

一种新型真三轴仪的研制与开发

邵生俊^{1,2}, 罗爱忠¹, 邓国华¹, 潘德勇¹

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 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)

摘要: 真三轴仪是一种真实模拟主应力状态, 且在任意应力路径下测试土力学特性的试验仪器。介绍了研制的一种新型真三轴仪, 它具有轴向刚性板加载、侧向双轴液压柔性囊加载的三向加载方式; 侧向双轴相邻液压囊之间采用径向弹性伸缩、平面弹性转动的薄壁钢板有效隔离技术; 伺服步进电机驱动滚珠丝杆推进活塞产生压力的液压/体变控制器独立施加三向主应力的自动控制系统。真正实现了三向独立加载、互不干扰。经测试分析, 仪器系统性能稳定。新型真三轴仪具有结构简单, 操作方便, 应力状态真实, 应变测试准确, 试验过程易于控制的特点。

关键词: 新型真三轴仪; 轴向刚性、侧压柔性加载; 隔板弹性转动与伸缩; 液压与体变控制; 三向独立加载

中图分类号: TU415

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)08-1172-08

作者简介: 邵生俊(1964-), 男, 甘肃武威人, 教授, 博士生导师, 从事黄土力学与土动力学的研究与教学工作。E-mail: sjshao@xaut.edu.cn。

Development of a new true tri-axial apparatus

SHAO Sheng-jun^{1,2}, LUO Ai-zhong¹, DENG Guo-hua¹, PAN De-yong¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Loess

Mechanics and Engineering, Xi'an 710048, China)

Abstract: A true tri-axial apparatus is usually applied to measure the mechanical characteristics of soil under the three-dimensional principle stress condition. A new true tri-axial apparatus with a new structural cell is developed by Geotechnical Engineering Institute of Xi'an University of Technology. By comparing loading ways of different true tri-axial apparatuses at home and abroad, the characteristics of the new true tri-axial apparatus are summarized as follows: ① A kind of hydraulic and volume apparatus with stepper motor servo-driven is developed, which is used to load independently the principal stress, and the corresponding automatic control system is developed. ② The cubic sample is loaded by a pair of vertical steel plate and two pairs of lateral latex film vesicas. ③ The neighboring vesicas are separated by the steel plate, which can flex elastically in the radial direction and turn elastically on the horizontal plane. Furthermore, the true tri-axial tests on remolded loess are executed by use of the new true tri-axial apparatus. The characteristics of the stress-strain curve of the true tri-axial tests on the remolded loess and the strength of the loess remodeling are analyzed under different water contents. The new true triaxial apparatus is simple in structure, convenient in operation, true in stress state, exact in measuring the strain state and manageable in testing process.

Key words: new true tri-axial apparatus; axial loading with rigid plate and lateral pressing with hydraulic pressure; separating plate with turning and flex; hydraulic and volume controlling apparatus; tri-axial independent loading

0 引言

土工实验是土力学发展的基础, 实验仪器的开发在土工实验中具有重要的地位。真三轴仪是一种真实模拟主应力状态的土工测试仪器。目前为止, 国内外已经研制了多种真三轴仪。按其压力室加荷特性来分, 有“刚性”、“柔性”、和“复合”3种形式。它们各有特点, 适用范围也不同。在国外, 刚性的真三轴仪主要有瑞典 Kjellman 研制的真三轴仪^[1]和英国剑桥大学 Pears 研制的剑桥真三轴仪^[2], 它们都适用于砂土; 柔

性的真三轴仪主要有 Surrey 大学 Mengles 研制的真三轴仪、墨西哥大学 Marsal 研制的真三轴仪和美国 Lo 等研制的真三轴仪^[2]; 复合型的真三轴仪主要有伦敦大学 Green 研制的真三轴仪、日本谷藤株式会社和日本诚研舍研制的真三轴仪。国内除了从国外引进真三轴仪外, 还有进行改造或自己开发的几种真三轴仪,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50779054, 10872161)

收稿日期: 2008-06-11

分别为清华大学真三轴仪^[3]、同济大学真三轴仪^[4-5]和河海大学真三轴仪^[6]。

按照真三轴仪的加荷方式,归纳起来主要有3种:应变控制的全部刚性的加荷方式,应力控制的全部柔性的加荷方式,复合控制的刚性和柔性的加荷方式^[7]。它们都有其优缺点。3种加荷方式的优点:①应变控制的全部刚性的加荷方式,试样各向应变均匀,能精确测量应变,可达到较大的轴向应变,可模拟复杂的应力应变路径,可在加荷板上安装压力盒及孔隙压力计等;②应力控制的全部柔性的加荷方式,主应力法向作用于加荷面,各面上应力分布均匀,在无明显边界干扰情况下3个方向能达到最大应变,易按预定的复杂应力路径进行试验,能产生剪切挠曲并可测量变形;③复合控制的刚性和柔性的加荷方式,以刚性边界作为压缩方向,应力控制的柔性边界作为挤伸方向可免除边界干扰,孔隙压力计及其它仪器易于安装,若预定的试验面与仪器轴成某一固定方向,则可按应力路径或应变路径进行试验,可模拟平面应变。3种加荷方式的缺点:①应变控制的全部刚性的加荷方式,应力不均匀且难以检验,不适宜于剪切挠曲,当轴向应变大时,会产生加荷板互相干扰,不能进行预定的应力路径试验,仪器较大而不灵巧,操作较复杂;②应力控制的全部柔性的加荷方式,如不采取特殊预防措施,会产生边界干扰,如不加专门润滑措施,则难以达到均匀应变,只有通过逐步校正作用于平面的法向应力,才可能达到平面应变条件,孔隙压力计不易安装;③复合控制的刚性和柔性的加荷方式,预定的复杂应力路径试验难以进行,刚性板上法向应力的均匀性及柔性板上应变的均匀性难以确定,在边界附近产生不均匀应力和应变,仪器较大而不灵巧,操作较复杂。

1 新型真三轴仪研制基本目标和思路

真三轴仪可以实现3个轴向分别施加不同大小的主应力,3轴向产生应变,能够模拟土体中一般的应力条件。为了实现3个轴向施加主应力,真三轴试样一般为一个立方体。若真三轴仪的3个轴向均采用平板加载时,每个轴向施加正应力的平板的刚性大,相对于土样,三向加载板可视为刚性板。当试样发生较大变形后,与试样接触的刚性板必然产生相互接触而制约它们的运动,这就影响了3个轴向的加载和变形。三向柔性加载时,便于控制应力,但三向柔性液压囊在接触处存在相互干扰,且不利于独立测试三向应变。双向平板、一向柔性加载时,双向刚性平板之间也存在互相干扰,且它们只能施加大小主应力。因此,改善真

三轴试验加载机构,消除现有真三轴仪加载刚性板之间的相互制约,刚性板对试样变形的约束影响,以及柔性液压囊之间的相互干扰使得试样沿三个轴向自由变形,不仅可以克服现有真三轴仪存在的问题,而且使模拟的应力与变形条件更加符合实际。

完善的真三轴仪加载机构能够模拟一般应力条件,3个轴向独立量测变形,以便研究复杂应力条件下岩土材料的力学性状。为此,对该真三轴仪的研制提出如下技术要求:①能够分别控制应力与应变,在轴向加载过程中可以实现控制加荷速率和变形速率,剪切过程可以实现中主应力联动控制,实现等洛德参数应力路径;②三向独立加荷,可以分别独立自动控制施加轴向、侧向荷载,既避免两者之间的相互影响,又可以相互协调,使立方体试样上沿轴向和侧向分别承受不同大小的正应力,能够模拟主应力轴偏转和旋转应力路径等土体的真实应力状态,并能进行多种应力路径的真三轴试验;③能够控制排水条件,可以分别进行固结排水和固结不排水条件试验,同时可以量测孔隙水压力;④自动量测与控制,实现所有应力信号输入与反馈控制的自动化,以及测试、量测信号的A/D转换和数据的自动采集处理。

同时,真三轴仪还具备以下6个特点:①水平面内两个主应力方向上应力和变形均呈对称分布;②土样侧面不受切向约束作用;③能够适应加载过程立方体土样变形引起侧棱变位的变化;④能够适应土样侧棱挤出变形的发展;⑤避免三向主应力加载过程的互相干扰;⑥加载过程土样保持对称,在水平面上始终中心受荷。

2 新型真三轴仪的研制

对比以往真三轴仪的优缺点,新研制的真三轴仪是一种轴向刚性、侧向柔性的复合型加载真三轴仪,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3部分构成。主机的压力室呈立方体,试样位于刚性底座和顶盖中央,立方体试样的侧面对应的有两组梯形侧压腔,放置柔性液压囊,且与液压/体变控制器连接。在竖向的主轴方向用刚性板施加主应力 σ_1 ;在水平面内的侧向分别有两对柔性囊相向施加中主应力 σ_2 和小主应力 σ_3 。为了主动适应加载过程中试样变形引起棱角的变化和避免中、小主应力之间的相互干扰,压力室的各侧压腔之间设置能够径向弹性伸缩、水平面内弹性转动的隔离板,能够有效分离相邻液压囊。步进伺服电机液压加载系统能够控制三向独立加载,其具有伺服步进电机驱动滚珠丝杆推进液压缸活塞产生液压源,分别与压力室底座下轴

弹性伸出。当中主应力比小主应力较大作用试样时, 试样在水平面上沿小主应力作用方向产生伸展变形, 沿中主应力方向产生压缩变形, 引起试样侧棱产生转角变位, 同样, 隔板也可产生水平面转动, 从而能够适应试样侧棱的变位。试样的排水条件可由与底座、顶盖透水板连通的排水管阀门控制。压力室实物及其内部结构见图 4、5。

2.2 加载系统

固结压力均由伺服步进电机驱动的液压/体变控制器直接供给。两个侧向固结应力分别由两套与侧压腔内柔性囊连接的液压/体变控制器独立控制, 大主应力方向由与压力室底座下的油缸连接的一套液压/体变控制器独立控制。如图 6 所示, 共有 3 套伺服步进电机驱动的液压/体变控制器。在试样固结时能实现 3 个固结应力的单独施加, 压缩剪切时 3 个主应力也互不干扰和影响。两套侧向主应力的液压/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, 分别用于控制侧向主应力的大小及液压囊的体变; 轴向荷载和试样变形分别由反力主轴上的荷载传感器和压力室顶盖上的位移传感器测量 (图 7), 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, 可

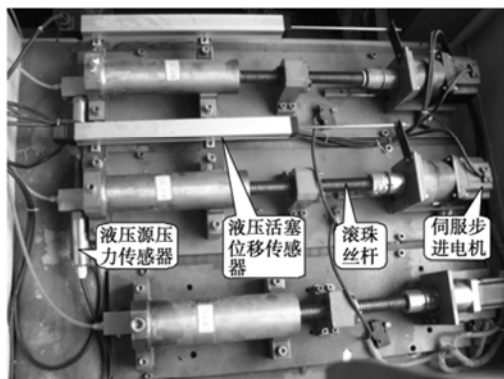


图 6 伺服步进电机液压/体变控制加载系统

Fig. 6 Loading system with hydraulic pressure driven by servo stepping electromotor

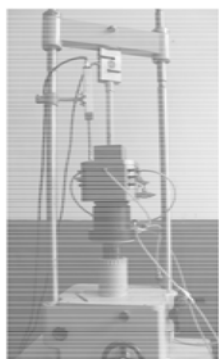


图 7 真三轴仪加载主机

Fig. 7 Loading major framework of the new true tri-axial apparatus

以分为应变控制式和应力控制式两种。应变控制是指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。应力控制式是指分级加载, 测量每级荷载作用下试样的变形量。它们可以分别由轴向荷载传感器和位移传感器量测, 并通过自动控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。

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。大主应力方向为刚性板加压, 因此应力和变形传感器可直接安装在压力室盖板上。侧向应力和变形可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。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的是上下双面排水, 在与土样直接接触的顶板和底座上设置有透水板, 通过透水板可以进行排水。在做固结排水试验时, 可以通过量水管量测试样在试验时的排水量; 进行固结不排水试验时, 可将排水管连接到孔压传感器上, 以测得试样的孔隙水压力。

2.5 自动控制系统

真三轴仪的控制系统由应力应变传感器、电阻应变仪、控制调节电路及微机控制系统几部分组成, 见图 8。土体试样的应力应变, 由对应的传感器做相应的输出, 输出作为反馈的信号与给定的信号闭环负反馈调节, 应力控制与应变控制由切换开关转换, 相应的传感器输出信号经放大后输入 A/D 卡中, 由微机完成试验数据的高速采集, 以数据文件方式存放于微机中。

2.6 附属设备

相关的附属设备包括原状样削样器、重塑样压样器、试样饱和器、橡皮膜、液压橡胶囊等。



图 8 真三轴仪

Fig. 8 A new true tri-axial apparatus

3 试验验证

试验土样为 Q₃ 黄土, 取自陕西省西安市南郊, 取土深度 8.5~10.00 m。经室内常规试验测定, 该黄土

的天然密度为 1.53 g/cm^3 , 天然含水率为 20.23%, 干密度 1.273 g/cm^3 。

3.1 试验步骤

试验的步骤: ①将制备好的正立方体试样安装于压力室的底座和顶盖之间; ②安装压力室外筒于压力室底座上; ③在压力室侧压腔内安放与步进伺服电机液压加载系统液压缸连接的柔性液压囊; ④安装压力室顶盖; ⑤安装压力室顶盖上轴向传力轴; ⑥打开压力室底座位置调节开关, 旋转粗调转轮顶进调节活塞, 顶升压力室, 使压力室顶盖与轴向传力主轴初步接触, 然后旋转微调转轮, 使得压力室顶盖与传力主轴精确接触; ⑦打开控制柜电源及自动控制程序, 各传感器初始读数调零; ⑧输入固结应力条件, 打开步进伺服电机, 启动固结控制程序, 三向施加固结压力; ⑨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; ⑩卸除步进伺服电机液压加载系统液压缸的压力; 11降低压力室位置, 拆除试样。

3.2 黄土的应力应变测试结果

为了考察新型真三轴仪测试结果的合理性, 利用非饱和黄土在不同主应力比 b 条件下的应变控制式试验。图 9 分别给出了不同中轴应力比值条件下不同含水率非饱和黄土广义剪应力和广义剪应变的关系曲线

($\rho_d=1.273 \text{ g/cm}^3$, $\sigma_c=100 \text{ kPa}$), 表明干密度较低的黄土的应力应变曲线均呈硬化型, 且随含水率的增大, 不同剪应变对应的剪应力在不断减小。同一中轴应力比值条件下, 大、小主应力差与大主应变及小主应变的关系曲线如图 10 所示, 表明小主应变均呈侧向挤出变形, 且均小于大主应变。从试验曲线的形态看, 仪器整体系统非常稳定, 试验曲线光滑平顺。

对比相同 b 值条件下不同含水率时黄土的应力应变关系 (固结压力 100 kPa) 可以发现, 随着含水率的增大, 应力应变曲线逐渐降低, 即土的强度在逐渐降低, 土抵抗变形的能力在逐渐减弱。这与黄土在常规三轴试验条件下的力学特性基本一致^[8]。

对比相同含水率条件下, 不同 b 值的应力应变关系 ($\rho_d=1.273 \text{ g/cm}^3$, $\sigma_c=100 \text{ kPa}$), 如图 11 所示, 可以发现, 随着 b 值的增大, 土的应力应变曲线有交叉现象, 但剪切应变充分发展时, 土的强度却逐渐减小, 即三轴压缩时, 土的强度最大, 三轴挤伸时, 土的强度最小。应力应变曲线随着 b 值的增大由弱硬化型向强硬化性转变。如果绘出广义剪应力与平均球应力比值与广义剪应变的曲线, 见图 12 ($\rho_d=1.273 \text{ g/cm}^3$, $\sigma_c=100 \text{ kPa}$, $w=5\%$), 则随着 b 值增大, 曲线依次在降低。这也进一步验证了测试结果的合理性。

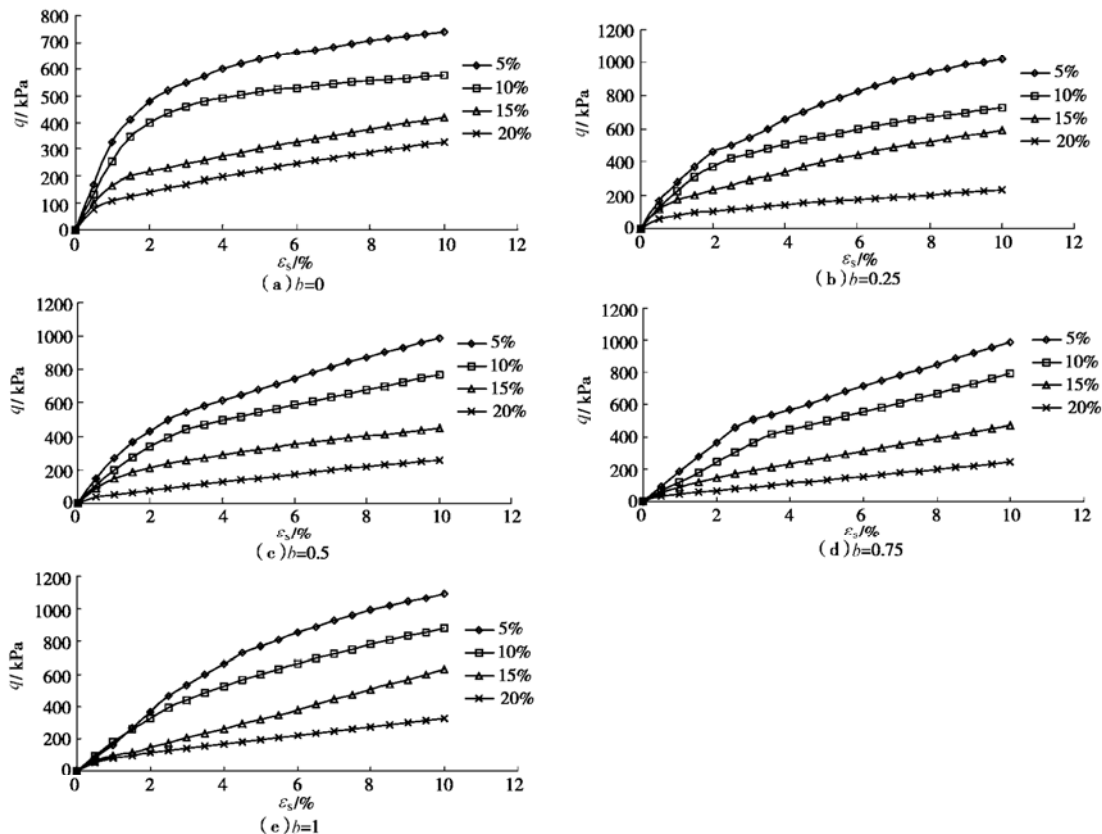


图 9 不同应力路径下黄土的应力 - 应变关系

Fig. 9 The stress-strain relationships of loess under consolidation pressure 100 kPa and different stress paths

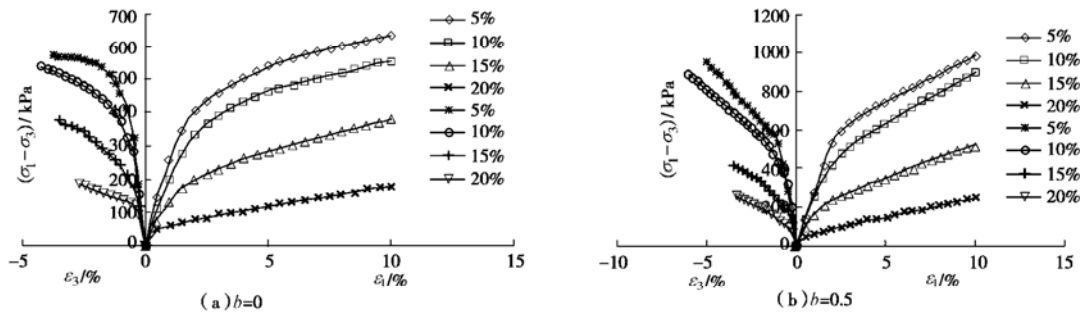
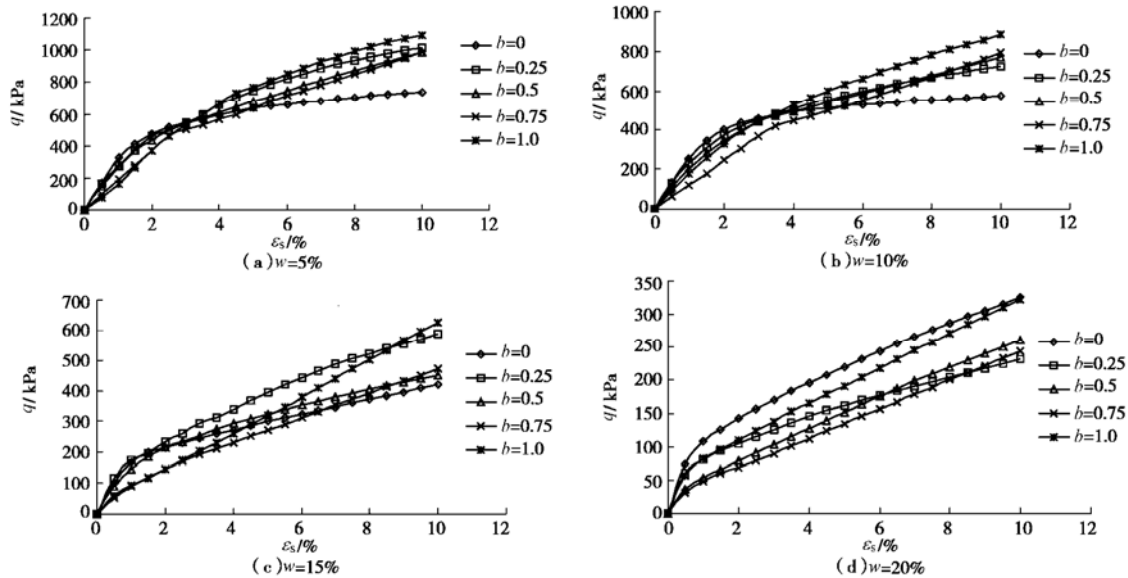
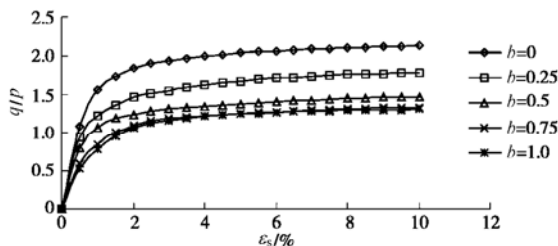
图 10 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 、 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_3$ 曲线Fig.10 The curve of $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 、 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_3$ 图 11 同一含水率、不同 b 值的应力应变关系Fig. 11 The stress-strain relationships of loess with given water content under different values of b 

图 12 黄土的应力应变关系

Fig. 12 The stress-strain relationships of loess

图 13 给出了 $w=5\%$ 黄土不同应力路径剪切条件下各应变分量之间的关系曲线。从黄土的变形特性看, 黄土在剪切过程中均呈现体缩特性, 随着 b 值的增大, 体应变在逐渐增大。 $b=0$ 时, ε_2 为负值 (膨胀), 其他 b 值时, ε_2 为正值 (压缩)。随着 b 值的增大, ε_2 , ε_3 在逐渐增大。

3.3 黄土试样的破坏形式

通过对试样破坏方式的观察可以发现, 黄土在真三轴条件下的破坏方式可分为侧胀破坏、锥形破坏、梯形破坏和六边形破坏 4 类, 如图 14 所示。这 4 类破

坏方式与试验条件密切相关。

当 $w=20\%$ 时, 所有试样的破坏方式均为侧胀破坏。当 $w=15\%$ 时, 100 kPa 固结围压条件下, b 值为 0.25, 0.5, 0.75 时, 小主应力方向土样被挤出, 中主应力作用面出现破坏轨迹, 为梯形破坏; b 值为 0, 1.0 时为侧胀破坏, 无破坏轨迹; 固结围压为 200 kPa 和 300 kPa 时试样的破坏方式均为侧胀破坏。由此可以推理, 当含水率一定时, 围压越小剪切面轨迹越易出现, 而围压越大, 破坏形式易表现为侧胀破坏。当 $w=10\%$ 时, 100, 200 kPa 固结围压条件下, b 值为 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 时, 中主应力作用面出现破坏轨迹, 为梯形破坏, b 值为 0 时, 出现锥形破坏。300 kPa 固结围压条件下, 无明显的破坏轨迹, 为侧胀破坏。由此可以进一步验证和推理, 含水率一定的条件下, 固结围压越小, 剪切面轨迹越易出现, 固结围压越大, 破坏形式更易表现为侧胀破坏。 b 值与剪切面是否出现无直接关系, 但它却强烈的影响着剪切面的轨迹。当 $w=5\%$ 时, 100, 200, 300 kPa 固结围压条件下, b 值为 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 时, 中主应力作用面均出现破坏轨迹,

为梯形破坏; $b=0$ 时, 呈现锥形破坏。由此可以进一步验证和推断, 如果其他条件一致, $b=0$ 时, 由于侧向压力相等, 小主应力作用面和中主应力作用面同时被挤出, 因此, 试样呈现出的剪切面为锥形; 当 $b \neq 0$ 时, 相对于中主应力作用面, 小主应力作用面更易被挤出, 从而为破坏轨迹的形成奠定了基础。

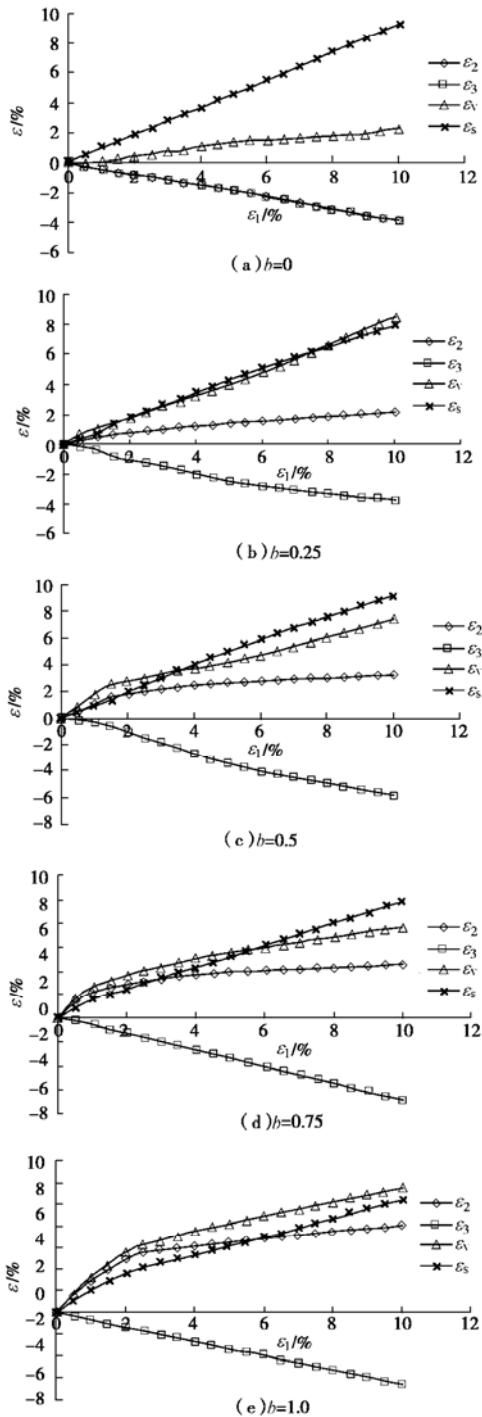


图 13 黄土的应变发展曲线

Fig. 13 The deformation characteristics of loess

综上所述, 在影响黄土破坏形式的条件中, 含水率最为显著, 固结围压次之, b 值最小。含水率较大

时, 易出现侧胀破坏, 含水率较小时, 易出现梯形破坏。固结围压较大时, 易出现侧胀破坏, 固结围压较小时, 易出现梯形破坏。而 b 值与剪切面是否出现无直接关系, 但它影响着剪切面的形状, $b=0$ 是锥形破坏的必要条件。六边形的破坏形式实际上是梯形破坏方式的延续, 即在试样出现梯形破坏后, 继续增大大主应力或降低小主应力而造成的结果。

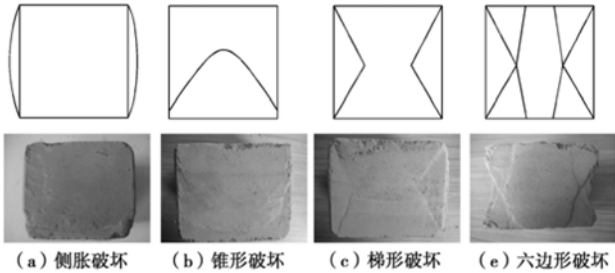


图 14 黄土的破坏面

Fig. 14 Failure surface of loess

4 试验误差初步分析

经试验验证, 该仪器性能基本稳定, 能够满足复杂应力条件下土力学特性测试的要求。根据对试验过程和试验结果的分析, 可以发现, 试验误差有以下 4 个方面^[9]。

4.1 端部的约束作用

对于一般的常规三轴仪和刚性加载的真三轴仪来说, 端部对试样的约束作用是非常显著的。尤其是对于 $70\text{ mm} \times 70\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 的真三轴方样。侧向应变较大时 (土质较差、含水率较大、 b 值较大), 可以明显地看到试验完成时, 试样的侧面呈凹面或凸面。这种约束作用会夸大试样作为一个单元体的强度和抗变形能力。

4.2 液压橡皮囊和橡皮膜的摩擦作用

与刚性加载面端部约束作用相似, 液压橡皮囊与橡皮膜之间也存在着相互的制约作用。当大主应力方向发生变形时, 它们之间的摩擦作用可能会阻止试样的轴向变形, 相当于在试样的侧向又施加了一个剪应力。相对于端部的约束作用, 这种摩擦作用对应力应变关系的影响相对较小。

4.3 液体 (水) 的压缩性

本仪器为侧向液压囊加载, 即通过向液压囊注水来满足侧向压力的要求。不论是采用一般的水还是蒸馏水, 由于在压力缸与液压囊连接的过程中, 空气不可能完全排出。水的压缩性可以忽略不计, 但气体的压缩性是不可避免的, 从而使得侧向应变的测试结果不够准确, 尤其是压力较大时。因此, 要尽量排出囊内残留的空气。

4.4 柔性液压橡皮囊嵌入压力室结构的缝隙

试样侧向应变是根据柔性液压囊体积变化来量测的,因此,在确保液压橡皮囊不漏水的情况下,根据压力缸活塞的推进量就可以算出侧向应变的大小。但实际上,压力室结构由底座、顶盖、侧壁和止水垫片组成,它们之间不可避免的存在一定的缝隙,在试验过程中,随着液压橡皮囊压力的增大,柔性的橡皮囊可能嵌入压力室结构的缝隙,导致实测的侧向应变偏离真实值。

5 结 论

(1)研制开发的新型真三轴仪具有轴向刚性板加载、侧向双轴液压柔性囊加载的三向加载方式,压力室侧向双轴相邻液压囊之间采用径向弹性伸缩、平面弹性转动的薄壁钢板有效隔离技术,伺服步进电机驱动滚珠丝杆推进活塞产生压力的液压/体变控制器独立施加三向主应力的自动控制系统。

(2)实现了立方体试样三个主应力的独立施加和互不干扰,以及应力路径的自动控制;能够独立量测立方体试样的三向变形。

(3)通过黄土的真三轴仪试验,测试得到了符合黄土变形特性的不同中轴应力比值条件下的广义剪应力与广义剪应变曲线,大、小主应力差与大主应变和小主应变的曲线,以及体应变、广义剪应变、中主应变、小主应变和大主应变之间的关系曲线。并分析了不同应力路径条件下黄土的破坏特征。从而验证了仪器系统的稳定性和测试结果的合理性。

(4)新型真三轴仪具有结构简单,操作方便,应力状态真实,应变测试准确,试验过程易于控制的特点。

(5)从压力室结构及试样加载和变形发展出发,初步分析了仪器系统的误差。

致 谢: 西安理工大学谢定义教授对本文介绍的新型真三轴仪的研制给与了具体指导;吴利言教授级高工完成了该仪器压力室的机械加工设计;西安理工大学岩土工程研究所其他教师为该仪器的开发也提出了参考意见,在此深表感谢!

参考文献:

[1] KJELLMAN W. Report on an apparatus for con-summate investigation of the mechanical properties of soils[C]//

Proceedings of the 1st ICSMFE. [s.&.] [s.n], 1936: 16 - 20.

- [2] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1981. (HUANG Wen-xi. Engineering properties of soils[M]. Beijing: Water Resources and electric power Press, 1981. (in Chinese))
- [3] 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 Guang-xin. A study of three-dimensional constitutive relationship of soils and an examination of various models[D]. Beijing: Tsinghua University, 1985. (in Chinese))
- [4] 袁聚云, 赵锡宏, 杨熙章, 等. 真三轴仪研制及其试验方法[J]. 水电自动化与大坝观测, 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]. Hydropower and Automation and Dam Monitoring, 1992(5): 8 - 12. (in Chinese))
- [5] 孙 红, 赵锡宏, 袁聚云. 软土的真三轴试验研究[J]. 水利学报, 2002, 12: 72 - 78. (SUN Hong, ZHAO Xi-hong, YUAN Ju-yun. A Study on soft soil by true triaxial tests[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 12: 72 - 78. (in Chinese))
- [6] 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 - 32. (ZHU Jun-gao, LU Hai-hua, YIN Zong-ze. Lateral deformation of soil in true triaxial tests[J]. Journal of Hohai University, 1995, 23(6): 28 - 32. (in Chinese))
- [7] ANHDAN L Q, KOSEKI J, HAYANO K, et al. True triaxial apparatuses with two rigid boundaries[C]// Proceedings of the Sessions of the Geo-Frontiers 2005 Congress, Austin, 2005.
- [8] 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. (in Chinese))
- [9] 罗爱忠. 新型真三轴仪调试及重塑黄土强度变形特性的试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008. (LUO Ai-zhong. Debugging of a new true triaxial apparatus and experimental study on the strength and deformation characteristics of remold loess[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008. (in Chinese))