

DOI: 10.11779/CJGE201709004

一室四腔刚-柔加载机构真三轴仪的改进与强度试验 ——西安理工大学真三轴仪

邵生俊^{1, 2}, 许萍^{2, 3}, 邵帅¹, 陈菲¹

(1. 西安理工大学土木学院岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048;
3. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 土的真三轴仪是研究不同应力路径等复杂应力条件下土力学性质的重要仪器。与国内外已有真三轴仪的加载机构比较, 西安理工大学真三轴仪具有一室四腔、竖向和水平面内正交两向分别呈刚性和柔性加载机构的特征。试样的竖向采用刚性板加载, 侧向正交双轴分别采用两组内置于压力腔的液压囊加载。针对试样上下端部刚性板的约束作用, 增大了试样的竖向尺寸, 研制了高宽比为2:1的压力室; 针对立方体试样侧面正交双轴的液压囊体积变化量测侧向变形的不足, 研制了穿越液压囊的变形量测机构; 针对自动控制系统信号波动变化较大, 稳定性差等不足, 开发了自动控制系统及多种应力路径和控制方式的控制程序。通过饱和砂土、非饱和土和原状黄土的试验, 测试了各种土的强度变化规律, 验证了改进真三轴仪的性能。

关键词: 真三轴试样; 真三轴压力室; 侧向变形量测; 控制系统; 试验验证

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2017)09-1575-08

作者简介: 邵生俊(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土动力学与黄土力学的教学和科研。E-mail:
sjshao@xaut.edu.cn。

Improvement and strength testing of true tri-axial apparatus with one chamber and four cells and rigid-flexible-flexible loading boundary mechanism—True triaxial apparatus developed in Xi'an University of Technology

SHAO Sheng-jun^{1,2}, XU Ping^{2,3}, SHAO Shuai¹, CHEN Fei¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaan'xi Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an 710048, China; 3. Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The true triaxial apparatus is an important instrument, which is usually employed to investigate the mechanical characteristics of soils under complicated stress conditions. The new true triaxial apparatus, developed in Xi'an University of Technology, is of the rigid-flexible-flexible loading boundary system, which is different from the rigid, flexible and rigid-rigid-flexible complex loading systems at home and abroad. The chamber of true triaxial apparatus includes four cells, in which the liquid bags face two groups of orthogonally lateral surfaces of cubic specimen and top and bottom rigid plates. In the vertical direction the normal stress acts on the ends of the cubic specimen. In the two orthogonal directions, two normal stresses are applied to the lateral surfaces of the cubic specimen. To eliminate the restraint of the top and bottom plates, the height of sample increases. Accordingly, the ratio of height to width of specimen is 2:1. To measure directly the lateral deformation of the sample in orthogonal biaxial directions, a measurement element is developed by a smooth connect pole passing through the liquid bags. To reduce the fluctuation of loading signals, an automatic control system including automatic control circuit board and control program is developed by the developing software. The strength laws of saturated sand, unsaturated soil and intact loess are investigated by the true triaxial tests. The improved true triaxial apparatus is verified by the experiments of different soils.

Key words: true triaxial sample; true triaxial pressure chamber; lateral deformation measurement; control system; experimental verification

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272320, 11572245); 西安理工大学科技创新计划(104-451016029); 校博士启动金项目(104-2560816023); 院开放基金项目(2016ZZKT-31)

收稿日期: 2016-06-06

0 引言

土的应力应变关系和抗剪强度是土力学的关键课题。土的应力、应变状态以及孔隙水、气压力可通过直剪、单剪、压缩和三轴试验获得,然而,通过单剪仪、直剪仪、单向压缩仪和常规三轴仪等传统仪器测试土的力学特性已经越来越不能适应实际工程中复杂应力条件下土力学响应分析的需要。例如:直剪仪仅限于模拟给定剪切面,测试得到给定剪切面一定法向应力作用下剪应力和剪应变的变化规律;单向压缩仪和常规三轴仪分别模拟了侧限变形和侧向围压作用下土承受轴对称应力作用的力学响应,不能够实现一般应力条件;平面应变仪在一定程度上改进和发展了以上3种测试仪所模拟的应力条件,可以控制三向主应力不同,但其中一个轴向应变为零,从而限制了一般应力条件的模拟。而真三轴仪克服了传统仪器的局限性,具有合理模拟一般应力条件下三向主应力状态的优越性,可以实现土剪切面上三向主应力和主应变的测试,是研究复杂应力条件下土力学特性研究的重要测试设备。

1 真三轴仪不同加载机构的比较

鉴于真三轴试验仪能够模拟一般应力条件下三维主应力状态的性能,真三轴仪的设计和研制最先开始于国外研究者,随后国内学者借鉴其研究成果,先后研制了多种真三轴试验仪,可归纳为具有三向刚性板、双向刚性板和一向柔性液压囊或流体围压、三向柔性液压囊等3种加载机构。西安理工大学已研制的新型真三轴仪具有一向刚性板和两向柔性液压囊(立方体试样正交三向分别为刚性、柔性、柔性加载边界)的加载机构,它与以上3种加载机构不同,属于一种新的加载机构。采用刚性板加载时,加载面上应变均匀分布,平均应力和均匀分布应变可通过刚性板的作用荷载和位移分别控制和量测,但刚性板之间往往存在相互干扰和相对滑移。采用柔性液压囊加载时,加载面上应力均匀分布,均匀分布应力和平均应变可以通过液压囊压力和体积变化分别进行控制和量测,但相邻液压囊之间易产生互相挤压,影响不同液压囊压力和体积变化的控制。因此,需要合理选取刚-柔加载边界机构,最大程度地满足三向主应力和主应变的独立控制和量测,避免互相干扰成为研制真三轴试验仪的核心问题。

早期 Kiellman^[1]设计真三轴仪属于刚性、刚性、刚性边界三向加载机构的典型代表。此后,剑桥大学真三轴仪^[2-3]在此基础上改进了三组刚性板之间的相

对滑移运动,仍属于三向刚性板加载机构。名古屋大学真三轴仪^[4-5]通过刚性板之间预留间隙,尽管克服了三向刚性板之间的相对滑移运动,但预留间隙处试样局部易产生挤出现象。该类仪器主要通过六块刚性板实施三向主应力的独立加载,试样安装在刚性板之间,该种加载方式可以对三组面上的应变进行准确测量,且应变分布均匀,也便于排水条件的控制和孔隙水压力的量测。但是,它仍然存在三向刚性边界加载机构互相干扰的通病,土样发生变形后,与试样接触的刚性板约束变形,在刚性板与试样的接触面上可能产生剪应力,不能保证该加载面上只存在正应力。

美国 Lade 等^[6]研制的真三轴仪属于刚性、刚性、柔性边界加载机构的典型代表。该真三轴仪的立方体试样安装在两组刚性板之间,且置于控制气压的压力室内。两组刚性板作用面的应力、应变易于控制和量测,且应变分布均匀,但柔性面上的应变难以有效量测,依旧存在竖向板和侧向板之间的相互干扰问题。国内香港大学从美国购置了该类真三轴仪,并进行了两向刚性板滑移机构的改进,改善了刚性板之间相互干扰的不良影响。河海大学真三轴仪^[7]应用美国 Lade 等研制的真三轴仪试制了该类仪器。

日本京都大学真三轴仪属于一向刚性两向柔性加载机构,中间主应力采用装有橡胶液压囊的铝板,该铝板被悬挂在压力室内立柱上,通过橡皮囊中充水实现中间主应力的施加。竖向采用刚性板,小主应力通过流体压力室施加。该种设备构造较为复杂,且中、小应力差较大时边缘橡皮膜易发生挤出变形。

为了有效进行三向应力的独立加载,试图完全摒弃刚性加载方式,Bell 最早研制了采用柔性、柔性、柔性边界三向加载机构的真三轴仪^[8],这种设计的最大问题是加载囊仅仅对 60% 的土样表面进行加载,导致土样内部产生不均匀应力,随后 Ko 等一些学者^[9-15]对这类真三轴仪进行了改进,依旧没能得到令人满意的结果。

从目前真三轴仪的研究现状来看,刚、柔边界结合的加载机构得到了人们的普遍关注,它有两种形式,一是两向刚性和一向柔性边界的加载机构;二是一向刚性和两向柔性的加载机构。目前,国内外采用刚、柔结合边界的加载机构多采用前者。但是,该加载机构的竖向刚性板和侧向刚性板之间仍存在互相影响;侧向刚性板中竖向适应试样变形的变形层增强了对试样侧面的影响。对于竖向刚性加载和侧面双向柔性加载机构中仍然存在相邻柔性囊之间的相互挤压和影响问题,研制西安理工大学真三轴仪时,提出了一种克服这一缺陷的方法^[16],采用了径向弹性伸缩和水平面

内弹性转动的隔离刚性板, 有效地分离了相邻液压囊, 从而实现了轴向刚性、侧面双向柔性边界的加载机构, 即刚性、柔性、柔性边界三向加载机构。

2 刚性、柔性、柔性边界加载机构分析

鉴于以上对比分析, 一向刚性、两向柔性边界加载机构具有克服加载过程中刚性边界、柔性边界之间互相影响, 独立施加三向主应力、便于三向主应变量测等突出的优越性。

竖向刚性、水平面内正交两向侧面柔性液压囊加载的真三轴仪机构和常规三轴仪竖向刚性、侧向液压加载的机构近似一致。它有效地克服了两向刚性、一向柔性加载机构, 或者三向刚性加载机构中刚性板相对滑移或接触的互相干扰问题, 同时也避免了试样侧面与刚性板之间相互摩擦的剪切作用。相邻液压囊之间采用径向弹性伸缩、水平向弹性转动的隔离板, 还有效地改善了三向柔性液压囊加载机构中相互穿通挤压的影响。试样安装在上、下刚性端板之间, 上、下刚性端板易于安装透水、透气板, 便于控制试样排水、排气条件, 同时也易于试样密封。围绕试样的两组柔性液压囊紧密贴合试样侧面, 位于压力室四壁内嵌的压力腔内, 便于试样的安装和液压囊的安放。

3 西安理工大学真三轴仪的改进

西安理工大学真三轴仪^[16]由邵生俊负责于 2008 年研制而成。自开始研制以来, 进行了系统且全面的调试和完善, 验证了该仪器对于模拟土三维主应力状态试验结果的合理性与可靠性。该新型真三轴仪主要由压力室、加载系统、量测与自动控制系统以及相关附属设备几部分组成, 如图 1 所示。



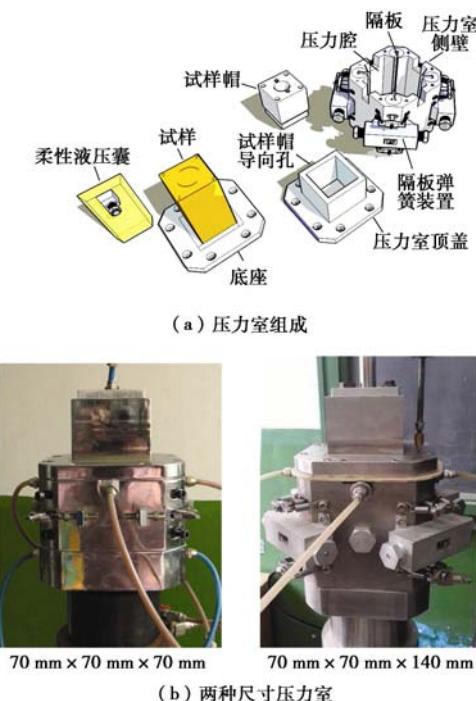
图 1 西安理工大学真三轴仪

Fig. 1 True triaxial apparatus of Xi'an University of Technology

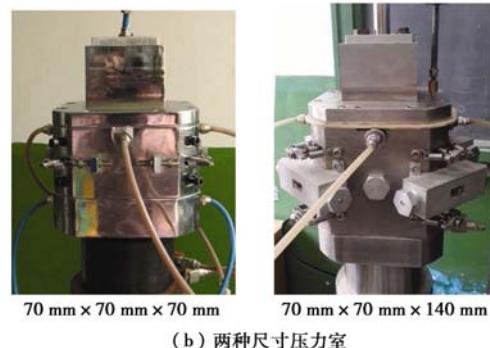
3.1 高样真三轴压力室

初期, 真三轴仪的试样采用了 $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times$

70 mm 的正立方体样。试验研究表明, 正方体试样上、下刚性板对端部的约束作用较大。根据圣维南原理, 通过增大刚性板加载方向上试样的高度, 以便消除端部约束力。因此, 将原正立方体试样改为 $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$ 的长立方体, 同时对压力室等也进行了改进(见图 2)。



(a) 压力室组成



(b) 两种尺寸压力室

图 2 压力室结构

Fig. 2 Structure of pressure cell

3.2 试样密封技术^[17]

饱和土控制排水条件和非饱和土控制吸力试验, 需要有效解决饱和土及非饱和土的试样密封问题。真三轴试样的乳胶膜呈方形筒状, 乳胶膜包裹试样后, 试样上、下端同时内置上、下透水板, 然后在下透水板和底座之间及上透水板与试样帽之间放置密封垫, 分别用橡胶圈密封排水孔, 通过螺栓连接下透水板和底座及上透水板和试样帽, 加压增强乳胶膜端部密封性, 从而实现真三轴立方体试样的密封, 同时方便控制排水条件。具体如图 3 所示, 长方体试样内置于特制的上、下端半开口的正方形断面乳胶膜内, 乳胶膜自下向上包裹内嵌有多孔板或陶土板的下透水板、试样和内嵌有多孔玻璃板的上透水(气)板, 由此形成试样的侧壁密封。同时, 将内置下透水板的乳胶膜下端放于固定底座凹槽内, 凹槽内放置密封垫, 包裹上透水板乳胶膜顶面放置密封垫, 采用螺栓分别固定下透水板和上透水(气)板, 螺栓加压可增强密封, 实现上、下透水板的密封。并用条形钢板填补下透水板

与底座之间的缝隙。压力室侧壁外罩与固定底座采用螺栓连接，将乳胶膜包裹密封的立方体试样内置于其中。压力室侧壁内腔内放置柔性液压囊。通过试样帽导向孔安装压力室顶盖，压力室顶盖通过螺栓与侧壁连接密封。

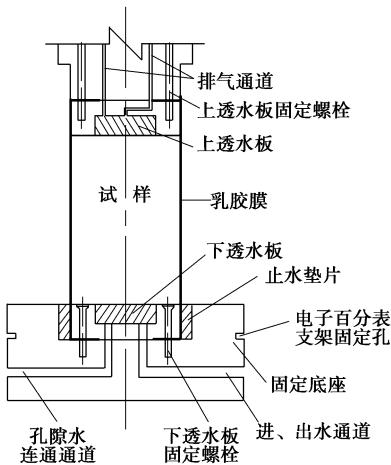


图3 试样密封机构

Fig. 3 Airproof framework of sample

3.3 试样侧向变形量测技术^[18]

真三轴试样内置于密闭的压力室内，通过轴向刚性板和两组柔性液压囊施加三向主应力。试样的轴向应变可以通过刚性板位移直接量测，侧面双向应变可以通过柔性液压囊的体积变化来量测。由于液压囊不可避免地残留气体，以及液压囊随隔离板的平面转动的原因，使得液压囊量测水平内两个主向的变形存在一定的误差。为了提高试样侧向应变量测的准确性，可通过试样点位移量测技术直接量测侧向变形。

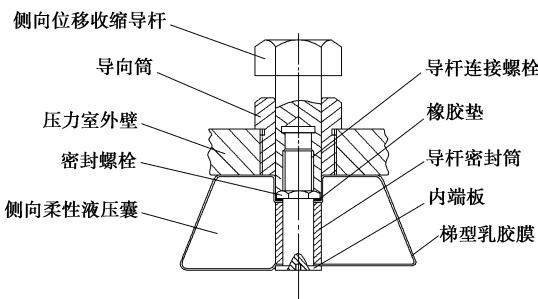


图4 侧向变形量测机构图

Fig. 4 Details of lateral deformation measurement

试样侧向点位移量测技术^[18]主要包括可径向自由伸缩导杆和位移传感器组成。伸缩导杆分为可拆卸的两部分，导杆向外延伸段部分需要穿过柔性液压囊向外延伸至压力室外壁，与线位移传感器相接触；另一部分向内与内端头相接触，内端头时刻与试样表面贴合。穿过液压囊的导杆段安装有刚性护筒，通过内端螺栓、刚性护筒和导杆向外延伸段密封液压囊穿越

孔，从而确保液压囊与伸缩导杆两者结合为一体，并且使试样侧面变形通过内端头，由导向杆传递至压力室外侧。压力室侧壁上安装有导向筒，导向杆密封穿越导向筒，与安装在压力室外壁的线位移传感器连接，将伸缩导杆传递的试样变形转换为数据信号，接入数据采样器，经 A/D 转换进入计算机，从而实现试样变形量的记录。

如图 5, 6 给出了 $b=0$ 和 $b=0.5$ 下液压囊测量技术和点位移测量技术的 ε_2 与 ε_1 关系曲线、 ε_3 与 ε_1 关系曲线，通过曲线可以得之，点位移技术的测量值小于液压囊技术测量值，且曲线的形态正常，成功地避免了由于侧向隔板产生的系统变形。

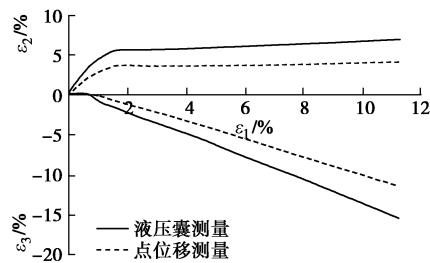


图5 $b=0$ 两种方法测量的侧向位移

Fig. 5 Lateral displacements measured by two methods with $b=0$

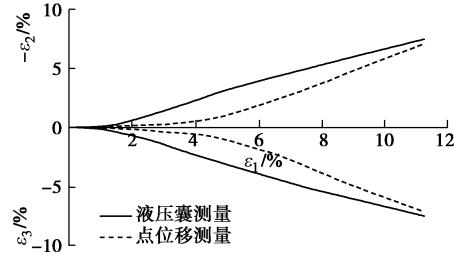


图6 $b=0.5$ 两种方法测量的侧向位移

Fig. 6 Lateral displacements measured by two methods with $b=0.5$

如果限制隔板的转动，校正液压囊残留气体体变的影响，液压囊体变间接量测侧向应变的方法可以与点位移量测技术测试结果比较，以便提高量测准确度。

3.4 试验自动加载与应力应变量测控制装置

(1) 三向主应力控制系统

三向主应力均采用自动控制加载，其核心是 3 个液压-体变伺服步进电机驱动控制装置由输入信号驱动液压缸活塞分别控制竖向荷载和侧向柔性液压囊压力。液压-体变伺服步进电机驱动控制装置^[16]工作原理：步进电机通过连轴器与滚珠丝杠一端连接，滚珠丝杠另一端穿过安装在固定支架上的丝母，且与液压缸活塞通过平面轴承连接；步进电机驱动滚珠丝杠，带动液压缸活塞往返运动，从而增大或减小液压缸的液压力大小。真三轴仪对立方体试样三向施加主应力时采用一个轴向步进电机和两个侧向步进电机驱动的

液压源分别通过量测信号处理和反馈控制实现液压调整。轴向液压源连通轴向加载液压缸内活塞上、下运动, 对试样进行轴向加载或卸荷; 两个侧向液压源分别与中、小主应力的液压囊连通, 控制试样中、小主应力, 对试样进行侧向两个主应力方向的加载或卸荷。可以进行应力控制和应变控制两种加载方式。

(2) 自动量测系统

仪器的量测系统可实现对试样 3 个主应力、3 个主应变及孔隙水压力的独立量测。对于非饱和土试样, 通过替换下透水板中多孔板为陶土板, 可独立量测试样的孔隙水压力和孔隙气压力。整个系统包括 1 支拉压传感器量测竖向荷载, 3 支流体压力传感器分别量测中主应力、小主应力、孔隙水压力; 7 支位移传感器分别量测大主应力方向试样的应变、柔性液压囊连通液压缸活塞位移及试样 4 个侧向变形。非饱和土的孔隙气压力通过调压阀控制, 压力表可直接量测。

(3) 控制程序

自动控制系统由计算机程序实时控制步进电机的运动, 能够进行等中主应力比值的应力控制、应变控制及等平均球应力加载试验。

控制系统硬件由 PC 机、采集驱动模块、荷载传感器、液压传感器、孔隙水压传感器、位移传感器、电机驱动器、步进电机、电源构成。采集驱动模块实现对荷载传感器、液压传感器、孔隙水压传感器、位移传感器输出的模拟量信号进行采集, 按电机动作要求提供电机驱动信号。采集驱动模块通过 USB 接口实现与 PC 机的实时通讯, 可实现 5 ms 频次的驱动及采集周期。匹配满足力矩及速度要求的步进电机, 由电机驱动器根据采集驱动卡提供的信号对每个液压-体变伺服步进电机加载系统的步进电机实施驱动。电源提供系统所需的各种直流电源。

控制系统同时具备数据自动采集功能。采集驱动模块由 MC9S12DG128MPVE 单片机构成的最小系统及相关外围功能电路设计实现。USB 接口电路由 USB 转串口芯片 FT232BL 设计实现, 实现与 PC 机通信。荷载传感器、油压传感器、孔隙水压传感器、位置传感器输出的模拟信号通过 AD620AR、TL072CD 构成的放大滤波电路进行放大滤波, 再通过 AD7327BRUZ 进行 A/D 采集。电机驱动电路直接由单片机 I/O 缓冲驱动实现。

PC 机软件在 Microsoft Visual Basic 6.0 中文版集成环境开发, 主要由参数设置、手动控制、试验设置 3 部分组成。参数设置主要实现荷载传感器、油压传感器、孔隙水压传感器、位置传感器校正功能, 以及试样初始尺寸的设置; 手动控制主要实现对荷载传感

器(竖向应力)、油压传感器(水平应力)、位移传感器实际值的控制, 便于对试验初始参数进行设置; 试验设置主要实现试验类型、加载方式、控制方式以及固结时间、试验结束条件等的设定。

试验开始程序的控制流程如图 7 所示。

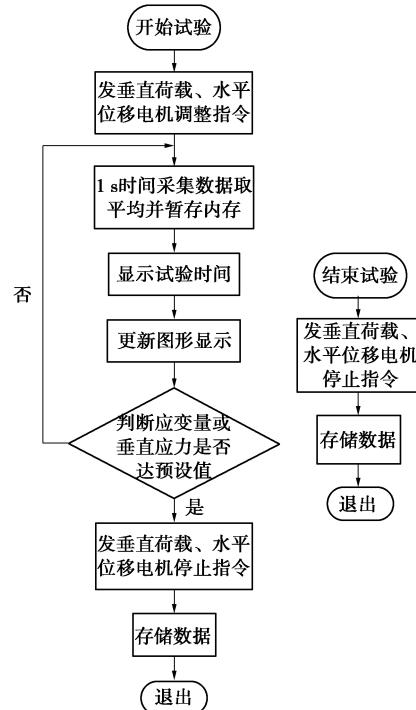


图 7 程序流程图

Fig. 7 Flow chart of control program

4 多种土的真三轴试验分析

通过改进的真三轴仪, 分别对饱和砂土、非饱和重塑黄土和原状黄土进行了等中主应力比值的固结排水真三轴压缩试验和控制基质吸力的真三轴压缩试验, 测试分析了不同土的强度变化规律。

4.1 饱和砂土固结排水真三轴试验及强度规律

(1) 物理性质指标

饱和砂土真三轴固结排水剪切试验采用土料为福建标准砂, 对其进行室内颗粒试验, 不均匀系数为 2.01, 曲率系数为 0.95。试样相对密实度为 0.6, 土粒比重为 2.65, 控制饱和砂样最大干密度为 1.68 g/cm^3 。

(2) 试验步骤

首先, 采用制备饱和砂土立方体真三轴试样, 试样尺寸为 $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$, 控制干密度为 1.68 g/cm^3 。制样的步骤: ①将下透水板由乳胶膜下端包裹, 通过螺栓密封固定于压力室底座, 且连通底座和下透水板的进、排水孔; ②将成样模对接成型后密封安装在压力室底座上, 乳胶膜上端开口包裹成样模顶端, 抽真空使乳胶膜紧贴成样模内壁; ③通过底座

进水孔注入成型乳胶膜内一定量的蒸馏水，将控制干密度分层称取好的饱和砂样依次装入橡皮膜内，直至达到试样高度。安装上透水板，乳胶膜包裹上透水板后，与试样帽密封连接，连通上排水孔；④通过底座排水孔降低试样内水头，使试样成负压，保持成型试样的形状。同时，拆除成样模；⑤量测试样尺寸后，安装压力室侧壁及压力腔柔性液压囊，并安装压力室顶盖。压力室密封后，恢复试样水头，安装试样完成。

均压固结：固结压力分别为 50, 100, 200, 300 kPa，固结时间一般为 1 h。试样剪切：等中主应力比值分别为 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1；应变控制方式加载，加载速率为 0.05 mm/min。

(3) 强度变化规律

依据不同固结压力、不同中主应力比的应力应变曲线，取峰值点或破坏应变条件时的应力状态，可得到不同中主应力比值 $p - q$ 面上的强度破坏线（图 8）和不同平均球应力条件下， π 平面上的强度破坏点（图 9）。

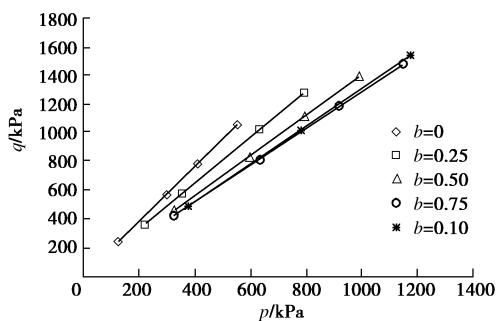


图 8 子午平面的强度破坏线

Fig. 8 Shear failure surfaces in $p - q$ plane

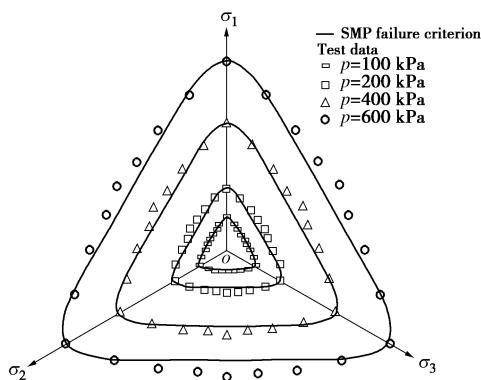


图 9 π 平面上的破坏曲线

Fig. 9 Strength failure lines on π plane

4.2 等吸力非饱和重塑黄土真三轴试验

(1) 物理性质指标

非饱和重塑黄土真三轴试样采取西安白鹿原 Q₂ 黄土制备。土的天然干密度为 1.35 g/cm³，含水率为 16.5%，土粒比重为 2.7，塑性指数为 14。

土样制备时，首先将碾散的土样配制成天然含水率，静置使其水分转移均匀，然后，将配置的土样控制干密度分层在制样模内压实，制备成 70 mm×70 mm×140 mm 的试样。

(2) 试验步骤

针对制备试样，通过密闭容器非饱和土固结试验仪，控制基质吸力，测试基质吸力达到稳定土样的含水率，从而建立基质吸力与含水率的关系曲线。从而制备拟控制吸力为 150 kPa 非饱和重塑黄土，确定真三轴试样的含水率。按照给定含水率制备的试样在保湿缸静置 24 h。真三轴试验前，将试样密封于压力室内，对试样施加 100 kPa 孔隙气压力及 -50 kPa 孔隙水压力，控制净应力等于零，使试样再静置 20 h。

试验时，首先将安装好的密封试样，通过施加固压和孔隙气压力、孔隙水压力，达到基质吸力的控制值，静置试样。一般基质吸力达到稳定时需要 20 h 左右。然后，施加净应力，进行固结，固结过程控制基质吸力保持不变。当试样固结变形达到稳定后，再进行控制基质吸力的真三轴压缩剪切。

均压固结：固结净应力控制为 50, 100, 150, 200 kPa，固结时间为 8 h，且试样固结变形趋于稳定，即可认为试样完成均压固结和内部吸力稳定。试样剪切：等中主应力比值分别为 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1；应变控制方式加载，加载速率为 0.05 mm/min。

(3) 强度变化规律

依据不同中主应力参数应力路径下真三轴剪切破坏时的净应力和基质吸力状态，在广义剪应力和平均净应力平面内绘出了不同中主应力参数的破坏点（图 10）。 π 平面上的强度破坏线（图 11），可以用 AC-SMP 强度准则近似描述。

净应力状态下，AC-SMP 强度准则如下^[18]：

$$\frac{(\hat{\sigma}_1 - \hat{\sigma}_2)^2 + (\hat{\sigma}_1 - \hat{\sigma}_3)^2 + (\hat{\sigma}_2 - \hat{\sigma}_3)^2 K_p}{(\hat{\sigma}_1 + \hat{\sigma}_2 K_p + \hat{\sigma}_3 K_p)^2} = 1, \quad (1)$$

式中， $K_p = \tan^2(45^\circ + \varphi/2)$ ， $\hat{\sigma}_i = \sigma_i - u_a + c_i \cdot \cot \varphi_i$ ， $i = 1, 2, 3$ 。

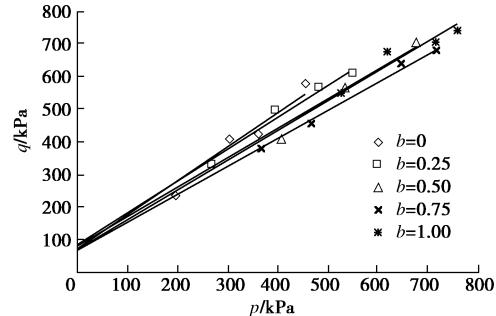
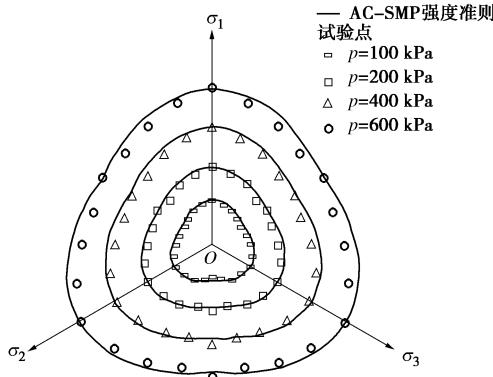


图 10 子午平面的强度破坏线

Fig. 10 Shear failure surfaces in $p - q$ plane

图 11 基质吸力 150 kPa π 平面上的强度破坏线Fig. 11 Strength failure lines on π plane under $s=150$ kPa

4.3 黄土固结排水真三轴试验

(1) 物理性质指标

原状黄土真三轴固结排水剪切试验分别采用西安白鹿原和月登阁的天然黄土, 取土深度约为 6.5~8.0 m。白鹿原黄土的物性指标: 干密度为 1.50 g/cm³, 土粒比重为 2.69, 含水率为 17.2%, 塑性指数为 12; 月登阁的黄土的物性指标: 干密度为 1.43 g/cm³, 土粒比重为 2.71, 含水率为 21.1%, 塑性指数为 12.1。

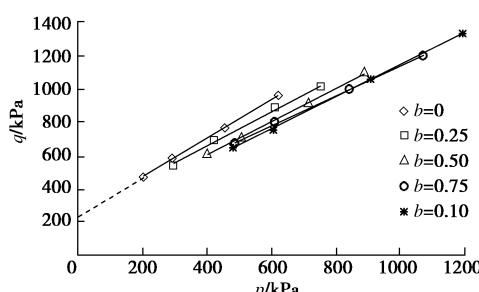
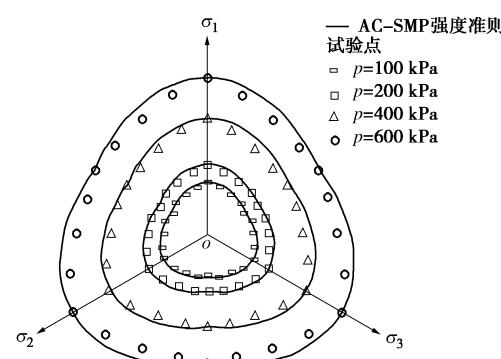
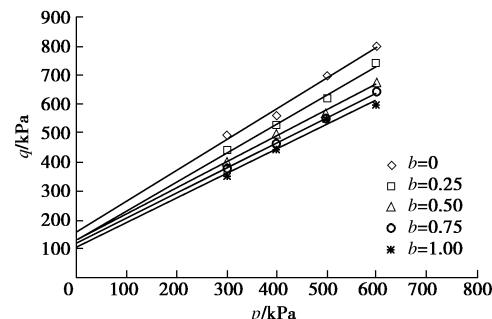
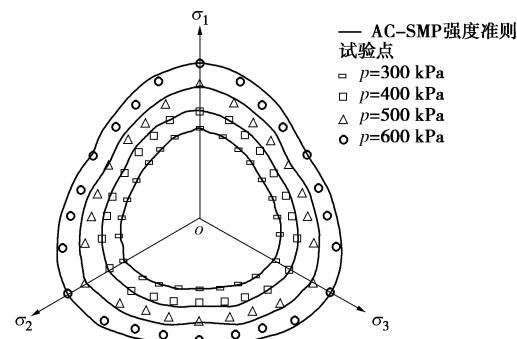
(2) 试验步骤

首先, 在压力室底座上固定下透水板后安装压力室侧壁, 且排除进、排水孔内水, 避免原状黄土样吸水。其次, 在压力室中央安放制备的原状黄土立方体试样, 同时, 将排除气体的柔性液压囊安放在 4 个压力腔内。最后, 在试样顶面安放具有上透水板的试样帽, 固定压力室顶盖。

试样固结: 等 b 应力路径的应变控制加载试验中, 固结应力分别为 50, 100, 150, 200 kPa, 固结时间 4 h; 等 b 等 p 应力路径的应变控制加载试验中, 固结应力分别为 300, 400, 500, 600 kPa, 固结时间亦为 4 h。两类应力路径的试样剪切中, 控制中主应力比值为 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0。应变控制方式的加载变形速率为 0.05 mm/min。

(3) 强度变化规律

在应力空间域内均可得到不同中主应力比子午平面上的强度破坏线, 如图 12, 14 所示。不同 π 平面上的不同强度破坏线, 如图 13, 15 所示。

图 12 等 b 子午平面的强度破坏线Fig. 12 Shear failure surfaces in $p - q$ plane with equal b -values图 13 等 b 路径下 π 平面上的强度破坏线Fig. 13 Strength failure lines on π plane with equal values of b 图 14 等 b 等 p 路径下子午平面的强度破坏线Fig. 14 Shear failure surfaces in $p - q$ plane with equal values of b and p 图 15 等 b 等 p 路径下 π 平面上的强度破坏线Fig. 15 Strength failure lines on π plane with equal values of b and p

5 结 论

(1) 已经研制的一种刚性-柔性-柔性边界加载机构真三轴仪具有一室四腔、竖向刚性和侧面双向柔性加载机构的特点。三向主应力模拟均匹配了独立伺服步进电机液压-体变控制器的液压源。通过采集驱动模块和 PC 机通讯连接单片机, 实现了主应力状态和变形速率的自动控制与信号采集处理。

(2) 将真三轴立方体试样刚性板加载方向的高度增大一倍, 改进压力室尺寸, 使其适应长立方体试样,

减小了刚性板加载的端部约束效应。针对通过柔性囊体变量测试样侧面双向应变的不足,研制了穿越柔性液压囊的杆件滑移点侧向变形量测装置。

(3) 通过真三轴仪加载机构、伺服控制加载液压源和自动控制系统,可以进行等中主应力比值、等平均球应力的不排水、固结不排水和固结排水三向主应力压缩试验,具有应力控制和变形控制两种加载方式。针对非饱和土,实现了控制基质吸力的真三轴压缩试验。

(4) 通过开展饱和砂土的固结排水真三轴试验、非饱和重塑黄土的控制基质吸力真三轴试验以及原状黄土的固结排水真三轴试验,表明不同土的强度测试结果合理,验证了具有刚性—柔性—柔性边界加载机构真三轴仪性能的可靠性。

参考文献:

- [1] KIELLMAN W. Report on an apparatus for consummate investigation of the mechanical properties of soils[C]// Proceedings of the 1st ICSMFE, 1963: 667 – 669.
- [2] PEARCE J A. A new triaxial apparatus, stress-strain behavior of soils[M]. PARRY R H G, FOULIS G T. England: Yeovil Co, Ltd, 1971: 330 – 339.
- [3] WOOD D M. Some aspects of the mechanical behaviour of Kaolin under truly triaxial conditions of stress and strain[D]. Cambridge: Univ of Cambridge, 1974.
- [4] MATSUOKA H, SUN D A. Extension of spatially mobilized plane(SMP) to frictional and cohesive materials and its application to cemented sands[J]. Soils and Foundations, 1995, **35**(4): 63 – 72.
- [5] MATSUOKA H, SUN D A, KOGANE A, et al. Stress-strain behaviour of unsaturated soil in true triaxial tests[J]. Can Geotech J, 2002, **39**: 608 – 619.
- [6] LADE P V, DUNCAN J M. Cubical triaxial tests on cohesionless soils[J]. J Soil Mech and Found Div, ASCE, 1973, **99**(10): 793 – 812.
- [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[J]. 河海大学学报, 1995, **23**(6): 28 – 33. (ZHU Jun-gao, LU Hai-hua, YIN Zong-ze. Lateral deformation of soil in true tri-axial test[J]. Journal of Hohai University, 1995, **23**(6): 28 – 33. (in Chinese))
- [8] BELL J M. Stress-strain characteristics of cohesionless granular materials subjected to statically applied homogeneous loads in an open system[D]. California: California institute of Technology, 1965.
- [9] KO H Y, SCOTT R F. A new soiltesting apparatus[J]. Géotechnique, 1967, **17**(1): 40 – 57.
- [10] STURE S, DESAI C S. Fluid cushion truly triaxial or multi-axial testing device[J]. Geotchnical Testing Journal, 1979, **2**(1): 20 – 33.
- [11] SIVAKUGAN N, CHAMEAU J L, HOLTZ R D, et al. Serve-controlled cuboidal shear device[J]. Geotechnical Testing Journal, 1988, **11**(2): 119 – 124.
- [12] REDDY K R, SAXENA S K, BUDIMAN J S. Development of a true triaxial testing apparatus[J]. Geotechnical Testing Journal, 1992, **15**(2): 89 – 105.
- [13] MANDEVILLE D, PENUMADU D. True triaxial testing system for clay with proportional-integral -differential(PID) control[J]. Geotechnical Testing Journal, 2004, **27**(2): 1 – 11.
- [14] CHOI C, ARDUINO P, HARNEY M D. Development of a true tri-axial apparatus for sands and gravels[J]. Geotechnical Testing Journal, 2007, **31**(1): 1 – 13.
- [15] PRASHANT A, PENUMADU D. Effect of intermediate principal stress on overconsolidated Kaolin clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, **130**(3): 284 – 292.
- [16] 邵生俊, 罗爱忠, 邓国华, 等. 一种新型真三轴仪的研制与开发[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(8): 1172 – 1179. (SHAO Sheng-jun, LUO Ai-zhong, DENG Guo-hua, et al. Development of a new true tri-axial apparatus[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(8): 1172 – 1179. (in Chinese))
- [17] 石建刚, 邵生俊, 陶虎, 等. 非饱和土的真三轴试验及强度变形特性分析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(增刊 1): 85 – 90. (SHI Jian-gang, SHAO Sheng-jun, TAO Hu, et al. True triaxial tests and strength deformation behaviors of unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(S1): 85 – 90. (in Chinese))
- [18] 邵生俊, 许萍, 陈昌禄. 土的剪切空间滑动面分析及各向异性强度准则研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(3): 422 – 435. (SHAO Sheng-jun, XU Ping, CHEN Chang-lu. Several shear spatially mobilized planes and anisotropic strength criteria of soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(3): 422 – 435. (in Chinese))