

DOI: 10.11779/CJGE201908005

# 刚柔混合型大型真三轴仪研制与验证

邵生俊<sup>1, 2</sup>, 王永鑫<sup>1</sup>

(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:** 真三轴仪是研究三维主应力作用下土的变形强度变化规律的关键设备, 同时也是岩土力学理论研究的试验仪。在西安理工大学已经开发的竖向刚性、水平面内正交两向柔性真三轴加载机构的基础上, 将自主研发的试样尺寸分别为 70 mm×70 mm×70 mm 和 70 mm×70 mm×140 mm 小型真三轴仪进一步开发为上、下端伺服控制同步加载的 300 mm×300 mm×600 mm 大型真三轴仪。该真三轴仪包括压力室主机架, 竖向主应力加载伺服控制液压油源, 水平面内主应力加载伺服控制液压体变控制器, 试样孔隙水压力伺服控制液压控制器, 以及伺服控制和信号采集控制系统。压力室加载机构具有沿竖向轴水平面内转动、径向滚动和液压驱动伸缩运动的隔板, 有效地隔离了相邻柔性液压囊; 具有上下端对称变形的液压缸加载刚性顶板和底座和侧面对称作用分布压力特征。真三轴仪研制中分别采用特殊构造的乳胶膜和装样模以及轴-板滚动结构和 PID 闭环控制优化算法, 解决了试样尺寸增大带来的试样制备和安装、试验操作、边界影响等问题, 水平面内正交两向柔性加载腔互相干扰的问题, 以及自动控制系统的稳定性问题。最后利用大型真三轴仪对重塑黄土进行了等  $b$  试验验证, 其应力-应变特性、抗剪强度特性得到了一致的结果。

**关键词:** 大型真三轴仪; 柔性加载腔; 围压隔离平衡装置; PID 闭环控制算法; 重塑黄土

**中图分类号:** TU413

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2019)08-1418-09

**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、黄土动力学等的研究工作。E-mail: sjshao@xaut.edu.cn。

## Development and verification of large-scale true triaxial apparatus with rigid-flexible-flexible loading boundary mechanism

SHAO Sheng-Jun<sup>1, 2</sup>, WANG Yong-xin<sup>1</sup>

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

**Abstract:** The true triaxial apparatus is the key equipment to study the variation laws of the deformation strength of soils under the action of three-dimensional principal stress. It is also a test instrument for theoretical study of geotechnical mechanics. On the basis of vertical rigid and horizontal orthogonal two-direction flexible triaxis loading equipment developed by Xi'an University of Technology, the self-developed small true triaxis instruments with sample sizes of 70 mm×70 mm×70 mm and 70 mm×70 mm×140 mm are further developed into a large one with 300 mm×300 mm×600 mm with both upper and lower servo-controlled synchronous loading. The true triaxis instrument includes the main frame of the pressure chamber, vertical main stress loading servo-control hydraulic oil source, main stress loading servo-control hydraulic variable controller in the horizontal plane, sample pore water pressure servo-control hydraulic controller, and the servo-control and signal acquisition and control system. The loading equipment of the pressure chamber has a baffle with horizontal rotation along the vertical axis, radial rolling and expansion movement under hydraulic driving, which effectively separates the adjacent flexible hydraulic bag. In the development of the true triaxis instrument, special structure latex film and sample mold, axial plate rolling structure and PID-closed control optimization algorithm are used to solve the problem of sample preparation and installation, test operation, boundary influence and so on. The problems of the interference of the orthogonal two-direction flexible loading cavity in horizontal plane as well as the stability of the dynamic control system are solved. Finally, the large-scale true triaxis apparatus is used to verify the tests on remolded loess under the same value of  $b$ . The stress-strain characteristics and shear strength of the remolded loess are consistent.

**Key words:** large-scale true triaxial apparatus; flexible loading cavity; isolating balance device; PID-closed control algorithm; remolded loess

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41272320, 11572245)

收稿日期: 2018-06-11



## 0 引言

土材料变形特性和力学特性的试验研究是建立本构模型的基础,同时也是指导岩土工程设计和施工的理论依据。传统常规三轴试验应用最广,但其应力路径比较单一,且未能考虑中主应力的影响<sup>[1-2]</sup>。为了模拟3个主应力方向荷载的独立控制,1936年瑞典的Kjellman等<sup>[3]</sup>研发了适用于砂土的真三轴试验仪,但直到1960年真三轴仪器的研发和利用才发展起来<sup>[4-10]</sup>,成为土工试验变形和强度特性研究的一个重点。按照真三轴仪的边界条件分类,归纳起来主要有3种:应变控制的全刚性边界、应力控制的全柔性边界、复合控制的刚性和柔性边界,3种边界条件各有自己的优势和不足<sup>[11]</sup>。按照试样外形和尺寸上进行分类,经过了小型、中型、大型的研发发展<sup>[12-14]</sup>。此外,也可按照试验功能、研究对象和特殊的工程要求进行分类。

国内外大型真三轴仪的研发利用和研究成果相对较少。施维成等采用120 mm×60 mm×120 mm的中型真三轴仪研究了 $p$ ,  $q$ ,  $\theta_\phi$ 单独变化对粗粒土变形特性的影响<sup>[12]</sup>; Anhdan等采用高精度局部测量技术对土工材料各向异性、时间效应、循环加卸载等特性进行了研究<sup>[14]</sup>;周跃峰结合微摩阻加载技术开展了砂砾石料的抗剪强度研究<sup>[15]</sup>; Alshibli等进行了不同中主应力影响下的砂土试验并揭示了剪切带的形成规律及破坏模式<sup>[16]</sup>; Choi等在241 mm立方体试样上进行了排水、不排水剪切试验,分析了砂砾石的变形强度特性<sup>[17]</sup>。

在西安理工大学自主研发的小型真三轴仪的基础上,发展了大型真三轴仪。随着试样尺寸的增大,试样的制备和安装、试验技巧、端部摩擦以及边界影响等问题凸显了出来。本文首先针对这些存在的问题进行了优化改造与总结。在程序控制方面介绍了PID控制参数<sup>[18-19]</sup>对试验结果的重要性并给出了参考值。其次,在调试完善的基础上利用大、小真三轴对重塑黄

土进行了同一应力路径下的固结排水试验,并对试验结果进行了讨论。

## 1 大型真三轴仪 XAUT-300 仪器介绍

岩土工程需要解决的问题越来越复杂,考虑的综合因素也越来越多,常规尺寸下的固结仪、直剪仪、三轴仪、平面应变仪以及较小尺寸真三轴仪已经远远不能满足工程的需要。因此,在西安理工大学自主研发的小型真三轴仪方样(70 mm×70 mm×70 mm)、长方体样(70 mm×70 mm×140 mm)的研究基础上,发展了大型真三轴仪(300 mm×300 mm×600 mm),加载控制方式都采用轴向刚性、侧向柔性的混合边界条件。大型真三轴仪研发用于高围压、大粒径的土工材料试验研究,研究对象可以是黏土、粗粒料、混凝土,还可以用来模拟一些简单结构单元在土体中的受力状态。如图1,2所示:该仪器包括主机部分,液压加载机构,同步数据采集与处理的控制系统。解决了由于试样尺寸增大带来的试样的制备和安装、端部摩擦以及边界影响等问题。3个主应力方向6个加载面可独立施加荷载,实现了真正意义上的真三维应力条件,可以进行各种复杂应力路径的试验。

### 1.1 刚-柔-柔复合型边界条件

图2中,轴向加压系统采用双向加载的方式,轴向变形为上、下油缸走的行程,最大可施加6 MPa的荷载。设置接触时,首先将下油缸与试样接触,轴向下荷载( $\sigma_{l, down}$ )接触压力应该等于试样及试样帽、加载板等的自重,轴向上荷载( $\sigma_{l, up}$ )接触预压力可设置为10 kPa左右。与以往单向加载方式相比,解决了试样由于荷载分布不均匀造成的试样几何中心和重心不重合的问题。

在图3中,轴向由刚性承载板传递荷载,侧向采用一室四腔的柔性液压囊提供水压,柔性边界可以和试样接触面完美贴合,测得的变形准确且压力容易控制。如图4,柔性液压囊与试样等高(600 mm),靠

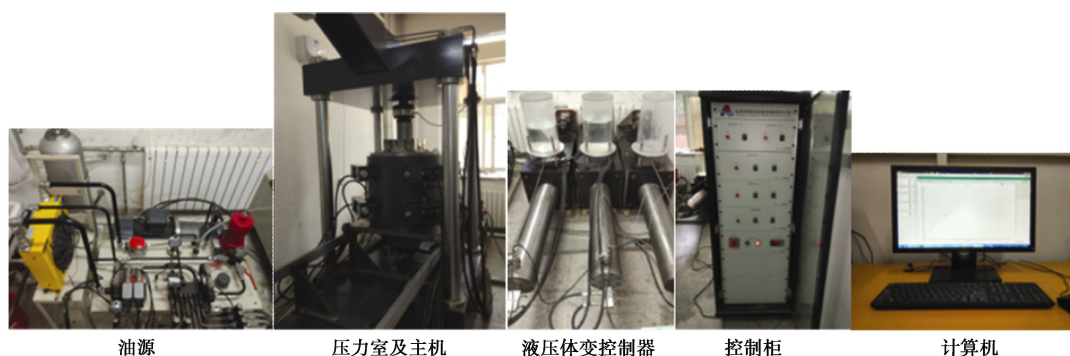


图1 大型真三轴仪组成

Fig. 1 Large-scale true triaxial apparatus

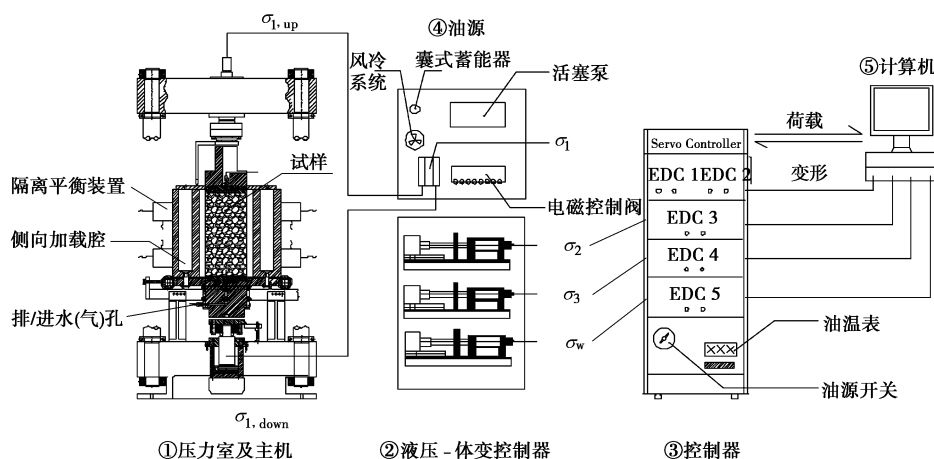


图2 大型真三轴仪结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of structure of large-scale true triaxial apparatus

近试样一侧与试样等宽 (300 mm), 宽度为 62.5 mm, 可以满足试样足够大的膨胀变形。由液压囊侧壁导出连接管与侧向加载系统联通, 通过楔形不锈钢块固定在压力室内侧。围压隔离平衡装置的隔离板不仅可以对试样起到固定作用, 还能保证两侧的加载腔不会互相干扰, 并保证棱边受力平衡。

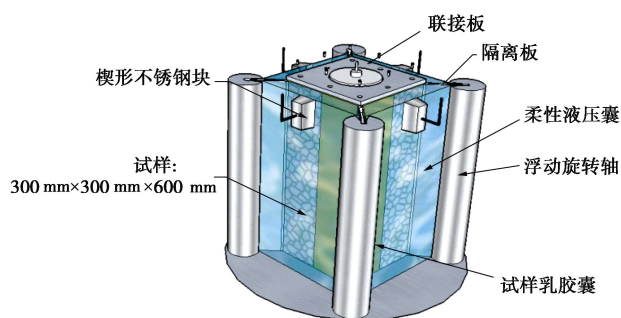


图3 压力室内部结构图

Fig. 3 Structure diagram of pressure chamber

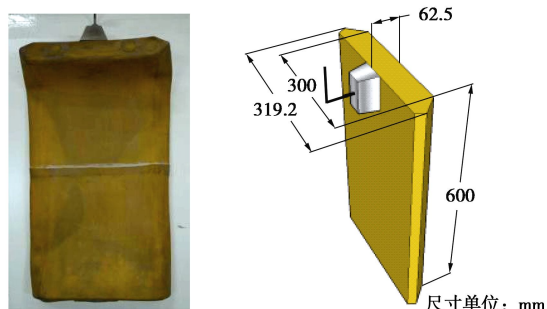


图4 柔性液压囊

Fig. 4 Flexible hydraulic rubber bag

#### (1) 接触摩擦和减阻措施

试样外装样的囊和液压囊为同种材料的乳胶囊, 在试验过程中会产生一定的滑动摩擦, 影响大主应力方向力的传递。通常在接触面涂抹滑石粉可以起到很好的减阻作用, 但由于乳胶囊之间摩擦系数较大, 减阻效果不是很好, 通过在接触面增加一块不同材料且表面光滑的减阻垫, 结合滑石粉的辅助作用, 可以有

效地减小试样和柔性边界的摩擦。

#### (2) 侧向变形量标定

柔性液压囊安放在侧向加载腔中, 由于空间受限, 而且为了能够承受较大的围压, 乳胶囊壁厚较大, 因此在安放过程中局部容易有褶皱, 不能根据胶囊的容积判定注水是否完成, 实际注水量大打折扣。

侧向加载系统通过伺服电机向 4 个柔性囊中注水提供荷载, 侧向变形由注入水的体积确定。首先在向囊内注水前要先对其抽气形成一定的负压  $p$ , 因为如果囊内有残留的气泡会对荷载的准确性和稳定性产生较大误差; 然后开始向囊内注水并实时记录侧向荷载和注水量, 是否注满的标准可以通过压力传感器反馈的压力值确定, 但考虑到囊产生褶皱后需要一定的压力才能使其完全舒展开, 因此并不能认为传感器压力为零即为注满判断标准, 为了找到这个压力阈值需要一直注水, 但其注水量并不能计入固结变形, 因此需要通过加卸载对其做出标定。

由图 5 可知,  $O-A-B$  加载过程中注水量 - 压力在  $A$  点出现明显转折点, 因此可以将  $A$  点对应的荷载作为压力阈值, 固结变形的起点平移到  $A$  点, 认为侧向压力在达到压力阈值前产生的变形很小, 即,  $OA$  段在  $x$  轴上对应的变形量不计入固结变形,  $AB$  段在  $x$  轴上对应的弹塑性变形即为在  $B$  处荷载下的弹性应变和塑性应变之和。分级固结阶段在每一级荷载下固结曲线可分为加载段和平稳段, 加载段弹性和塑性变形发展几乎是同时发生的, 没有明显的屈服点; 平稳段为塑性变形。加载阶段和分级固结阶段并没有在卸载点 (即  $B$  点) 重合, 这是因为在分级固结阶段土体在每一级荷载下体变已基本达到稳定, 由于强化作用, 土单元进入新的应力状态。

#### 1.2 围压隔离平衡装置

刚+柔+柔复合型的加载方式存在的一个问题就



是如何能够很好地控制侧向 4 个柔性液压囊加载腔的相互独立, 使其在加载过程中不会互相干扰。围压隔离平衡装置很好地解决了这个问题, 并且隔离板可以随着试样的变形和变位伸缩自如、自由转动。

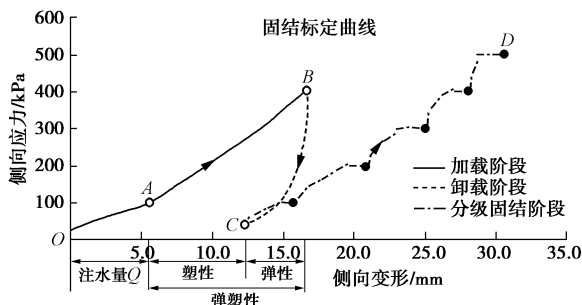
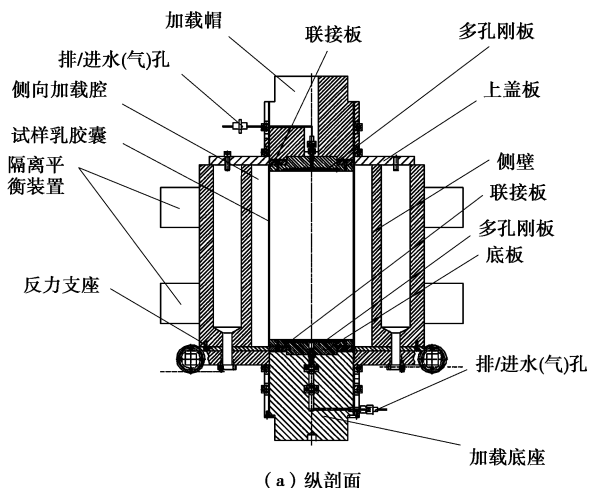


图 5 加卸载试验对侧向变形量的标定

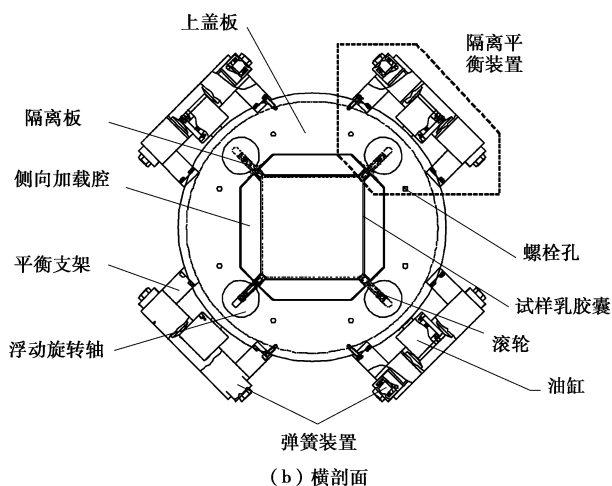
Fig. 5 Calibration of lateral deformation by loading and unloading experiments

小型真三轴仪试样尺寸较小, 通过在 4 个棱角处设置弹簧式隔板来隔离侧向压力腔, 对试样起到了很好的固定作用和隔离压力腔的效果。利用该装置这一特点和优势, 在大型真三轴仪上同样设计了围压隔离平衡装置, 将机械式弹簧用液压油缸来代替提供对隔离板的约束, 如图 6 (a) 所示。该装置通过平衡支架固定在压力室侧壁上, 围压隔离平衡装置内设置有油缸、竖向旋转轴及水平面内隔离板板组成, 如图 6 (b) 所示。特殊的结构设计可以控制隔离板前后伸缩以及小角度旋转, 如图 6 (b) 所示。

如图 6, 7 所示, 4 组 8 个小油缸由油源提供动力, 8 个小油缸的进油管 and 回油管由阀块导出形成一个闭合的回路。在油缸进油管设置液压阀开关控制流量大小, 从而控制隔离板径向运动位移, 保证 4 个隔离板同时接触试样棱边并均匀受力, 阀块出口连接溢流阀将油缸压力维持在预先设定的固结压力, 保证试样在整个试验过程中棱边受力平衡, 不会发生应力集中现象导致试样棱角首先发生破坏, 继而导致试验失败。



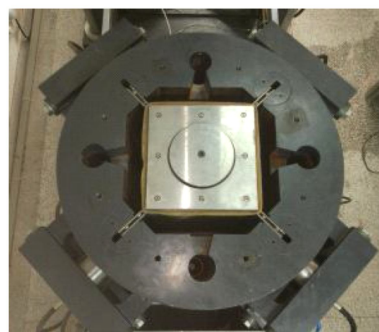
(a) 纵剖面



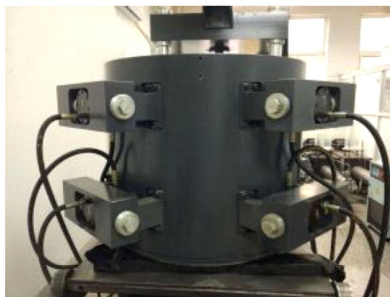
(b) 横剖面

图 6 压力室围压隔离平衡装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of confining pressure-isolating balance devices



(a) 俯视图



(b) 侧视图

图 7 压力室侧压腔及围压隔离平衡装置

Fig. 7 Physical map of confining pressure-isolating balance devices

围压隔离平衡装置是试验成功与否的关键, 一方面起到固定试样的作用, 试样不会偏心受压; 另一方面, 隔离压力腔, 保证水平面内正交双向的液压囊独立施加液压, 不会互相产生干扰。

### 1.3 PID 闭环控制系统

同步数据采集与处理的控制系统使用 PID 算法, 基于调整输出信号 (比例项 P、积分项 I 和微分项 D) 以达到目标命令值:

$$o(x) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

式中  $K_p$  为比例系数,  $T_I$  为积分时间常量,  $T_D$  为微分时间常量, 分别对应参数项 P, I, D 均为量纲为 1 的参数。

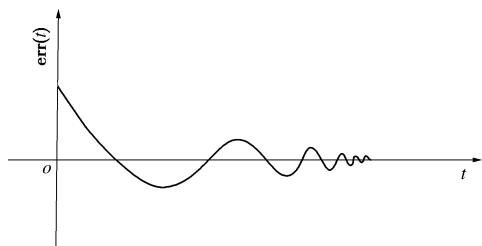


图 8 偏差曲线示意图

Fig. 8 Schematic diagram of deviation curve

位置 PID 参数和荷载 PID 参数选取遵循的控制算法一致, 即都存在一个实际值  $A$  到目标值  $B$  的过渡问题。如图 8 所示, 偏差项  $err(t)=B-A$ , PID 调整的目的就是最小化这种差异。反馈的速度和反馈过程中的超调量由 3 个控制参数决定: 比例控制系数  $K_p$  对系统的响应速度会有影响,  $K_p$  值较大, 达到目标值的速度快, 但在接近设定值时系统会产生比较大的震荡; 理想状态下偏差项为零, 但在震荡作用下会产生正、负超调量, 积分控制部分的作用主要是用来消除系统的稳态误差, 使其积分面积为零; 而微分的作用是改善系统的动态特性, 在响应过程中抑制偏差向任何方向的变化, 对偏差变化进行提前预报。

对于获得期望的应力和应变关系曲线, PID 参数的调控很重要。参数的选取除了与传感器响应时间、处理器速度等有关, 还依赖于材料本身的性质和应力历史。为了找到在该控制程序中 PID 系数的参考值, 利用 Zigler Nichols 调谐法增加比例项 P 直到设定的变量(应力或应变)围绕目标值连续循环。然后使用该震荡的周期来确定 I 和 D 系数的适当值。利用该方法, 得到了一定含水率和干密度的重塑黄土的 3 个主应力方向应力和应变的 PID 参数, 如表 1。

表 1 PID 参数参考值

Table 1 Reference values of PID parameters				
控制参数		P	I	D
应变	$\varepsilon_{1, up}$	30~40	0~2	0~1
	$\varepsilon_{1, down}$	50~70	1~3	0~1
	$\varepsilon_2$	385~410	0~2	0~1
	$\varepsilon_3$	230~275	0~2	0~2
应力	$\sigma_{1, up}$	90~120	0~2	0~1
	$\sigma_{1, down}$	60~80	1~3	0~1
	$\sigma_2$	5~20	5~15	0~2
	$\sigma_3$	10~30	15~25	0~2

2 试验过程

本次试验所用土样取自陕西省西安市南郊公园南路某工地现场, 其土性指标见表 2。

表 2 土性指标

Table 2 Parameters of soils					
颗粒相对密度 $G_s$	天然含水率 $w/\%$	干密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	初始孔隙比 $e_0$
2.7	13.2~15.8	1.25	31.7	20.6	1.20

2.1 试样制备及安装

试样可以直接在操作台制备, 避免了试样移动过程中的扰动, 也有利于试样的安装。

制样时, 重塑黄土土样控制含水率在  $12\% \pm 0.5\%$  范围内, 干密度为  $1.30 g/cm^3$ 。按照 ASTM 标准分 6 层夯实在一个预先套有乳胶囊(厚度为 3.5 mm)的成样模中(图 9 (a)), 为了保证试样的平整度, 成样模和乳胶囊抽真空贴合。

试样制备完毕后(图 9 (b)), 将试样移到压力室内并通过隔离平衡装置中的隔离板将其固定(图 9 (c))。依次安置 4 个柔性液压囊, 并做好减阻措施。然后, 通过起吊装置及架设在导轨上两辆小车的配合, 完成压力室的封闭。将侧向加载系统与柔性液压囊连通(图 9 (d))。最后, 连接外部控制系统(图 9 (e))。

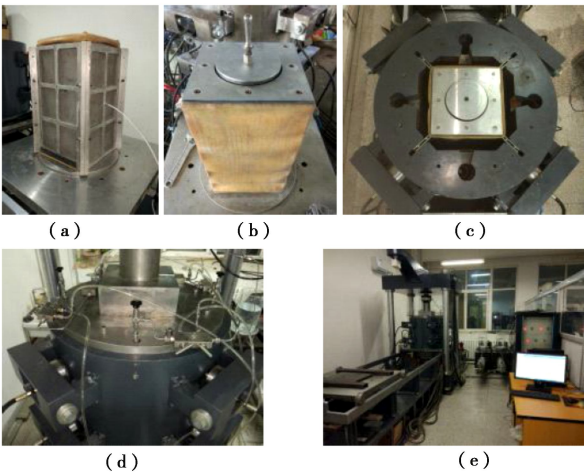


图 9 试样制备及安装

Fig. 9 Preparation and installation of samples

2.2 试验过程

(1) 试验前准备

在进行试验之前, 需要先将侧向液压囊内气体排尽, 利用侧向液压加载装置先将液压囊抽真空, 如图 10, 关闭液压囊上的止水阀门, 然后注水, 将 2 个闭合通道内的气体排出, 最后打开止水阀, 开始注水, 并记录注水量。

(2) 固结

固结前, 打开试样底部的排水阀, 先固定试样竖向的加载刚性板, 然后通过柔性液压囊施加水平向的接触预压力。设置固结围压为 500 kPa, 分级加载量 100 kPa, 每级荷载下固结稳定时间为 3 h, 固结稳定

标准为每小时固结变形量小于 0.01 mm。

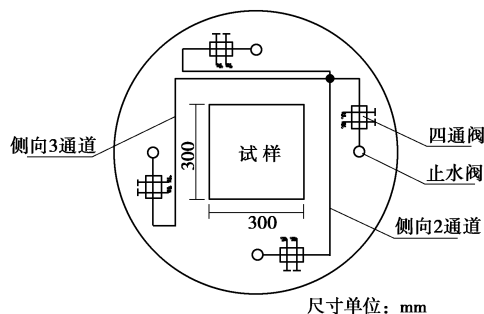


图 10 侧向注水回路示意图

Fig. 10 Schematic diagram of lateral water injection route

### (3) 剪切

对于等  $b$  值加载试验, 在初始固结应力 ( $\sigma_{1c}$ ,  $\sigma_{2c}$ ,  $\sigma_{3c}$ ) 的基础上, 随着  $\sigma_1$  的增大,  $\sigma_3$  保持不变,  $\sigma_2$  亦在变化。

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \quad (2)$$

即  $\sigma_2 = b(\sigma_1 - \sigma_3) + \sigma_3$ ,  $(3)$   
 式中,  $b$  和  $\sigma_3$  为输入值,  $\sigma_1$  为量测值。

当竖向应变达到 15% 时, 结束试验。

## 3 试验验证

试验开始前完成了对位移传感器、压力传感器的标定, 在这里不再赘述。首先, 在改造的真三轴仪上采用应力控制和应变控制两种剪切加载方式对程序进行了调试。然后分别在试样尺寸为 70 mm × 70 mm × 140 mm 和 300 mm × 300 mm × 600 mm 的真三轴仪上, 对重塑黄土进行一系列控制相同含水率和干密度下不同中主应力参数的等  $b$  试验, 剪切过程在固结排水条件下进行, 剪切方式为应变控制, 应变速率为 0.05 mm/min。其应力路径如图 11 所示。

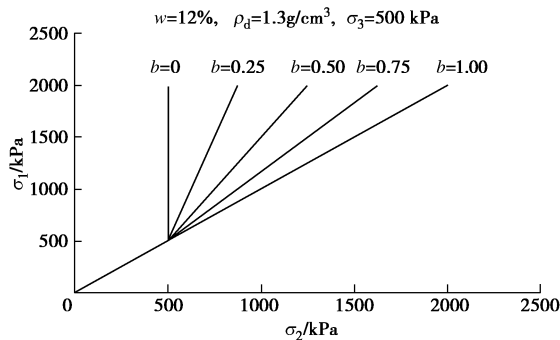


图 11 应力路径

Fig. 11 Stress paths

### 3.1 应力控制和应变控制

对重塑黄土分别进行了应力控制和应变控制条件

下的剪切试验 ( $b=0$ ,  $\sigma_3=50$  kPa), 如图 12, 13, 来验证控制程序的稳定性及功能的完善。在应力控制条件下, 分级加载量为 10 kPa, 分级加载稳定标准为 0.01 mm/min; 在应变控制条件下, 加载速度为 0.2 mm/min。

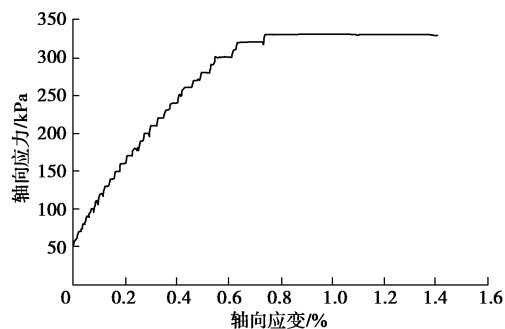


图 12 重塑黄土应力控制下的变形曲线( $b=0$ )

Fig. 12 Stress-strain characteristics of remolded loess under stress control ( $b=0$ )

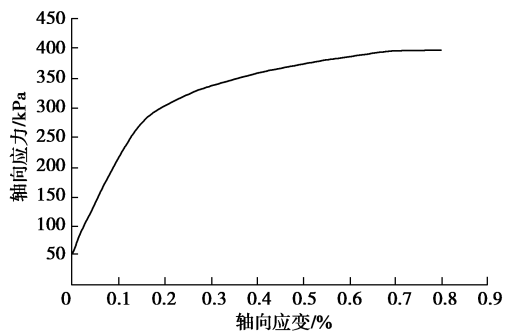


图 13 重塑黄土应变控制下的变形曲线( $b=0$ )

Fig. 13 Stress-strain characteristics of remolded loess under strain control ( $b=0$ )

在两种剪切控制模式下, 重塑黄土的应力应变特性均表现出明显的弹塑性变形特性, 为弱硬化型。应力控制条件下得到的重塑黄土剪切强度偏低, 这与塑性功耗散随荷载作用时间有很大关联。在低围压下, 应变控制模式下曲线近似为光滑的双曲线, 应力控制模式下在每级荷载下会产生塑性变形, 变形曲线为阶梯状, 随着荷载的增加, 每级荷载下所需的变形稳定时间也会增长, 直至在某级荷载下应变持续增长, 认为土体发生破坏。

### 3.2 试验结果

#### (1) 大、小真三轴不同 $b$ 值下试验结果对比

对改进的真三轴仪进行了重塑黄土的力学特性及变形强度特性的验证分析, 与小三轴试验结果对比,  $q - \varepsilon_s - \varepsilon_v$  变化规律性一致。个别试验结果差异主要由人为操作或仪器本身造成的, 此外, 由于小三轴试验仪侧向液压囊可承受的水压有限, 围压较大时, 尤其是在  $b$  值较大时, 施加的中主应力压力过大, 容易造成液压囊漏水, 导致试验提前失败。由图 14~18 可以看出, 虽然试样高宽比一样 ( $H/B=14/7=60/30=2$ ),

但小三轴试样由于尺寸较小, 剪切过程受边界约束较强, 在高围压的应力路径下, 试验结果会产生误差, 剪切后期随着中主应力的增大误差会更大。

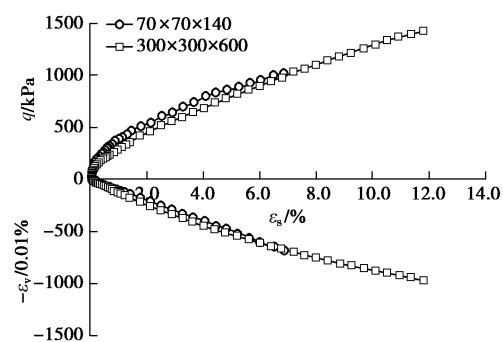


图 14  $q - \varepsilon_s - \varepsilon_v$  关系曲线( $b=0$ )

Fig. 14 Contrast of stress-strain curves at  $b=0$

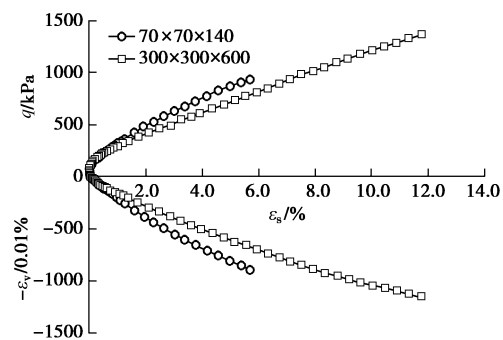


图 15  $q - \varepsilon_s - \varepsilon_v$  关系曲线( $b=0.25$ )

Fig. 15 Contrast of stress-strain curves at  $b=0.25$

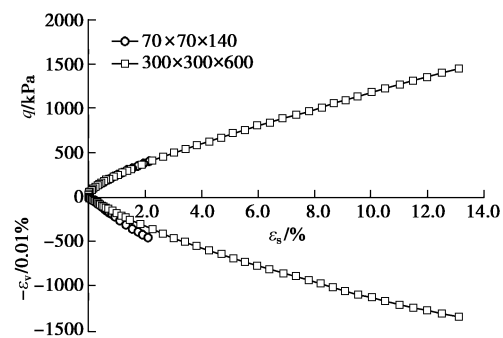


图 16  $q - \varepsilon_s - \varepsilon_v$  关系曲线( $b=0.5$ )

Fig. 16 Contrast of stress-strain curves at  $b=0.5$

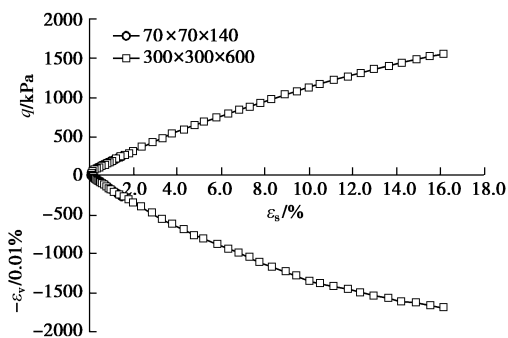


图 17  $q - \varepsilon_s - \varepsilon_v$  关系曲线( $b=0.75$ )

Fig. 17 Contrast of stress-strain curves at  $b=0.75$

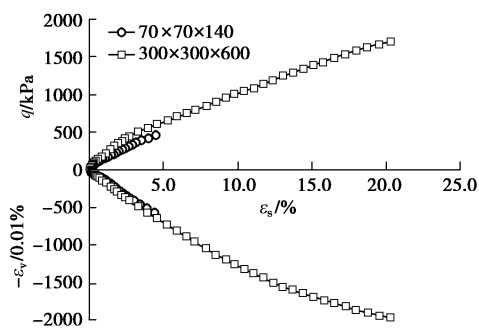


图 18  $q - \varepsilon_s - \varepsilon_v$  关系曲线( $b=1$ )

Fig. 18 Contrast of stress-strain curves at  $b=1$

## (2) 大三轴不同 $b$ 值下试验结果对比

图 19 为广义剪应力  $q$  同轴向应变  $\varepsilon_1$  在不同应力路径下的关系曲线。图 19 中, 随着荷载的增大, 屈服点在不断提, 应力应变特性表现为硬化性, 取最大主应变为 15% 时对应的强度为不同中主应力影响下的抗剪强度。在  $\varepsilon_1 - q$  关系曲线中, 随着  $b$  值的增大, 土的抗剪强度提高。

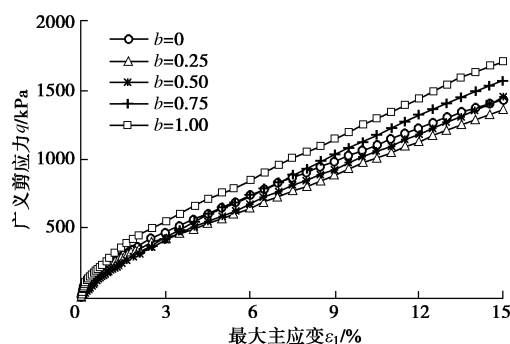


图 19 不同  $b$  值下  $q - \varepsilon_1$  关系曲线

Fig. 19 Relationship between deviatoric stress and major principal strain under different values of  $b$

图 20, 21 为偏应力比  $q/p$  同剪应变的关系近似双曲线关系,  $q/p - \varepsilon_s$  变化规律比较明显, 随着剪应变增大, 偏应力比变化趋于平缓。随着中主应力参数的增加, 偏应力比达到稳定的值降低, 表明土单元在该应力状态下所能发挥的最大强度减弱。剪切过程中平均球应力除了对体变有影响, 对剪应变也会有影响。同样, 在  $\varepsilon_v - \varepsilon_s$  关系曲线中,  $\varepsilon_v$  一直为正值, 以压缩为主, 随着剪应变的增大体应变增大。随着中主应力参数的提高, 体应变增量显著增加。

图 22, 23 为中主应变和最小主应变 ( $\varepsilon_2, \varepsilon_3$ ) 与最大主应变 ( $\varepsilon_1$ ) 在 Lode 角变化范围  $-30^\circ \sim 30^\circ$  内的曲线, 图中实心的数据点对应试样发生剪切破坏时的点。中主应变和小主应变与大主应变的关系曲线都是非线性的。在等  $b$  等  $\sigma_3$  应力路径下, 小主应变均表现为膨胀, 随着  $b$  值的增大, 膨胀速率增大。中主应变的变化依赖于中主应力的影响, 当  $b=0$ , 即  $\sigma_2 = \sigma_3$  时, 由于在水平面上土体各向同性, 所以中主应变的变化



同小主应变相同; 当  $b \geq 0.25$  时, 中主应变表现为压缩, 且随着  $b$  值得增大, 压缩速率增大。

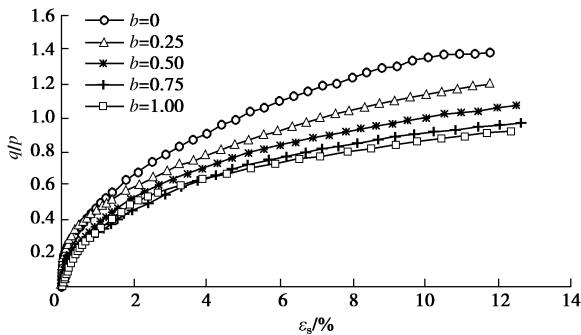


图 20 不同  $b$  值下  $q/p - \varepsilon_s$  关系曲线

Fig. 20 Relationship between deviatoric stress ratio and shear strain under different values of  $b$

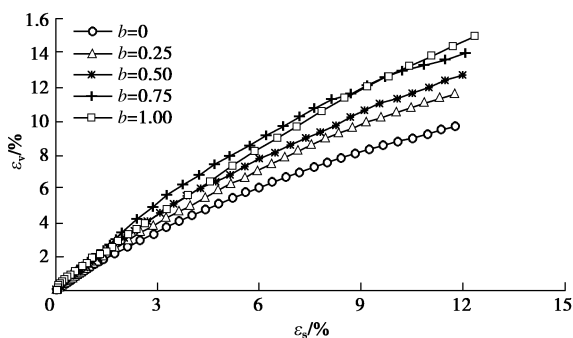


图 21 不同  $b$  值下  $\varepsilon_v - \varepsilon_s$  关系曲线

Fig. 21 Relationship between volumetric strain and shear strain under different values of  $b$

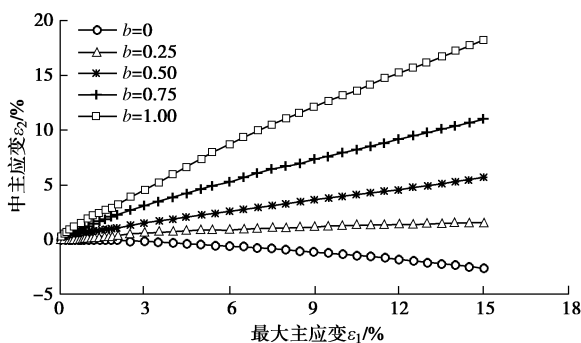


图 22 不同  $b$  值下  $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$  关系曲线

Fig. 22 Relationship between principal strains under different values of  $b$

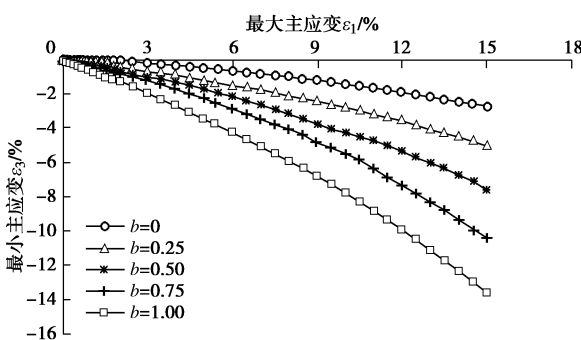


图 23 不同  $b$  值下  $\varepsilon_3 - \varepsilon_1$  关系曲线

Fig. 23 Relationship between principal strains under different values of  $b$

## 4 结 论

(1) 试样尺寸增大一方面扩大了土粒径的变化范围, 可适用于粗粒土试验, 另一方面, 改进了试样边界条件的影响。然而, 大尺寸试样制备、安装和加载试验又增大了难度, 且对仪器实现功能是一个巨大的挑战。

(2) 围压隔离平衡装置由 8 个液压油缸提供驱动力, 使其沿径向随试样变形自由伸缩, 弹性约束限位使其在水平面内小角度转动。压力室沿正交向设置隔离板, 形成了一室四腔机构, 每个腔放置液压囊柔性加载。隔离板上、下端和左、右面安装滚动轴承, 可保证竖直、均匀沿径向位移运动, 克服摩擦阻力。

(3) 试样竖向闭环伺服液压活塞刚性加载, 正交侧向闭环伺服液囊加载。试样孔隙水压力或排水闭环伺服液压控制。

(4) 采用 PID 闭环控制算法优化了自动控制系统的稳定性问题。对于获得期望的应力和应变关系曲线, PID 参数的调控很重要。参数的选取除了与传感器响应时间、处理器速度等有关, 还依赖于材料本身的性质和应力历史。

(5) 大、小重塑黄土试样同一应力路径下的固结排水真三轴试验结果表明, 变形特性和强度特性得到了近似一致的变化规律; 大型真三轴仪三个主应力可独立闭环控制施加荷载, 实现了三维应力空间不同应力路径的真三轴剪切试验, 初步验证了研制的大型真三轴试验仪。

## 参考文献:

- [1] 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. (YIN Zong-ze, ZHU Jun-gao. Improvement of true triaxial apparatus[C]// Proceedings of 1<sup>st</sup> National Conference on Geotechnical Constitutive Theory. Beijing, 2008. (in Chinese))
- [2] 俞茂宏, 咎月稳, 范文, 等. 20 世纪岩石强度理论的发展——纪念 Mohr-Coulomb 强度理论 100 周年[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 545 - 550. (YU Mao-hong, ZAN Yue-wen, FAN Wen, et al. Advances in strength theory of rock in 20 century: 100 years in memory of the Mohr-Coulomb strength theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 545 - 550. (in Chinese))
- [3] KJELLMAN W. Report on an apparatus for consummate investigation of the mechanical properties[C]// Proceedings of the 1st International Conference on Soil Mechanics and

- Foundation Engineering. Cambridge, 1936.
- [4] HAMBLEY E C. A new true triaxial apparatus[J]. *Géotechnique*, 1969, **19**(2): 307 – 309.
- [5] GREEN G E. Strength and deformation of sand measured in an independent stress control cell[C]// *Proceedings of the Roscoe Memorial Symposium*. London, 1971.
- [6] 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))
- [7] 邵生俊, 许 萍, 邵 帅, 等. 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[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(9): 1575 – 1582. (SHAO Sheng-jun, XU Ping, SHAO Shuai, et al. 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[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(9): 1575 – 1582. (in Chinese))
- [8] SHAO S, WANG Q, LUO A, et al. True triaxial apparatus with rigid-flexible-flexible boundary and remolded loess testing[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2017, **45**(3): 1 – 10.
- [9] PRASHANT A, PENUMADU D. Effect of intermediate principal stress on overconsolidated kaolin clay[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2004, **130**(3): 284 – 292.
- [10] 叶冠林, 盛佳韧, 武朝军, 等. 自动控制真三轴仪的研制及验证[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(3): 380 – 385. (YE Guan-lin, SHENG Jia-ren, WU Chao-jun, et al. Design and verification of automatic true triaxial apparatus[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(3): 380 – 385. (in Chinese))
- [11] 殷建华, 周万欢, KUMRUZZAMAN M D, 等. 新型混合边界真三轴仪加载装置及岩土材料试验结果[J]. *岩土工程学报*, 2010, **32**(4): 493 – 499. (YIN Jian-hua, ZHOU Wan-huan, KUMRUZZAMAN M D, et al. New mixed boundary true triaxial loading device for testing study on 3-D stress-strain-strength behaviour of geomaterials[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(4): 493 – 499. (in Chinese))
- [12] 施维成, 朱俊高, 代国忠, 等. 球应力和偏应力对粗粒土变形影响的真三轴试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, **37**(5): 776 – 783. (SHI Wei-cheng, ZHU Jun-gao, DAI Guo-zhong, et al. True triaxial tests on influence of spherical and deviatoric stresses on deformation of coarse-grained soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(5): 776 – 783. (in Chinese))
- [13] SHI W C, ZHU J G, CHIU C F, et al. Strength and deformation behaviour of coarse-grained soil by true triaxial tests[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2010, **17**(5): 1095 – 1102.
- [14] ANHDAN L Q, KOSEKI J, HAYANO K, et al. True triaxial apparatuses with two rigid boundaries[C]// *Geo-Frontiers Congress*. Austin, 2005: 1 – 10.
- [15] 周跃峰, 潘家军, 程展林, 等. 基于大型真三轴试验的砂砾石料强度 - 剪胀特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, **36**(11): 2818 – 2825. (ZHOU Yue-feng, PAN Jia-jun, CHENG Zhan-lin, et al. Strength and dilation of sandy gravel material based on large-scale true triaxial tests[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, **36**(11): 2818 – 2825. (in Chinese))
- [16] ALSHIBLI K, WILLIAMS H. A true triaxial apparatus for soil testing with mixed boundary conditions[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2005, **28**(6): 534 – 543.
- [17] CHOI C, ARDUINO P, HARNEY M D. Development of a true triaxial apparatus for sands and gravels[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2008, **31**(1): 32 – 44.
- [18] PENUMADU D, PRASHANT A. Automated flexible boundary true triaxial system for cohesive soils[J]. *Geotechnical Special Publication*, 2005(130).
- [19] MANDEVILLE D, PENUMADU D. True triaxial testing system for clay with proportional-integral-differential control[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2004, **27**(2): 1 – 12.