

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0147

LEI Lele, WANG Dayan, WANG Yongtao, et al. Study on preparation method of remolded hollow cylinder specimen of frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(5): 1674–1680. [雷乐乐, 王大雁, 王永涛, 等. 冻结黏土空心圆柱试样制样方法[J]. 冰川冻土, 2022, 44(5): 1674–1680.]

冻结黏土空心圆柱试样制样方法

雷乐乐¹, 王大雁², 王永涛³, 张斌龙²

(1. 东华理工大学 土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 内蒙古大学 交通学院, 内蒙古 呼和浩特 010070)

摘 要: 冻土空心圆柱仪是室内研究冻土在车辆荷载等复杂应力路径下力学特性的主要仪器, 试验中为实现主应力轴方向在垂直于径向平面内连续旋转, 其试样多采用薄壁空心圆柱试样, 但由于空心圆柱试样薄壁的特点, 增加了制样的困难, 成为制约冻土空心圆柱试验研究进展的主要阻碍。为此, 借鉴冻土三轴试验的制样方法, 基于实验室现有的制样条件, 设计了一套重塑冻结黏土空心圆柱试样的制样装置, 可提高制样效率, 减小制样过程中人为因素的影响; 随后, 基于该制样装置, 提出了一种冻结黏土空心圆柱试样的制样方法, 给出了制备重塑冻结黏土的制样步骤。最后, 通过对所制备试样的物理力学性质测定, 发现采用该制样方法可以制备含水率及干密度均匀、力学性质稳定的重塑冻结黏土试样; 同时对两个平行制备的冻结黏土试样的不同主应力轴方向的定向剪切试验结果进行了比较, 证明了所提出的制样方法具有良好的可重复性, 且所得的冻土力学特性与已有研究成果吻合较好, 可用于进一步系统研究复杂条件下冻结黏土的静、动力学特性。

关键词: 冻土; 空心圆柱试样; 制样方法; 力学特性

中图分类号: P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)05-1674-07

0 引言

冻土是由固体颗粒、冰、液态水和气体四种基本成分所组成的非均质、各向异性的一种特殊岩土材料^[1], 由于其组成物质的多相性和复杂性, 决定了冻土的工程性质是复杂多变的^[2-3]。冻土的室内试验是获取冻土的物理、力学参数的有效途径, 为冻土工程设计和数值计算提供依据。而在进行室内试验时, 试样制备是重要的一环, 同样是制约着室内试验研究发展的重要因素^[4]。由于冻土原状试样取样、保存、运输以及切削等均存在较大困难, 且费用较高, 因此现阶段主要通过冻土的重塑试样进行其力学特性的试验研究。

目前冻土空心圆柱仪是室内研究冻土在车辆荷载等复杂应力路径下力学特性的主要仪器, 试验

中为实现主应力轴方向在垂直径向平面内的连续旋转, 其试样多采用薄壁空心圆柱试样, 而室内重塑空心圆柱黏土试样制样方法多集中于未冻土研究中, 主要有两类: 一类为击实法, 浙江大学张泉芳等^[5]自行研制的击实器能够完成对试样的击实, 但是在击实过程中试样尺寸与目标含水率、击实功、分层高度等因素存在相互影响^[4]; 另一类为固结法, 首先由 Sheeran 等^[6]提出, 随后经 Lin 等^[7]、纪玉诚等^[8]、沈扬等^[9]的研发与改进, 制样技术相对成熟, 但是试样在固结过程中不可避免地会出现土颗粒大小分布不均匀现象, 会对试验结果产生影响。在冻土试验研究中, 陈敦等^[10]、雷乐乐等^[11]基于冻土空心圆柱仪(FHCA-300)^[12], 初步探索了主应力轴方向角、应力洛德角变化对冻土静力学特性的影响, 但还未有关于冻土空心圆柱试样制样方法

收稿日期: 2021-08-11; 修订日期: 2022-05-25

基金项目: 东华理工大学博士启动基金项目(DHBK2019242); 国家自然科学基金项目(41871054; 41977236); 冻土工程国家重点实验室项目(SKLFSE-ZT-31)资助

作者简介: 雷乐乐, 讲师, 主要从事冻土力学及岩土地下工程等方面的教学和科研. E-mail: leilele3917@163.com

通信作者: 王大雁, 研究员, 主要从事冻土力学及寒区工程等方面的研究. E-mail: dywang@lzb.ac.cn

的研究。为此,本文借鉴冻土三轴试验的制样方法,依托冻土工程国家重点实验室现有的制样条件,自行设计加工了一套黏土空心圆柱试样的制样装置,基于该装置,经过课题组成员的反复尝试,提出了一套切实可行的黏土空心圆柱试样制样方法。

1 空心圆柱黏土试样制样装置

该制样装置用于制备外直径 100 mm×内直径 60 mm×样高 100 mm^[9]的空心圆柱试样,主要由传力杆、不锈钢外筒、不锈钢内筒、箍圈、内筒帽和带齿的上下压头组成,如图 1 所示。加力杆与压样机的圆柱形压头相接,其作用是将压力传递给带齿的上压头。外筒由三瓣圆弧形不锈钢金属片拼接组成,并对不锈钢外筒的内壁刨光,在外面用上、中、下三个紧箍圈固定,这样不仅保证所制备试样的完

整性,而且便于脱模,减小对试样的扰动,不锈钢外筒的内直径为 100 mm(与试样的外直径相同),外直径为 120 mm,壁厚 10 mm(保证制样过程中提供足够的刚性外护壁),筒高 290 mm(保证一个试样的松土在人工振捣下能全部装入制样筒内);内筒由两瓣半弧形的不锈钢金属片及一个长方形的抽板组成,两瓣半弧形的不锈钢的内直径为 40 mm,外直径为 60 mm(与试样的内直径相同),壁厚为 10 mm(保证制样过程中提供足够刚度的内护壁),筒高 290 mm;长方形抽板的作用是在脱模时先抽掉抽板,卸掉内筒之间的挤压力,方便内筒的脱模,内筒的外壁也刨光,便于脱模;带齿的上下压头将加载杆的压力均匀传递至试样,并使上下表面带有齿槽,避免切削过程对试样的扰动。内筒帽是一个圆形的金属盖,直径比不锈钢对瓣内筒的直径稍大,主要是防止装样时土样洒入内筒中间。

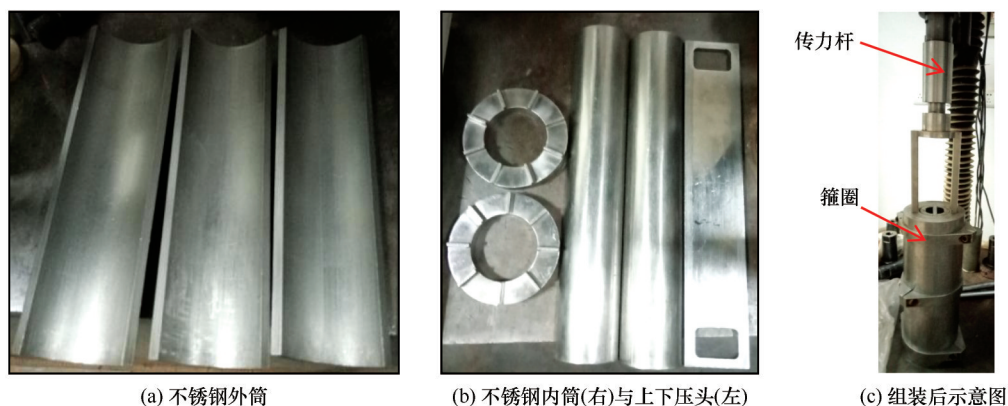


图 1 制样装置各部分示意图

Fig. 1 The novel preparation device for remolded hollow cylinder specimen of frozen soil: stainless steel outer cylinder (a); stainless steel inner cylinder (right) and upper pressure head (left) (b); installation form (c)

该装置的优点有:一是对于黏土饱和样和非饱和样均可适用;二是制成的试样上直接形成齿槽,且压制试样时用的齿与试验机上的齿是完全相同的,避免人工切削过程中造成的齿槽宽窄不一、深浅不一的现象;三是通过压样机制样,采用应力控制为主、位移速率控制为辅,保证制样中试样均匀受力,避免人工击实过程中试样受力的不均匀。

但该制样设备存在以下几点不足之处:一是对于粉土和砂土,只有当试样中黏粒含量较高时(一般要大于 20%),才能显著提高制样的成功率;而对于黏粒含量较低的粉土和砂土样,目前也可采用该制样装置制样,但需要先将试样冻结,然后再进行试验,但会增大对试样的扰动,后期会进一步改进制样装置,扩大该制样装置的适用范围。二是该制

样装置为不锈钢材质,较为笨重,翻转装置时,存在安全风险,后期将会积极探索尝试使用新材料或改进制样装置,既保证装置的刚度,又提升制样的安全性。

2 制样方法

基于以上的制样设备,经过反复探索,提出了冻结黏土空心圆柱试样制样方法,其具体的制样步骤如下:

(1)制样准备工作。根据室内试验确定的目标含水率和干密度,考虑自然风干条件下土样的初始含水量,计算出一个空心圆柱试样所需的干土质量和用水量,同时考虑到制样过程中土样的损耗,计算

干土质量和用水量均需增大 3%~5%。为了尽可能地控制各组试验的初始条件,拌和湿土时一次性拌和一组试验的用量,拌和均匀后,将湿土过 5 mm 筛使颗粒大小均匀,然后用保鲜袋装好密封,在密闭的玻璃罐中放置 24 小时,保证湿土中的含水率均匀分布,如图 2(a)和图 2(b)所示。

(2)安装制样装置。为便于脱模,将上下压头带齿的一边,以及外筒内侧和内筒外侧均用凡士林擦拭。随后将下压头放在试验台上,齿面朝上,内筒拼装好放置在下压头内;不锈钢三瓣外筒紧贴下压头外侧放好,装上紧箍圈,旋紧固定螺丝,盖上内筒帽,完成制样装置的安装,如图 2(c)所示。

(3)装入湿土。称取一个空心圆柱试样所需要的湿土质量,分层倒入内外筒之间,并适当振捣,然

后将上压头装好,带齿的一面与土体接触,完成装样。

(4)压制试样。为保证试样受力的均匀性,采用两头对称压样,压样过程采用应力控制为主,位移速率控制为辅的方法,保证两头的最大轴向力尽可能相等。经过多次的反复尝试,发现当正面位移为总位移的 85%~88% 时,制样过程中两头的最大轴向力比较接近。

(5)脱模。首先抽取内筒中间的长方形抽板,卸除部分内筒与试样之间的压力,然后将两瓣内筒沿试样内壁缓缓向上抽出;拆除外筒上的三个紧箍圈,将三瓣外筒逐一沿试样外壁缓缓向上抽出;最后将上下压头逐一取出,即得到所需的黏土空心圆柱试样,如图 2(d)所示。



图2 试样制备流程图

Fig. 2 The process of specimen preparation: soil mixing (a); store mixed soil (b); install the sample making device (c); the hollow cylinder sample (d)

3 试样的物理力学性能测定

3.1 试样物理性能测定

在完成试样制备后,采用烘干法测定试样冻结

前后的分层含水率。由于试样为空心圆柱试样,较难采用环刀法测定其干密度,因此采用切削立方体试样块配合烘干法测定其干密度,验证已制备的空心试样含水率和干密度的均匀性。含水率的测定

方法:沿竖直方向将整个土样分为20层,每层高度为1 cm,每层取3个测点,将3个测点取平均值作为该层的含水率;测试分3组进行,每组两个试样,第一个试样脱模后立即用保鲜膜包裹严密,再用保鲜袋密封包好,在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温箱中冻结24小时;第二个试样脱模后,立即测定其分层含水率。干密度的测试方法:沿竖直方向将整个试样分为5部分,每部分取3个测点,将3个测点取平均值作为该部分的干密度;测试分2组,每组两个试样,一个为冻结前试样,另一个为冻结后的试样。各组试样冻结前后的分层含水率和干密度变化如图3~4所示。

从图3中可以看出,试样整体含水率最大差值为0.65%左右,说明试样的含水率自上而下分布较均匀,各层含水率在冻结前后变化较小,同时也证实了在快速冻结条件下,可以有效抑制黏土试样冻结过程中的水分迁移,保证试样冻结前后整体含水率的均匀性。对于各组试样,其平均含水率的最大差值为0.30%,说明利用该制样方法制备的试样个体间差异性较小。

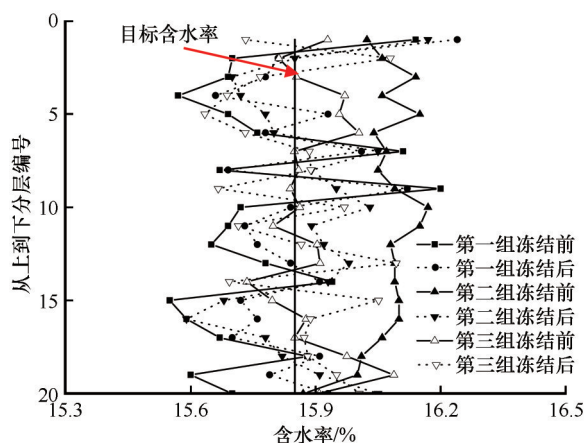


图3 试样从上到下冻结前后含水率变化情况

Fig. 3 The distribution of moisture content in prepared specimen

从图4可以看出,试样的干密度最大差值为2.80%,主要是由于测试各层干密度的试样块为人工切削后,再测量其尺寸,存在一定的测量误差。但从图4还可以发现,试样从上到下干密度均在目标值附近呈较小幅值波动,呈较均匀地分布特征,即使经历冻结,试样的整体干密度变化幅度较小,证明采用该制样方法制备的试样整体均匀性较好。

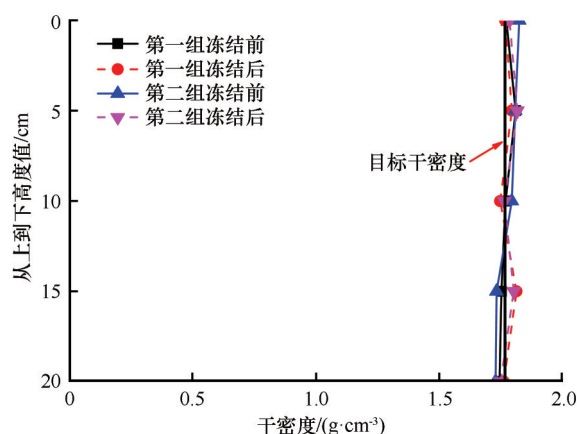


图4 试样冻结前后干密度变化情况

Fig. 4 The distribution of dry density in prepared specimen

3.2 试样力学特性测定

采用冻土空心圆柱仪(FHCA)对所制备的试样进行力学特性测定。共开展两组试验,分别为试验数据的可重复性测定、定向剪切试验(主应力轴方向固定在某个方向下的剪切试验)。两组试验的加载过程为:第一阶段将所有应力参数加载到应力路径设定的初始值,如表1和表2所示,稳定5 min;第二阶段为试验加载阶段,控制中主应力系数 b 值、主应力轴方向角 α 、平均主应力 p 值和试验温度保持不变,最大剪应力 q 值从0开始增加,直至试样发生破坏。

表1 试验应力路径表

Table 1 The test stress path

试验编号	温度/ $^{\circ}\text{C}$	p/kPa	b	$\alpha/(^{\circ})$	q/kPa
1-1	-10	4 500	0	15	从0开始增加,直至破坏
1-2	-10	4 500	0	15	从0开始增加,直至破坏
2-1	-10	4 500	0	30	从0开始增加,直至破坏
2-2	-10	4 500	0	30	从0开始增加,直至破坏
3-1	-10	4 500	0.5	15	从0开始增加,直至破坏
3-2	-10	4 500	0.5	15	从0开始增加,直至破坏
4-1	-10	4 500	0.5	30	从0开始增加,直至破坏
4-2	-10	4 500	0.5	30	从0开始增加,直至破坏

表2 试验应力路径布设表
Table 2 The test stress path

试验编号	温度/℃	p/kPa	b	$\alpha/(\text{°})$	q/kPa
第一组	-5	4 500	0	30	从0开始增加,直至破坏
	-10	4 500	0	30	从0开始增加,直至破坏
	-20	4 500	0	30	从0开始增加,直至破坏
第二组	-5	4 500	0.5	30	从0开始增加,直至破坏
	-10	4 500	0.5	30	从0开始增加,直至破坏
	-20	4 500	0.5	30	从0开始增加,直至破坏

3.2.1 试验数据的可重复性测定

为了测定试验结果的可重复性,在-10℃条件下对空心圆柱土样进行4组定向剪切试验,每组试验有两个平行试验,分别为试验一和试验二。试验的应力路径如表1所示。

图5是4组试验的轴向应力-应变曲线,从图中可以看出两组试验的应力-应变曲线均吻合较好,试样在加载过程中的强度差值最大为1.8%,说明该制样方法具有较好的可重复性。

3.2.2 定向剪切试验

为了验证该制样方法制备试样的力学特性,采用三种不同的试验温度:-5℃,-10℃和-20℃,以及两个不同 b 值的试验,具体的试验方案如表2所示。

图6为不同温度下试样的应力-应变曲线,从图中可以看出,随着温度的降低,冻土的强度会增加,

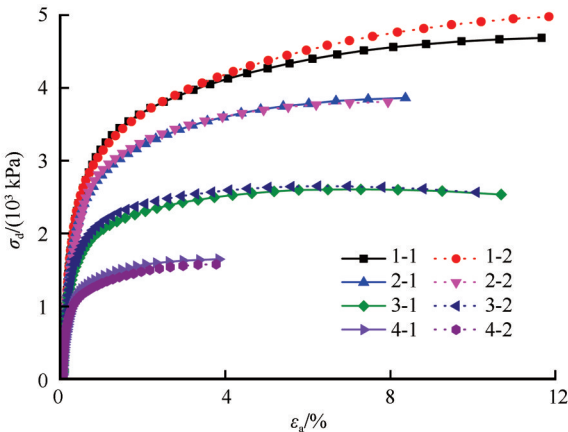


图5 试验数据可重复性验证试验结果

Fig. 5 Test data repeatability test results

增加的速率有所降低,与冻土三轴试验结果较为吻合^[1];中主应力系数 b 值的改变也会使冻土试样的强度发生变化。

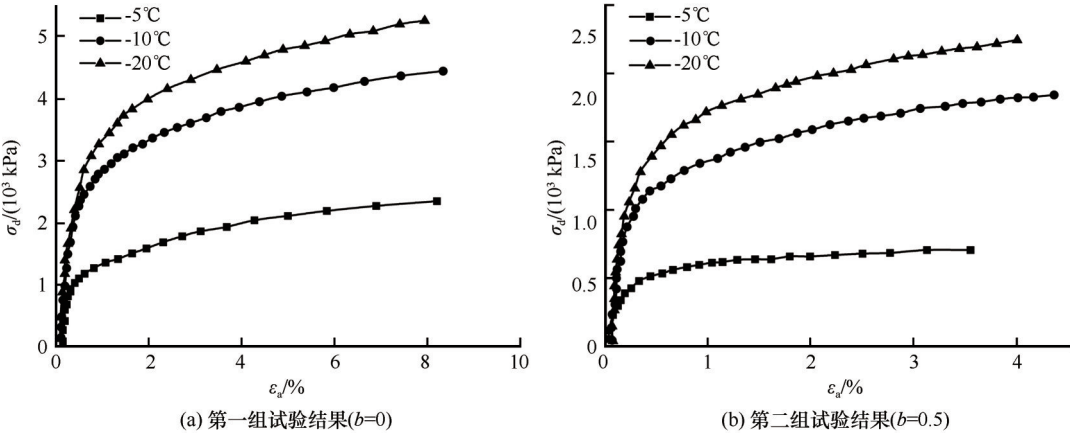


图6 不同温度下应力-应变关系曲线图(δ_d 为轴向偏应力, ε_a 为轴向应变)

Fig. 6 The stress-strain curves at different temperature (δ_d is axial deviatotic stress, ε_a is axial strain): $b=0$ (a); $b=0.5$ (b)

图7为加载后的试样,图中红色线表示试样受到扭剪力的形变量(由于整个加载过程中,试样下部保持不变,上部施加扭剪力),从图中可以看出,经历加载后,试样发生了较大的扭剪变形,试样的端部在加载后仍保持较好的状态,如图7(b)所示,

说明采用该制样方法可以保证将端部的扭剪力传递至整个试样。

4 结论

本文对冻结黏土空心圆柱试样的制样方法开

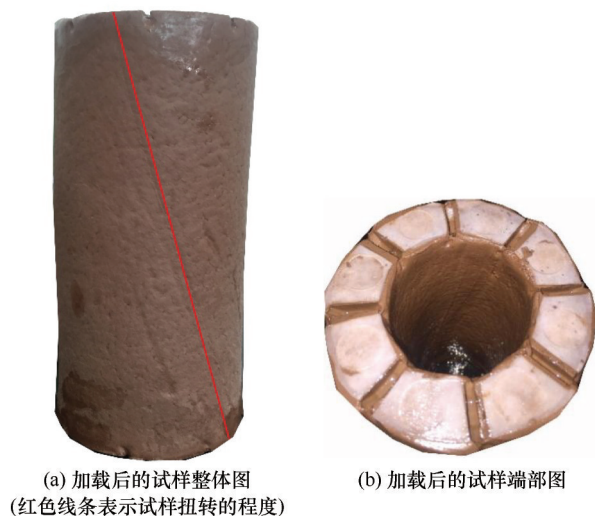


图7 加载后的试样图

Fig. 7 The specimen after loading: the sample after loading (red line indicate the deformation of the specimen) (a); the sample top after loading (b)

展研究,在研发制样设备的基础上,提出了空心圆柱试样制样方法,得出如下结论:

(1)该制样方法可以提高制样效率,减小制样过程中人为因素的影响,可制备出含水率及干密度均匀、力学性质稳定的冻结黏土试样。

(2)对两个平行制备的冻结黏土试样的不同主应力轴方向的定向剪切试验结果进行了比较,证明了所提出的制样方法具有良好的可重复性,可用于进一步系统研究复杂条件下冻结黏土的静、动力学特性。

参考文献(References):

- [1] Ma Wei, Wang Dayan. Frozen soil mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2014. [马巍, 王大雁. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.]
- [2] Liu Qinghe, Wang Yongtao, Xu Xiangtian, et al. Experimental study on shear characteristics of the interface between the frozen silty clay and the pipe foundation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2): 491-498. [刘庆贺, 王永涛, 徐湘田, 等. 冻结粉质黏土-桩基接触面剪切特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2): 491-498.]
- [3] Zhao Qian, Su Lijun, Liu Hua, et al. Investigation on the influence of freezing-thawing cycle on the permeability coefficient anisotropy of loess[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3): 843-853. [赵茜, 苏立君, 刘华, 等. 冻融循环对黄土渗透系数各向异性影响的试验研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3): 843-853.]
- [4] Shen Yang, Zhou Jian, Zheng Wei. Study and countermeasure on side effects from principal stress axis rotation experiment with hollow [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(11): 33-37. [沈扬, 周建, 郑伟. 空心圆柱仪主应力轴旋转试验负效应研究及对策[J]. 水利水电技术, 2005, 36(11): 33-37.]
- [5] Zhang Quanfang, Zhao Yu, Huang Bo, et al. Development of a compating instrument for reconstituted samples in hollow cylinder apparatus [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2008, 27(5): 42-44. [张泉芳, 赵宇, 黄博, 等. 空心圆柱扭剪仪重塑样击实器的研制[J]. 实验室研究与探索, 2008, 27(5): 42-44.]
- [6] Sheeran D E K R. Preparation of homogenous soil samples by slurry consolidation [J]. Journal of Materials, 1971, 6(2): 356-273.
- [7] Lin H, Penumadu D. Experimental Investigation on Principal Stress Rotation in Kaolin Clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(5): 633-642.
- [8] Ji Yucheng, Yan Pengwang. Technology and application of preparation of soil sample by indoor vacuum preloading [J]. Port and Waterway Engineering, 1997, 23(12): 1-2. [纪玉诚, 闫澍旺. 室内真空预压制备土样的技术及应用[J]. 水运工程, 1997, 23(12): 1-2.]
- [9] Shen Yang, Wang Baoguang, Tao Ming'an, et al. Improvement of preparing technique for hollow cylinder specimen of remolded clay and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Suppl 1): 697-701. [沈扬, 王保光, 陶明安, 等. 重塑黏土空心圆柱试样制备技术改进及应用[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊1): 697-701.]
- [10] Chen Dun, Wang Dayan, Ma Wei, et al. A strength criterion for frozen clay considering the influence of stress lode angle[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, 56(11): 1557-1572.
- [11] Lei Lele, Wang Dayan, Wang Yongtao, et al. The strength characteristics of frozen clay under the different principal stress directions [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(6): 103-109. [雷乐乐, 王大雁, 王永涛, 等. 定向剪切应力路径下冻结黏土强度特性试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(6): 103-109.]
- [12] Guo Yan, Wang Dayan, Ma Wei, et al. Development and application of frozen hollow cylinder apparatus [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(12): 114-120. [郭妍, 王大雁, 马巍, 等. 冻土空心圆柱仪的研发与应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(12): 114-120.]

Study on preparation method of remolded hollow cylinder specimen of frozen soil

LEI Lele¹, WANG Dayan², WANG Yongtao³, ZHANG Binlong²

(1. East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3. Institute of Transportation, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China)

Abstract: The frozen soil hollow cylinder apparatus is the main experiment instrument to study the mechanical characteristics of frozen soil under the complex stress paths including stress rotation. The sample used in frozen soil hollow cylinder test is mostly hollow cylinder sample to achieve the continuous rotation of the main stress axis direction. However, it is difficult to prepare hollow cylinder specimen because of the thin wall, which can have a great influence on the further study in frozen soil hollow cylindrical tests. Therefore, based on the preparation method of clay sample in triaxial test, a novel preparation device for remolded hollow cylinder specimen of frozen soil is designed, which can improve the efficiency of sample making and reduce the influence of human factors in the sample making process. Based on the novel preparation device, a practical preparation method for frozen clay hollow cylindrical specimens is proposed. It is found the moisture content and dry density of the clay samples prepared by this method is uniform and the mechanical properties are stable, which can meet the requirements of indoor mechanical tests of frozen soil. Two parallel remodeled hollow cylinder soil samples of frozen clay prepared under the same conditions are tested in the different principal stress directions tests, and the consistency of the results indicates that the preparation method for samples has sound repeatability. Thus, the proposed preparation method can be used for further systematical researches on the static and dynamic mechanical behaviors of frozen soil under complex condition.

Key words: frozen clay; hollow cylinder specimen; preparation method; mechanical characteristic

(责任编辑: 张明义)