

文章编号: 1000-7598 (2014) 12-3636-07

冻土与结构接触界面层力学试验系统研制及应用

孙厚超^{1,2}, 杨平¹, 王国良¹

(1.南京林业大学 土木工程学院, 南京 210037; 2.盐城工学院 土木工程学院, 江苏 盐城 224051)

摘要:在天然冻土区或人工冻土工程中存在着大量冻土与结构物接触界面层问题,目前有关此类接触界面层力学变形性能的试验研究手段缺乏。为此,在已研制大型多功能冻土-结构接触面循环直剪系统DDJ-1基础上,改制冻土剪切盒,凸出冻土试样界面层,研发微变形测量系统,组成冻土与结构接触界面层力学试验系统。该系统不仅能实现不同边界条件下接触界面的力学特性试验,而且能测量和分析接触界面层不同位置的冻土体位移,分析研究不同冻土温度、不同结构粗糙度、不同法向荷载作用下界面层冻土体变形特性。试验结果表明,该系统能准确再现冻土与结构接触界面层的力学变形行为,可为系统开展冻土-结构接触界面层的研究提供试验基础。

关键词:冻土; 接触界面层; 单调剪切; 试验系统

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Development of mechanical experimental system for interface layer between frozen soil and structure and its application

SUN Hou-chao^{1,2}, YANG Ping¹, WANG Guo-liang¹

(1. School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. College of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng, Jiangsu 224051, China)

Abstract: In the permafrost region and artificial frozen soil engineering, there are massive interface layers between frozen soil and architectural construction, but it is lack of experimental methods for frozen soil-structure interface mechanical deformation research. For this, based on the developed apparatus called large-scale multi-functional cycle direct shear system for frozen soil-structure interface (DDJ-1), the shearing box of frozen soil was modified to highlight the interface layer of frozen soil, and the measuring system of tiny deformation was developed, thus the experimental system was composed. Using this system, the mechanical properties experiments of interface layer can be performed under different boundary conditions; the displacement of soil can be measured in different positions; and the deformation properties of interface layer can be studied under different temperatures, roughnesses and normal stresses. The results show that, the apparatus can accurately reproduce the mechanical and deformational behaviors of the interface layer between frozen soil and structure; meanwhile, it can provide a experimental basis for carrying out researches on the frozen soil-structure interface layer.

Key words: frozen soil; interface layer; monotony shear; experimental system

1 引言

近年来,随着我国西部大开发推进,越来越多的建(构)筑物与天然冻土形成接触面。与此同时,在大量城市地下工程(如地铁)利用冻结法施工的过程中,人工冻土和结构物以及人工冻土和盾构机之间也存在接触面问题。由于冻土壁与结构之间相互作用引起结构应力场重分布而导致结构损伤,影

响结构的耐久性,因此,对冻土与结构接触面问题的研究就显得十分必要。而以往的研究主要集中在常温土与结构物相互作用的接触面问题,由于冻土的物理属性受其冻结过程、冻融作用以及季节性或长期温度变化等因素的影响,其物理、力学及变形性能和常温土相比差异巨大。因此,冻土和结构接触界面层力学性能较之常温土与结构相互作用存在显著不同,其机制更加复杂。研制能够真实、准确

收稿日期: 2014-01-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51278251); 江苏省高校优秀学科建设项目; 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(No. CXZZ13_0540)。

第一作者简介: 孙厚超,男,1975年生,博士,高级工程师,主要从事岩土与地下工程的教学与研究工作。E-mail: sunhouchao1975@163.com;

通讯作者: 杨平,男,1964年生,教授,博导,主要从事岩土与地下工程的教学与研究工作。E-mail: yangping@njfu.edu.cn

模拟冻土与结构接触界面层力学性能的试验设备及配套测试技术成为冻土接触面界面层力学特性研究的前提。国内外相关学者在常温土与结构接触面试验仪器研制方面做了不少尝试,在国外,1985年,Desai 等^[1]研制了多自由度循环直剪仪;Uesugi 等^[2-3]曾使用矩形截面的单剪仪开展了接触面试验;Fakharian^[4]研制了三维循环接触面剪切仪(C3DSSI),可实现直剪和单剪两类试验。国内,胡黎明等^[5]改进的直剪仪不但能测试土体与结构接触面的力学性能,而且可以通过数字照相技术记录土体颗粒的位移情况;张嘎等^[6]研制了较为先进的大型循环直剪仪,该直剪仪除了能够精确地施加常法向应力、常法向位移、常法向刚度和零法向应力 3 种法向边界,还能通过视窗进行接触面形态细观观测;张建民等^[7]也研制了类似的大型三维接触面试验仪,该仪器能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;李永波等^[8]设计了一套冻土-桩动力相互作用模型试验系统,能较好地模拟和分析冻土和桩基之间的动力相互作用;周国庆等^[9]设计了一套深部土与结构接触面及界面层力学特性试验系统,利用旋转结构面法模拟结构面不同粗糙度和结构面下移法来研究界面层力学特性。但现有的仪器大多数是在直剪仪、单剪仪、环剪仪^[10]、扭剪仪^[11]等基础上地改进,不能很好地测出受结构物影响土的接触界面层变形,尤其是冻土与结构物形成的接触界面层研究,尚无这方面的专用仪。

笔者在赵联桢等^[12]已研制的一台大型多功能冻土-结构接触面循环直剪仪(DDJ-1)基础上,对该设备系统进行升级。在已实现对冻土试样与结构面板之间水平和垂直加载及数据采集的自动化基础上,改制试验剪切盒,凸出受结构影响的接触面界面层,采用数字照相技术和自主开发的图像处理软件,实现对接触界面附近冻土破坏形态、接触界面层厚度和界面层内土体剪切位移的细观测试。试验结果表明,该试验系统可准确模拟和再现单调加载作用条件下冻土与结构接触界面层的变形特性,为系统研究冻土与结构接触面界面层的变形特性和建立实用冻土接触界面层本构模型提供试验基础和重要前提。

2 试验系统构造

DDJ-1 大型冻土直剪仪^[12]是针对人工冻土与结构接触面力学特性问题而研制的,该设备能够提供较大的接触面尺寸;能实现 0~-20℃范围内对接

触面温度的精确控制;能精确施加常刚度、常位移、常应力和零应力 4 种法向边界条件;能够模拟多种粗糙度的接触面;能够实现循环剪切和单调剪切两种剪切形式;应力施加、位移控制和温度测量精准。

通过大量冻土与结构接触面力学特性试验表明,冻土与结构接触面不是单纯的无厚度面,而是冻土与结构面板相互剪切形成的有一定厚度剪切带(这里定义为接触界面层)。为了实现对接触界面层的变形特性研究,利用 DDJ-1 大型冻土直剪仪加载、温控和数据采集系统,对剪切试验盒改制,凸出接触面界面层,并利用数字照相技术,得到接触面界面层的变形图像,自主开发图像处理软件,可分析冻土与结构接触界面层内冻土变形特性。

2.1 冻土与结构面加载系统及数据采集系统

(1) DDJ-1 大型冻土直剪仪

DDJ-1 大型冻土直剪仪是目前研究人工冻土与结构接触面力学特性的主要仪器。其主要结构包括加载系统(包括水平和竖直加载装置)、传感器系统(包括水平、竖直位移传感器;水平、竖直荷载传感器;温度传感器)、制冷及温控系统、数据采集及自稳系统、导轨系统、剪切盒系统、支架系统。主体结构如图 1 所示,仪器的主要性能指标如表 1 所示。

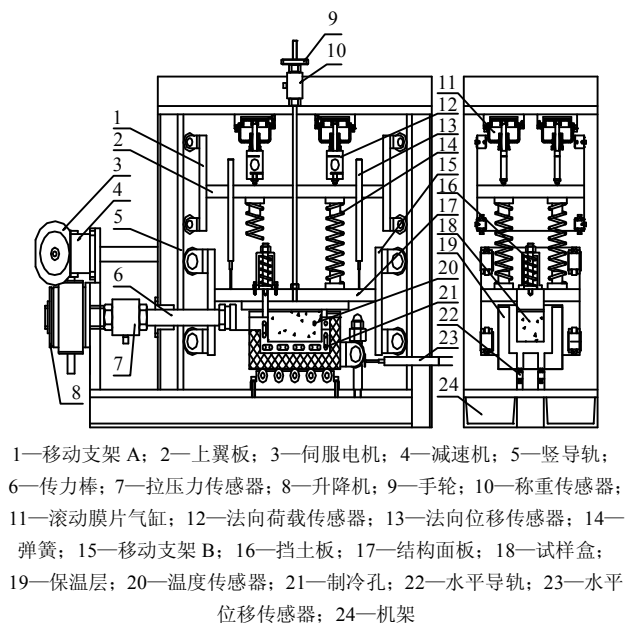


图 1 大型冻土直剪仪示意图

Fig.1 Schematic view of DDJ-1

表 1 DDJ-1 的主要性能参数

Table 1 Parameters of DDJ-1

试样尺寸/cm		荷载/kN		极限位移/ μm		最低温度/℃
长	宽	法向	切向	法向	切向	
20	10	20	100	10	20	-20
精度		0.3%	1%	± 1	± 10	± 0.3

(2) 数据采集系统简介

数据采集系统主要功能是精确施加试验所需法向荷载、剪切速度, 并进行切向荷载和切向位移的实时采集, 试验过程中接触面切向应力及相对位移均由传感器及相应的数据采集系统自动测得。数据采集系统软件运行环境: ①CPU: 最低 Pentium 200 MHz; ②内存为 64 M 以上; ③操作系统: Windows 98/ME/2000/XP; ④至少具备一个 COM 口。试验过程中, 法向荷载、法向位移、剪切力、剪切位移等数据实时显示并同步采集。剪切试验结束后本试验数据以 Excel 格式导出。

2.2 界面层试验剪切盒改进

原有 DDJ-1 大型冻土直剪仪只能通过传感器测出接触面的剪切位移、法向位移、剪切应力、法向荷载等等, 而不能得出接触面界面层的变形特性。为了能够拍摄冻土接触界面层图像, 以便利用和处理界面层图像测量界面层冻土颗粒的位移, 在保持冻土试样尺寸 100 mm×200 mm×75 mm 不变情况下, 将原有剪切盒的高度缩短 10 mm, 即将原有的冻土试样表面与剪切盒上表面齐平改为冻土试样凸出剪切盒上表面 10 mm, 见图 2。同时保持试样上表面到剪切盒的下表面垂直距离与原试样盒的高度不变, 这样不影响装样后剪切盒的正常安装入轨。

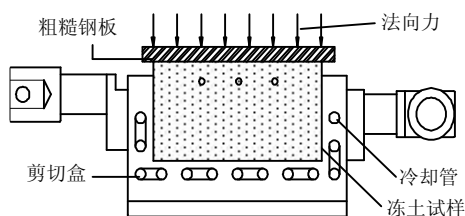


图2 冻土剪切盒
Fig.2 Shearing box of frozen soil

2.3 冻土试样制备方法

为了能够达到突出冻土试样的界面层, 以便于利用照相技术拍摄冻土与结构面板发生相对剪切位移时的界面层图像, 在冻土试样制作过程中采取了如下措施:

(1) 为了观察界面层的土颗粒的位移情况, 制备冻土试样时需使冻土试样凸出于剪切盒 10 mm, 这就需要在剪切盒上安装一中空尺寸为 100 mm×200 mm 的制样模板, 模板厚度为 10 mm, 制样模板须与剪切盒紧密连接, 否则制样过程中, 土体会从侧边溢出。

(2) 剪切盒中分层装入土样。由于一定含水率的土样在冻结过程中会发生冻胀现象, 而制作好的

冻土试样要求上表面平整, 为此, 在装土样过程中分两次装样。在装第 1 层土样时, 完成 80% 土样的装填, 并待土样冻胀完毕后, 再装入剩余土样。这样就可以消除冻土样因冻胀而导致表面不平。

(3) 在冻土试样冻结过程中, 试样表面会遇空气中水蒸气而结霜, 影响冻土与结构接触面界面层图像拍摄。为了消除冻结过程中试样表面结霜带来的影响, 当试样初冻成型时, 采取在试样表面用透明胶带密封方法来隔绝空气中水蒸气对土样的影响。当冻土试样达到试验规定温度时, 揭开透明胶带后进行试验。试验结果表明, 隔霜效果显著。

2.4 图像采集和位移量测系统研发

为了获取冻土与结构接触面界面层内冻土颗粒位移规律, 在与剪切盒相连的支架上按照指定位置固定好专用高清相机及镜头, 拍摄剪切过程中接触面界面层的图像, 并用自主开发的图像处理软件(图像测量 1400)对界面层图像进行处理, 获取接触面界面层冻土颗粒的位移。

(1) 相机和镜头的选取。

相机采用 JHSM1400 相机, 是针对高清晰度、高分辨率的视觉检测领域设计的一款 1 400 万像素 1/2.3 英寸 CMOS 彩色相机。该相机采用高品质 CMOS 图像传感器, 通过 USB2.0 接口传输, 即插即用, 不需要额外的插卡。相机支持 Windows 2000、Windows XP 和 Windows 7 等操作系统。提供二次开发包和演示程序源代码。

镜头采用 7.2 mm 千万高清无畸变工业定焦镜头, 镜头与测量物体平面距离约 20 cm, 视野大小约为 13 cm×17 cm。主要功能是克服透视相差(成像时由于距离不同而造成的放大倍数不一致现象)的影响, 使得检测目标在一定范围内运动时得到的尺寸数据几乎不变。一般情况下, 此镜头是固定焦距和工作距离的, 满足试验对土颗粒的位移测量精度比较高的要求。

(2) 图像位移测量系统。

基于图像处理技术的位移测量方法, 具体测量原理^[13]如下: 在剪切盒规定支架固定点上安装相机, 在被测点界面层位置安置标定板, 完成相机与计算机等系统组装。采集标定板图像并进行灰度变换、滤波、二值化、开运算和区域标识等图像处理操作, 最终得到各标定点重心像平面坐标(单位: 像素); 把各标定点的像平面坐标和已知的物平面坐标(单位: mm)一一对应, 形成标定样本并进行系统标定, 从而得到两坐标间的映射关系; 采集测量点图像并进行图像处理, 得到各测量点重心像平

面坐标, 利用已有的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, 便得到各测量点的物平面位移。

标定板使用 64 mm×64 mm 的 halcon 标准陶瓷标定板, 标志点直径为 4 mm, 圆心距为 8 mm, 黑线框宽为 2 mm, 如图 3 所示。标定板采用最小二乘三次曲面拟合标定法标定, 图像测量过程中使用 B 样条曲线逼近模板的轮廓来实现可变形的模版匹配, 在匹配到的区域中通过插值进行可变形的网格划分, 系统结果精确, 整体误差在 1 μm 左右。

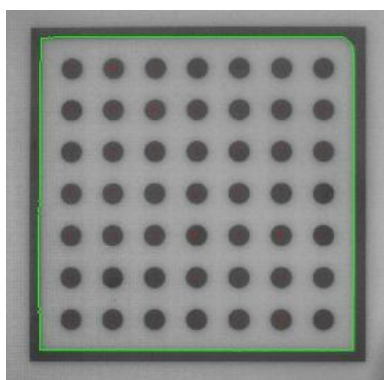


图 3 陶瓷标定板

Fig.3 Ceramics calibration plate

对图像位移测量是基于自主开发的图像处理软件完成的, 本文软件开发的基本环境是 Microsoft Visual C++, 并集成了 Halcon 机械视觉处理软件。Halcon 主要用来解决图像采集、显示、预处理和区域标识等操作。图像测量软件基本功能是标定设置、图像测量设置和测量结果显示。

3 试验步骤

本试验系统使用步骤:

(1) 在计算机中设置试验系统初始状态, 按试验要求设定低温、恒温搅拌反应浴状态, 启动内部无水乙醇的冷却循环。

(2) 试样制备

按试验要求制作冻土试样: 在土样盒上表面安装厚为 10 mm、中空 200 mm×100 mm 模板, 将静置完毕的土样分层装入铜制土样盒里, 插入温度传感器, 连接低温反应浴与土样盒之间的制冷管并启动之间循环制冷, 待土样达到零下冻结状态时, 拆除模板后形成凸出界面层的冻土试样, 并用白色油漆在试样表面留有图像测量标记。

(3) 土样盒安装调整: 将装有冻结土样的试验盒放入 DDJ-1 的水平导轨上, 启动伺服电机快速前进按钮, 使粗糙钢板与土样盒中心位置符合试验要

求, 并安装好位移传感器。

(4) 试样表面温度控制

待冻土试样达到试验温度时, 放下竖向粗糙钢板自重预压。在竖向位移和冻土样温度稳定后, 启动竖向加载系统, 将试验选定的法向边界条件通过粗糙钢板施加到冻土表面上, 并继续冻结以维持冻土试样与粗糙钢板接触面界面层温度稳定, 且满足试验要求。由于温度传感器位于试样表面下方 2~3 cm 处, 所以传感器的温度并不能表示试样表面的温度, 采用热电偶测温法标定试样界面层温度。

(5) 开始剪切和数据图像采集

冻土界面层温度和竖向位移稳定后, 在与试验土样盒相连的支架上安装照相机。启动水平加载系统, 以试验设定好的剪切速率实现单调或循环剪切。试验过程中, 接触面的切向位移、切向荷载、法向位移、法向荷载以及接触面温度都由各自传感器采集并和计算机控制软件实时交互。

接触面界面层土样的位移图像采用照相机随试验过程人工或软件按设定时间间隔自动拍摄采集。

(6) 数据图像处理

试验完成后, 卸除竖向荷载, 停止温度循环系统, 取出冻土试样盒, 并分析整理试验数据。

4 试验验证与初步结果

为了验证接触面界面层力学系统试验仪的可靠性和实用性, 主要对接触面界面层进行不同温度、不同法向应力和不同粗糙度情况下单程剪切试验, 剪切幅值为 11 mm, 剪切位移控制速率为 5 mm/min。选定钢板粗糙度为 0.8 mm, 分别做 2 组试验来验证和研究接触界面层的力学变形特性, 第 1 组冻土界面层温度为 -10 $^{\circ}\text{C}$, 分别施加法向荷载 100、300、500、700 kPa; 第 2 组法向荷载为 500 kPa, 接触界面层冻土温度分别为 -2、-6、-10、-14 $^{\circ}\text{C}$ 。

4.1 试验土样和结构面板

试验土料采用南京地铁穿越的典型土层——粉质黏土的重塑土, 含水率为 30%, 重度为 18.4 kN/m³。试验用结构面板是人工制备的粗糙钢板, 钢板粗糙面铣出均匀排列高度为 R 的正四棱台, 定义粗糙度 R 为钢板粗糙面峰谷距, 分别为 0、0.3、0.8、1.5 mm, 如图 4 所示。下文试验结果均为针对上述冻结土料和粗糙度为 0.8 mm 结构面板形成的接触界面所进行。

4.2 接触界面力学试验结果分析

图 5 不同法向荷载 σ 条件下单程剪切时, 剪应力 τ 与相对剪切位移 μ 的关系曲线。图 6 为不同冻

土温度 T 条件下单程剪切时, 剪应力 τ 与相对剪切位移 μ 的关系曲线。

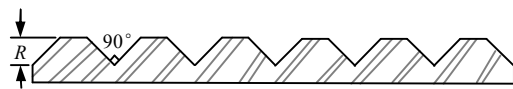


图4 粗糙钢板表面及粗糙度定义
Fig.4 Surface of the rough steel plate and definition of the roughness

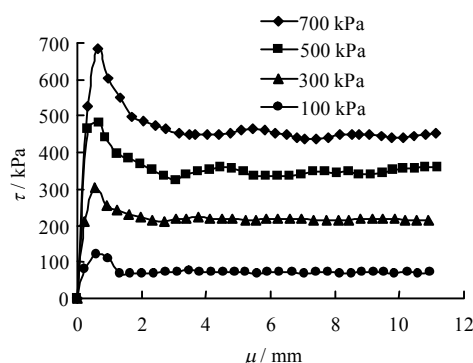


图5 不同法向荷载条件下接触界面 τ - μ 关系图
Fig.5 Shearing strength-shear displacement curves of contact interface under different normal loading conditions

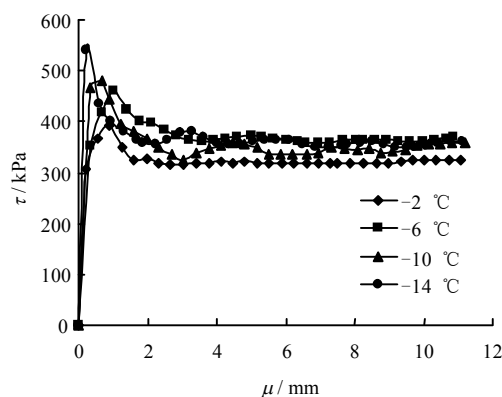


图6 不同温度条件下接触界面 τ - μ 关系图
Fig.6 Shearing strength-shear displacement curves of contact interface under different permafrost temperature conditions

由图5可知, 单调剪切时, 随着剪切位移的增加, μ 在 0.2~0.6 mm 时, 剪切应力开始出现应力峰值, 而后趋于平稳, 直至剪切结束。不同法向应力作用, 剪切应力峰值和平稳剪切应力差异显著; σ 为 700 kPa 时, 剪切应力峰值 τ 为 673.1 kPa, 是 σ 为 100 kPa 的剪切应力峰值的 6 倍, 是平稳剪切阶段的约 6.4 倍。究其原因开始剪切时粗糙钢板不仅要克服冻土与钢板的冰冻胶结力, 还要克服粗糙钢板与冻土接触界面的摩擦力, 随着进一步剪切, 剪切应力主要是克服粗糙钢板与冻土接触界面的摩擦力。且随法向荷载增加, 冻土与钢板形成接触界面的剪切应力峰值, 并且平稳阶段的剪切应力随之

增加。说明法向荷载增大, 粗糙钢板与冻土接触界面咬合程度在增强。

由图6可知, 随着剪切位移的增加, 在 μ 为 0.25~1.00 mm 时, 剪切应力开始出现应力峰值, 而后趋于平稳, 直至剪切结束。不同温度条件下, 剪切应力峰值存在差异, 冻土温度为 -14 °C 时, 接触界面剪切应力峰值最大, 为 540.4 kPa; 冻土温度为 -2 °C 时, 剪切应力峰值最小, 为 393.95 kPa; 应力峰值差异为 1.37 倍, 而在平稳剪切阶段的剪切应力变化不大, 均在 350 kPa 左右波动。究其原因主要为: 在初始剪切时, 不同冻土温度条件下接触界面冻结程度, 温度低的冻土与结构面板大于温度高的冻土与结构面板, 需要克服冻土与结构面板之间的冻结力大。而在平稳剪切阶段, 接触面之间的剪切力主要克服冻土与结构面之间的摩擦力, 主要由接触界面所受法向荷载所决定。

4.3 界面层位移试验结果分析

图7为不同法向荷载 σ 下发生单程剪切时, 界面层内冻土体水平位移 u 随界面层厚度 h 关系曲线。由不同法向荷载下 h - u 关系曲线可知, 随接触界面层深度 h 增加, 界面层内冻土体的平均水平位移在减小。法向荷载为 100 kPa 时, 距接触界面 5 mm 范围内, 随界面层厚度增加, 冻土体平均水平位移分布从 16.31 μ m 到 0.65 μ m; 法向荷载为 700 kPa 时, 界面层厚度 5 mm 内冻土体平均水平位移从 93.76 μ m 到 29.7 μ m。随着法向荷载增加, 界面层中同一层的冻土体的平均水平位移在增加, 而不同层的冻土体平均水平位移随深度变化速率在减小, 在深度 5 mm 范围内影响较明显。究其原因因为冻土体与结构钢板相接触界面层受到法向荷载和水平剪切应力的双重作用下, 靠近接触界面的冻土体受到

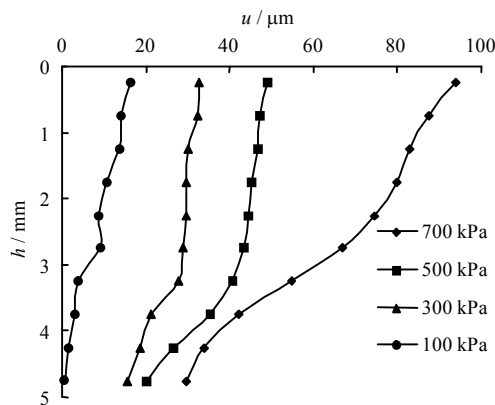


图7 不同法向荷载条件下 h - u 关系图
Fig.7 Relationships between interface layer thicknesses and interface layer soil displacements under different normal loadings

的剪压应力较大, 而随着距接触界面越远, 冻土体受到的应力就越小, 直至为 0。

图 8 为不同温度条件下冻土试样接触界面层单程剪切时冻土水平位移 μ 随界面层厚度 h 的关系曲线。总体上在法向荷载一定条件, 不同温度冻土体与结构面板发生剪切作用时, 随接触界面层深度 h 增加, 界面层内冻土体的平均水平位移在减小, 并趋向于一定值。随着冻土体温度降低, 同一冻土层的土体平均位移在减小, 减小幅度在 $10 \mu\text{m}$ 左右。究其原因因为冻土体主要由土颗粒和冰以及未冻水组成, 温度越低未冻水的含量就越少, 冻土体的强度就越高, 从而呈现同一冻土层土体平均水平位移随温度降低而减少的规律。

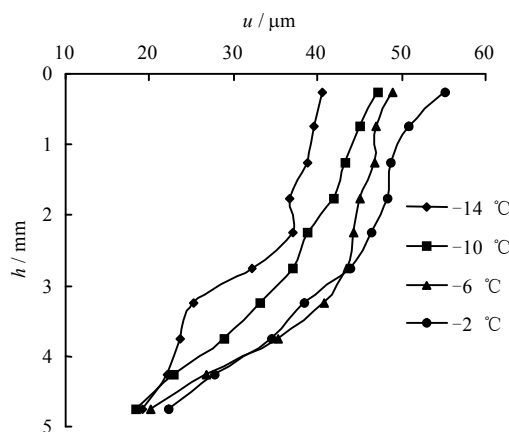


图 8 不同温度条件下 $h-u$ 关系图
Fig.8 Relationships between interface layer thicknesses and interface layer soil displacements under different permafrost temperatures

从图 7、8 中可得出, 不同法向荷载或不同冻土体温度条件下发生接触面剪切时, 对界面层内土体影响深度在 5 mm 左右, 而 3 mm 内变形尤为显著。

5 结 论

(1) 在已有的 DDJ-1 大型冻土直剪仪基础上, 改制了冻土剪切盒, 研发了微米级变形测量系统, 构成冻土与粗糙结构面板形成接触界面层剪切试验系统。该系统不仅能实现接触界面的力学特性试验, 而且能对接触界面层的冻土体微量位移进行量测、分析。

(2) 通过试验验证, 该试验系统稳定, 智能化程度较高, 试验数据有效可信, 可用于模拟工程结构与冻土的接触界面层的力学变形特性。

(3) 接触界面力学特性: 单调剪切时, 不同法向荷载条件或不同冻土体温度条件下, 随着剪切位移的增加, 剪切应力开始出现应力峰值, 而后趋于

平稳, 直至剪切结束。法向荷载对冻土体与结构面板接触界面力学性质影响大于冻土体温度的影响。

(4) 接触界面层变形特性: 不同法向荷载或不同冻土体温度条件下发生接触面剪切时, 界面层内土体水平位移随深度增加而减小; 随着法向荷载增加, 界面层中同一层的冻土体的平均水平位移在增加, 而不同层的冻土体平均水平位移随深度变化速率在减小, 在深度 5 mm 范围内影响较明显。随着冻土体温度降低, 同一冻土层的土体平均位移在减小, 冻土体其主要影响深度在 5 mm 左右, 深度在 3 mm 以内尤为显著。

参 考 文 献

- [1] DESAI C S, DRUMM E C, ZAMAN M M. Cyclic testing and modeling of interfaces[J]. **Journal Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1985, 111(6): 793—815.
- [2] UESUGI M, KISHIDA H. Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel[J]. **Soils and Foundations**, 1986, 26(4): 139—149.
- [3] UESUGI M, KISHIDA H, TSUBAKIHARA Y. Friction between sand and steel under repeated loading[J]. **Soils and Foundations**, 1989, 29(3): 127—137.
- [4] FAKHARIAN K. Three-dimensional monotonic and cyclic behavior of sand-steel interfaces[D]. Ottawa: University of Ottawa, 1996.
- [5] 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 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.
- [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]. **岩石工程学报**, 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.
- [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]. **岩土工程报**, 2008, 30(6): 889—894.
ZHANG Jian-min, HOU Wen-jun, 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.

- [8] 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 Yong-bo, ZHANG Hong-ru, QUAN Ke-jiang. Development of model test system for dynamic frozen soil-pile interaction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(4): 774—780.
- [9] 周国庆, 夏红春, 赵光思. 深部土-结构接触面与界面层力学特性的直接剪切试验[J]. 煤炭学报, 2008, 33(10): 1157—1162.
- ZHOU Guo-qing, XIA Hong-chun, ZHAO Guang-si. Direct shear experiment of deep soil-structure interface and interface layer mechanical characteristics[J]. **Journal of China Coal Society**, 2008, 33(10): 1157—1162.
- [10] BRUMMUND W F, LEONARDS G A. Experimental study of static and dynamic friction between and and typical construction material[J]. **Journal of Testing and Evaluation**, ASTM, 1973, 1(2): 162—165.
- [11] 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.
- [12] 赵联桢, 杨平, 王海波. 大型多功能冻土与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 Lian-zhen, YANG Ping, WANG Hai-bo. 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.
- [13] 侯杰, 钱稼茹, 张微敬, 等. 基于图像处理的二维位移测量系统[J]. 清华大学学报, 2010, 50(6): 826—829.
- HOU Jie, QIAN Jia-ru, ZHANG Wei-jing, et al. 2D displacement measurement system based on image processing[J]. **Journal of Tsinghua University (Science and Technology)**, 2010, 50(6): 826—829.