

大型多功能结构物-土界面循环直剪仪的研制与应用

郭聚坤^{1,2}, 王 瑞¹, 寇海磊³, 魏道凯^{2,4}, 卞贵建², 雷胜友¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 山东交通职业学院 公路与建筑系, 山东 潍坊 261206;
3. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100; 4. 日喀则市交通运输局工程项目管理中心, 西藏 日喀则 857021)

摘要: 借助剪切设备开展室内试验是研究结构物-土体相互作用的重要途径之一, 因此, 剪切设备的改进或研制具有重要意义. 本文研制了一种大型多功能结构物-土界面循环直剪仪, 该设备可以实现在法线方向施加常应力和常刚度两种加载方式, 通过伺服电机控制等应变、等应力方式施加剪切力, 剪切盒上设有玻璃观察窗, 可配合外置图像采集系统观察土体颗粒的运动轨迹, 上下剪切盒的联接采用保证间隙的滚动方式结构, 限制了上剪切盒在试验过程中的上翘, 辅助导轨的设计方便了结构物更换和土样装卸, 试验数据通过计算机控制系统实现自动采集和实时显示. 利用该设备进行了钙质砂与粗糙钢板的界面循环剪切试验, 试验结果表明: 该设备能够较好地分析钢-钙质砂界面剪切特性, 为后期结构物-颗粒土相互作用研究提供了有力的试验支撑.

关键词: 设备研制; 界面剪切; 常刚度; 常应力; 剪切特性; 循环直剪

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)05-0673-09

Development and application of large-scale multifunctional cyclic direct shear apparatus for structure-soil interface

GUO Jukun^{1,2}, WANG Rui¹, KOU Hailei³, WEI Daokai^{2,4}, BIAN Guijian², LEI Shengyou¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. School of Highway and Architecture, Shandong Transport Vocational College, Shandong Weifang 261206, China;

3. College of Engineering, Ocean University of China, Shandong Qingdao 266100, China;

4. Engineering Project Management Center of Shigatse Transportation Bureau, Tibet Shigatse 857021, China)

Abstract: It is one of the important ways to study the interaction between structure and soil to carry out laboratory test by shear equipment, so the improvement or development of shear equipment is of great significance. In this paper, a large-scale multifunctional cyclic direct shear apparatus for structure-soil interface is developed, which can realize two loading modes of applying constant stress and constant stiffness in the normal direction. The shearing force is applied by servo motor in the way of equal strain and equal stress. The shear box is equipped with a glass observation window, which can cooperate with the external image acquisition system to observe the movement track of soil particles. The connection of the upper and lower shear boxes adopts the rolling structure to ensure the clearance, which limits the upward warping of the upper shear box during the test. The design of the auxiliary guide rail facilitates the replacement of the structure and the loading or unloading of the soil sample. The test data can be automatically collected and displayed at the same time through the computer control system. The cyclic shear test of interface between calcareous sand and rough steel plate was carried out with this equipment. The experimental results show that the equipment can better analyze the shear characteristics of steel-calcareous sand interface, which provides a strong experimental support for the later study of interaction between structure and granular soil.

Key words: equipment development; interface shear; constant stiffness; constant stress; shear behavior; cyclic direct shear

收稿日期: 2021-03-16

修改稿日期: 2021-09-23

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2020QE257); 西藏自治区科技计划基金项目(XZ202001ZY0013G); 西藏自治区自然科学基金项目(XZ202001ZR0058G); 山东省交通运输科技项目(2020B23)

第一作者: 郭聚坤(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事结构物与土体相互作用的研究. E-mail: gjk_1986@126.com

通讯作者: 雷胜友(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程及岩石力学的研究. E-mail: 1436885380@qq.com

结构物-土体相互作用广泛存在于土木、水利及市政等实际工程中,如挡土墙与土体^[1]、桩与桩周土体^[2]、堆石坝的面板与垫层料^[3]、地铁下部结构与周围土体之间^[4]等。室内试验是研究结构物-土体界面剪切特性的重要途径之一。

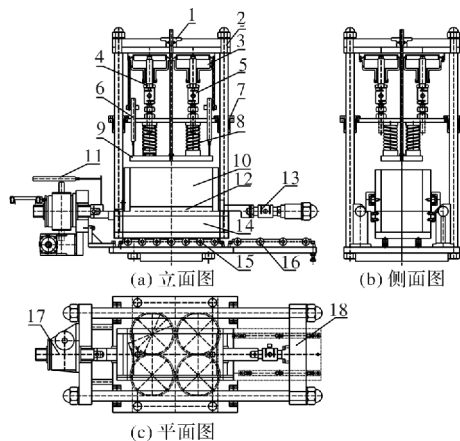
在多种室内剪切设备当中,结构物-土体界面直剪仪的研制较为广泛。Fakharian K等^[5]研制了循环三维界面剪切仪(C3DSSI),该设备可实现常应力和常刚度条件下界面单调和循环剪切试验。张嘎等^[6]研制了TH-20t大型结构物-土界面循环加载剪切仪,该设备可通过玻璃观察窗研究粗粒土的颗粒位移等细观状态。张建民等^[7]自主研制了一种结构物-粗粒土界面三维加载试验设备,该设备可实现圆形、椭圆、十字等复杂加载路径。李邵军等^[8]设计了一种带有局部透视剪切盒的大型直剪设备,该设备可配合高清摄像定量分析剪切带变形和颗粒运动规律。赵联桢等^[9]研制了大型多功能结构物-冻土界面直剪系统,可实现 $-20\sim 0^{\circ}\text{C}$ 范围内界面温度的设置。刘俊伟等^[10]研制了一种考虑桩周土体变形特点的大型恒刚度直剪仪,该仪器可以实现常刚度条件下的单调和循环剪切试验。除了结构物-土体界面直剪仪之外,高俊合等^[11]研制了界面单剪仪,杨有莲、朱俊高等^[12-13]研制了界面环剪仪,邬俊杰等^[14]研制了三轴剪切仪,李永波等^[15]、寇海磊等^[16-17]研制了其他类型的剪切设备。

尽管众多学者在结构物-土体界面剪切方面研制了多种设备,但部分设备存在边界条件加载稳定性不高、装卸试样麻烦、无法观察界面颗粒运动情况等问题。因此,本文在前述设备研究的基础上,研制了一种大型多功能结构物-土界面循环直剪仪,在结构物更换、土样装卸、常刚度加载实现方式、上下剪切盒联接和传感器安装等方面进行了设计,通过钙质砂-钢界面循环剪切试验对设备的实用性和准确性进行了验证,所得界面抗剪强度指标对于桩基设计和桩侧摩阻力的估计具有重要意义。

1 设备研制

1.1 设备结构

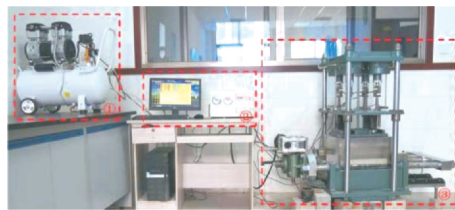
大型多功能结构物-土界面循环直剪仪用于测量结构物与土界面在常应力、常刚度法向加载条件下的直剪摩擦特性,仪器设备结构示意图如图1所示,仪器设备实物如图2所示。该设备由法向系统、剪切向系统和设备控制系统三部分组成。



1-手轮; 2-法向框架; 3-滚动膜片气缸; 4-调节螺母; 5-法向载荷传感器; 6-法向位移传感器; 7-滑动板; 8-IT弹簧; 9-传压板; 10-上剪切盒; 11-剪切位移传感器; 12-透视窗; 13-水平载荷传感器; 14-下剪切盒; 15-导轨; 16-辅助导轨; 17-剪切推动装置; 18-剪切反力架

图1 大型多功能结构物-土界面循环直剪仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of large-scale multifunctional cyclic direct shear apparatus for structure-soil interface



①空气压缩机; ②设备控制系统; ③设备主体结构

图2 大型多功能结构物-土界面循环直剪仪实物图

Fig. 2 Real picture of large-scale multifunctional cyclic direct shear apparatus for structure-soil interface

1.1.1 法向系统

法向系统由空气压缩机、四个滚动膜片气缸、加载框架、承重板、四个弹簧、承压板、承压板提升装置、两个法向位移传感器和四个法向载荷传感器组成,如图3所示。法向荷载的施加通过计算机发出指令,空气压缩机产生的压缩空气进入滚动膜片气缸,气缸内的竖向杆根据施加法向力的大小按照线性比例伸出,将法向力通过螺纹杆传递给传压板,由于设置在法向加载框架上的线性轴承可以沿竖向杆上下移动,故施加的法向力会引起传压板下移,最终把法向力汇集在四个弹簧上,通过承压板传递给土体。

滚动膜片气缸的活塞与缸体使用滚动膜片隔离,活塞与缸体为滚动摩擦,由电气比例阀调节空气压力以达到试验要求的压力。设备可提供的最大法向载荷为40 kN,法向荷载施加的大小由法向载荷传感器进行量测,最大量程为50 kN,试验过程中土体在竖向上的位移量通过法向位移传感器进行测量,量程为0~30 mm。

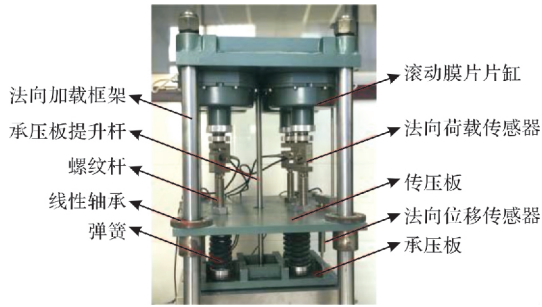


图3 法向系统

Fig. 3 Normal system

1.1.2 剪切向系统

如图4所示,剪切向系统由上剪切盒、下剪切盒、导轨、剪切推动装置、反力装置、剪切位移传感器和水平荷载传感器组成。图(a)所示的上剪切盒内部放置有机玻璃、土样和垫板,有机玻璃尺寸为 $404\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 12\text{ mm}$,土样空间尺寸为 $400\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 190\text{ mm}$,垫板尺寸为 $400\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 20\text{ mm}$,下剪切盒内部放置有机玻璃和结构物,有机玻璃尺寸为 $504\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 12\text{ mm}$,结构物空间尺寸为 $500\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,下剪切盒在剪切方向上的尺寸较上剪切盒大,保证了试验过程中结构物-土体接触面积不变。为保证试验过程中下剪切盒与底部不产生摩擦力,设置滚动轴承试验导轨,如图4(b)所示。如图4(c)和图4(d)所示,伺服电机与下剪切盒连接,反力装置与上剪切盒连接,在试验过程中,伺服电机推动和牵引下剪切盒向右、向左移动,界面剪切力通过上剪切盒传递给反力装置,可实现等应力或等应变方式加载。剪切位移传感器在伺服电机一侧,量程为 $0 \sim 100\text{ mm}$,水平荷载传感器在反力装置一侧,为 10 kN 拉压传感器。

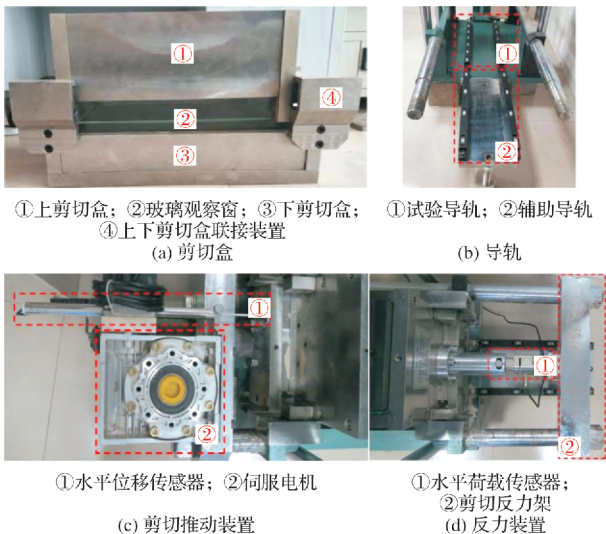


图4 剪切向系统

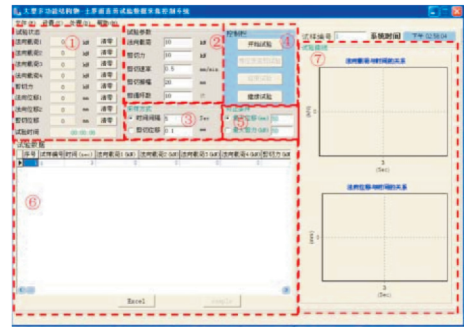
Fig. 4 Shear direction system

1.1.3 设备控制系统

如图5(a)所示,设备控制系统由数据采集控制系统和控制箱组成。如图5(b)所示,法向应力的施加、卸载及相关试验参数的设置均通过数据采集控制软件完成,试验过程中位移传感器和荷载传感器采集到的数据及相关曲线可以实时显示在数据采集控制系统的主页面上,以便及时追踪试验进程,试验结束后数据可以通过 excel 进行保存。控制箱将设备传感器、计算机和空气压缩机联系在一起,保证了试验过程中滚动膜片气缸压力输出和传感器数据采集的稳定性。



(a) 数据采集控制系统及控制箱



①状态显示区;②参数输入区;③输入区;④控制栏;⑤终止条件输入区;⑥试验数据显示区;⑦试验曲线显示区
(b) 数据采集控制软件

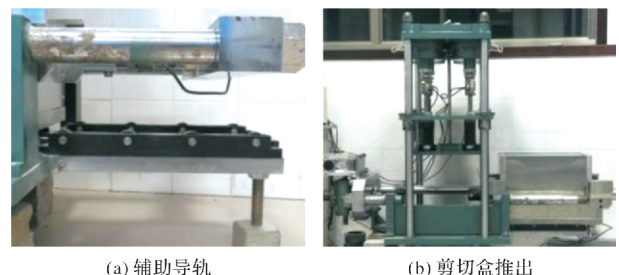
图5 设备控制系统

Fig. 5 Equipment control system

1.2 设备研制的特色

1.2.1 滚动轴承辅助导轨的设计

上、下剪切盒由于尺寸大、重量大,使得结构物和土样的装卸变得较为困难,为解决这一问题,在设备试验导轨右侧设置滚动轴承辅助导轨,便于剪切盒从试验导轨上推出,如图6所示,使下剪切盒结构物更换和上剪切盒土样装卸变得更容易。



(a) 辅助导轨

(b) 剪切盒推出

图6 辅助导轨

Fig. 6 Auxiliary guide

1.2.2 常刚度加载的实现方式

为比较常应力和常刚度两种加载方式在原理上的不同,绘制加载原理示意图如图7和图8所示。

对于常应力加载,如图7(a)所示,设备高度共分为六部分,其中: a 为滚动膜片气缸高度; b 为气缸伸出杆高度; c 为传感器上螺旋顶面到传压板底面的高度; d 为弹簧高度; e 为土体高度; f 为结构物高度; a 、 c 、 f 及六部分的高度之和在整个试验过程中始终保持不变,为便于分析,在图中将恒定值 a 、 c 、 f 用黑色表示, b 、 d 、 e 用红色表示。如图7(b)所示,施加法向应力后,气缸伸出杆变长,其值变为 b_1 ,弹簧和土体受到压缩高度变小,高度值变为 d_1 和 e_1 ,随着界面剪切试验的进行,土体会发生剪缩或剪胀现象。如图7(c)所示,土体因剪缩其高度从 e_1 减小至 e_2 ,由于传压板未被固定,其可通过加载框架立柱上的线性轴承向下移动,因此承压板、弹簧、传压板、传感器及螺旋会整体下移且高度保持不变,即弹簧长度 d_1 保持不变,气缸伸出杆的长度会从 b_1 增长至 b_2 。如图7(d)所示,土体因剪胀其高度从 e_1 增大至 e_3 ,由于弹簧长度 d_1 保持不变,气缸的伸出杆会从 b_1 减小至 b_3 。从上述分析可知,因弹簧长度 d_1 在试验过程中始终保持不变,故这种法向加载方式称为常应力加载。

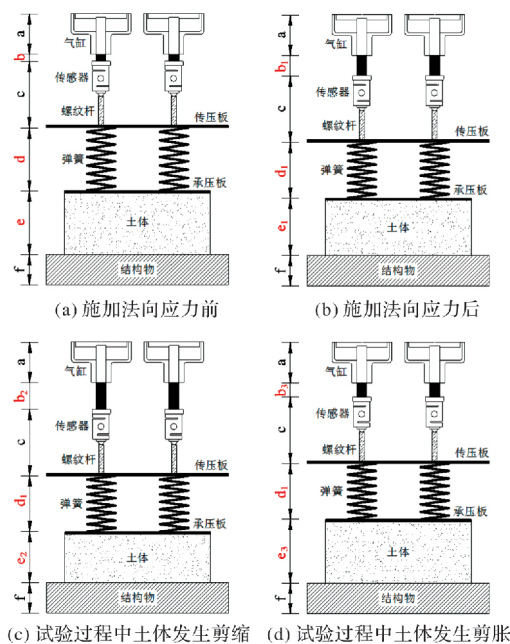


图7 常应力加载原理示意

Fig. 7 Loading principle of constant stress

对于常刚度加载,图8(a)为施加法向应力后的各部分高度,同常应力加载保持一致。如图8(b)所示,放置高度相同的4组钢圆环于气缸与传

感器上部螺旋之间(详见图9、10),并将螺栓向上拧紧以固定住4组钢圆环,之后将法向力卸载,气缸伸出杆的长度因受到圆环的限制不再变化,传压板底面以上的 a 、 b_1 和 c 三部分将保持不变,使得弹簧在卸载后仍处于压缩状态,土体受到的法向力在此过程中未发生改变。如图8(c)所示,随着界面剪切试验的进行,若土体发生剪缩其高度从 e_1 减小至 e_2 ,因传压板位置被固定,弹簧的高度从 d_1 增大至 d_2 ,弹簧因伸长使得法向应力减小。如图8(d)所示,若土体发生剪胀其高度从 e_1 增大至 e_3 ,弹簧的高度从 d_1 减小至 d_3 ,弹簧因压缩使得法向应力增大。从上述分析可知,土体和弹簧的高度之和在整个试验过程中始终保持不变,且法向应力变化值与弹簧高度变化值的比值始终保持不变,故将弹簧系数 K 保持不变的加载方式称为常刚度加载。

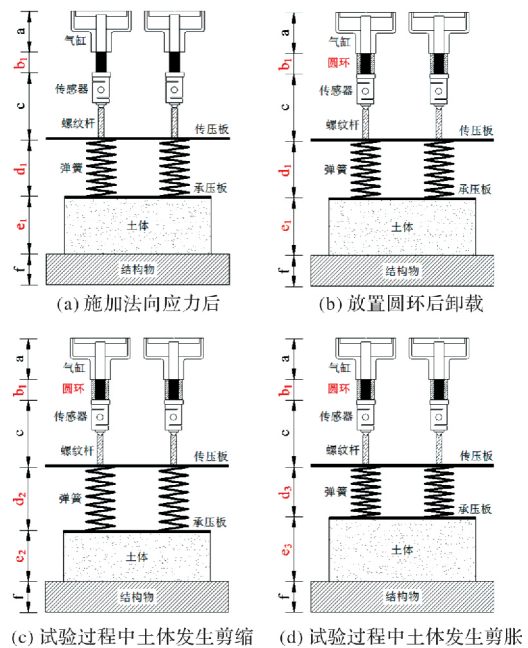


图8 常刚度加载原理示意

Fig. 8 Loading principle of constant stiffness

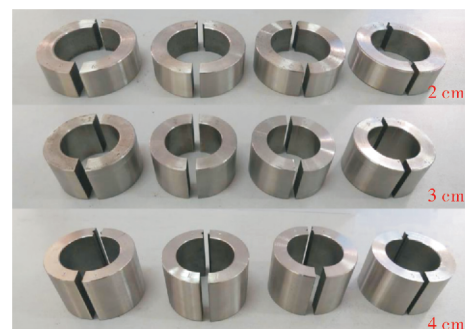


图9 常刚度加载用圆环

Fig. 9 Ring for constant stiffness loading

基于常刚度加载原理,考虑到滚动膜片气缸

伸出杆的高度与法向力的大小成正比,特制作高度为2 cm、3 cm、4 cm的圆环,以满足初始法向应力0~300 kPa范围内的常刚度加载,如图9所示,每次试验需要4组钢圆环,每组钢圆环由2个半圆环组成。以初始法向应力200 kPa为例,常刚度加载的实现方式如图10所示。

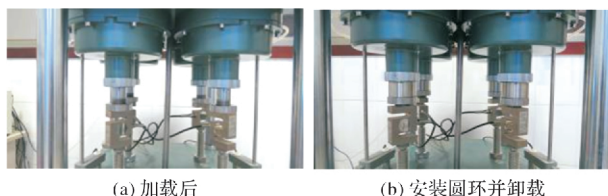


图10 常刚度加载的实现方式

Fig. 10 Implementation of constant stiffness loading

1.2.3 上下剪切盒联接装置的设计

如图11所示,上下剪切盒联接装置采用保证间隙的滚动方式结构,在图(a)红色虚线区域,即在下剪切盒的四个角位置处安装了四个“轨道”装置,该“轨道”将上剪切盒的四个滚轮限制在此“轨道”所在的空间位置上,如图(b)中红色虚线区域所示,该联结装置的设计实现了以下功能:

(1)光滑“轨道”和滚轮间摩阻力极小,保证了下剪切盒在移动的过程中,仅在土体与结构物间产生摩阻力(下剪切盒下部设置有滚动轴承导轨,也不会产生摩阻力)。

(2)“轨道”属于半开口式结构,“轨道”的顶部限制了上剪切盒在试验过程中的上翘。

(3)“轨道”的下部使得上剪切盒和下剪切盒不会发生接触,二者间仅存在细小缝隙,这样既保证了上剪切盒中的砂颗粒不会从缝隙中露出,又保证了上剪切盒自身的重力不会作用在下盒结构物上,而是通过“轨道”传递给下剪切盒外壁上,传递给结构物的力仅为土体的法向力。

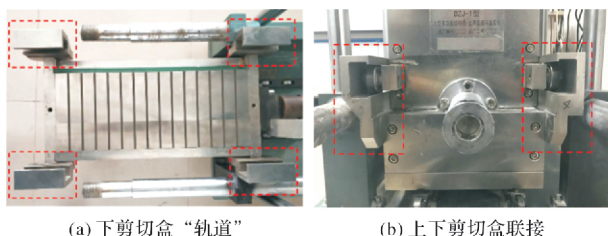


图11 上下剪切盒联接装置

Fig. 11 Connection device between upper shear box and lower shear box

1.2.4 法向位移传感器固定装置的设计

法向位移传感器的固定装置如图12所示。该装置由圆钢杆、固定块和螺栓组成,在固定块开两个贯通圆孔,一个孔放置圆钢杆,另外一个孔

放置法向位移传感器,圆钢杆一端旋紧在气缸上,另一端插入固定块中由螺栓旋紧,位移传感器的上端插入固定块由螺栓旋紧,保证了位移传感器在竖直位置上不会发生移动,减小了试验数据采集的误差。



图12 法向位移传感器的固定装置

Fig. 12 Fixing device of normal displacement sensor

2 试验过程及结果

为验证设备的实用性与准确性,进行了多组钢-钙质砂界面剪切试验,剪切振幅为15 mm,剪切速率为3 mm/min,剪切循环次数为30次。循环剪切示意图如图13所示,加载路径的方向为①→②→③→④→①→②...,并定义①→②→③→④为1个完整循环,①为1/4循环,②为2/4循环,③为3/4循环,④为4/4循环,规定箭头向右为正方向剪切,箭头向左为反方向剪切,正向剪切应力取正值,反向剪切应力取负值。限于篇幅,本文仅展示初始法向应力100 kPa下钙质砂-钢界面的循环剪切试验结果。

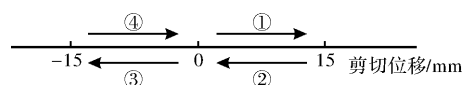


图13 单次循环剪切示意图

Fig. 13 Single cycle shear diagram

2.1 试验材料

钙质砂产自中国南海海域,砂的颗粒级配指标和基本物理力学指标依据公路土工试验规程(JTG 3430-2020)获得,其级配曲线如图14所示,试验所用钙质砂见图15,级配指标见表1,基本物理力学指标见表2。试验选用钙质砂粒径范围为0.5~2 mm。钢板表面利用机械设备在钢板表面刻制14道形状为倒三角形的纹理,纹理宽度为4 mm,深度为4 mm。如图16所示。为保证钙质砂在上剪切盒内初始状态的一致性,钙质砂分五次

装入上剪切盒, 每次装入的质量均为 4.1 kg, 每层厚度均为 38 mm.

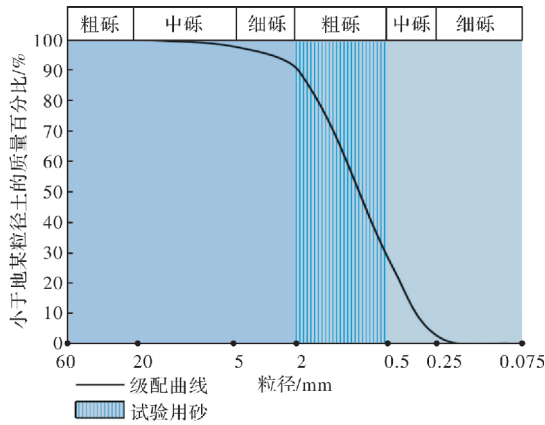


图 14 钙质砂级配曲线

Fig. 14 Distribution curves of calcareous sand



图 15 试验用钙质砂

Fig. 15 Calcareous Sand used in the test

表 1 界面剪切试验用钙质砂级配指标

Tab. 1 Gradation index of calcareous sand for interfacial shear test

特征粒径/mm				C_u	C_c
d_{10}	d_{30}	d_{50}	d_{60}		
0.57	0.74	0.96	1.10	1.94	0.87

表 2 钙质砂主要物理力学指标

Tab. 2 Main physical and mechanical indexes of calcareous sand

e_{\max}	e_{\min}	e	D_r	G_s	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$\varphi/(^\circ)$
1.17	0.84	0.93	0.73	2.71	1.40	46.3



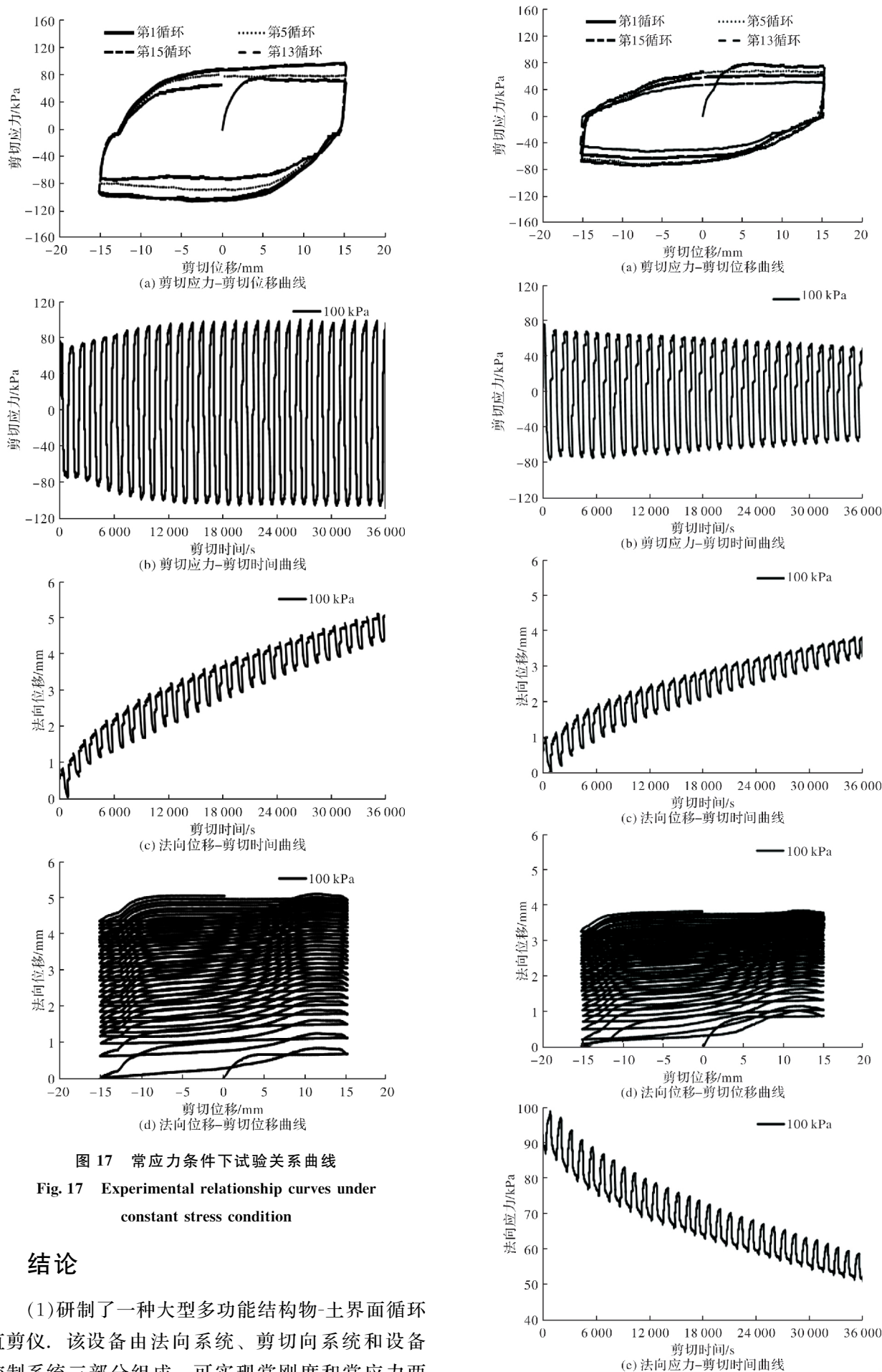
图 16 试验用粗糙钢板

Fig. 16 Rough steel plate used in the test

2.2 试验结果

试验关系曲线如图 17 和 18 所示, 可以看出:

由图 17(a)和 18(a)发现, 两种法向加载条件下的剪切应力-剪切位移关系呈现出“环状曲线”变化规律, 常应力下, 随着剪切循环次数的增加, “环状曲线”所围成的面积逐渐增大, 但面积增大幅度逐渐减小, 常刚度与常应力恰恰相反, 随着剪切循环次数的增加, “环状曲线”所围成的面积逐渐减小, 对于第 1/4 循环, 剪切应力达到峰值后出现小幅度软化, 对于第 5、15 和 30 循环, 正向剪切的剪切应力呈现出明显的硬化特性, 而反向剪切的剪切应力没有表现出明显的硬化特性, 达到峰值后出现轻微的软化. 由图 17(b)和 18(b)发现, 常应力下, 随着剪切时间的增加, 界面峰值剪切应力逐渐增加, 且集中在前 10 个循环, 之后趋于稳定, 而常刚度下的界面峰值剪切应力随剪切时间增加逐渐减小, 说明常应力下的峰值剪切应力随循环次数的增加呈现出硬化特性, 而常刚度条件下呈现出软化特性, 从剪切方向看, 正方向剪切和反方向剪切的峰值剪切应力差别不大. 图 17(c)和 18(c)为法向位移-剪切时间关系曲线, 规定剪缩为正值, 剪胀为负值, 可以看出, 法向位移整体呈现出随剪切时间增加而增大的现象, 且增速逐渐放缓, 在单个循环内呈现出先增加后减小再增加的变化规律, 在试验结束时常应力下钙质砂的剪缩量达到 5 mm 左右, 而常刚度下的剪缩量达到了 4.5 mm 左右. 由图 17(d)和 18(d)发现, 沿正方向剪切时钙质砂发生剪缩现象, 沿反方向剪切时钙质砂发生剪胀现象, 但剪缩量要大于剪胀量, 法向位移-剪切位移关系曲线随着循环次数的增加呈现出由稀疏至密集的变化规律, 可见钙质砂的剪缩主要发生在前半部分的循环内. 由图(c)和图(d)可以看出, 常应力下钙质砂的剪缩量要大于常刚度的剪缩量, 这是因为常应力条件下法向应力保持不变, 但常刚度下的法向应力随剪切时间的增加逐渐减小, 但在单个循环内呈现出先减小后增加再减小的变化趋势, 如图 18(e)所示, 法向应力的变化规律与法向位移的变化规律保持一致, 即钙质砂发生剪缩时法向应力减小, 发生剪胀时法向应力增加, 且法向应力变化量与法向位移变化量的比值始终保持不变, 即弹簧刚度系数 K , 试验结束时的法向应力减小至 52 kPa 左右. 由图 18 中(f)可以看出, 剪切应力-法向应力曲线由右向左逐渐变化, 曲线也由稀疏逐渐变密集, 峰值剪切应力随法向应力的减小而减小, 且减小幅度基本保持一致.



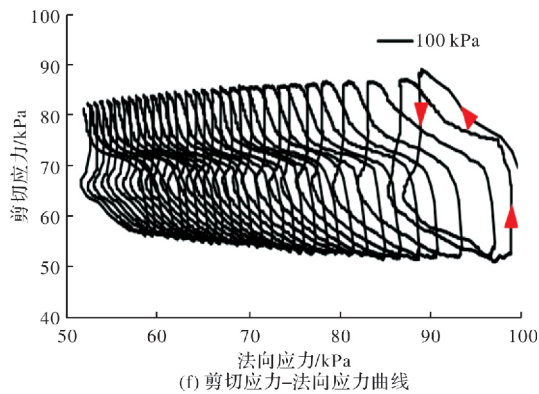


图 18 常刚度条件下试验关系曲线

Fig. 18 Experimental relationship curves under constant stiffness condition

种法向加载方式,剪切盒上设有玻璃观察窗,可用于跟踪土体颗粒运动轨迹,上下剪切盒的联接采用保证间隙的滚动方式结构,保证了剪切力仅发生在结构物与土体的界面上,滚动轴承辅助导轨的设计方便了下剪切盒结构物的更换和上剪切盒土样的装卸,法向位移传感器固定装置的设计保证了法向位移数据采集的准确性,设备所有数据均通过计算机自动采集;

(2)开展了钙质砂-钢界面循环剪切试验。常应力下剪切应力-剪切位移“环状曲线”面积随循环次数增大而增加,界面峰值剪切应力表现出硬化特性,常刚度下“环状曲线”面积随循环次数增大而减小,界面峰值剪切应力表现出软化特性,法向位移在两种法向加载方式下均表现出剪缩的特性,但在单个循环内呈现出先增加后减小再增加的变化规律,法向位移-剪切位移关系曲线随着循环次数的增加呈现出由稀疏变密集的变化规律,常刚度下的法向应力随循环次数的增加逐渐减小,但在单个循环内呈现出先减小后增加再减小的变化趋势,剪切应力-法向应力曲线随循环次数的增加也呈现出由稀疏变密集的变化趋势;

(3)试验数据验证了该设备运行的可靠性,表明该设备能够为结构物-颗粒土界面剪切研究提供有效的试验支撑。

参考文献 References

[1] 谢明星,郑俊杰,曹文昭,等.有限填土路堤挡土墙主动土压力研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2019,47(2):1-6.
XIE Mingxing, ZHENG Junjie, CAO Wenshao, et al. Study of active earth pressure against embankment retaining wall of limited backfill[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural

Science Edition),2019,47(2):1-6.

- [2] COYLE H M, SULAIMAN I H. Skin friction for steel piles in sand[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967, 93(SM6): 261-278.
- [3] UDDIN N, Gazetas G. Dynamic-response of concrete-faced rock fill dams to strong seismic excitation[J]. Journal of Geotechnical Engineering-Asce, 1995, 121(2): 185-197.
- [4] HUO H, BOBET A, FERNANDEZ G, et al. Load transfer mechanisms between underground structure and surrounding ground: evaluation of the failure of the daikai station[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005,131(12): 1522-1533.
- [5] FAKHARIAN K, EVGIN E. Cyclic simple-shear behavior of sandsteel interfaces under constant normal stiffness condition[J]. J Geotech & Geoenv Engng, 1997, 123(12): 1096-1105.
- [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 Jianmin. Development and application of cyclic shear apparatus for soil-structure interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003,25(2): 149-153.
- [7] 张建民,侯文峻,张嘎,等.大型三维土与结构接触面试验机的研制与应用[J].岩土工程学报,2008(6): 889-894.
ZHANG Jianmin, HOU Wenjun, ZHANG Ga, et al. Development of a 3D soil-structure interface test apparatus and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008,30(6): 889 - 894.
- [8] 李邵军,孟凡震,陈静,等.土与结构相互作用的可视化剪切试验装置研制及应用[J].岩石力学与工程学报,2012,31(1): 180-188.
LI Shaojun, MENG Fanzhen, CHEN Jing, et al. Development of shear test device with interface visualization for soil-structure interaction and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012,31(1): 180-188.
- [9] 赵联桢,杨平,王海波.大型多功能冻土-结构接触面循环直剪系统研制及应用[J].岩土工程学报,2013,35(4): 707-713.
ZHAO Lianzhen, YANG Ping, WANG Haibo. Development and application of large-scale multi-functional frozen soil-structure interface cycle-shearing system [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 707-713.
- [10] 王永洪,刘俊伟,张明义,等.大型土与结构相互作用恒刚度直剪试验装置研究[J].地下空间与工程学

- 报, 2019, 15(6): 1667-1673.
- WANG Yonghong, LIU Junwei, ZHANG Mingyi, et al. Study on direct shear test device for constant stiffness of large scale soil-structure interaction[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(6): 1667-1673.
- [11] 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(4): 42-46.
- GAO Junhe, YU Haixue, ZHAO Weibing. 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.
- [12] 杨有莲, 朱俊高, 余挺, 等. 土与结构接触面力学特性环剪试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3256-3260.
- YANG Youlian, ZHU Jungao, YU Ting, et al. Experimental study of mechanical behaviour of soil-structure interface by ring shear test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3256-3260.
- [13] 朱俊高, SHAKIR R R., 杨有莲, 等. 土-混凝土接触面特性环剪单剪试验比较研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 692-696.
- ZHU Jungao, SHAKIR R R., YANG Youlian, et al. Comparison of behaviors of clay-concrete interface from ring-shear and simple shear tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 692-696.
- [14] 郭俊杰, 刘帅君, 陈锦剑, 等. 桩土接触面三轴模拟试验设备研究与应用[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(11): 1523-1527, 1535.
- WU Junjie, LIU Shuaijun, CHEN Jinjian, et al. Development and application of a triaxial model test system for pile-soil interface[J]. Journal of Shanghai Jiao-Tong University, 2014, 48(11): 1523-1527, 1535.
- [15] 李永波, 张鸿儒, 全克江. 冻土-桩动力相互作用模型试验系统研制[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 774-780.
- LI Yongbo, ZHANG Hongru, QUAN Kejiang. Development of model test system for dynamic frozen soil-pile interaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 774-780.
- [16] 寇海磊, 俞峰, 张明义. 静压敞口预应力高强混凝土管桩界面剪切性状试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(5): 167-173.
- KOU Hailei, YU Feng, ZHANG Mingyi. Experimental study on interface shear behavior of static open prestressed high strength concrete pipe pile[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(5): 167-173.
- [17] 寇海磊, 李旺, 杨丹良, 等. 基于不同贯入速率砂土地基中静压敞口混凝土管桩试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(7): 140-145.
- KOU Hailei, LI Wang, YANG Danliang, et al. Experimental study on static pressure open concrete pipe pile in sandy soil foundation based on different penetration rates[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(7): 140-145.

(编辑 沈 波)

(上接第 664 页)

- [12] 侯朝炯, 马念杰. 煤层巷道两帮煤体应力和极限平衡区的探讨[J]. 煤炭学报, 1989(4): 21-29.
- HOU Chaojiong, MA Nianjie. Discussion on the stress and limit equilibrium zone of the two sides of coal seam roadway[J]. Journal of China Coal Society, 1989(4): 21-29.
- [13] 尤春安, 宋振骐. 抗滑桩控制巷道底鼓的理论与实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增刊): 2221-2224.
- YOU Chun'an, SONG Zhengqi. Theory and application of floor heave control in roadways with anti-slide piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(S): 2221-2224.
- [14] 杨军, 石海洋, 齐干. 巷道底角锚杆控制底鼓机理及选型试验[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(4): 643-648.
- YANG Jun, SHI Haiyang, QI Gan. Research on mechanism for floor heave control in the roadway by base-angel-bolt and its type selection test[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(4): 643-648.
- [15] 赵均海, 马淑芳, 魏雪英, 等. 基于统一滑移线场理论的边坡稳定分析[J]. 长安大学学报(建筑与环境科学版), 2003, 20(4): 1-4.
- ZHAO Junhai, MA Shufang, WEI Xueying, et al. Stability analysis of slope based on unified slip line field[J]. Journal of Chang'an University (Architecture and Environment Science Edition), 2003, 20(4): 1-4.

(编辑 沈 波)