

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.12.016

冻土空心圆柱仪的研发与应用

郭妍^{1,2},王大雁¹,马巍¹,穆彦虎¹

(1.中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室,兰州 730000;2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:为研究复杂应力路径条件下冻土的力学特性,中国科学院冻土工程国家重点实验室与美国 GCTS 公司合作研发了新型冻土力学试验设备——冻土空心圆柱仪(FHCA-300),该设备通过独立施加内围压、外围压、轴向荷载和扭矩来改变3个主应力的方向和大小,从而更为真实地模拟冻土在地震荷载、交通荷载等多向应力和主应力轴旋转等复杂应力路径下的应力-应变行为.详细介绍了该仪器各部分的组成、传感器和动荷载频率的选取过程以及目前可实现的具体试验类型.此外,着重介绍了冻土空心圆柱仪温度控制系统的设计原理,并且对其控温能力进行了验证,结果证明该系统可以达到预期的降温能力和控温要求.最后利用冻土空心圆柱仪进行了主应力轴静态旋转和循环旋转测试试验,验证了仪器实现包括主应力轴旋转在内的复杂应力路径的能力,初步试验结果表明该设备能够准确再现冻土在复杂应力路径条件下的力学行为和变形行为,可为系统开展冻土在复杂应力条件下的强度、变形特性和本构关系等研究提供技术手段.

关键词:复杂应力路径;动荷载;力学性质;温度;冻土空心圆柱仪

中图分类号: TU445 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2016)12-0114-07

Development and application of frozen hollow cylinder apparatus

GUO Yan^{1,2}, WANG Dayan¹, MA Wei¹, MU Yanhu¹

(1.State Key Laboratory of Frozen Soils Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To study mechanical properties of frozen soil under complex stress path, a novel frozen soil testing system-Frozen Hollow Cylinder Apparatus-300(FHCA-300) was developed by State Key Laboratory of Frozen Soils Engineering and the GCTS company in America. By independently controlling inner, outer confine pressure, axial load and torque, this apparatus can change the magnitude and direction of three principal stresses to accurately simulate the stress-strain behavior of frozen soil under complex stress path including the principal stress rotation and multiaxial stress induced by traffic or seismic. This paper introduced the components of FHCA-300, the selection process of sensors, the frequency of dynamic load and the concrete experimental types in details. The design principle of the temperature control system was concretely presented, and the temperature control ability was verified as well. The results show that the system can meet the desired temperature control requirements. For investigating the apparatus' performance of realizing the complex stress path including principal stress rotation, static principal stress axis rotation and cyclic rotation tests were designed, preliminary test results show that the instrument can accurately reproduce the frozen soil mechanical and deformation behaviors in complex stress path condition. It provides technical means for systematical researches on the strength, deformation characteristics and constitutive relation of frozen soil under complex stress condition.

Keywords: complex stress path; dynamic load; mechanical properties; temperature control; FHCA-300

土体的力学性质受到应力路径的影响,理想状态下只有室内试验条件完全模拟真实加载过程,才

能反应土体的真实响应,在动力条件下尤其如此^[1].对于寒区工程而言,构建筑物在几种熟知的动力荷载,如交通和地震荷载的作用下,冻土地基土体所受应力路径复杂,不仅体现在主应力轴在时间上和空间上连续旋转,而且主应力差的大小也发生连续变化,这对于冻土的变形和强度具有显著的影响^[2].随着中国经济的深入发展,寒区的交通运输工程建设发展迅速,规模日益扩大,等级日益提高.青藏铁路、青藏公路、哈大高铁、哈齐高铁等一系列重大冻土线

收稿日期: 2015-10-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973项目)(2012CB026106);

冻土工程国家重点实验室基金(SKLFSE-2T-17);

国家自然科学基金(41071048)

作者简介: 郭妍(1991—),女,硕士;

王大雁(1971—),女,研究员,博士生导师

通信作者: 王大雁,dywang@lzb.ac.cn

性工程的设计与运行均涉及冻土在交通荷载作用下的动力特性研究.而作为我国冻土主要的分布地区,青藏高原又是地球表面构造活动最频繁的大陆高原,自 2003 年以来,7~8 级以上的大地震已经发生多次,特别是昆仑山口西、玉树等地的大地震对地面建筑物及其地基基础造成了不同程度的破坏,对人民的生命财产安全造成了巨大的损失^[3].地震荷载下冻土的动力特性响应是寒区建设工程抗震设计的重要依据之一,因此开展冻土在动力荷载及复杂应力路径条件下力学性质研究具有重要的意义.冻土力学是一门试验科学,试验手段与试验仪器的研发是冻土力学向前发展的基石^[4].目前,受仪器设备及试验手段限制,现有的冻土强度理论及本构模型的建立大都是通过拟合单轴、三轴压缩和等比加载等简单应力状态及应力路径下的试验结果得到的^[5-8].而考虑实际工程中多向应力及主应力轴旋转效应下的冻土力学特性研究仍属空白.传统的冻土动力试验中,动三轴仪只能施加动态的偏应力,在试样 45°斜面上模拟地震水平向剪切作用^[9-11],交通荷载和地震荷载均属于非比例循环加载,总的偏剪应力同时受到正应力偏差(竖向和水平正应力之差)和剪应力两者交替变化的影响^[12-13].显然,上述动三轴仪所能开展的简单应力路径的动力试验并不能真实地模拟交通和地震荷载下土体中复杂的应力变化过程^[14].因此,为了较为准确获取冻土在复杂应力路径条件下的力学性质和变形行为,迫切需要研发一套新型的冻土力学实验设备,该设备能够实现多向应力和主应力轴旋转等各种复杂应力路径,获得相应的力学和变形参数,为建立更为准确可靠的冻土本构模型提供试验依据.空心圆柱仪是目前可以实现包括主应力轴旋转在内的多种复杂应力条件的最先进的土工试验设备^[1].但是由于国内外现有的空心圆柱仪都是针对未冻土的研究,没有考虑对试样的降温和控温要求,并且加载范围小、传感器量程不足,无法开展土体在负温条件下的力学性质研究.

冻土是由土颗粒、冰、水和空气组成的四相混合物,结构具有明显的各向异性特征,且其强度和变形随着温度的变化会发生明显的改变.为此,中国科学院冻土工程国家重点实验室与美国 GCTS 公司联合研制了用于研究冻土在复杂应力路径条件下力学特性的试验系统:冻土空心圆柱仪(FHCA-300).本文主要介绍了 FHCA-300 的组成,设备参数的选取以及目前可操作的试验类型,并对该仪器的工作能力及可靠性进行了初步验证.从目前结果来看,该试验系统具备良好且稳定的工作性能,能够开展复杂应力状态和应力路径条件下冻土的力学性能试验.

1 FHCA-300 试验系统的组成及主要性能

图 1 是冻土空心圆柱仪 FHCA-300 主要结构以及各部分之间的相互联系的示意图.从图中可以看出, FHCA-300 由压力室及伺服主机系统、液压伺服加载系统、数字控制系统以及温度控制系统 4 部分组成.

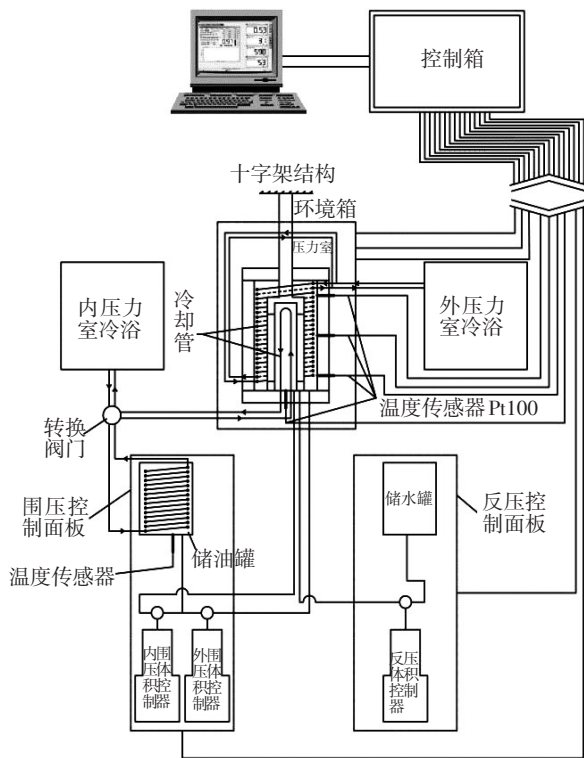


图 1 冻土空心圆柱仪结构示意图

Fig.1 Schematic of frozen hollow cylinder apparatus structure (FHCA-300)

1.1 压力室及伺服主机系统

压力室及伺服主机系统是冻土空心圆柱仪的核心部分,其设计目的是为加载系统和温度控制系统的正常工作提供基础.压力室顶部有轴力/扭矩载荷传感器和位移传感器,负责轴力、扭矩、轴向应变和扭剪应变的测量.传感器的上端是轴力扭矩双驱动装置,负责轴力和扭矩的施加.压力室内部设有降温设施、上压头、下压头、温度传感器和土样.试验中要保证压头与土样刚性连接以确保加载稳定.

1.2 液压伺服加载系统

冻土和未冻土相比,具有负温和强度较高的特点.如果采用气动伺服控制或者水压伺服控制会存在控制精度低或加载能力不足,以及水在负温下发生冻结无法提供围压等一系列问题.液压加载方式相对比较平稳,反应快,易于实现快速启动、制动和频繁换向,而且系统地过载保护功能更加容易实现^[15].因此 FHCA-300 采取液压伺服控制的加载系统.

整个液压伺服加载系统的动力由液压泵提供,然后通过 5 个伺服阀单独控制的作动器(包括轴

力、扭矩、内围压、外围压和反压作动器)将载荷传到土样表面,使土样达到设定的应力状态和应力路径.FHCA-300 配备的液压伺服加载系统与试验系统相连接,可通过数字控制系统进行控制和反馈.

1.3 数字控制系统

数字控制系统由 GCTS 专用的数字控制器和一体化的计算机辅助试验系统(CATS 软件)组成.FHCA-300 的控制器类型是 SCON-2000,内置函数编辑器、数据采集、数字信号的输出/输入.最大特点在于其通用的信号调节模板可以连接任何形式的传感器.CATS 软件中除了静力加载、动力加载、饱和、固结等集成模块外,还包含一个通用试验模块.通用试验模块允许试验人员建立预想的测试程序,包括饱和、固结、三轴、直剪、共振柱/扭剪、真三轴、循环加载等单个试验以及多个连续的试验程序.

1.4 温度控制系统

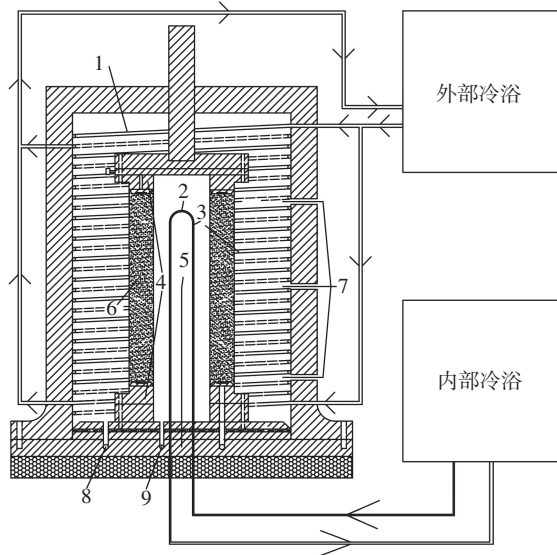
温度控制系统是冻土空心圆柱仪能进行冻土试验的关键,其目的是确保土样内部温度的均匀性.整个温度控制系统由部分构成:冷浴循环系统、温度监测与反馈系统和保温系统.

冷浴循环部分由两台冷浴和均匀分布在压力室内壁的双循环紫铜管以及空心圆柱土样内腔的倒 U 型紫铜管组成.分别用于控制空心圆柱土样外腔和内腔传热承压介质的温度,并最终达到控制土样温度的目的.冷浴中使用的冷媒是工业酒精,降温能力为 $-40 \sim +20\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度控制精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$.为了减少了单向循环所造成压力室内传热介质的温度梯度,我们进行了如下设计:将其中一根双螺旋紫铜管内的冷液顺时针循环,另一根逆时针循环,具体见图 2.

温度监测与反馈系统由四个温度传感器和相应的温度控制、监测和显示元件组成.其中一个温度探头位于空心圆柱土样内腔的中心处,用来监测和反馈测量的土样内腔承压传热介质的温度;另外 3 个温度探头沿试样外壁布置,分别位于上中下 3 个位置,其中位于土样中部附近的温度探头用来监测并反馈土样外腔承压传热介质的温度.与此同时,冷浴将内外腔温度探头反馈的温度数值与设置的目标温度进行对比,自动调节冷浴的降温速率,当温度探头反馈的温度接近预设的目标温度值时,冷浴通过调节冷浴内部液体的温度,使得被降温的硅油的温度始终保持在设定的目标温度值并保持不变.其他两个位于试样顶端附近和底端附近的温度探头用来实时监测试样外腔硅油的温度.

保温的具体措施为:在压力室外表面严密包裹的泡沫保温材料,以及底座下部配置的隔热底板组成,用来减少压力室与外部环境的热交换.

值得指出的是该温度控制系统同时与内、外围压储油罐相连,可在试验前对储油罐中的硅油进行预冷,减少围压加载试验中因为温度过高的硅油进入压力室中造成试样环境温度升高,导致试样力学性质发生变化的影响.



1.双螺旋线形紫铜管 2.内部冷凝管 3.酒精 4.上下压头 5.内部温度传感器 6.试样 7.外部温度传感器 8.外腔油进出口 9.内腔油进出口

图 2 温度控制系统原理示意

Fig.2 Principle of temperature control system

2 FHCA-300 的技术参数

2.1 传感器种类和量程、精度

测量对象决定着传感器型号的选择^[16].FHCA-300 的传感器类型包括荷载传感器、位移传感器和温度传感器三大类.为了使仪器具有广泛的适用性,该设备选取了不同类型和量程的荷载、位移传感器和温度传感器.荷载传感器包括 3 个不同量程轴力和扭矩传感器,用来测量试验过程中作动器施加的轴力和扭矩.考虑到冻土的强度等级较高,因此选取的内、外围压传感器的量程都较大.压力传感器与位移传感器均安装在压力室的外部,使其不受压力室内部温度变化的影响.压力室中的温度传感器采用 Pt-100 传感器,精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,用于温度的量测和反馈.FHCA-300 配置的主要传感器的技术指标见表 1.

2.2 动荷载的加载频率

FHCA-300 的一个重要用途是研究交通、地震荷载下冻土试样的变形和力学性质,因此选择合适的加载频率尤为关键.考虑到研究内容的广泛性,同时兼顾到仪器各方面的配置及能力的适应性,最终, FHCA-300 选取加载频率为 $0 \sim 20\text{ Hz}$,轴向单调加载时激振频率可以达到最高值 20 Hz ,扭剪单调加载频率为 10 Hz ,内、外围压加载有效频率为 2 Hz ,轴向、扭剪耦合动态加载频率为 10 Hz ,轴向、径向

双向同步耦合动态加载频率为 2 Hz,轴向、扭转和围压耦合动态加载频率为 2 Hz,可以满足模拟地震、交通荷载频率的要求.经过测试,发现仪器在单

独和耦合动态加载时的工作性能稳定,同时计算机显示的荷载或变形的曲线不会出现滞后的现象,可以实时反映加载的真实情况.

表 1 FHCA-300 主要传感器的性能指标

Tab.1 Main performance index of FHCA-300 sensors

类型	名称	量程	精度
温度传感器	内外压力室温度传感器	-40~80 ℃	±0.1 ℃
	轴向压力传感器	-100~100 kN	量程 0.1%
压力传感器	扭矩传感器	-1 000~1 000 N·m	量程 0.1%
	内外围压、反压压力传感器	-0.1~22 MPa	量程 0.25%
	孔压压力传感器	-0.1~2.1 MPa	量程 0.25%
	轴向位移传感器	-50.8~50.8 mm	0.001 mm
位移传感器	扭转位移传感器	-114.3~114.3 mm	0.001 mm
	内、外围压,反压位移传感器	-127.0~127.0 mm	量程 0.1%

3 可实现空心试样的试验类型

在进行空心圆柱试样尺寸选择时,对国内外诸多具有代表性的空心圆柱试样尺寸进行了调查研究.其中,Sayao 等^[17]指出合适的试样尺寸将会在很大程度上减缓应力分布的不均匀性和加载方式不同造成端部效应,并且认为试样的壁厚、内外径之比、高径比满足下列条件时试样内的应力状态比较均匀:

壁厚 $\delta = r_o - r_i = 20 \sim 26 \text{ mm}$, (1)

内外半径比 $0.65 \leq \frac{r_i}{r_o} \leq 0.82$, (2)

高度 $1.8 \leq \frac{H}{2r_o} \leq 2.2$. (3)

Saada 等^[18]建议空心圆柱试样满足以下准则时能够使试样内部的应力-应变分布更加均匀:

高度 $H \geq 5.44 \sqrt{r_o - r_i}$, (4)

内外半径比值 $n = \frac{r_i}{r_o} \geq 0.65$. (5)

式中: r_i 、 r_o 分别代表空心圆柱试样的内外半径, H 代表试样的高度.关于未冻土在试样尺寸方面的研究已经逐渐趋于成熟^[19],因此在参考以上建议的尺寸标准外,综合考虑试验的可操作性以及目前相关设备的使用经验^[13-14],最终选取 FHCA-300 空心圆柱试样尺寸为 $D_o \times D_i \times H = 100 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$.针对空心试样,冻土空心圆柱仪可以在不同温度实现的试验类型主要有:1)3 个主应力大小可以独立控制的三轴静、动试验;2)静力和动力纯扭剪试验;3)主应力轴旋转的静力和动力试验(可以同时施加轴力、扭矩、内外围压,在静力试验时控制加载速率;动力试验时控制轴力、扭矩、围压的幅值和频率).

4 FHCA-300 控温能力以及复杂应力路径实现能力的初步验证

FHCA-300 主要是针对冻土力学性质研究而设计

开发的试验仪器.主要目的是为了开展主应力轴旋转等复杂应力路径条件下的冻土力学性质研究.因此对仪器分别进行了控温能力测试和复杂应力路径的实现能力测试.关于压力和加载能力验证和常规空心圆柱仪普通的仪器一样,因此在此便不再赘述.

4.1 控温能力验证

温度的改变会对冻土的内部结构产生巨大的影响,从而导致冻土的力学性质产生明显的变化^[20].为了验证冻土空心圆柱仪的控温能力,设计了目标温度为-10、-15 和-20 ℃的降温试验.在试验之前,首先测试了试样内部温度与传热介质温度达到一致所需的时间,主要的操作是将一个温度探头埋入试样的内部,另一个温度探头放置在传热介质中后开始降温,最终两个温度探头采集的数据结果表明:当降温达到稳定后恒温时间超过 8 h 以上,试样内部的温度与传热介质的温度达到一致.但是即使土样内部的温度达到均匀,但是如果冻结速率较慢时,土样在冻结的过程中也会出现冻胀和水分迁移的现象^[21],因此,为了尽量消除土样中的水分迁移和不均匀冻胀,首先将空心圆柱土样快速冻结至-30 ℃,然后再分别升温至目标温度-10、-15 和-20 ℃,恒温 15 h 左右后取温度探头测量的温度值进行分析.图 3、4、5 分别空心圆柱试样在-10、-15 以及-20 ℃的温度测试结果.图 4 和图 5 表明温度在 7 h 后达到稳定,并且在 24 h 之后温度的波动范围小于±0.1 ℃.温度稳定后,目标温度为-10 ℃时空心圆柱土样外壁上中下以及内部温度探头的温度平均值分别为-9.62、-10.05、-9.90、-10.04 ℃,目标温度为-15 ℃时温度探头的温度平均值分别为-14.55、-14.99、-14.87、-15.02 ℃,目标温度为-20 ℃时温度探头的温度平均值分别为-19.56、-20.01、-19.85、-19.98 ℃,可看出,设置 3 个目标温度下 4 个温度探头测量的温度波动范围均小于±0.5 ℃,由此证明该温度控制系统降温能力和长时间控温能力较好.

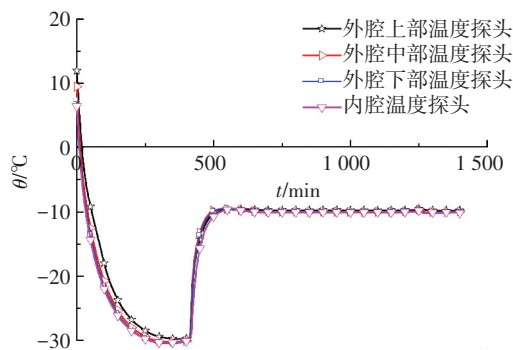


图3 目标温度-10 °C时土样不同位置温度变化曲线

Fig.3 Temperature variation curves of soil samples at different location when the target temperature is -10 °C

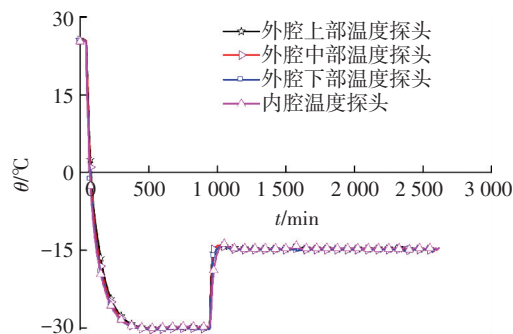


图4 目标温度-15 °C时土样不同位置温度变化曲线

Fig.4 Temperature variation curves of soil samples at different location when the target temperature is -15 °C

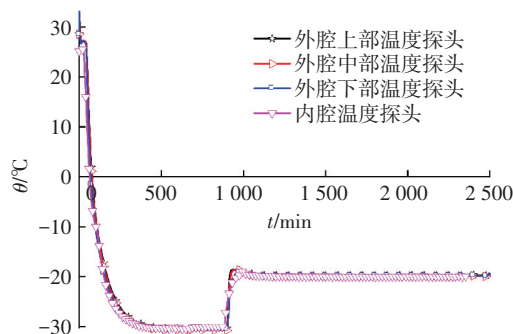


图5 目标温度-20 °C时土样不同位置温度变化曲线

Fig.5 Temperature variation curves of soil samples at different location when the target temperature is -10 °C

4.2 复杂应力路径的实现能力试验

通过空心圆柱试样的不同加载试验,对冻土空心圆柱仪复杂应力路径的实现能力进行了测试,下面选取两组具有代表性的试验进行分析,试验1:主应力轴静态旋转试验;试验2:主应力轴循环旋转试验。两组试验中采用的土样均为青藏粉质黏土,试样尺寸为内径60 mm,外径100 mm,高200 mm,试样干密度为1.9 g/cm³,含水率为15.9%,见图6(a)。

4.2.1 主应力轴静态旋转试验

试验过程中试样的温度设置为-15 °C,试验过程采用应力控制,且应力的加载速率为30 kPa/min,主应力轴旋转的角度为0.3(°)/min,试验的过程同

样利用FHCA-300专用操作模块改变 p 、 b 、 α 、 q 这4个应力参数来达到预先设定的应力路径。

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta),$$

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{\sigma_r - (\sigma_z + \sigma_\theta)/2 + \sqrt{(\sigma_r + \sigma_r)^2/4 + \tau_{z\theta}^2}}{2\sqrt{(\sigma_r + \sigma_r)^2/4 + \tau_{z\theta}^2}},$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\tau_{z\theta}}{\sigma_z - \sigma_\theta}, q = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) = \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2} \right)^2 + \tau_{z\theta}^2},$$

其中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为试样的大、中、小主应力的大小; σ_z 、 σ_r 、 σ_θ 分别为轴向、径向、环向主应力的。

试验1设定的应力路径具体如下:保持 $b=0$ 和 $p=4500$ kPa的条件下,在 $\alpha=0^\circ$ 时使切应力 q 从100 kPa增加到1510 kPa,保持 $q=1510$ kPa,同时使主应力轴旋转至 45° ,最后保持 α 不变,增加切应力 q 直至试样破坏。试样最终发生破坏后出现明显剪切痕迹,见图6(b)。从图7可看出,实际应力路径围绕设计的应力路径虽然有略微的波动,但整体还是保持不变。因此通过试验1证明冻土空心圆柱仪可实现冻土主应力轴的静态旋转试验。



(a) 试验前的试样

(b) 试验后的试样

图6 青藏粉质黏土空心圆柱试样

Fig.6 Hollow cylinder specimen of Qinghai ibet silty clay

4.2.2 主应力轴循环旋转试验

为考察仪器在高频下对输入波形的反应能力,在-10°对空心圆柱土样进行了轴力、扭矩与内外围压相位差为0°的耦合循环加载试验。轴力、扭矩与内外围压的振动频率采用的频率为2 Hz,波形选择正弦波,轴力的振幅为4 kN,扭转角的振幅为5°,内外围压的振幅为2 MPa,所选的变载振幅均小于全量程的1/10。图8、9给出了轴向力和轴向位移的振动曲线,图10、11为内外围压的振动曲线,图12、13为转角和扭矩的振动曲线。从图8~13可看出,轴力、内外围压、转角、扭矩实际的振动曲线与设计的曲线较为一致。因此,本文研制的仪器能够实现冻土主应力轴的动态旋转试验。

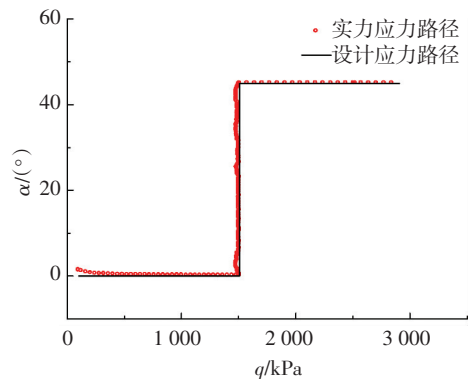


图 7 主应力轴静态旋转试验

Fig.7 Static principal stress axis rotation test

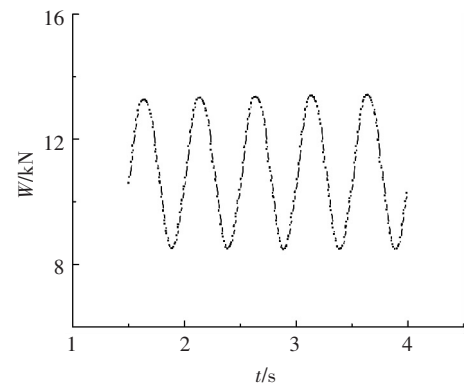


图 8 轴向力实际振动曲线

Fig.8 Measured vibration curves of axial load

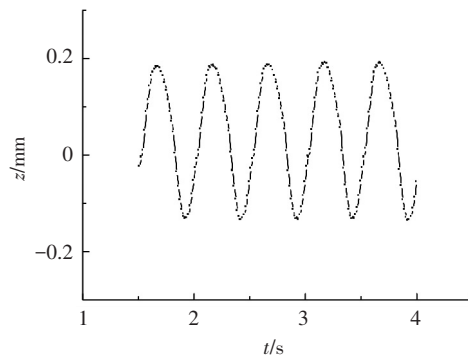


图 9 轴向位移实际振动曲线

Fig.9 Measured vibration curves of axial displacement

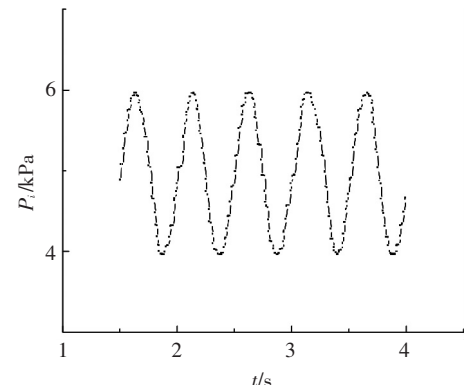


图 10 内围压实际振动曲线

Fig.10 Measured vibration curves of inner press

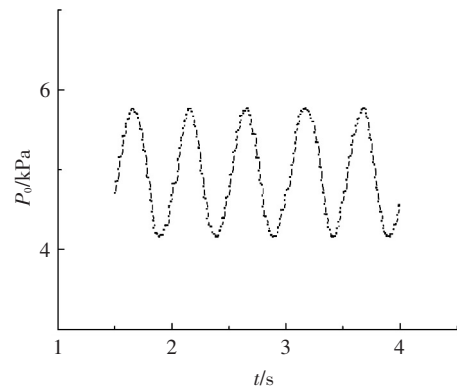


图 11 外围压实际振动曲线

Fig.11 Measured vibration curves of outer press

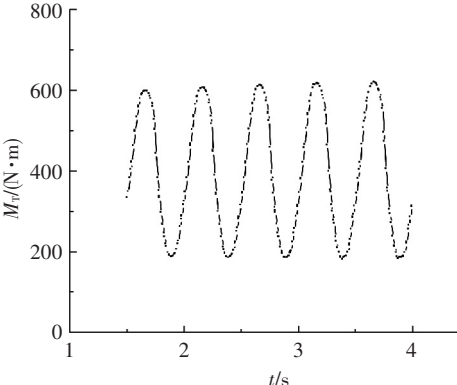


图 12 扭矩实际振动曲线

Fig.12 Measured vibration curves of torque

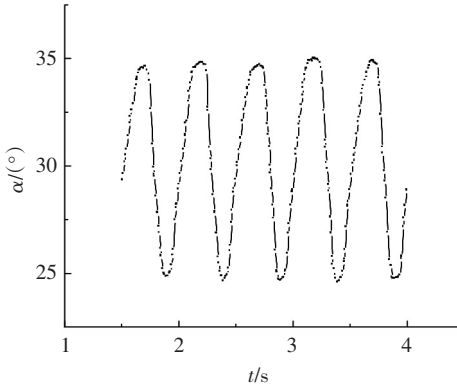


图 13 转角实际振动曲线

Fig.13 Measured vibration curves of torsion angle

5 结 论

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室与美国 GCTS 公司合作研发的冻土空心圆柱仪(FHCA-300)具有 4 个独立的加载参数(轴力、扭矩、内围压和外围压),试验系统采用液压伺服闭环控制的加载方式,可以通过计算机辅助试验系统配合数字控制器对仪器进行全自动控制,具备完善的量测系统与数据采集系统.该仪器能够真实的模拟包括多向应力和主应力轴旋转等复杂应力路径的加载过程,为冻土在交通、地震等动力荷载作用下的力学行为的研究提供了更为先进的技术支

持,是目前开展复杂应力路径条件下冻土的力学特性和各向异性研究的较为理想的试验仪器。

致谢:本项仪器的研发过程得到吴青柏研究员、常小晓高级工程师、王贵荣高级工程师、邓友生高级工程师、赵淑萍研究员、杨曙光工程师以及王永涛博士、关辉博士的大力帮助,谨此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 黄博,丁浩,陈云敏,等. GDS 空心圆柱仪动力试验能力探讨[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 314–320. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2010.01.054.
HUANG Bo, DING Hao, CHEN Yunmin, et al. Preliminary study of dynamic testing performance of hollow cylinder apparatus[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 314–320. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2010.01.054.
- [2] ISHIHARA K. Soil behavior in earthquake geotechnics[M]. New York: Oxford University Press Inc., 1996. DOI: 10.5860/CHOICE.34-5113.
- [3] 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2): 486–490.
CUI Yinghui, LIU Jiankun, LÜ Peng. Development of dynamic load direct shear apparatus for frozen soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S2): 486–490.
- [4] 张世银, 汪仁和. 多功能冻土三轴试验机的研制与应用[J]. 试验技术与试验机, 2007, 47(1): 67–70. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3407.2007.01.019.
ZHANG Shiyin, WANG Renhe. The studying fabrication and application of the multifunctional frozen triaxial test apparatus[J]. Test Technology and Testing Machine, 2007, 47(1): 67–70. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3407.2007.01.019.
- [5] HAYNES F D, KARALIUS J A, KARAFUT J. Strain rate effect on the strength of frozen silt[R]. USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Research Report 350. 1975; 27. DOI: 10.1016/0148-9062(78)91255-X.
- [6] PARAMESWARAN V R, JONES S J. Triaxial testing of frozen sand[J]. Journal of Glaciology, 1981, 27(95): 147–155.
- [7] GREGORY D R, GERMAINE J T, LADD C C. Triaxial testing of frozen sand; equipment and example results[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2003, 17(3): 90–118. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-381X(2003)17:3(90).
- [8] 马巍, 王大雁. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
MA Wei, WANG Dayan. Frozen soil mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [9] 吴志坚, 王兰民, 马巍, 等. 地震荷载作用下冻土的力学参数试验研究[J]. 西北地震学报, 2004, 25(3): 220–224. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2003.03.004.
WU Zhijian, WANG Lanmin, MA Wei, et al. Laboratory study on dynamics parameters of frozen soil under seismic dynamics loading[J]. Northwestern Seismological Journal, 2004, 25(3): 220–224. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2003.03.004.
- [10] 徐建平, 谢伟平. 典型动力荷载作用下的应力路径及土动力分析方法[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2002, 19(2): 42–45.
XU Jianpin, XIE Weipin. Paths of stress under typical dynamics load and the summary of dynamic analytical methods of soil[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition), 2002, 19(2): 42–45. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0985.2002.02.012.
- [11] 姚兆明, 毛芬, 李哲, 等. 动态空心圆柱剪切仪模拟复杂应力路径能力[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2012, 32(5): 71–78.
YAO Zhao ming, MAO Fen, LI Zhe, et al. Capacity analysis of dynamic hollow cylinder shear apparatus simulating complicated stress path[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2012, 32(5): 71–78.
- [12] 张金良. 浙江大学 5Hz 空心圆柱仪调试研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
ZHANG Jinliang. Research on the tuning of 5Hz hollow cylinder apparatus of Zhejiang University[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [13] 沈扬. 考虑主应力方向变化的原状软粘土试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
SHEN Yang. Experimental study on effect of variation of principal stress orientation on undisturbed soft clay[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [14] 栾茂田, 郭莹, 李木国, 等. 土工静力-动力液压三轴-扭转多功能剪切仪研发及应用[J]. 大连理工大学学报, 2003, 45(5): 670–675.
LUAN Maotian, GUO Ying, LI Muguo, et al. Development and application of soil static and dynamic universal triaxial and torsional shear apparatus[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2003, 45(5): 670–675.
- [15] 冯忠帅. 新型土工三轴试验仪的研制[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
FENG Zhongshuai. Development of a new geotechnical dynamic triaxial test instrument[D]. Dalian: Dalian University of technology, 2013.
- [16] 沈扬, 周建. 空心圆柱仪(HCA)性能指标分析及同类产品比较[J]. 科技通报, 2006, 22(5): 671–680.
SHEN Yang, ZHOU Jian. The analysis and comparison on the performance index of Hollow Cylinder Apparatus in the world[J]. Bulletin of Science and Technology, 2006, 22(5): 671–680.
- [17] SAYAO A, VAID Y P. A critical assessment of stress Non-uniformities in hollow cylinder test specimens[J]. Soils and Foundations, 1991, 31(1): 60–72. DOI: 10.3208/sandf1972.31.60.
- [18] SAADA A S, TOWNSEND F C. State of the Art: Laboratory Strength Testing of soil[J]. Laboratory shear strength of soil, 1981, 740: 7–77. DOI: 10.1520/STP28744S.
- [19] HIGHT D W, GENS A, SYMES M J. The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soil[J]. Geotechnique, 1983, 33(4): 355–383. DOI: 10.1680/geot.1983.33.4.355.
- [20] 霍明, 汪双杰, 章金钊, 等. 含水率和温度对高含冰量冻土力学性质的影响[J]. 水利学报, 2010, 41(10): 1165–1172.
HUO Ming, WANG Shuangjie, ZHANG Jinzhao, et al. Experimental study on influences of water content and temperature on mechanical properties of ice-rich frozen soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(10): 1165–1172.
- [21] 邱国庆, E.张伯伦, I.伊斯坎达. 莫玲粘土冻结过程中的离子迁移、水分迁移和冻胀[J]. 冰川冻土, 1986, 8(1): 1–14.
QIU Guoqing, CHAMBERLAIN E, ISKANDAR I. Ion and moisture migration and frost heave in freezing Morin clay[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1986, 8(1): 1–14.