

DOI: 10.11779/CJGE20231256

# 土的三向刚性真三轴仪研制及验证

邵生俊<sup>1,2</sup>, 王泽驰<sup>1</sup>, 邵帅<sup>1</sup>, 吴昊<sup>1</sup>, 张少英<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:** 中主应力对土的应力应变行为有显著的影响。为了更准确地描述土的应力应变行为, 在土力学领域开展真三轴试验是必要的。介绍了西安理工大学自主研制的一种新型三向刚性真三轴仪, 包括由 4 块底面滚动及侧面滑移刚性板、刚性试样帽和刚性底板构成压力室、三向伺服液压步进电机加载控制系统、计算机与存储智能控制系统、水-气吸力控制系统面板四部分。通过将长方体土样分为真三轴长方体剪切层试样和端部传递层土块, 由端部传递层作用于长方体剪切层传递竖向主应力与侧面滑移刚性板施加作用正交双向主应力, 解决了传统三向刚性板加载互相干扰的技术难题。通过开展重塑黄土和饱和砂土的验证试验, 验证了仪器的合理性, 总结了试样破坏形式及试验误差的原因。该仪器具有操作简单、变形均匀、自动加载智能控制的优点。

**关键词:** 真三轴试验; 三向刚性真三轴仪; 重塑黄土; 应力应变关系

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)05-1107-06

**作者简介:** 邵生俊(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事黄土力学方面的研究工作。E-mail: sjshao@xaut.edu.cn。

## Development and validation of three-way rigid true triaxial apparatus for soils

SHAO Shengjun<sup>1,2</sup>, WANG Zechi<sup>1</sup>, SHAO Shuai<sup>1</sup>, WU Hao<sup>1</sup>, ZHANG Shaoying<sup>1</sup>

(1. Institute of Geotechnical engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. Shaanxi Province Key

Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The intermediate principal stresses have a significant effect on the stress-strain behavior of soils. To describe the stress-strain behavior of soils more accurately, it is necessary to carry out true triaxial tests in the field of soil mechanics. A new three-way rigid loading true triaxial apparatus independently developed by Xi'an University of Technology is introduced, including the pressure chamber composed of four bottom rolling and side sliding rigid plates, a rigid specimen cap and a rigid bottom plate, the three-way servo-hydraulic stepping motor loading control system, the computer and storage intelligent control system, and the water-air suction control system panel. By dividing the rectangular soil samples into true triaxial rectangular shear layer specimens and soil blocks of the transfer layer, transferring the vertical principal stresses through the end of the transfer layer acting on the rectangular shear layer and applying the orthogonally bi-directional principal stresses with the side sliding rigid plate, the technical problem of interference in using the traditional three-way rigid plate loading is solved. Through the verification tests on the remolded loess and saturated sand, the rationality of the apparatus is validated, and the failure mode of the samples and the cause of the test errors are summarized. The proposed apparatus has the advantages of simple operation, uniform deformation and intelligent control of automatic loading.

**Key words:** true triaxial test; three-way rigidly loaded true triaxial apparatus; remodeled loess; stress-strain relationship

## 0 引言

土工试验仪器的研制对推动土力学学科发展有着重要作用。土工真三轴仪可以实现土单元在三维空间中三向主应力独立加载和主应变变量测, 进而研究复杂应力路径下土的强度变形规律。根据真三轴仪加载边界条件, 可归纳为三向柔性加载边界<sup>[1-2]</sup>、刚柔复合性加载边界<sup>[2-8]</sup>和三向刚性加载边界<sup>[9-11]</sup> 3 种加载机构。这些加载边界真三轴仪的优缺点已经在文献中广泛讨论<sup>[12-13]</sup>。刚性边界不能保证施加应力的均匀性, 柔性

边界不能保证施加变形的均匀性。刚柔复合型真三轴仪的试样将要形成破坏面时, 试样变形和破坏可能更加倾向于柔性边界方向, 这使得试样破坏面和破坏形状受到干扰<sup>[9]</sup>。因此, 最适用于研究目的的真三轴仪往往是 6 个柔性边界或 6 个刚性边界的真三轴仪, 边界条件的各向同性没有给出优先的破坏方向, 这更适合实际土体破坏特点。

收稿日期: 2023-12-23

\*通信作者 (E-mail: 315602024@qq.com)

本文阐述了西安理工大学研制的新型三向刚性加载真三轴仪及其构成系统和工作原理。通过开展重塑黄土和饱和砂土的验证试验，验证了仪器的合理性，并对测量误差原因进行了分析。

1 三向刚性真三轴仪

1.1 三向刚性真三轴仪的构成

为解决现有三向刚性真三轴仪存在的加载板运动不同步及互相干扰问题，西安理工大学提出了一种新型三向刚性真三轴仪的研制思路。

新型真三轴仪在技术上应当满足以下要求：①3个主应力方向应能够按照设定路径独立加载并量测应力及应变；②对试验的排水排气条件进行控制并量测孔隙水压力及气压力；③通过计算机与存储智能控制系统实现所有应力信号输入与反馈控制的自动化，以及测量信号的A/D转化和数据的自动采集处理及自动绘制；④剪切过程中试样始终中心受荷，主应力方向应力及变形对称，且三向加载板互不干扰。

三向刚性真三轴仪主要由4块底面滚动及侧面滑移刚性板、刚性试样帽和刚性底板构成压力室、三向伺服液压步进电机加载控制系统、计算机与存储智能控制系统、水-气吸力控制系统面板4部分构成，如图1所示。刚性板表面经过了高质量抛光，并且在试验时的试样表面涂抹水溶性润滑剂并粘贴聚乙烯薄膜，在刚性板表面均匀涂抹凡士林以减少加载产生的切向摩擦。

压力室的4个角处设置方柱，其主要功能在于固定刚性板的滑轨。方柱上配置有限位器，可精确定位顶板和竖向油缸，保证在试验过程中，应力主轴保持固定，不发生偏转。刚性试样帽与水平刚性板均连接加载油缸，加载油缸与伺服油缸连接，可通过计算机控制对试样进行复杂应力路径的加载试验。三向刚性真三轴仪结构示意图如图2所示。

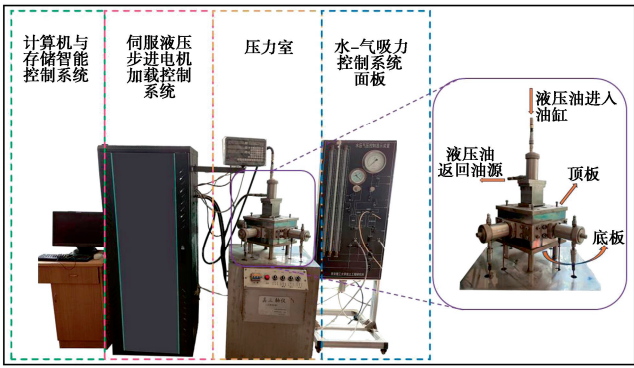


图1 三向刚性真三轴仪

Fig. 1 Three-way rigid true triaxial apparatus

试样尺寸为7 cm×7 cm×18 cm，置于正方形断面的特制橡胶囊内，试样下部嵌入底座中，上部固定在顶板的垫框内。底座下设置有排水通道，刚性试样帽中设置有进水通道和进气通道。试样的排水排气条件可由底座和刚性试样帽连通的阀门控制。

1.2 液压系统加载原理

三向刚性真三轴仪共有5个加载油缸，其中包含两组水平方向的串联加载油缸和一个竖向加载油缸，图3为串联油缸加载原理图。当液压系统密闭无气时，供油量与排油量相等，实现了一个伺服油缸同时驱动两个油缸且变形量相等的功能。顶部油缸在加载时，伺服油缸将液压油推进顶部油缸上部空间，使活塞推动刚性试样帽实现竖向加载。

1.3 压力室及加载原理

本文介绍的三向刚性真三轴仪加载原理，通过将7 cm×7 cm×18 cm的长方体土样分为16 cm高的真三轴长方体剪切层试样和2 cm高的端部传递层土块，由端部传递层作用于长方体剪切层传递竖向主应力与侧面滑移刚性板施加作用正交双向主应力，解决了传统三向刚性板加载互相干扰的技术难题。

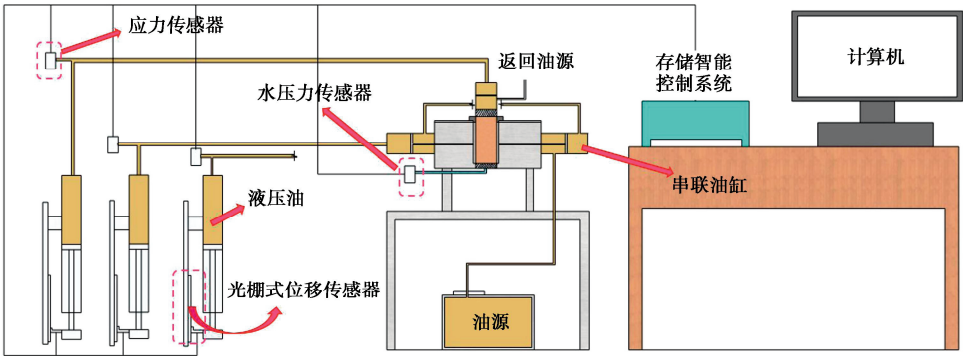


图2 三向刚性真三轴仪结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of structure of three-way rigid true triaxial apparatus

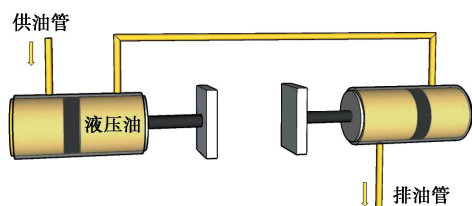
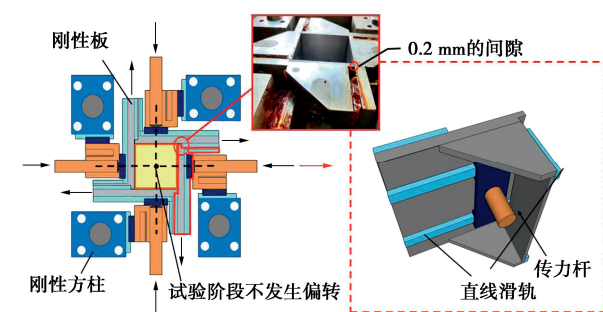


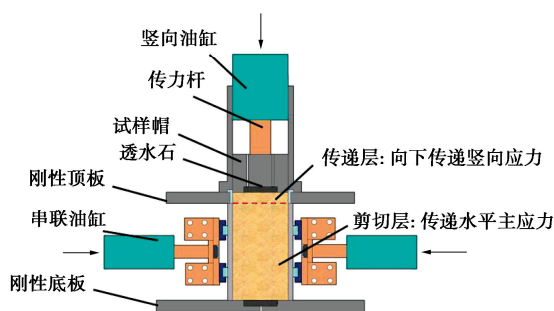
图3 串联油缸原理图

Fig. 3 Schematic diagram of tandem cylinder

图4为三向刚性真三轴仪的水平向和竖向加载原理图。水平加载机构由4块经过高质量抛光的刚性板通过直线滑轨连接围成，通过刚性板底面滚动及侧面滑移实现试验过程中正交的刚性板随试样变形而移动。刚性板采用L型设计，增大了刚性板的刚性，降低了刚性板的挠度。正交的刚性板间有0.2 mm的间隙，间隙中填充润滑油，保证在试验过程中正交的刚性板之间互不干扰，又避免了橡胶囊和土嵌入刚性板间隙的情况发生。



(a) 水平加载原理图



(b) 竖向加载原理图

图4 西安理工大学三向刚性真三轴仪加载原理图

Fig. 4 Schematic diagram of XUT rigid true triaxial apparatus

#### 1.4 量测及计算机存储智能控制系统

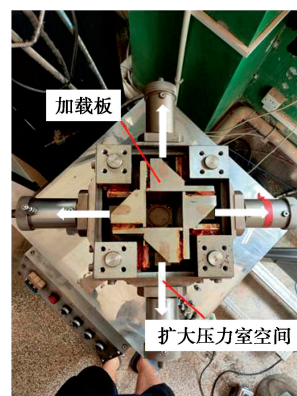
量测系统包括荷载量测、变形量测和孔隙水压力量测。如图2所示，三向主应力和变形均通过3组伺服液压步进电机加载控制系统上设置的压力传感器和光栅位移传感器量测。所使用的压力传感器为WY-802型，量程为0~4 MPa，精度为0.5%FS；光栅位移传感器为GCS898，量程为35.0 mm，精度为

0.005 mm。

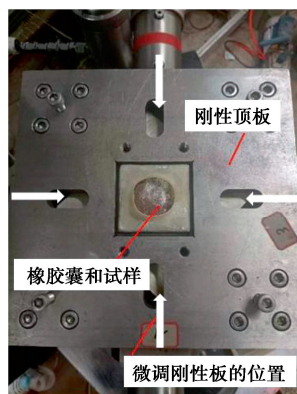
在试验中，高精度传感器将数据输出至控制器，再至计算机，输出信号与计算机设定的试验条件转换的信号闭环负反馈调节，传感器输出信号放大后输入A/D卡中，由计算机实现试验数据的实时采集与存储。控制系统也可在试验中绘制3个主应力方向实时的应力-时间、应变-时间、应力-应变关系曲线，供试验人员观察。

## 2 试验步骤

①安装试样前，先将仪器竖向油缸和顶板卸下，控制水平刚性板向外移动，使压力室空间增大，便于装样，如图5(a)。②将橡胶囊套在装样器内，透水石和试样先后置于囊内。在橡胶囊表面涂抹水溶性润滑剂，然后贴上聚乙烯薄膜，并且在刚性板表面均匀涂抹凡士林，以降低橡胶囊与刚性板间的摩擦效应。③将试样安装在压力室底座中，微调水平向刚性板，使试样与水平刚性板精确接触，安装顶板，见图5(b)。④安装竖向油缸和3个主应力方向的输油管，见图5(c)。⑤设置固结参数后开始固结，完成固结后设置剪切参数后开始剪切，达到变形破坏标准后，试验停止，保存试验数据。

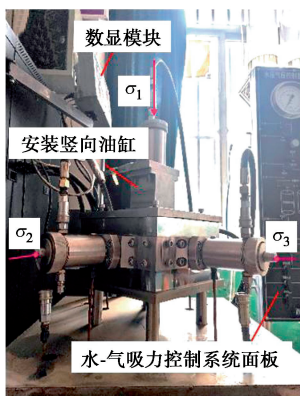


(a)



(b)





(c)

图 5 试验步骤

Fig. 5 Test procedure

### 3 验证试验结果

#### 3.1 重复性试验

试验开始前已完成对位移传感器和压力传感器的标定, 这里就不再详述。利用该仪器进行了 3 组应变控制式重塑黄土真三轴试验, 试样的含水率为 20%, 干密度为  $1.50 \text{ g/cm}^3$ , 加载的固结应力为 50 kPa, 中主应力比  $b$  为 0。如图 6 所示, 3 次试验的应力-应变曲线表现出高度一致性, 显示出仪器的控制精度高、稳定性好的特点。

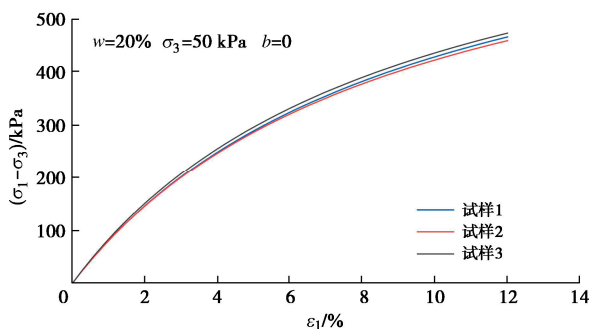


图 6 重复性试验

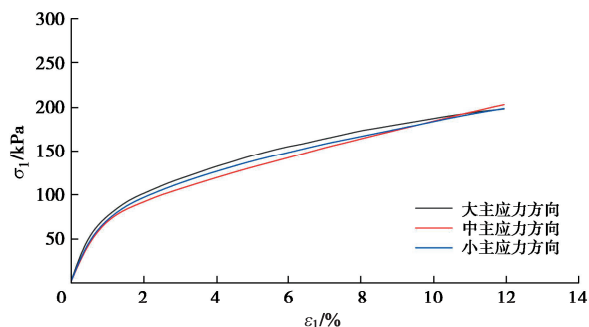
Fig. 6 Repeatability tests

#### 3.2 三向主应力应变关系验证

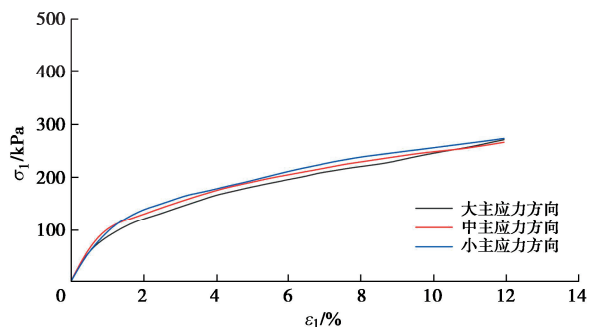
为验证新型真三轴仪的合理性, 进行了重塑黄土和饱和砂土的等向加载试验以及 3 个主应力方向的单轴加载试验。重塑黄土和饱和砂土的等向加载试验得到了 3 个主应力方向的应力应变曲线, 具体见图 7。这些曲线显示出了硬化型的特征, 整体上偏差较小, 且呈现出较强的一致性。

另外, 对重塑黄土和饱和砂土进行了 3 个主应力方向的单轴加载试验, 并得到了相应的应力应变曲线, 如图 8。通过对比, 发现在单轴加载条件下, 3 个主应力方向的曲线偏差很小。这是因为刚性加载所产生的

应力波动相对于柔性液压囊加载更小, 因此数据的离散性也更小。



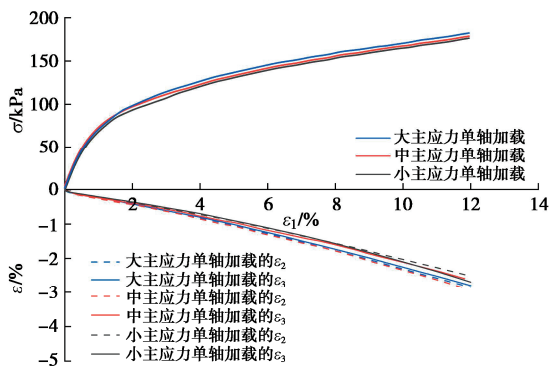
(a) 重塑黄土的等向加载试验



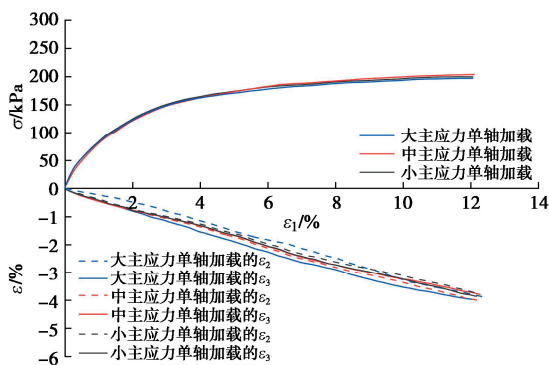
(b) 饱和砂土的等向加载试验

图 7 等向加载试验

Fig. 7 Equidirectional loading tests



(a) 重塑黄土的单轴加载试验



(b) 饱和砂土的单轴加载试验

图 8 单轴加载试验

Fig. 8 Uniaxial loading tests



### 3.3 两种加载边界真三轴仪的对比

图9为三向刚性真三轴仪与刚柔混合型真三轴仪进行相同真三轴试验的对比结果。两种加载边界的真三轴仪的应力应变曲线形状基本一致, 三向刚性真三轴仪的应力应变曲线略高。产生略微不同的应力应变曲线主要是由于它们的加载边界和加载原理的差异所导致的。柔性边界可以在一定程度上缓解约束, 使试样在受力过程中更具有弹性和变形能力。而三向刚性边界中试样所受的约束更为严格, 试样没有优先破坏方向, 从而导致略高的应力值。总体来说, 即使加载边界不同, 试验仍然能够产生相似的结果, 表明这两种边界的真三轴仪在进行土力学性质测试方面具有较高的可比性和准确性。

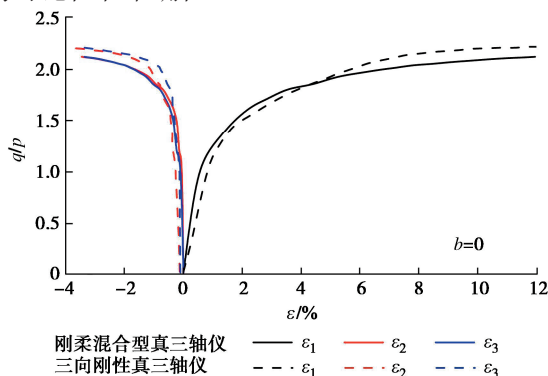
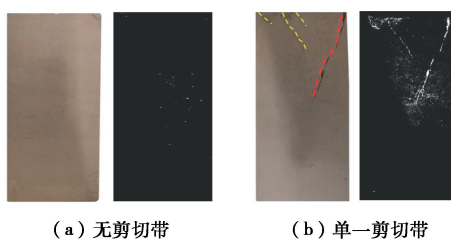


图9 两种加载边界真三轴仪的对比

Fig. 9 Comparison of true triaxial apparatus with two loading boundaries

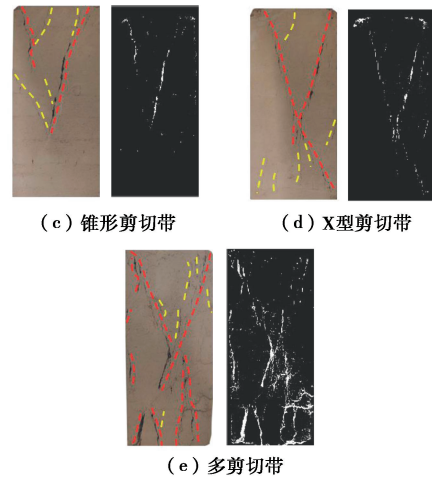
## 4 黄土试样的破坏形式

试样破坏时的剪切带形式与多种因素相关, 如试样的均匀性、加载速率、水力路径以及加载边界等。通过对不同应力条件下的黄土试样破坏形式的总结, 可将破坏形式分为5种类型: ①无剪切带形式: 试样的含水率较大或 $b$ 值较小时, 试样为压密破坏, 没有形成明显的剪切面, 见图10(a); ②单一剪切带形式: 主要是一条切斜裂隙, 该斜切裂隙从上端产生并向下发展, 见图10(b); ③锥形剪切带形式: 由试样上端两角产生两条斜切裂隙, 向下发展而成, 见图10(c); ④X型剪切带形式: 由锥形剪切带持续发展而来, 见图10(d); ⑤多剪切带形式: 主要发生于高 $b$ 值或低含水率的试样上, 试样往往产生了多条单一剪切带, 试样整体压碎破坏, 见图10(e)。



(a) 无剪切带

(b) 单一剪切带



(c) 锥形剪切带

(d) X型剪切带

(e) 多剪切带

图10 三向刚性真三轴试验试样破坏形式

Fig. 10 Failure modes of three-dimensional rigid true triaxial test specimens

图11为刚柔混合型真三轴仪中试样的破坏形式, 可以观察到柔性边界接触的试样变形不均匀, 可能会出现试样表面下凹或上凸的情况, 这会导致测试的主应变不准确<sup>[14]</sup>。相比之下, 刚性边界的变形更加均匀, 因此主应变的测量更为精准。

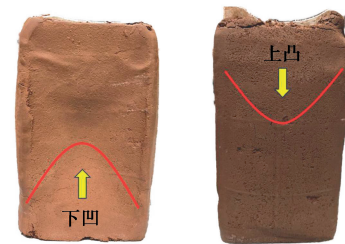


图11 刚柔混合型真三轴仪破坏形式

Fig. 11 Failure modes of rigid-flexible mixed true triaxial apparatus

## 5 试验误差分析

经试验验证, 该仪器性能稳定, 能够满足复杂应力条件下土力学特性试验的要求。根据试验过程总结和仪器原理, 可将引起试验误差的主要原因归结为以下3个方面。

### 5.1 端部效应

对于含有刚性边界的真三轴仪, 刚性加载端的刚度远大于试样的刚度, 试样与刚性加载端之间受到摩擦力影响而不能自由侧向膨胀变形, 得到的试样的强度和抗变形能力偏大。

### 5.2 水平加载板与试样的摩擦效应

与端部效应类似, 试样竖向变形时, 水平刚性板与试样表面存在滑动摩擦力, 限制了竖向变形。试样侧向应力越大, 滑动摩擦力约束越大, 对竖向变形的影响越大, 这等同于在试样侧方额外施加了剪应力。在后续研究中仍需要采取更有效的措施以降低水平刚

性板与试样间的摩擦效应。

### 5.3 压缩气体的影响

安装油管时,可能会有少量气体进入油路,加之有部分气体溶解在液压油中,均会使液压油的不可压缩性降低,干扰试验结果。

## 6 结 论

本文介绍的新型三向刚性加载真三轴仪由压力室、三向伺服液压步进电机加载控制系统、计算机与存储智能控制系统、水-气吸力控制系统面板 4 部分构成。详细介绍了该仪器的原理,并通过一系列试验进行验证,得到 4 点结论。

(1)三向刚性真三轴仪通过端部传递层作用于长方体剪切层传递竖向主应力与侧面滑移刚性板施加正交双向主应力,解决了传统三向刚性板加载互相干扰的技术难题。

(2)开展了一系列的验证试验,测试得到了符合黄土强度变形特性的应力应变关系曲线,从而验证了仪器系统的稳定性和试验结果的合理性。

(3)归纳了三向刚性真三轴试验试样的破坏形式,并从试验过程及仪器原理出发,分析了仪器误差的主要原因。

(4)三向刚性真三轴仪相较于刚柔性真三轴仪,具有操作简单、变形均匀、自动智能控制的优点。

**致 谢:** 西安理工大学吴利言教授级高工完成了该仪器压力室的机械加工设计并且给出了具体指导;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] BELL J M. Stress-Strain Characteristics of Cohesionless Granular Materials Subjected to Statically Applied Homogeneous Loads in an Open System[D]. Pasadena: California Institute of Technology, 1965.
- [2] KO H, SCOTT R. A new soil testing apparatus[J]. Géotechnique, 1967, 17: 40-57.
- [3] GREEN G E. Strength and deformation of sand measured in an independent stress control cell[C]// Proc of Roscoe Memorial Symp on Stress-Strain Behaviour of Soils. Cambridge, 1971.
- [4] RODRIGUEZ N M, LADE P V. True triaxial tests on cross-anisotropic deposits of fine Nevada sand[J]. International Journal of Geomechanics, 2013, 13(6): 779-793.
- [5] 施维成. 粗粒土真三轴试验与本构模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2008. (SHI Weicheng. Study on True Triaxial Test and Constitutive Model Of Coarse-Grained Soil[D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))
- [6] LEO C J, KUMRUZZAMAN M, WONG H, et al. Behavior of EPS geofoam in true triaxial compression tests[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(2): 175-180.
- [7] 潘家军, 程展林, 江泊洵, 等. 大型微摩阻土工真三轴试验系统及其应用[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(7): 1367-1373. (PAN Jiajun, CHENG Zhanlin, JIANG Jiwei, et al. Large-scale low-friction geotechnical true tri-axial apparatus and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(7): 1367-1373. (in Chinese))
- [8] 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 Shengjun, LUO Aizhong, DENG Guohua, et al. Development of a new true tri-axial apparatus[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8): 1172-1179. (in Chinese))
- [9] HAMBLY E C. A new triaxial apparatus[J]. Géotechnique, 1969, 18(2): 307-309.
- [10] BO IBSEN L, PRASSTRUP U. The Danish rigid boundary true triaxial apparatus for soil testing[J]. Geotechnical Testing Journal, 2002, 25(3): 254-265.
- [11] AIREY D W, WOOD D M. The Cambridge true triaxial apparatus[M]// Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock. West Conshohocken: Templeton Foundation Press, 1988.
- [12] 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 Shengjun, 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))
- [13] YIN J H, ZHOU W H, KUMRUZZAMAN M, et al. A rigid-flexible boundary true triaxial apparatus for testing soils in a three-dimensional stress state[J]. Geotechnical Testing Journal, 2011, 34(3): 1-8.
- [14] 邵生俊, 陈 菲, 代亚锋, 等. 结构性黄土的剪切带及强度特性的真三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 1): 66-70, 84. (SHAO Shengjun, CHEN Fei, DAI Yafeng, et al. True triaxial test study on shear band and strength characteristics of structural loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 66-70, 84. (in Chinese))