴试验仪,针对典型砂土,以不同初始 b 值为初始条件,从不同方向加载,作了大量试验,研究所产生的应变分量的规律,从而较清楚的揭示了土体中

显著的应力诱导各向异性^[9]。殷宗泽根据试验结果,进一步揭示土体三维应力路径条件下,应力诱导的各向异性应力变形性状与规律,提出土体应力应变柔度矩阵所应具有的性质,并对 Duncan 一张模型进行一定程度上考虑土体应力诱导各向异性性状的修正^[10]。陈瑜瑶等针对重庆红粘土,试验拟合得出偏平面上屈服轨迹^[11]。

3 结语

利用真三轴试验仪进行土体变形规律的研究,较常规三轴仪更接近土体的真实应力状态,可以在三向应力状态下,充分考虑中主应力的影响,研究土体的各向异性;在特定应力路径下,如等 b ,等 p 的控制下,可以直接测出 π 平面上屈服轨迹,对于在弹塑性理论框架内研究土体的应力应变特性提供了试验依据;此外,对于已有的大量的土体本构模型,其可靠性和适用性只有通过试验来验证,在真三轴条件下对既有土体本构模型,通过不同应力状态和应力路径验证和发展,检验其适用条件,总结规律,其意义不亚于提出新的模型,从某种意义上来说更为重要。

值得注意的是,虽然真三轴仪可以用来作模型的验证工作,以及规律总结等,但是,由于目前的普及程度和发展水平,还不能被用来作为确定模型参数的主要手段。因此,在真三轴试验基础之上,无论是建立新模型,还是检验修正既有模型,其参数都应该以常规试验确定为主,这样,才不失其实用性。

参 考 文 献

- 1 Kjellman, W., Report on an Apparatus for Consummation Investigation of the Mechanical Properties of Soils, 1st ICSMFE, 1963
- 2 李广信. 土的三维本构关系的探讨与模型验证: [学位论文]. 北京: 清华大学, 1985
- 3 吴国溪. 真三轴仪的研制和试验及其参数在地基基础与上部结构共同作用中的应用: [学位论文]. 上海: 同济大学, 1987

- 4 袁聚云. 软土各向异性性状的试验研究及其在工程中的应用: [学位论文]. 上海: 同济大学, 1995
- 5 姜洪伟. 软土的三维各向异性弹塑性/弹粘塑性本构关系理论及其应用研究: [学位论文]. 上海: 同济大学, 1995
- 6 许东俊. 中间主应力对岩石变形和强度的影响, 岩石力学, 1987, (15~16): 90~98
- 7 朱俊高, 卢海华, 殷宗泽. 土体侧向变形性状的真三轴试验研究. 河海大学学报, 1995, 23(6): 28~33
- 8 Lade, P. V. and Duncan, J. M., Cubical Triaxial Tests on Cohesionless Soil, J. SMFD, ASCE, 1973, 99 (10): 783~812
- 9 徐志伟. 中砂侧向变形特性的真三轴试验研究. 岩土工程技术, 1999(4): 27~30
- 10 殷宗泽, 徐志伟. 土体的各向异性及其近似模拟. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 547~551
- 11 陈瑜瑶等. 由试验数据拟合重庆红粘土的屈服条件. 岩土力学, 2001, 22(4): 443~446

收稿日期: 2003-06-24

(上接第 280 页)

软土地基沉降引起的改良土路堤变形。其特点是变形量较大, 且随时间与地基沉降量增大而增大。室内离心模型试验显示, 改良土填筑的路堤, 当地基沉降控制在一定范围内时, 路基面的沉降差较未改良的路堤小, 充分说明填料经改良后强度提高抗变形能力亦提高。而当地基中心沉降超过 75 cm 左右时, 改良土路堤出现开裂变形, 裂缝自下向上发展, 呈下宽上窄。同样由现场填筑试验中在改良土路堤中埋设的柔性传感器测试结果分析, 也存在这种趋势, 即地基中心沉降超过一定值时, 改良土路堤底部出现开裂变形, 如比较典型的 1[#]测点, 测试期间最大为 9 mm, 这种变形具张拉性质, 随地基沉降量加大而向上发展, 但由于地基沉降已趋稳定, 变形仅发生在路堤下部, 对路堤稳定无影响。因此, 在软土地基中采用改良土填筑时, 控制地基的总沉降量也是十分必要的。软土地基采用改良土填筑路基设计如能把地基沉降量控制在一定值以内, 如 75 cm 左右, 使用改良土路堤可充分发挥其强度高、抗变形能力强的特点, 减少路基面的差异沉降。因此软土地区改良土路堤设计不但要控制工后沉降量, 而且要合理地控制地基总沉降量。

3 结 论

1) 根据实测沉降推求的最终沉降分析, 对工后沉降要求很高的高速铁路若采用排水固

结方案时必须采用预压措施。为了提高沉降计算的准确性, 一方面需深入研究勘测及土工试验精度, 另一方面必须通过实测沉降资料推求工后沉降。粉喷桩加固层沉降实测值比计算值大, 但由于其完成时间快, 对工后沉降的实际影响不大, 从控制工后沉降角度, 采用“悬浮桩”方案与穿透压缩层的排水固结方案相比, 不具任何优势。

2) 由现场试验得出, 地基中心沉降超过一定值时, 改良土路堤出现具张拉性质的开裂变形, 但由于地基沉降已趋稳定, 变形仅发生在路堤下部, 对路堤稳定无影响。这与室内离心模型试验的结果一致, 二者相互印证。因此, 为充分发挥改良土路堤强度高、抗变形能力强的特点, 在软土地基上填筑改良土路堤, 设计时宜将地基沉降量控制在一定值以内。

参 考 文 献

- 1 铁建设[2003]13号 京沪高速铁路设计暂行规定(上册)
- 2 张诚厚, 袁文明, 戴济群等. 高速公路软基处理. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. 7~26
- 3 王炳龙, 方卫民, 周顺华等. 高速铁路路基填料改良离心试验研究. 上海铁道大学学报, 1999, 20(10): 22~27
- 4 宣国梁, 李晋三等. 道路施工技术. 北京: 人民交通出版社, 2000. 35~63

收稿日期: 2003-06-06