



大型三维土与结构接触面试验机的研制与应用

张建民, 侯文峻, 张 嘎, 冯大阔

(1. 清华大学岩土工程研究所, 北京 100084; 2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 已有的土与结构接触面试验研究集中在二维加载条件下的接触面力学特性, 而实际工程中接触面的受载条件大多为三维的, 即接触面的剪应力方向在剪切过程中是不断变化的。针对粗粒土与较粗糙结构面的大型三维接触面的试验手段目前较为缺乏, 自主设计研制了一台用于土与结构接触面特性试测的大型三维加载试验机。该试验机具有高加载能力, 提供大试样截面, 能够进行较大粒径土体与较粗糙接触面在较大应力变化范围内的单调和循环加载试验; 采用液压伺服控制系统, 法向可提供应力、常位移、常刚度等边界条件; 切向两个方向均可按应力或位移控制, 能够实现接触面上单向往返、十字、圆形、椭圆等不同的任意设定的加载路径。试验表明, 该试验机能够很好地再现粗粒土与结构接触面在上述的复杂加载条件下的力学响应, 为接触面的三维力学特性的研究提供了基础。

关键词: 接触面; 粗粒土; 三维循环加载; 试验仪器; 力学特性

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)06-0889-06

作者简介: 张建民(1960-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事土力学及岩土工程的教学与科研工作。E-mail: zhangjm@tsinghua.edu.cn。

Development and application of 3D soil-structure interface test apparatus

ZHANG Jian-min, HOU Wen-jun, ZHANG Ga, FENG Da-kuo

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A new 3D soil-structure interface test apparatus, which was capable of applying monotonic and cyclic loading in three perpendicular directions, was designed and developed to investigate the mechanical characteristics of the interface between coarse grained soil and structure under 3D loading conditions in most practical projects. Monotonic and cyclic tests could be carried out on large section interface sample by this apparatus with high loading capability. Hydraulic servo system was adopted on each loading direction to generate the desired load or displacement paths on the interface. In the normal direction, three boundary conditions including the constant normal stress, the constant volume and the constant normal stiffness could be imposed, while in the two perpendicular tangential directions, numbers of different loading paths, i.e., cross, circular and elliptical etc. could be imposed. It was shown that this apparatus could be employed to represent the response of the interface under various loading paths.

Key words: interface; gravel; 3D cyclic loading; test apparatus; mechanical characteristic

0 引 言

受结构约束影响, 土与结构交界面处的土体的力学特性与土体本身的力学特性有着较大差别, 此区域被称为土与结构接触面。土与结构接触面力学特性的研究是土与结构相互作用研究中的重要课题之一。已有的土与结构接触面试验研究多集中在二维加载条件下的接触面力学特性, 实际工程中接触面的受载条件大多为三维的, 即接触面的剪应力方向在剪切过程中不断变化, 而针对粗粒土与较粗糙结构面的大型三维接触面的试验手段目前较为缺乏。

土与结构接触面的变形的主要原因在于土体与结

构之间的相对剪切, 迄今为止所采用的直剪仪^[1-7]、单剪仪^[8-12]、环剪仪^[13]、扭剪仪^[14]、共振柱仪^[15]等诸多试验仪器中, 被采用最多的是直剪型仪器。直剪型试验仪器的最大优点在于限制了土体与结构之间的相对剪切在交界面上发生, 且在剪切过程中接触面的面积保持不变, 能够较好地反映土体与结构发生相对位移时接触面的力学特性。

笔者自主设计研制了一台大型三维土与结构接触

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2007CB714108);

国家自然科学基金资助项目(50679034)

收稿日期: 2007-09-07

面试验机。该试验机能够提供较高的加载能力、较大的试样面积,可进行粗粒土与结构接触面的大型试验。试验机采用了液压伺服控制系统,可实现复杂静动力加载。同时,试验机设计采用模块化设计理念,为试验机功能的扩展提供了接口。

1 试验设备

试验机主要由主机框架、水平加载平台、竖向加载平台、试验容器以及测量控制系统组成。试验机的真机照片及结构示意图分别如图 1 和图 2 所示。为表述方便,建立笛卡尔坐标系, z 轴正方向为竖直向上, x , y 轴方向为水平面内相互垂直的两个加载方向。

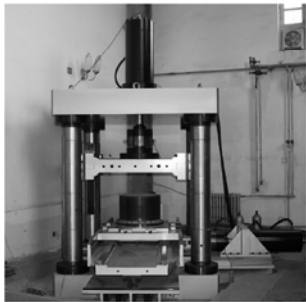
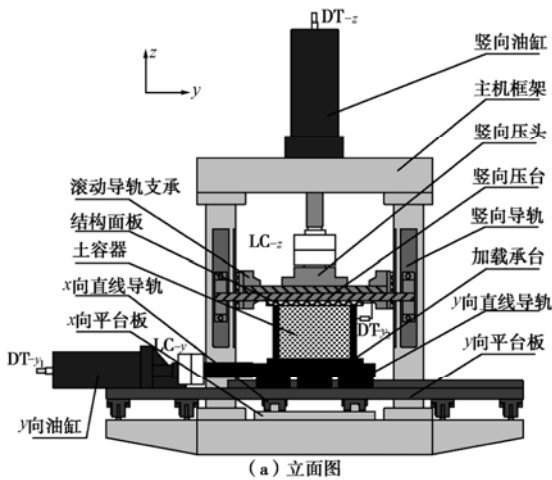
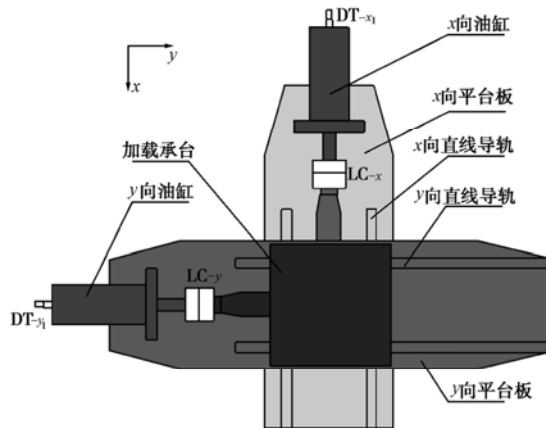


图 1 试验机真机图片

Fig. 1 Photograph of the apparatus



(a) 立面图



(b) 水平加载平台俯视图

图 2 试验机结构图

Fig. 2 Structure of the apparatus

1.1 主机框架及基本参数

主机框架含有顶梁、立柱、底座,立柱上设有作为竖向加载平台导向装置的竖向导轨。试验机主要性能指标如表 1 所示。

试验机顶梁和底座的水平截面尺寸均为 $2000\text{ mm} \times 2000\text{ mm}$,高均为 300 mm ,在设计中采用了加强肋提高结构的抗载能力。顶梁与底座间立柱高 2000 mm ,提供了足够的空间安放水平加载平台和竖向加载平台,水平加载平台与竖向加载平台间最大净空为 800 mm ,可以安放大型的试验容器。

1.2 加载平台

水平加载平台包括两个互相垂直的 x , y 向加载平台。 x 向加载平台位于底层,包括固定于底座上的 x 向平台板,在 x 向平台板上固定有 x 向滚动直线导轨副,还固定有与 x 向平台板相对固定的 x 向伺服作动器,作动器的活塞杆与上层 y 向加载系统沿 x 方向连接。 y 向加载平台,含有固定在 x 向滚动直线导轨副的滑块上的 y 向平台板,在 y 向平台板上固定有 y 向滚动直线导轨副,还固定有与 y 向平台板相对固定的 y 向伺服作动器,作动器的活塞杆与一个加载承台沿 y 方向连接。加载承台的底部固定在 y 向滚动直线导轨副的滑块上。上述结构形式将水平两个方向的运动分解开,各采用一套液压伺服系统控制,加载承台可以在水平面内做任意曲线运动,以实现单调、循环等各种复杂加载路径,为进行复杂加载条件的接触面试验提供了基础。

竖向加载平台含有固定在顶梁上的竖向放置的伺服作动器,该伺服作动器的活塞杆下方连接推力关节轴承,该推力关节轴承的下方依次连接压头和竖向压台。在竖向压台四周安装有滚动导轨支承,当竖向压台随伺服作动器的活塞杆上下移动时,滚动导轨支承以立柱上的竖向导轨作为轨道上下运动。上述结构保证竖向压台在进行上下运动时保持水平而不发生倾斜,保证了接触面在试验过程中竖向受力均匀。试验表明,这种结构在实际试验过程中效果很好。同时,滚动导轨支承将结构面板所受的水平向作用力传递到立柱上,由立柱提供反力。

1.3 试验容器

针对接触面直剪试验要求分别设计了方形截面和圆形截面两种截面形式的试验容器。方形截面试验容器的示意图如图 3 所示。试验容器包括用以与加载承台固定的容器底座,在容器底座上方固定一个过渡盘,在过渡盘外围的容器底座上间隔均匀开孔,孔内装有弹簧,在弹簧上放置直剪上盒以盛纳土体。在方形截面直剪上盒的两个垂直方向上均开有观察窗,可用数字拍照技术记录剪切过程中接触面附近土体的运动及

表 1 试验机主要性能指标
Table 1 Performance of the apparatus

方向	最大加载能力/kN	最大行程/mm	最大加载速率/(mm·s ⁻¹)	最小加载速率/(mm·s ⁻¹)	测量精度/%	最大加载频率/Hz	接触面最大尺寸/mm
x 向	400	±150	100	0.1	0.1	0.5	500
y 向	400	±150	100	0.1	0.1	0.5	500
z 向 (竖向)	800	±300	200	0.1	0.1	0.5	—

物性变化。该容器的设计考虑了接触面在剪切过程中的体积变形,直剪上盒可以在试验过程中上下运动,以防止容器中的土体掉出。试验过程中结构面所施加的法向应力主要由土体承担,直剪上盒与结构面板间的法向作用力及摩擦力很小,可忽略不计。

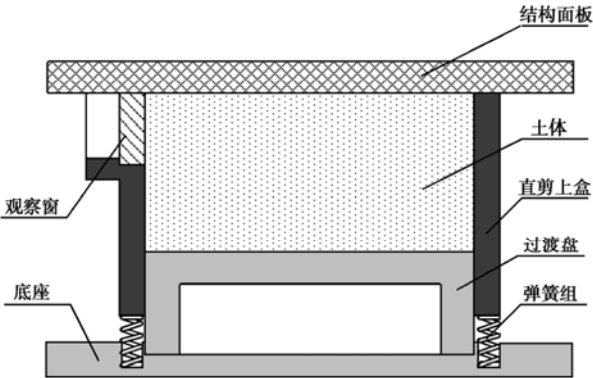


图 3 方形截面直剪容器示意图

Fig. 3 Schematic view of direct shear container

试验所用结构面板与竖向压台固定连接,提供不同粗糙度的结构面。

1.4 测量控制

三个方向上的伺服作动器活塞杆与所连接结构之间均安放有高精度力传感器(图 2 中 LC_x, LC_y, LC_z),可以直接量测出作用于接触面上的法向应力和水平向剪切力,作为试验结果进行记录并用于伺服控制。

三个方向上的伺服作动器中还安放有位移传感器(图 2 中 DT_{x1}, DT_{y1}, DT_z),竖向位移传感器 DT_z 的测量结果作为接触面法向的位移,而水平向两个(DT_{x1}, DT_{y1})主要用于试验准备阶段的定位控制。在施加上法向压力之后,在 x, y 两个方向上分别安装一个测量试验容器与结构面板之间相对位移的位移传感器,用于测量和控制,例如图 2 (a) 所示的 DT_{y2} 。这样可以消除作动器活塞与容器之间诸多连接存在的间隙,更加精确合理的得到土体与结构之间的相对位移,提高了试验的精度。

试验机三个方向均采用液压伺服控制系统,能够实现高精度的负荷控制、位移控制等基本控制方式。此外,竖向采用的常应力控制时,可将竖向位移变化量引出,与用户输入的 k 值进行相乘计算,得到一个

控制值后引入负荷控制闭环,计算得到负荷控制的目标值,由此实现了常刚度的控制方式。

2 基本试验结果

为验证试验机的实用性及可靠性,运用该试验机进行了粗粒土与结构接触面在不同控制方式、不同加载路径下的试验,以研究粗粒土与结构接触面在三维静动荷载作用下的力学特性。试验包括法向为常应力、常位移、常刚度等不同边界条件,水平向剪切分别按位移控制和按应力控制加载,加载路径包括在水平面内的单调、单向往返循环、十字循环、圆形循环等。限于篇幅,简要介绍粗粒土与理想粗糙钢板接触面的部分典型试验结果。

2.1 试验材料

试验土料为积石峡面板堆石坝垫层料所用的粗粒土料。土料为较均匀的人工破碎料,颗粒粒径 5~12 mm,平均粒径为 7.5 mm,颗粒尖角锐缘不多。试验用结构钢板为人工制备粗糙钢板,钢板粗糙一面铣出均匀排列的高度为 1 mm 的正四棱台,如图 4 所示。定义粗糙度 R 为钢板粗糙面峰谷距,本试验中即为正四棱台的高度,试验用钢板粗糙度为 1 mm。下文试验结果均为针对上述土料与结构面板所形成的接触面所进行。



图 4 粗糙钢板表面及粗糙度定义

Fig. 4 Surface of the rough steel plate and definition of the roughness

2.2 法向常应力切向位移控制加载试验

图 5 给出了接触面在法向应力保持为 400 kPa 时,切向加载为按位移控制沿 x 轴方向往返循环剪切的试验结果。分别给出了第 1, 10, 80 循环接触面剪应力 τ_x 与相对剪切位移 u_x , 接触面相对法向位移 u_z 与相对剪切位移 u_x 的关系,以及相对法向位移 u_z 与循环次数 N 的关系曲线。从 τ_x-u_x 曲线可以看出,剪切开始时,

随着相对剪切位移的增加,接触面剪应力逐渐增大,剪应力达到峰值后基本保持不变,没有明显的软化现象。随着循环次数的增加,接触面的峰值剪应力变化不大,但剪切反向时的卸载模量逐渐增大,反向加载的模量也逐渐变大。从 u_z-u_x 曲线和 u_z-N 曲线可以看出,接触面的相对法向位移在一次循环中表现出剪胀与剪缩的交替出现,在整个试验过程中,可明显看出体变存在着可逆性体变和不可逆性体变两部分^[16-17]。不可逆性体变随循环次数逐渐增加,但累积的速率减慢,可逆性体变分量在每次循环中的值基本相同。上述规律与前人所得到的二维剪切试验规律一致^[16-17],说明试验机很好地再现粗粒土与结构接触面的力学特性。

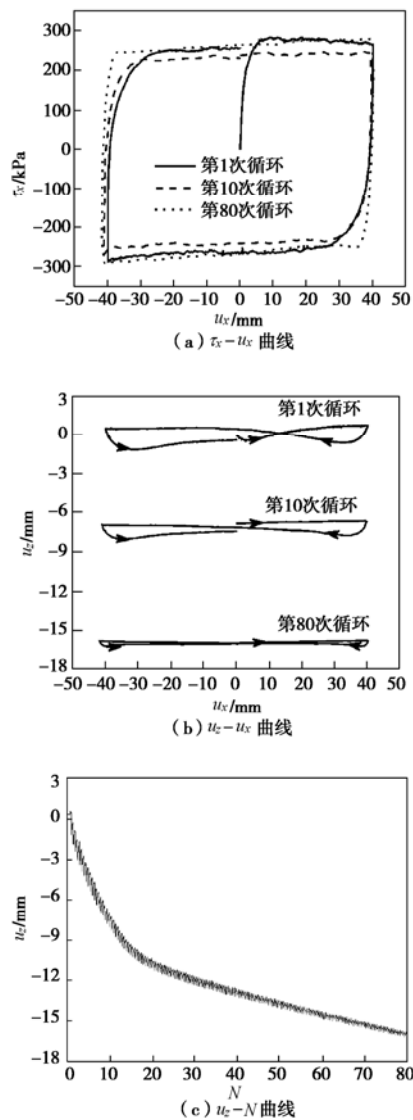


图5 法向常应力 x 向位移控制循环剪切试验结果

Fig. 5 Results of cyclic shear tests on displacement along x direction under constant normal stress

2.3 法向常应力切向应力控制加载试验

进行了水平两个方向上耦合加载的接触面剪切试验。试验过程为:先在接触面上施加法向应力 σ_z 至 700 kPa 并控制在试验过程中保持不变,之后在切向 x 向施加一个固定剪应力 $\tau_x=200$ kPa 并控制在试验过程中保持不变,最后在 y 向采用应力控制进行循环剪切,剪切幅值为 380 kPa。其试验加载应力路径见图 6。图 7 给出了分别给出了试验第 1, 10, 50 循环接触面 y 向相对剪切位移 u_y 与 y 向剪应力 τ_y 、接触面相对法向位移 u_z 与 y 向剪应力 τ_y 、相对法向位移 u_z 与循环次数 N 的关系曲线,以及 x 向相对剪切位移 u_x 与 y 向剪应力 τ_y 的关系。从 $u_y-\tau_y$ 曲线可以看出,随着循环次数的增加,相同的 τ_y 增量引起的 u_y 增量逐渐减小,说明接触面的模量随着剪切逐渐增大。从 $u_z-\tau_y$ 和 u_z-N 曲线可以看出, τ_y 变化引起的接触面相对法向位移在一个循环内有剪胀和剪缩的变化,接触面的体变同样存在着可逆性体变和不可逆性体变两个分量。随着循环的增加,接触面不可逆体变的累积速率逐渐变小。在每一个循环中的可逆性体变分量闭合,各个循环的可逆性体变分量基本相等。从 $u_x-\tau_y$ 曲线可以看出, x 向剪应力保持不变的情况下, y 向剪应力的变化仍然会引起 x 向的相对切向位移增量,这说明接触面在两个方向上的应力应变存在耦合效应。这一现象在砂土与钢板的接触面试验中也被发现^[10]。

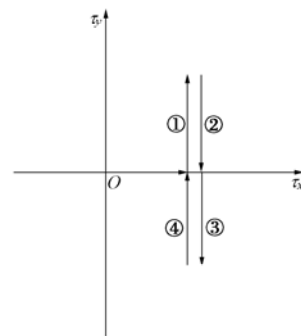
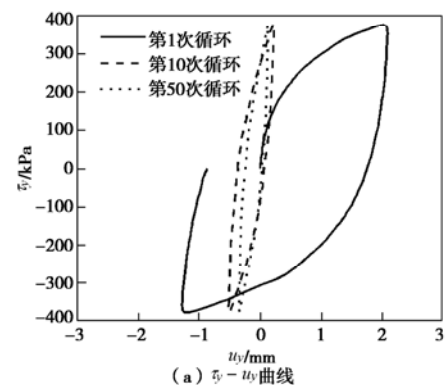


图6 法向常应力 x, y 向应力控制循环剪切应力路径

Fig. 6 Stress path of the cyclic stress loading under constant normal stress



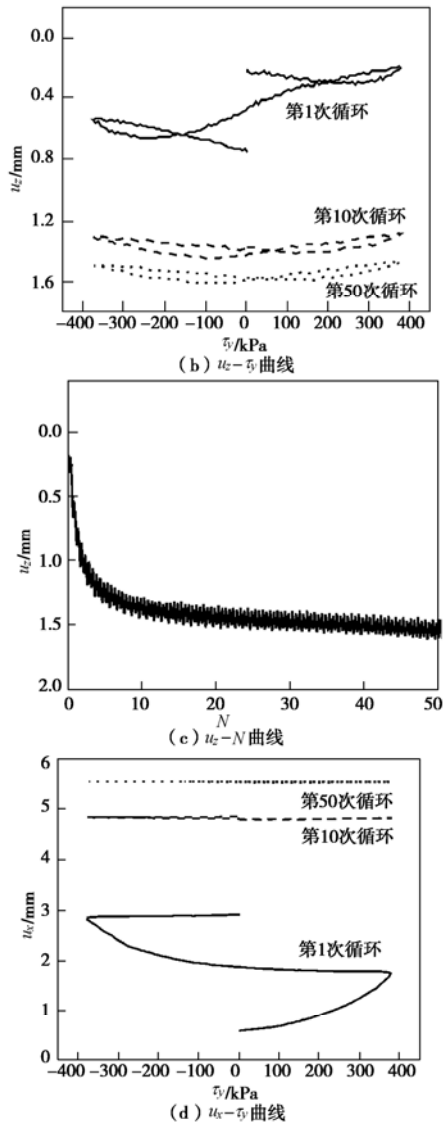


图7 法向常应力切向应力控制耦合剪切试验结果

Fig. 7 Results of coupled shear tests on cyclic tangential stress under constant normal stress

2.4 法向常刚度切向位移控制加载试验

进行了法向常刚度条件下切向位移控制圆形路径循环剪切试验。试验过程为：在接触面法向施加初始法向应力 σ_{z0} 为400 kPa，设置法向刚度 k_z 为100 kPa/mm，先在 y 向按位移控制进行剪切，相对剪切位移为40 mm，然后从此处开始进行圆形路径剪切，剪切半径保持为40 mm，法向应力减小到零时停止试验。图8给出了试验得到的接触面法向应力变化值与法向相对位移变化值的关系曲线，从图中可以看出，加载过程中接触面法向刚度与试验设定值非常接近，说明试验机采用的法向常刚度控制方式是可靠有效的。图9分别给出了试验所得的 x 向剪应力 τ_x 与 y 向剪应力 τ_y 的关系曲线和接触面法向应力 σ_z 与 y 向剪应力 τ_y 的应力路径。从图中可以看出，随着循环周次的增加，法向相对位移逐渐增大，因此接触面法向应力逐渐减小，接触面的最大剪应力也就相应减小，导致 $\tau_x-\tau_y$ 曲线也

逐渐向原点靠近。从应力路径中也可以清楚看到法向应力逐渐降低， y 向剪应力逐渐减小的这一过程。应力路径图中法向应力不是从400 kPa开始，这是由于试验开始时沿 y 向剪切过程中接触面产生体变使得法向应力增加所致。

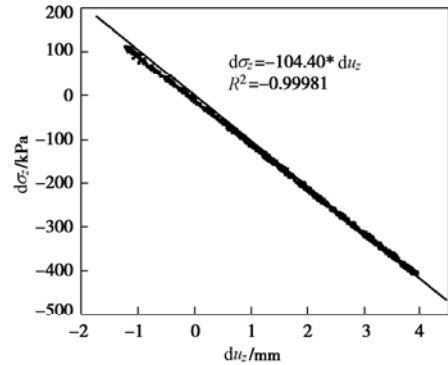


图8 接触面法向应力变化值与法向相对位移变化值的关系
Fig. 8 Relationship between the variation of normal stress and normal displacement

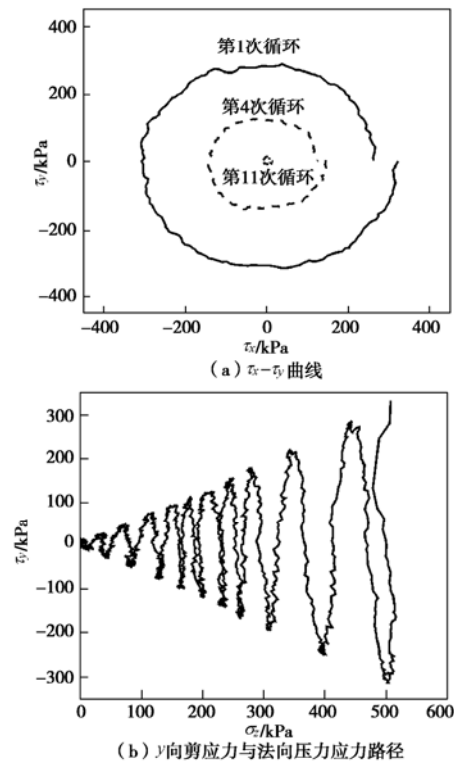


图9 法向常刚度切向位移控制圆形剪切试验结果

Fig. 9 Results of circular shear tests on tangential displacement under constant normal stiffness

3 结 论

为研究实际工程中三维受载情况下土与结构接触面的力学特性，研制了一台能够进行三维循环加载的大型接触面试验机。试验机具有以下特点：

(1) 试验机具有高加载能力，可以进行较高压力

条件下接触面试验。

(2) 试验机提供了较大试验空间,能够进行粗粒土与较粗糙结构面形成的较大试样截面接触面的试验。

(3) 试验机采用液压伺服系统控制,三个方向可单独分别控制,也可耦合控制;法向可实现常应力、常位移、常刚度等边界条件,水平切向可进行按应力或位移控制的单向往返、十字、圆形、椭圆形等复杂加载路径。

典型试验结果表明,试验机能够很好地再现粗粒土与结构接触面在单向往返、十字、圆形剪切等复杂加载路径下的力学响应,为接触面的三维力学特性的研究提供了基础。

参考文献:

- [1] POTYONDY J G. Skin friction between various soils and construction material[J]. *Geotechnique*, 1961, **11**(4): 331 - 353.
- [2] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analysis of retaining wall behavior[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 1971, **97**(SM12): 1657 - 1672.
- [3] DESAI C S, DRUMM E C. Cyclic testing and modeling of interfaces[J]. *J Geotech Eng*, 1985, **111**(6): 793 - 815.
- [4] 殷宗泽, 朱泓, 许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. *岩土工程学报*, 1994, **16**(3): 14 - 22. (YIN Zong-ze, ZHU Hong, XU Guo-hua. Numerical Simulation of the Deformation in the Interface between Soil and Structural Material[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, **16**(3): 14 - 22. (in Chinese))
- [5] 胡黎明, 濮家骊. 土与结构物接触面物理力学特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2001, **23**(4): 431 - 435. (HU Li-ming, PU Jia-liu. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, **23**(4): 431 - 435. (in Chinese))
- [6] 张嘎, 张建民. 大型土与结构接触面循环加载剪切仪的研制及应用[J]. *岩土工程学报*, 2003, **25**(2): 149 - 153. (ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Development and application of cyclic shear apparatus for soil-structure interface[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, **25**(2): 149 - 153. (in Chinese))
- [7] ZHANG G, ZHANG J M. Large-scale apparatus for monotonic and cyclic soil-structure interface test[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2006, **29**(5): 401 - 408.
- [8] UESUGI M, KISHIDA H. Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel[J]. *Soils and Foundations*, 1986, **26**(4): 139 - 149.
- [9] UESUGI M, KISHIDA H, TSUBAKIHARA Y. Friction between sand and steel under repeated loading[J]. *Soils and Foundations*, 1989, **29**(3): 127 - 137.
- [10] FAKHARIAN K. Three-dimensional monotonic and cyclic behavior of sand-steel interfaces: testing and modeling[D]. Ottawa: University of Ottawa, 1996.
- [11] 卢廷浩, 鲍伏波. 接触面薄层单元耦合本构模型[J]. *水利学报*, 2000(2): 71 - 75. (LU Ting-hao, BAO Fu-bo. A coupled constitutive model for interface thin-layer element[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000(2): 71 - 75. (in Chinese))
- [12] 高俊合, 于海学, 赵维炳. 土与混凝土接触面特性的大型单剪试验研究及数值模拟[J]. *土木工程学报*, 2000, **33**(4): 42 - 46. (GAO Jun-he, YU Hai-xue, ZHAO Wei-bing. Characteristics study of interface between soil and concrete by using large size single shear apparatus and numerical analysis[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2000, **33**(4): 42 - 46. (in Chinese))
- [13] BRUMMUND W F, LEONARDS G A. Experimental study of static and dynamic friction between and and typical construction material[J]. *J Testing and Evaluation, ASTM*, 1973, **1**(2): 162 - 165.
- [14] YOSHIMI U, KISHIDA T. A ring torsion apparatus for evaluation friction between soil and metal surface[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1981, **4**(4): 831 - 834.
- [15] 俞培基, 秦蔚琴. 在共振柱仪上研究接触面的动力变形特性[J]. *水利学报*, 1995(1): 81 - 85. (YU Pei-ji, QIN Wei-qin. Cyclic deformation behavior of interface studied on resonant column test device[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1995(1): 81 - 85. (in Chinese))
- [16] 张嘎, 张建民. 循环荷载作用下粗粒土与结构接触面变形特性的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2004, **26**(2): 254 - 258. (ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Experimental study on cyclic behavior of interface between soil and structure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, **26**(2): 254 - 258. (in Chinese))
- [14] ZHANG G, ZHANG J M. Monotonic and cyclic tests of interface between structure and gravelly soil[J]. *Soils and Foundations*, 2006, **46**(4): 505 - 518.