

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.05.013

冻土直剪仪多功能改进与试验研究

石泉彬^{1,2}, 杨平¹, 孙厚超^{1,3}

(1. 南京林业大学土木工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 泰州职业技术学院建筑工程学院, 江苏 泰州 225300;
3. 盐城工学院土木工程学院, 江苏 盐城 224051)

摘要: 为从更多角度、更准确进行冻土接触面力学性能试验研究,对原冻土直剪仪进行多功能改进完善;对温度采集、位移测量、冻土盒装卸等装置进行改进,使冻土直剪仪能更好地满足冻土接触面力学性能试验要求;在原冻土直剪仪基础平台上集成冻土接触面冻结强度试验、冻土界面层力学特性试验模块,满足多功能试验要求;新功能开发采用模块化设计,注重各功能模块的兼容性和功能切换的方便性。试验结果表明改进后的冻土直剪仪能满足冻土接触面冻结强度、接触界面层力学特性等多功能试验要求,试验数据稳定可靠。

关键词: 冻土直剪仪;接触面;界面层;多功能改进;功能合成

中图分类号: TU445 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2017)05-0457-07

Multi-function improvement and experimental study on the direct shear apparatus for frozen soil

SHI Quanbin^{1,2}, YANG Ping¹, SUN Houchao^{1,3}

(1. School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;
2. School of Architectural Engineering, Taizhou Polytechnical College, Taizhou 225300, China;
3. School of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

Abstract: For the purpose of making a more accurate study on the interface mechanical properties of the frozen soil from more perspectives, improvements on the original multi-function direct shear apparatus for frozen soil are conducted, which involve improvements on temperature collecting and recording device, displacement measuring device, and loading and unloading device for frozen soil box. These improvements will allow the direct shear apparatus to better meet testing requirements on the interface mechanical properties of frozen soil. Based on the original direct shear apparatus, modules related to the adfreezing strength test on the interface of frozen soil and the mechanical property test on the interface layer of frozen soil are integrated, meeting the multi-function testing requirements. The new functions are developed by means of modular design, in which the compatibility and convenience of switching between different functional modules are emphasized. The experimental results have shown that the improved direct shear apparatus is able to meet the multi-function experiment requirements for the frozen soil, such as the research on the adfreezing strength and mechanical properties of interface layer, and the testing data is demonstrated to be stable and reliable.

Key words: direct shear apparatus for frozen soil; interface; interface layer; multi-function improvement; functional synthesis

收稿日期: 2016-09-01
基金项目: 国家自然科学基金(51278251);江苏省青蓝工程资助项目(苏教师[2016]15号);泰州市科技支撑计划项目(TS201522)
作者简介: 石泉彬(1978—),男,江苏泰州人,副教授,博士研究生,主要从事环境岩土与城市地下工程研究。E-mail: sqb. tz@163. com
通信作者: 杨平,教授。E-mail: yangping@ njfu. edu. cn

天然冻土与基础接触面力学特性和受力变形规律是确定冻土区基础工程承载力、抗拔性能和分析构筑物与冻土相互作用的基础和关键^[1];各类地铁隧道、快速路下穿隧道、过江隧道、地下综合管廊隧道施工中广泛采用人工冻结加固法,但人工冻土与结构接触面间冻结力会引起结构应力重新分布,引发结构损伤^[2],甚至可能影响地下工程掘进设备正常推进施工。因此,冻土与结构接触面力学特性研究已成为天然冻土和人工冻结加固工程中冻土与构筑物相互作用核心问题之一。

试验仪器研制和开发是进行科学研究的前提和保障。冻土接触面试验仪器研制通常借鉴常温土抗剪强度试验^[3-4]及常温土接触面试验仪器研究成果。Desai^[5]研制出多自由度循环直剪仪。Uesugi等^[6]利用矩形截面单剪仪进行接触面试验研究。Fakharian^[7]研制出具有直剪和单剪功能的三维循环接触面剪切仪(C3DSSI)。张建民等^[8]研制出能实现单向往返、十字、圆形、椭圆等任意加载路径大型三维接触面试验仪。张嘎等^[9]研制出能通过视窗进行接触面形态细观测的大型循环直剪仪。胡黎明等^[10]研制出能通过数字照相技术记录土体颗粒位移情况的直剪仪。王伟等^[11]改进单剪仪反向剪力加载系统进行正反向单剪试验对比研究。在冻土接触面试验仪器研制方面, Lee等^[12]将常温土直剪仪置于步入式环境箱用于冻土与结构冻结强度试验研究。崔颖辉等^[13]、Liu等^[14]将传统直剪仪改造为冻土动荷载直剪仪,测量出冻土在动荷载下的应力-应变曲线、动弹性模量、动阻尼比等,但未考虑接触面粗糙度的影响,无冻土界面层力学特性试验功能。国内外有关常温土与结构接触面力学性能试验仪器研究成果较多,但有关冻土与结构接触面力学性能试验仪器研究成果较少,尤其是有关专门用于冻土接触面力学性能试验研究的多功能冻土直剪仪鲜有报道。

本课题组赵联桢等^[15]研制大型多功能冻土直剪仪,可模拟多种粗糙度接触面实现循环和单调2种剪切形式。通过已有试验研究^[16-17]发现,现有试验装置功能仍不够完善,性能有待优化拓展,因此有必要进行装置优化和多功能改进以满足冻土接触面多角度试验研究需求。

1 试验装置优化与功能合成

从冻土接触面冻结强度试验和冻土界面层力学性能试验两大主要功能要求出发,在原大型冻土直剪仪^[15](图1)基础上进行优化改进和多功能合成,使其为冻土与结构接触面力学性能相关试验研究提供更为精确可靠、多功能、模块化的软硬件平台。

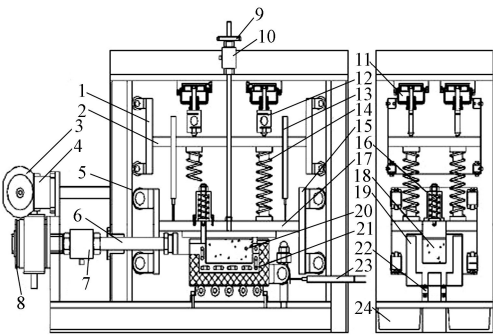
1.1 试验装置优化

1.1.1 冻土制冷控温装置优化

原冻土直剪仪 PT-100 热电阻温度传感器测量端为中空管,直径较大,不适于采集冻土接触面温度,且在剪切时易损坏。鉴于 T 型热电偶具有线性度好、热电动势较大、灵敏度较高、动态响应好、均匀性好、结构简单等优点,尤其在-200 ~ 0℃使用稳定性好(年稳定性可小于±3 μV),故将冻土盒控温传感器和接触面温度测量传感器均更换为 T 型热电偶温度传感器。同步研制与 T 型热电偶温度传感器相配套的温度采集盒,由冻土直剪仪试验软件系统根据测温数据对低温恒温冷浴进行动态控制和接触面温度数据全程记录。

1.1.2 位移测量装置优化

为更精确可靠记录冻土接触面、界面层在剪切过程中剪应力随位移变化规律,位移传感器精度是试验成败关键因素之一。主要优化途径是改进位移传感器固定支座和更换高精位移传感器:改进原有位移传感器固定方式(一端用可调表座固定,另一端用挡块支撑),使位移传感器位置固定更稳固、拆卸更方便;更换型号为 novotechnik TR 高精位移传感器(位移测量精度±0.01 mm),使位移测量精度更高、稳定性更好、动态响应更快,从而大幅提高冻土直剪仪剪切过程位移测量精度。



1—移动支架 A;2—上翼板;3—伺服电机;4—减速机;5—竖导轨;6—传力棒;7—拉压力传感器;8—升降机构;9—手轮;10—称重传感器;11—滚动膜片气缸;12—法向荷载传感器;13—法向位移计;14—弹簧;15—移动支架 B;16—挡土板;17—剪切板;18—冻土盒;19—保温层;20—温度传感器;21—冷液循环铜管;22—水平导轨;23—水平位移计;24—机架

图1 DDJ-1型大型冻土直剪仪示意图
Fig.1 Diagram for the DDJ-1 large direct shear apparatus for frozen soil

1.1.3 冻土盒装卸装置优化

冻土盒采用双层铜板制成,内置冷液循环铜管,其装土后质量达 60 kg。冻土盒过重使得人工装卸冻土盒十分吃力、难以精准就位、易破坏土样表面。为克服现有不足,专门研制一种冻土盒装卸装置(图 2(a)),它整体固定于冻土直剪仪机架上,可根据试验需要方便整体拆卸,不影响冻土直剪仪原使用功能,通过轨道、薄壁千斤顶、手动液压油泵、托举支架等装置(图 2(b))使冻土盒提升、移动、就位更易掌控。

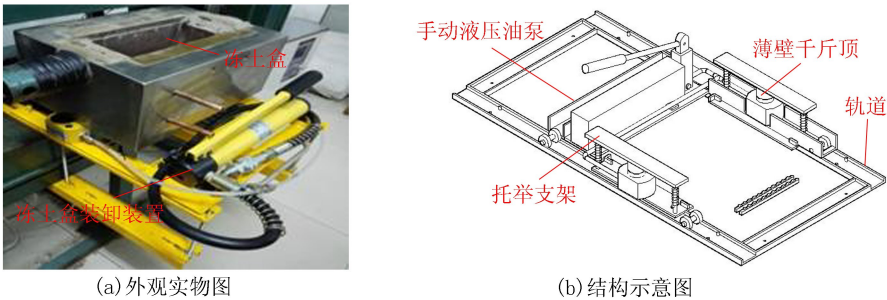


图 2 冻土盒装卸装置及其结构示意图

Fig.2 Loading and unloading device of frozen soil box and schematic diagram of its structure

1.2 试验装置模块化设计与功能合成

为提高试验设备使用效率和模块兼容性,冻土直剪仪不同功能试验装置均采用模块化设计。接触面冻结强度试验模块由标准冻土盒、冷液循环剪切板、温度传感器、温度采集盒、水平及竖直位移计等成套装置组成。界面层力学特性试验模块由专用冻土盒、制样器、数码摄像头、剪切板、水平及竖直位移计等装置组成。各试验模块均以原冻土直剪仪机架、加载系统、测量系统、软件操作系统等为公共平台开发,在不同试验功能合成的同时还注重不同功能试验模块切换的方便性,注重不同试验监测数据分类同步显示、后台自动记录、及时动态反馈,提高人机交流友好性。

2 冻土接触面冻结强度试验功能研发

2.1 冻土接触面冻结强度试验装置研制

2.1.1 冻土接触面制冷装置研制

原冻土直剪仪冻土盒内部盘管循环冷液的冷冻效率低,且无法确保冻土接触面处温度与冻土体内部温度一致。为使试验更为精准有效,有必要对原冻土直剪仪制冷方式进行改进:在剪切板内布置多排冷液循环铜管,将剪切板冷液循环铜管和冻土盒冷液循环铜管串联并与低温恒温冷浴冷液输出端和输入端相连接(图 3),通过低温恒温冷浴对冻土盒和剪切板同时循环制冷,大幅度提高冻土接触面冻结效率和冻结效果。

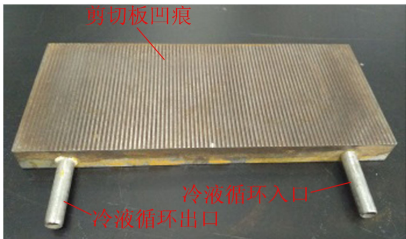


图 3 内置冷液循环管剪切板

Fig.3 Shear plate with internal cooling liquid circulation tube

2.1.2 冻土接触面温度采集装置研制

为精确采集冻土接触面温度,当土样制作完毕后将 3 根 T 型热电偶温度传感器分别从冻土盒上表面固定位置插入距冻土表面约 2 ~ 3 mm 不同位置,以实时观测并全程记录冻土接触面在冻结、加载、剪切全过程温度变化情况,以更准确探究温度对冻土接触面冻结强度影响及剪切过程中冻土接触面温度变化规律。

2.1.3 冻土接触面剪切加载方式改进

缩小剪切板(图 3)短边尺寸,使其比冻土盒短边内部尺寸小 2 mm。土样制作完成后将冻土盒准确推入至剪切位置,旋转手轮使剪切板在自重作用下缓降,直至与土样上表面接触。通过冻土盒和剪切板内部铜管冷液循环对土样冻结,待冻结至试验设计温度后再施加法向荷载。改进后加载方式能够克服原冻土直剪仪试验时冻土样上表面与剪切板不完全接触缺陷,从而有利于更为准确测定冻土接触面冻结强度。

2.2 冻土接触面冻结强度相关测试研究

为检验改进后冻土直剪仪冻结强度试验效果,选用南京地区地铁施工区域典型粉细砂进行试验,其密度为 1.98 g/cm³,孔隙比为 0.721,压缩系数为 0.145 MPa⁻¹,压缩模量为 12.98 MPa,内摩擦角为 30.2°。试验时按 26% 原状土含水量重塑,土样分 3 层定量装入冻土盒,每层装样后均匀振捣,控制土样平均密度为 1.96 g/cm³。

冻土盒内空腔为长方体(长 200 mm×宽 100 mm×高 87 mm),长边两侧对称布置温度传感器(图 4)。进行单程(11 mm)剪切,剪切速率 7 mm/min。剪切板粗糙度 R 定义为剪切板表面凹痕的垂直深度,以 mm 计,其凹痕各齿边沿剪切板水平向等间距均匀分布,各齿边的边长关系如图 4 所示。

图 5 为接触面温度 $T=-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $R=1.4\text{ mm}$ 、法向应力 $\sigma=300\text{ kPa}$ 时部分冻结强度测试结果。由图 5 可知:剪应力随剪切位移增加先快速增长并达到峰值即极限冻结强度,随后剪应力显著下降并随剪切位移增加而呈循环波动变化;接触面温度随剪切位移增加呈分段递增趋势。其原因为粗糙剪切板沿有凹痕冻土接触面滑动摩擦生热使接触面温度升高,剪切过程中接触面处冻土体处于剪压状态,冻土压融也使接触面温度升高;因温度升高接触面处冻土体冻结强度随之降低,同时由于接触面处冻土体沿粗糙剪切板错动滑移,故剪应力在峰值后波动变化,并呈逐渐减小趋势。

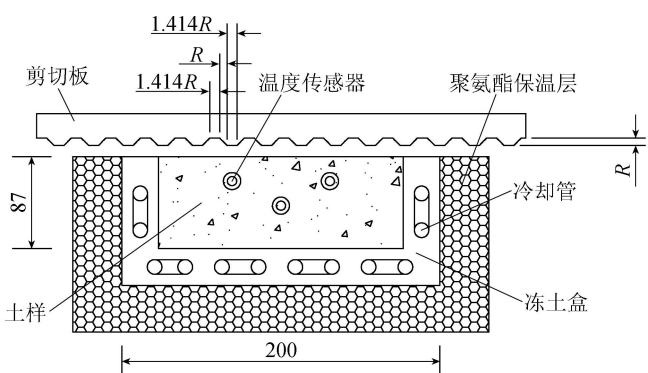


图 4 冻土盒及剪切板结构示意图(单位:mm)
Fig. 4 Schematic diagram of frozen soil box and shear plate(units:mm)

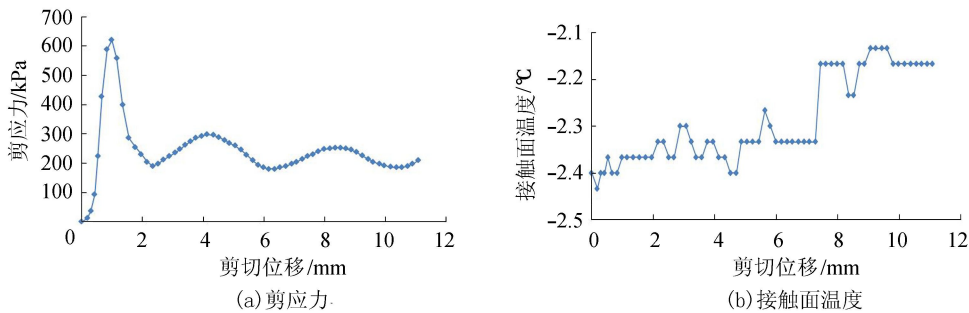


图 5 剪应力及接触面温度随剪切位移变化曲线

Fig. 5 Curve of shear stress and interface temperature varying with shear displacement

图 6 为 $T=-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $R=0.3\text{ mm}$ 、 $\sigma=300\text{ kPa}$ 时部分冻结强度测试结果,由图 6 可发现:剪应力在达到极限冻结强度后随剪切位移继续增加而循环波动变化;法向位移变化趋势与剪应力变化趋势相似;由于剪切破坏瞬间剪切板脱离冻土接触面凹痕显著抬升,故法向位移随剪切位移递增先增大至 0.18 mm,后显著减小至 -0.25 mm;后因粗糙剪切板沿有凹痕冻土接触面滑动,故法向位移随剪切位移继续增加也呈循环波动变化。

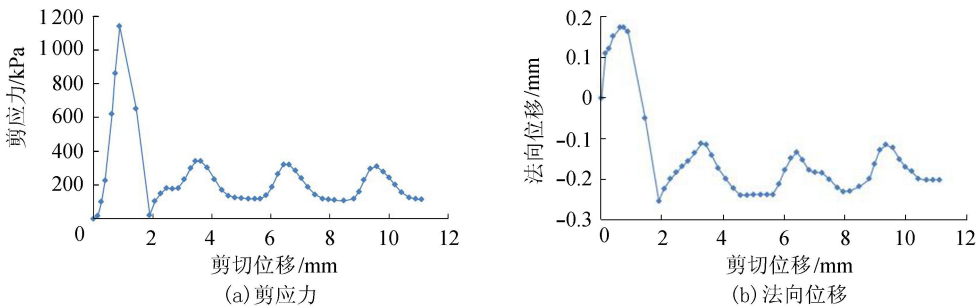


图 6 剪应力及法向位移随剪切位移变化曲线

Fig. 6 Curve of shear stress and normal displacement varying with shear displacement

通过比较前述 2 组测试结果发现:当 $R=1.4\text{ mm}$ (图 5),剪应力在峰值后的波峰间距较大,当 R 减小为 0.3 mm (图 6),剪应力在峰值后的波峰间距相应减小。其他组测试结果也呈相似现象,且当剪切板光滑时剪应力在峰值后下降并保持恒定(图 7, $T=-14\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sigma=500\text{ kPa}$)。据此推断剪应力在峰值后呈现波动变化与剪切板表面凹痕有关,且其波峰间距随剪切板粗糙度减小而减小。

测试结果表明改进后的冻土接触面冻结强度试验装置能满足冻结强度试验要求,且其试验结果与前期

研究发现的剪应力在峰值后波动变化、其变化趋势与剪切切面粗糙度相关的结论(图 7)相吻合。装置改进后,能更有效地冻结土样,更精准地测量、控制温度,更精确地测量水平和竖向位移,因此试验精准度大幅度提高。

3 冻土界面层力学特性试验功能研发

冻土与结构相互作用问题不仅指接触面问题,还包括受接触面约束影响的那部分冻土薄层,即接触界面层,因此有必要研制专门进行冻土界面层力学特性试验的装置。

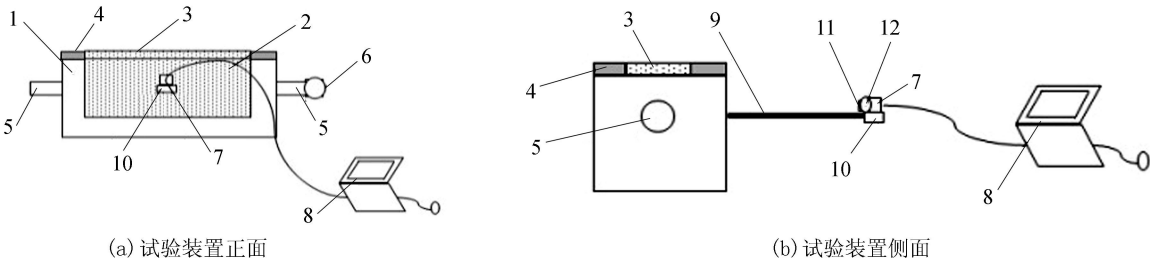
3.1 冻土界面层力学特性试验装置研制

3.1.1 改进冻土盒

保持原土样尺寸(200 mm×100 mm×87 mm)不变前提下,降低冻土盒高度,以使土样能凸出冻土盒顶面 10 mm,以满足对冻土接触界面层侧表面图像采集要求。

3.1.2 改进制样方法

采用厚度为 10 mm、内方孔尺寸为 100 mm×200 mm 制样模板(图 8)叠合在冻土盒上表面辅助进行冻土试样制作,实现土样凸出冻土盒顶面 10 mm。



1—冻土盒;2—土样;3—土样界面层;4—制样模板;5—防翘棒;6—防翘轴承;7—工业相机;8—图像处理装置(笔记本电脑);
9—刚性支架;10—底座;11—定焦镜头;12—LED 照明灯

图 8 冻土接触界面层力学试验装置示意图

Fig. 8 Schematics of the mechanical test apparatus for interface layer of frozen soil

3.1.3 研制接触界面层图像采集系统

图像采集系统由工业相机和镜头、LED 光源、刚性支架和图像处理装置等组成(图 8)。该系统采用的工业相机为针对高清晰度、高分辨率视觉检测领域设计的一款 1400 W 像素 CMOS 彩色相机,采用 7.2 mm 高清无畸变工业定焦镜头,镜头与测量物体距离约 20 cm,视野大小约 13 cm×17 cm,该镜头能克服透视相差(成像时由于距离不同而造成放大倍数不一致现象)的影响,使检测目标在一定范围内运动时得到的尺寸数据几乎不变,满足接触界面层试验对土颗粒位移测量高精度要求。

3.1.4 研发接触界面层图像测量软件

针对冻土接触界面层力学特性试验自主研发图像测量 1400 软件,实现界面层数字图像处理,位移测量精度达±1 μm。具体程序如下:将相机安装于剪切盒支架上,在被测界面层位置安置标定板,连接相机与计算机系统;采集标定板图像并进行灰度变换、滤波、二值化、开始运算和区域标识等图像处理操作,得到各标定点重心像平面坐标(单位:像素);把各标定点像平面坐标和已知物平面坐标(单位:mm)一一对应,形成标定样本并进行系统标定(图 9(a)),得到两坐标间映射关系;采集测量点图像并利用软件进行图像处理(图 9(b)),得到各测量点重心像平面坐标,利用已有映射关系得出测量点物平面坐标,各点物平面坐标减去各自初始值即为各测量点物平面位移。由此精确测量剪切过程中冻土接触界面层各点水平位移。

3.2 冻土界面层力学特性相关测试研究

为验证接触面界面层力学特性试验装置性能,选用南京地铁穿越地区典型粉质黏土进行 2 组单程剪切试验,其含水率为 30%,密度为 1.84 g/cm³,孔隙比为 0.946,液限为 32.4%,塑限为 19.9%,内摩擦角为

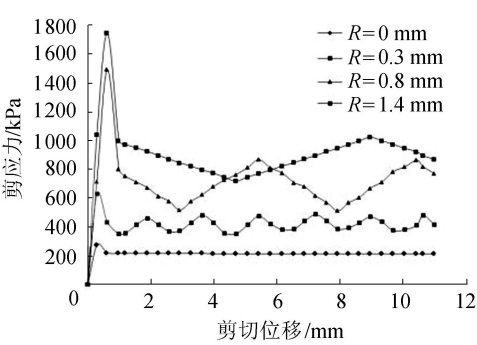


图 7 不同粗糙度条件下剪应力随剪切位移变化曲线^[18]

Fig. 7 Curve of shear stress changing with the shear displacement under different roughness^[18]

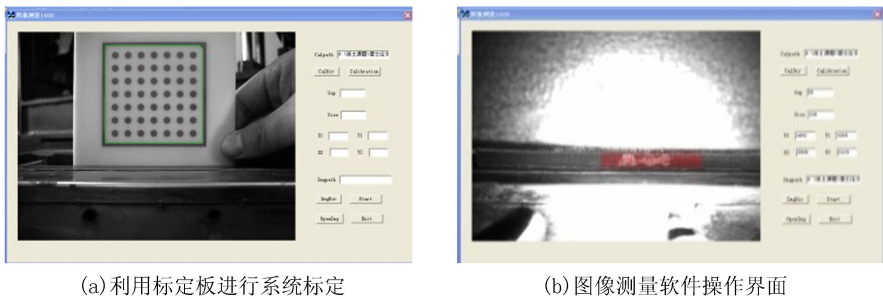


图9 标定板标定及图像测量软件操作界面

Fig.9 Operation interface of calibration board and image measurement software

11.9°,黏聚力为17 kPa。第1组 $T=-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, R 分别为100 kPa、300 kPa、500 kPa、700 kPa;第2组 $\sigma=500\text{ kPa}$, T 分别为 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$,试验结果如图10所示。

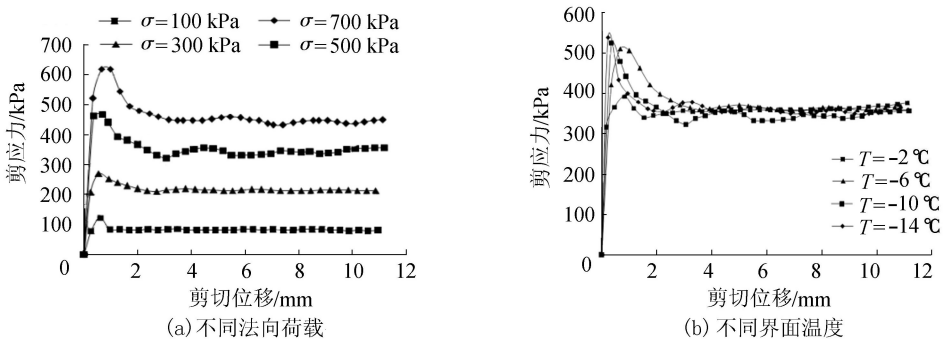


图10 不同法向荷载及温度条件下接触界面剪应力随剪切位移变化关系曲线

Fig.10 Curve of interface shear stress varying with shear displacement under different normal loadings and temperatures

通过界面层图像测量软件得到不同法向荷载下冻土深度~冻土体平均水平位移关系曲线(图11),由图11可知,随冻土深度增加,界面层内冻土体平均水平位移减小。随法向荷载增加,界面层中同一层冻土体平均水平位移增加,而不同层冻土体平均水平位移随深度减小,在深度5 mm 范围内影响较明显。究其原因因为冻土体与剪切板接触界面层水平剪切应力与法向荷载呈正比,靠近接触界面冻土体受剪切应力较大,而随着距接触界面越远该剪切应力逐渐衰减,直至趋向于零,而剪切应力是引起该剪切位移的直接原因。

试验研究表明该系统不仅能实现接触界面层力学特性试验,且能对接触界面层冻土体微量位移进行量测、分析,可以比较真实地反映冻土与结构接触界面层应力和变形力学特性。

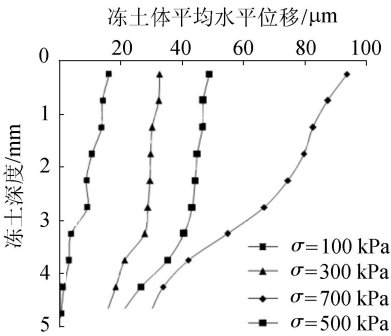


图11 不同法向荷载条件下冻土深度~冻土体平均剪切位移关系曲线

Fig.11 Curve of frozen soil depth and average shear displacements under different normal loadings

4 结 论

对冻土直剪仪进行多功能改进与试验研究,为冻土与结构接触面力学性能试验研究提供更好软硬件条件,并可为冻土接触面同类试验研究和试验仪器研发提供借鉴,其主要研究结论如下:(a)对原大型冻土直剪仪进行改进和优化,重点对温度采集记录装置、位移测量装置、冻土盒装卸装置等进行优化改进,使其能更好满足冻土接触面多功能力学特性试验要求;(b)在原大型冻土直剪仪基础平台上进行功能开发,研制出冻土接触面冻结强度试验、冻土界面层力学特性试验等多功能试验模块;(c)冻土直剪仪多功能改进采用模块化设计,注重各功能模块的合成、兼容性和切换方便性;(d)测试研究表明该试验仪可以满足冻土与结构接

触面和界面层应力变形特性精准研究的要求。

参考文献:

- [1] 董盛时,董兰凤,温智,等. 青藏冻结粉土与混凝土基础接触面本构关系研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1629-1633. (DONG Shengshi, DONG Lanfeng, WEN Zhi, et al. Study of constitutive relation of interface between frozen Qinghai-Tibet silt and concrete[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1629-1633. (in Chinese))
- [2] 张志强, 何川. 用冻结法修建地铁联络通道施工力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3211-3217. (ZHANG Zhiqiang, HE Chuan. Study on construction of cross connection of shield tunnel and connecting aisle by freezing method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3211-3217. (in Chinese))
- [3] 桂跃, 付坚, 侯英杰, 等. 高分解度泥炭土直剪抗剪强度特性及机理[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 418-426. (GUI Yue, FU Jian, HOU Yingjie, et al. Shear strength properties and mechanisms of peaty soil with high degree of decomposition in direct shear tests[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(5): 418-426. (in Chinese))
- [4] 张海霞, 陈勇, 秦帮民. 三轴不固结不排水剪的试验方法[J]. 水利水电科技进步, 2007, 27(3): 30-31. (ZHANG Haixia, CHEN Yong, QIN Bangmin. Methods on unconsolidated and undrained triaxial shear tests[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(3): 30-31. (in Chinese))
- [5] DESAI C S. Cyclic testing and modeling of interfaces[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(6): 793-815.
- [6] UESUGI M, KISHIDA H. Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel[J]. Soils and Foundations, 1986, 26(4): 139-149.
- [7] FAKHARIAN K. Three-dimensional monotonic and cyclic behaviour of sand-steel interfaces: testing and modelling[D]. Ottawa: University of Ottawa, 1996.
- [8] 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, 30(6): 889-894. (ZHANG Jianmin, HOU Wenjun, ZHANG Ga, et al. Development and application of 3D soil-structure interface test apparatus[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 889-894. (in Chinese))
- [9] 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. (in Chinese))
- [10] 胡黎明, 濮家骝. 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 Liming, PU Jialiu. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 431-435. (in Chinese))
- [11] 王伟, 卢廷浩, 宰金珉, 等. 土与混凝土接触面反向剪切单剪试验[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1303-1306. (WANG Wei, LU Tinghao, ZAI Jinmin, et al. Negative shear test on soil-concrete interface using simple shear apparatus[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1303-1306. (in Chinese))
- [12] LEE Joonyong, KIM Youngseok, CHOI Changho. A study for adfreeze bond strength developed between weathered granite soils and aluminum plate[J]. Journal of the Korean Geo-Environmental Society, 2013, 14(12): 23-30.
- [13] 崔颖辉, 刘建坤, 吕鹏. 冻土动荷载直剪仪的研制[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊2): 486-490. (CUI Yinghui, LIU Jiankun, LYU Peng. Development of dynamic load direct shear apparatus for frozen soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Sup2): 486-490. (in Chinese))
- [14] LIU Jiankun, CUI Yinghui, WANG Pengcheng, et al. Design and validation of a new dynamic direct shear apparatus for frozen soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 106: 207-215.
- [15] 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. (in Chinese))
- [16] ZHAO Lianzhen, YANG Ping, WANG Jianguo, et al. Cyclic direct shear behaviors of frozen soil-structure interface under constant normal stiffness condition[J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 102: 52-62.
- [17] ZHAO Lianzhen, YANG Ping, WANG Jianguo, et al. Impacts of surface roughness and loading conditions on cyclic direct shear behaviors of an artificial frozen silt-structure interface[J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 106/107: 183-193.
- [18] 王国良. 人工冻土与混凝土结构接触面冻结强度研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2015.