

DOI: 10.11779/CJGE201504006

渠道冻胀离心模型试验设备的研制

黄英豪^{1, 2}, 蔡正银^{1, 2}, 张 晨^{1, 2}, 徐光明^{1, 2}, 洪建忠³, 赵宝忠³

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 3. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 输水渠道冻胀破坏是寒冷地区渠道破坏的主要表现。研制了一套在土工离心机中进行渠道冻胀模拟的试验设备, 该设备主要包括冻融模型箱、循环冷却水系统、测量控制系统等组成。冻融模型箱采用内外两层结构, 中间填充保温材料。循环冷却水系统采用 12 组半导体制冷片, 利用其帕尔贴效应实现制冷/热。采用高压水泵驱动水流并结合风冷散热器, 持续为制冷器循环冷却, 实现了在离心机不具备水旋转接头下的循环水利用。开发了直流回弹式位移测量系统的安装装置, 保证了测量系统的准确。利用该设备进行了北疆地区输水渠道的冻胀模拟, 试验结果规律好, 可以正确的模拟冻胀温度场和位移场。渠道冻胀离心模型试验设备的研制为寒冷地区输水渠道冻胀问题的研究提供了有力工具。

关键词: 渠道; 冻胀; 离心模型试验; 循环冷却水; 研制

中图分类号: TU41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)04-0615-07

作者简介: 黄英豪(1979-), 男, 山东菏泽人, 博士, 高级工程师, 主要从事环境岩土工程和渠道防渗防冻胀方面的研究。E-mail: ythuanyingaho@163.com。

Development of centrifugal model test facility for frost-heave of channels

HUANG Ying-hao^{1, 2}, CAI Zheng-yin^{1, 2}, ZHANG Chen^{1, 2}, XU Guang-ming^{1, 2}, HONG Jian-zhong³, ZHAO Bao-zhong³

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 3. General Engineering Research Institute, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Frost-heave damage is the main reason for the channels in seasonal frozen regions. A new device is developed for simulating the frost-heave phenomenon of channels. It mainly includes the freeze-thaw model container, the circulating cooling water system and the measurement control system. The freeze-thaw model container consists of internal and external structures, and thermal insulation materials are filled between them. The circulating cooling water system adopts 12 groups of semiconductor chilling plates, and cooling or heating is accomplished by the Peltier effects. The high-pressure pump combined with the air cooling radiator realizes a continuous cooling for the system without hydraulic rotating joints. The installation device for the direct rebound displacement sensors is developed to ensure the accurate measurement. The whole device is used to study the frost-heave damage of a channel. The test results show a good regularity with correct simulation of both the temperature and displacement fields, indicating that this facility is effective for the simulation tests on frost-heave of channels.

Key words: channel; frost-heave; centrifugal model test; circulating cooling water; development

0 引 言

中国高纬度和高海拔地区分布有广阔的冻土, 仅多年冻土面积就占国土面积的 1/5 强^[1]。当冻土深度超过 0.5 m 时, 就会发生明显的冻结融化作用, 冻融作用会导致输水渠道渠基土变形, 使得上覆衬砌防渗结构发生变位、隆起和损毁^[2-5]。中国寒冷地区输水渠道损坏的一个重要原因就是渠基土的冻胀, 因渠道冻胀破坏造成的损坏占渠道破坏总量的 40%以上, 每年用于处理渠道损坏的费用超过总维修费的 60%, 严重

影响了渠道的正常运行^[6]。

对输水渠道或土体冻胀特性的研究, 目前主要是采用室内单元试验研究渠基土自身的冻胀特性^[7-10], 少数学者采用了现场实测的方法^[11-13], 但前者在应力状态和时间模拟等方面和实际情况差别很大, 只能用

基金项目: 水利部公益性行业科研专项 (201201037); 国家自然科学基金项目 (51209142); 江苏省自然科学基金项目 (BK2012067); 南京水利科学研究院国家重点实验室基本科研业务费项目 (Y314006)
收稿日期: 2014-08-14

作渠基土单元体冻融基本规律的探讨,而现场实测需在现场建立试验监测段,费时费力、周期长,费用高。因此,在室内进行输水渠道冻融的物理模型试验将是一种有效的研究方法。

目前对输水渠道冻融特性进行研究的物理模拟试验方法,都是在常应力状态(1g)下进行试验^[14-15],这种模拟方法主要存在两大不足:①由于岩土工程中土体自重应力常为主导因子,占据支配地位,而室内小型物理模型试验无法真实再现渠基土真实应力状态,使得试验结果和真实渠道的冻融情况相比仍有较大差别;②常应力状态下物理模型试验中,实现渠道冻融一般在几天甚至几小时内完成,而实际渠道的冻融过程往往跨度达几个月,因此,在渠道冻融的时间跨度模拟方面,1g 常应力条件下的模型试验也难以反应真实冻融周期。在土工离心机上进行物理模型试验,一方面通过设置模型比尺 N ,不仅可以反应渠道的真实应力状态,并可以通过离心机实现时间的加速,使得模型箱内几个小时的时间即可模拟原型的冻融时间跨度(原型真实冻融时间为模型箱时间的 N^2 倍)。因此,在离心机上进行渠道冻融的物理模型试验,在受力状态和时间跨度方面,具有更好的相似性^[16]。

在离心机上进行渠道冻融循环的模拟,关键是实现大幅度的温度变化区间,常见的压缩机制冷和液氮制冷等方法,因其使用特点不适合在离心机中采用。陈湘生^[16-17]介绍了一种可以在离心场中采用半导体制冷/热的方式,并以此模拟了冻土地基和输气管道的冻胀变形问题。本文所开发的冻胀离心模拟系统,在参照上述作者研究的基础上,考虑到渠道冻胀的特点,研发了一套专门用于寒冷地区输水渠道冻胀特性研究的离心模拟设备,尤其是实现了在离心机不具备水旋转接头时可以实现冷却水的循环使用。

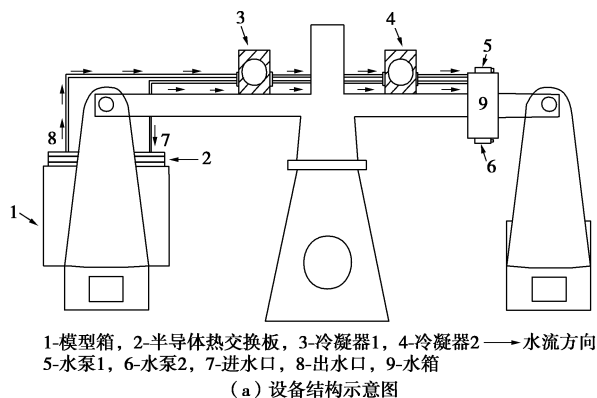
1 试验设备的研制

研制的渠道冻胀离心模型试验设备如图 1 所示,按照功能的划分,主要包括 4 大部分组成:①冻融模型箱;②循环冷却水系统;③测量系统;④控制系统。

1.1 冻融模型箱

模型箱是设置渠道模型的空间,良好的保温与隔热性能是实现渠道模型快速冻胀融沉的前提。模型箱结构的设计分为外箱、内箱和夹层填充材料 3 层组成。外箱由高强度不锈钢材料制作,以保证有足够的结构刚度,能够适应高速旋转的离心力场作用。内箱由高强度的航空有机玻璃制作,具有良好的耐温变和抗冻性能。夹层填充材料为高保温隔热聚四氟乙烯泡沫塑料,导热系数低于 $\leq 0.025 \text{ W/m}\cdot\text{k}$ 。如此 3 层结构制作

的模型箱整体,暨满足强度和刚度的要求,又具有良好的保温隔热性能。



(b) 设备实物照片

图 1 冻融离心模型试验设备

Fig. 1 Schematic diagram of centrifugal model test facility for freeze-thaw of channel freezing

冻融模型箱的内部尺寸长×宽×高分别为 $750 \text{ mm} \times 350 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$ 。冻融模型箱的上部覆盖着热交换系统,热交换系统是利用多块半导体制冷器制冷或制热来实现温度变化,通过直流电能转换成冷热能向下方土壤模型表面传递冷热能,使土壤模型由外向内产生降温或升温效果,从而实现模拟渠道的冻胀或融沉。试验时模型箱内布设传感器,模型箱整体需固定在在离心机的吊篮内。

1.2 循环冷却水系统

土体中的热量在试验过程中需要通过流动的水流带走,从而实现模型箱内的土体降温。在 1g 的常重力加速度条件下,可以直接设置冷却水管穿过模型土层将热量带走,效率高。而进行离心模型试验时,冻融离心试验系统是放置于高速旋转的离心机转臂上,所以冷却水系统的结构与离心机是否具有水旋转接头有关(水旋转接头是从地面向离心机转动中的试验设备提供水源的部件)。

当离心机配备有水旋转接头时,冷却水系统是通过水旋转接头供水口由地面供水(自来水或常温水)到半导体制冷器热端带走热端温度,循环后再通过水旋转接头出水口将水排出到地面。而由于很多离心机

在建设时受设计或经费等的制约, 并未能配备水旋转接头。当离心机不具备水旋转接头部件, 以往的冷却水系统无法满足试验需求。本次冻融试验是在南京水利科学研究院 60 g-t 的土工离心机上进行, 该离心机就不具备水旋转接头。针对这种情况, 专门研制了一套内循环的循环冷却水系统, 其主要包括热交换系统、高压水泵、水箱、供回水管路等组成 (图 2)。

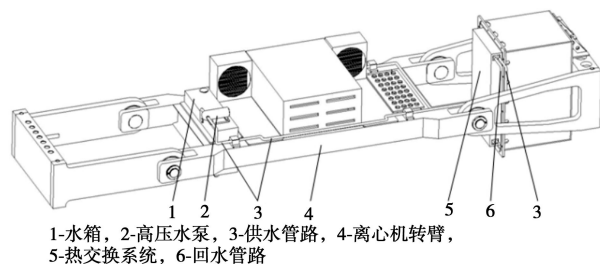


图 2 循环冷却水结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of circulating cooling water

热交换系统是整个冻融离心模型试验系统的核心, 其主要功能是实现模型的制冷。目前制冷方式较常见的有机械压缩制冷和半导体制冷。机械压缩制冷包括压缩机、冷凝器、制冷剂很多部件通过复杂管路连接组成, 它的制冷效率较高, 常用于冰箱、空调等电器, 但其结构复杂, 且怕震动, 不能倾斜, 不适合在离心机上采用。电子半导体制冷也称为热电制冷, 它的工作原理是利用半导体材料的 Peltier 效应, 即当直流电通过两种不同半导体材料串联成的电偶时, 在电偶的两端即可分别吸收和放出热量, 从而实现制冷的目的。半导体制冷片体积小, 没有滑动和旋转部件, 不怕倾斜震动, 并且热惯性小, 冷热随意切换, 适合在高速旋转的离心力场下应用。由于半导体制冷片是一种温差器件, 当一端制冷时另一端必然会产生热量, 当冷端和热端达到一定温差, 热传递的量相等时, 就会达到一个平衡点, 此时冷热端的温度就不会继续发生变化。为了使冷端达到更低的温度, 就需要采取水冷方法带走热端的热量来实现冷端持续降低温度。

综合考虑模型箱容积和制冷效率计算, 设计采用了 12 组半导体二级制冷热电堆 (制冷片)。1 组热电堆中, 一级由 88 对 P-N 结串联, 二级由 24 对 P-N 结串联, 每组制冷热电堆的热端上方设有小型储水箱。各组制冷热电堆间串联连接, 理论总制冷能力可达 3600 W。该设备可以快速实现温度控制, 可实现的温度变化范围为负温 40℃ 到正温 30℃。

为实现向半导体制冷器供冷却水, 在离心机转臂上设置了一个水箱作为冷却水系统的水源, 由不锈钢焊接而成, 容积为 50 L。水箱顶部设置有注水口以便向水箱内注水, 水箱设置有进水口、出水口, 与各热

电堆热端的小型水箱相连, 利用高压水泵输送, 通过管路与热交换系统形成循环水冷却。设置了 4 个高压水泵, 每个水泵的扬程 110 m, 最大输出压力 1.1 MPa, 可根据制冷效率要求打开不同数量的水泵, 但由于受热电堆内部热端小型水箱的流量限制, 一般可同时开启两个高压水泵, 在试验工作中高压水泵一般交替使用, 以保证设备可以长时间运行。

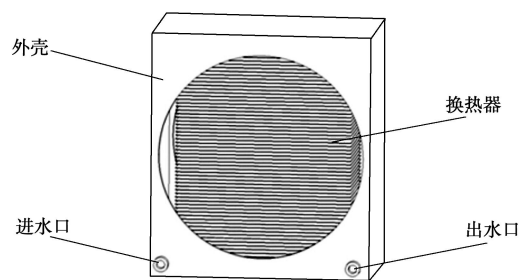


图 3 风冷冷凝器结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of air cooling radiator

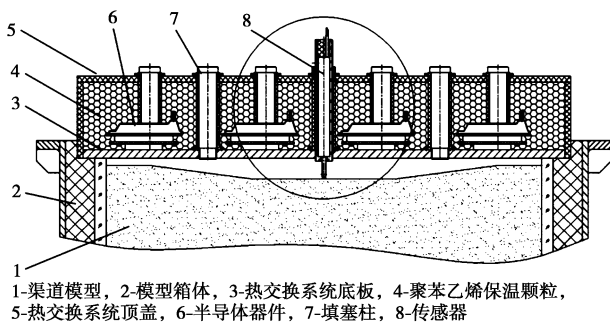
由于水箱容积有限, 半导体制冷器持续产生的热量, 在长时间循环条件下, 水箱内冷却循环水自身的温度将逐渐升高进而降低冷却能力, 为此, 在冷却水循环回路中配置了一组相应功率的风冷散热器, 风冷装置的结构见图 3 所示。试验前先从注水口将水箱内注满水, 离心机运转试验开始则启动高压水泵, 高压水泵入口端将水箱内的冷却水吸入, 并从水泵出口端通过管路在水泵压力下供到半导体制冷器热端进行温度交换, 在水泵压力作用下温度交换后的水流入回路中的风冷散热器内, 利用离心机高速旋转产生的空气流动进行循环水与空气热交换, 使冷却水温保持在允许范围内, 最后通过水箱回水口流回水箱内, 不断循环为半导体制冷器持续降温。为了预防在夏季进行试验时由于机室内环境温度过高可能造成的制冷片损坏, 设置了高温报警系统并与制冷系统关联, 当水管中冷却水温度过高时 (超过 27℃), 制冷系统便会断路, 停止工作。

1.3 测量系统

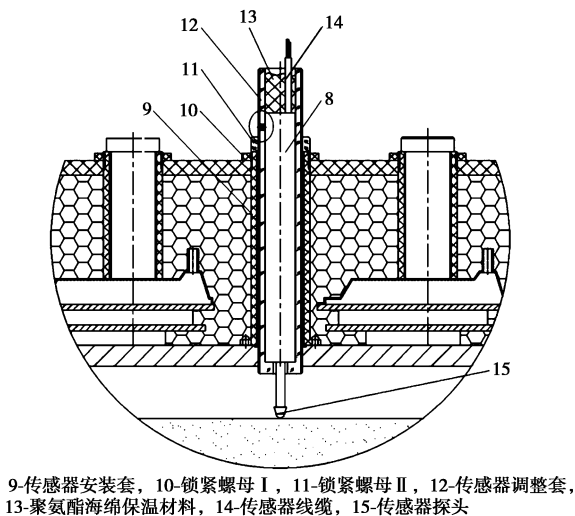
输水渠道在负温作用下发生冻害破坏, 其主要表现为冻胀变形, 因此, 试验过程中需安装位移传感器和温度传感器以分别测试渠道冻胀位移和渠基土温度。温度传感器采用的是 PT-100 铂电阻传感器, 工作范围 -200℃ ~ 800℃。位移传感器采用的是直流回弹式位移传感器 (LVDT), 工作原理属于差动变压式, 该类传感器耐低温, 温度漂移小, 线性度高。LVDT 传感器外形结构为 304 不锈钢材料的圆柱体, 圆柱体前端是回弹式探针, 后端为线缆。由于该传感器外径达 20 mm, 长度达 200 mm, 在高速旋转的低温环境中,

如何实现位移传感器既可以灵活伸长,以满足不同冻胀变形的测试需求,又如何有效防止模型箱热交换系统内的温度通过传感器或空气向外传导流失,即如何对位移传感器进行安装是一个难点。

为此,在位移传感器测量位置对应热交换系统的铝合金底板和顶盖处开孔,铝合金底板为螺纹孔。在开孔处设置一个聚甲醛材料的传感器安装套,安装套内为一通孔,通孔尺寸略大于底板螺纹孔。传感器安装套底端为方形法兰,并用螺钉与铝合金底板螺纹孔对接,上端穿过顶盖开孔,传感器安装套上端穿出顶盖部分设置有外螺纹,以便聚甲醛材料的锁紧螺母 I 可将顶盖与安装套锁紧固定(图 4)。



1-渠道模型, 2-模型箱体, 3-热交换系统底板, 4-聚苯乙烯保温颗粒, 5-热交换系统顶盖, 6-半导体器件, 7-填塞柱, 8-传感器



9-传感器安装套, 10-锁紧螺母 I, 11-锁紧螺母 II, 12-传感器调整套, 13-聚氨酯海绵保温材料, 14-传感器线缆, 15-传感器探头

图 4 位移测量系统的安装方法

Fig. 4 Installation device for displacement sensors

为实现位移传感器在箱体外的伸出长度可灵活调整,进一步设计了一个有机玻璃材料的传感器调整套,它整体为外螺纹圆柱体,外螺纹尺寸与铝合金底板螺纹孔相匹配,传感器调整套一端为长盲孔,为方便传感器的装入,传感器调整套另一端中心开有一个小孔,小孔尺寸略大于传感器探针外径,以便传感器探针伸出。传感器调整套探针伸出的一端通过传感器安装套旋入铝合金底板螺纹孔内,另一端伸出传感器安装套,由有机玻璃材料制成的锁紧螺母 II 与传感器调整套外螺纹配合锁紧调整套。传感器线缆经调整套内的空腔

由伸出端引出,为防止温度由传感器传导,在调整套的空腔内装入聚氨酯海绵保温材料。共设置了 17 个传感器安装孔,对于试验中不安装传感器的安装套,采用设计的有机玻璃填塞柱,填塞柱底部螺纹与热交换系统底板螺纹孔配合旋入安装套内,可以防止温度流失。

1.4 控制系统

控制系统主要是在地面对离心机上热交换系统中半导体制冷器进行温度的设定,并利用制冷/制热双向自动控制功能实现温度连续控制的电控系统,系统与电脑连接,可显示和记录设备工作参数和土体不同深度温度和位移变化。

2 使用方法与特点

利用该冻融离心模拟设备进行输水渠道渠基土冻融过程的研究,操作方法简单。首先根据所模拟渠道的断面尺寸,结合离心机的模型箱尺寸和最大离心加速度,确定合适的模型比尺 N 。根据相似比尺,计算出模型渠道断面尺寸。将调配好含水率的土体按照设计干密度控制制作模型渠道,该过程中根据研究需要在渠坡和渠基不同位置埋设位移传感器和温度传感器。传感器安装好后其线缆应进行捆扎保护,防止试验过程中的损坏。对制冷器与模型箱体的缝隙采用聚氨酯泡沫塑料进行保温处理,然后用绝缘胶带将缝隙进行密封,防止冷量的散失。检查循环冷却水系统的连接,开启温度控制器,设定温度和离心加速度目标值,开启离心机进行试验。

该设备具有如下特点:①由于热交换系统由半导体制冷片组成,它既可以制冷又可以制热,因此,该冻融离心模拟系统可以实现渠道的冻胀和融沉两个过程;②重复上面的试验过程后,该系统既可以实现渠道的反复冻胀—融沉试验;③由于循环冷却水系统为内循环,因此,当水体反复循环温度过高后($>27^{\circ}\text{C}$)系统会报警,此时应停机换水;④该系统可靠性强,最大可以在 $50g$ 的离心加速度下运行,控制方便,应用广,不但可用于输水渠道的冻胀过程的研究,也可用于寒冷地区路基或其他结构物冻胀问题的研究。

3 初步的应用

采用该设备对北疆地区输水渠道的冻胀特性进行了初步研究,本文仅简要给出几组典型试验的试验结果,以说明利用该设备进行渠道冻胀模拟研究的有效性和可行性。

所模拟的渠道为北疆某输水渠道工程,衬砌采用素混凝土六棱块,边长 25 cm ,厚 6 cm ,衬砌下为水

泥砂浆找平层。模型试验所用土体即取自该渠道工程现场,黏粒和粉粒含量分别为 20%和 62.1%,液限和塑限分别为 29.1%和 15.2%,土体为低液限黏土。在模型箱内制作好的渠道模型见图 5 所示。



图 5 在模型箱内制作好的渠道模型

Fig. 5 Finished channel model

设计了两组试验(见表 1)分别研究渠道在不同离心加速度下的冻胀特性,离心加速度分别选取了 20g 和 30g,渠基土含水率取为 13.5%(接近最优含水率)。

表 1 试验方案表

Table 1 Experimental schemes

试验组号	模型比尺 <i>N</i>	渠基土参数	
		<i>w</i> /%	$\rho_d/(g\cdot cm^{-3})$
#1	20	13.5	1.89
#2	30	13.5	1.89

试验时为了提高降温效果,模型内采用了与内壁材料相同的有机玻璃填充以减小模型箱空间。试验在渠顶上方未铺设衬砌的土表面、表面下 10 mm (20g) 和 6.7 mm (30g),即对应于原型表面以下 0.2 m 处埋设温度传感器,传感器编号分别为 T9、T10 (20g), Ti、Tj (30g);渠坡和渠底中心衬砌的上表面、下表面,以及表面下 10 mm 和 50 mm(20g),表面下 6.6 mm 和 33 mm (30g),即对应于原型的 0.2 m 和 1 m 处埋设温度传感器,传感器编号从上至下依次为渠底 T1、T2、T3、T4 (20g), Ta、Tb、Tc、Td (30g);渠坡 T5、T6、T7、T8 (20g), Te, Tf, Tg, Th (30g)。渠道中心和渠坡中心表面放置两个位移传感器(LVDT, 精度 5 μm),如图 6。

将不同 *g* 值条件下的离心模型试验结果换算成原型,所得到的渠底和渠坡的温度变化过程如图 7 所示。可见,热交换板的温度起初下降较快,在原型 20 d 时即达到-27.25℃,此后降温速率非常缓慢,在 30 d 后基本达到了最低温度-30℃,之后温度基本维持不变。而渠底不同深度处的温度传感器的降温速率也明显不同,距热交换板越近,降温速率越快,最终能达到的

温度越低。不同 *g* 值条件下的离心模型试验都有相类似的规律,说明该渠道冻胀离心模型试验装置可以较好的模拟温度场的作用。

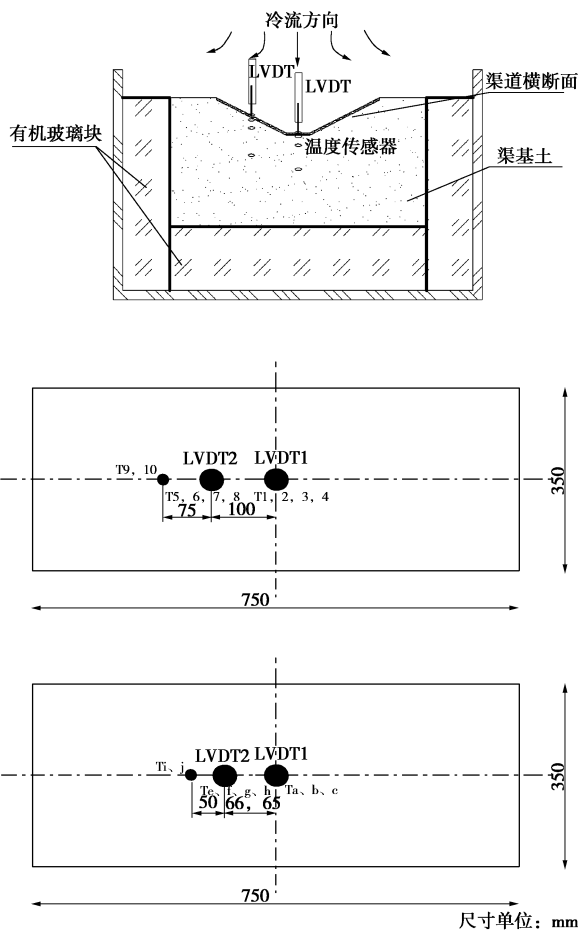


图 6 模型箱内温度及位移传感器的设置

Fig. 6 Arrangement of temperature sensor and LVDT

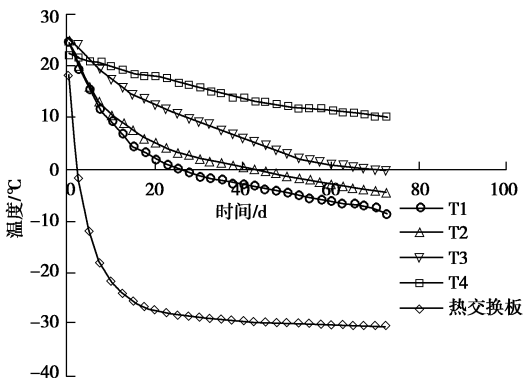


图 7 由离心模型试验得到的原型渠道的热传递曲线

Fig. 7 Heat transfer curves of prototype channel

原型条件下的冻胀位移(冻胀量)如图 8 所示,其中,渠底的冻胀位移量为位移传感器的测值;而渠坡的法向冻胀位移量应由公式 $D=v/\cos\theta$ 计算, v 为位移传感器的测值, θ 为渠道的坡角。可见,渠坡处在第 28 天时开始出现冻胀,至第 50 天内冻胀速率较快,

平均约 0.6 mm/d, 而 50 d 后冻胀位移量增长变缓并逐渐趋稳定, 最终的渠坡法向位移冻胀量为 14.59 mm。渠底出现冻胀的时间为第 43 d, 到 60 d 这一期间的冻胀速率约为 0.42 mm/d, 最终的渠底法向冻胀位移量为 8.96 mm。同时可见, 不同 N 值条件下冻胀的起始发生时间不同, N 越大, 冻胀开始时间相对滞后, 但不同 g 值下的冻胀量基本相同, 说明该套渠道冻胀离心模型试验设备在冻胀位移的测试方面是正确的。

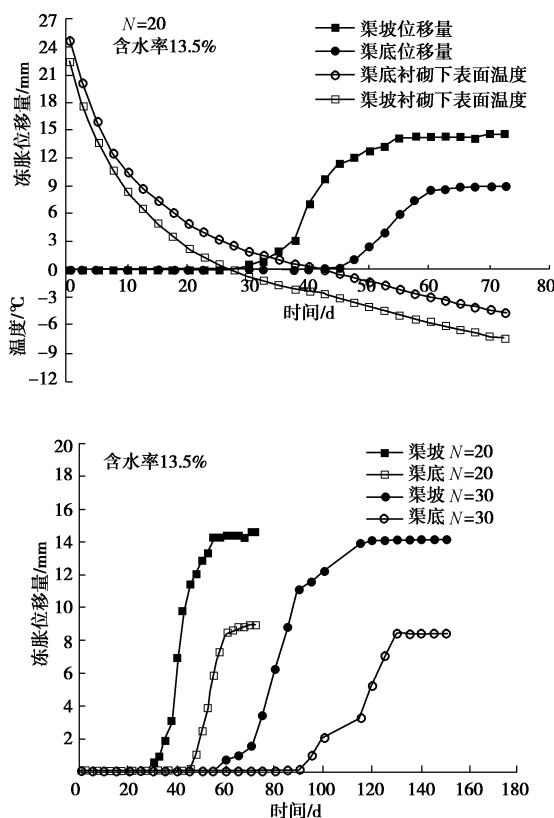


图 8 渠道冻胀位移曲线

Fig. 8 Frost-heave curves of prototype channel

4 结 论

(1) 研制了一套渠道冻胀离心模拟试验设备, 该设备主要包括冻融模型箱、循环冷却水系统、测量系统等组成, 该设备实现了在离心机不具备水旋转接头时冷却水的循环使用。

(2) 开发了专门用于冻融离心场作用下的直流回弹式位移传感器的安装装置, 该装置即可以牢固的固定位移传感器, 又可以保证位移传感器的探针自由移动, 同时又能防止试验过程中的温度损失。

(3) 采用该离心模型试验设备研究了北疆地区输水渠道的温度场和位移场, 结果表明, 该套设备的温度模拟正确, 冻胀量测试准确, 可以很好地适用于输水渠道冻胀问题的研究。

(4) 该套渠道冻胀离心模型试验设备采用的是半导体制冷片制冷, 它既可以实现温度的降低, 又可以实现温度的升高, 因此, 它既能模拟渠道的冻胀, 又能模拟渠道的融沉, 并可模拟渠道的反复冻胀—融沉作用, 同时, 也可以推广应用于研究寒冷地区其他结构物和地基土的相互作用问题。

参考文献:

- [1] 陈肖柏, 刘建坤, 刘鸿旭, 等. 土的冻结作用于地基[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (CHEN Xiao-bai, LIU Jian-kun, LIU Hong-xu, et al. Frost action of soil and foundation engineering[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [2] 朱 强. 我国渠道冻胀防治综述[J]. 防渗技术, 1996, 2(2): 7 - 15. (ZHU Qiang. Control of canal frost heave in north china[J]. Technique of Seepage Prevention, 1996, 2(2): 7 - 15. (in Chinese))
- [3] 吴志强, 蔡正银, 黄英豪, 等. 含水率和含盐量对冻土无侧限抗压强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(9): 1580 - 1586 (WU Zhi-qiang, CAI Zheng-yin, HUANG Ying-hao, et al. Influence of water and salt contents on strength of frozen soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9): 1580 - 1586. (in Chinese))
- [4] 周振民, 徐苏容, 刘 月. 黄河下游引黄灌区衬砌渠道工程防冻胀破坏措施研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2005, 3(1): 5 - 9. (ZHOU Zhen-min, XU Su-rong, LIU Yue. Control measures for frost heaving failure of concrete-lined canal in Yinhuang irrigation area of downstream of Yellow River[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2005, 3(1): 5 - 9. (in Chinese))
- [5] 王正中, 刘旭东, 陈立杰, 等. 刚性衬砌渠道不同纵缝削减冻胀效果的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 1 - 6. (WANG Zheng-zhong, LIU Xu-dong, CHEN Li-jie, et al. Computer simulation of frost heave for concrete lining canal with different longitudinal joints[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(11): 1 - 6. (in Chinese))
- [6] 吴志强. 北疆渠基土冻胀特性的试验研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2014. (WU Zhi-qiang. Experimental study on frost heaving properties of north Xinjiang channel soil[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2014. (in Chinese))
- [7] 赖远明, 张 耀, 张淑娟, 等. 超饱和含水率和温度对冻结砂土强度的影响[J]. 岩土力学, 2007, 29(6): 3665 - 3670. (LAI Yuan-ming, ZHANG Yao, ZHANG Shu-juan, et al.

- Experimental study of strength of frozen sandy soil under different water contents and temperatures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **29**(6): 3665 - 3670. (in Chinese))
- [8] SHEN M, LADANYI B. Modelling of coupled heat, moisture and stress field in freezing soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 1987, **14**: 237 - 246.
- [9] 李国玉, 喻文兵, 马巍, 等. 甘肃省公路沿线典型地段含盐量对冻胀盐胀特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(8): 2276 - 2280. (LI Guo-yu, YU Wen-bing, MA Wei, et al. Experimental study of characteristics of frost and salt heaves of saline highway foundation soils in seasonally frozen regions in Gansu Province[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(8): 2276 - 2280. (in Chinese))
- [10] 包卫星, 杨晓华, 谢永利. 典型天然盐渍土多次冻融循环盐胀试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(11): 1991 - 1995. (BAO Wei-xing, YANG Xiao-hua, XIE Yong-li. Research on salt expansion of representative crude saline soil under freezing and thawing cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(11): 1991 - 1995. (in Chinese))
- [11] 马巍, 王大雁. 中国冻土力学研究 50a 回顾与展望[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(4): 625 - 640. (MA Wei, WANG Da-yan. Studies on frozen soil mechanics in China in past 50 years and their prospect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(4): 625 - 640. (in Chinese))
- [12] ZHANG Li-xin, PU Yi-bin, LIAO Quan-rong, et al. Dynamic investigation on the coupled changing process of moisture and density fields in freezing soil[J]. Science in China, 1999, **42**(2): 141 - 145.
- [13] 吴紫汪, 马巍, 蒲毅彬, 等. 冻土蠕变变形特征的细观分析[J]. 岩土工程学报, 1997, **19**(3): 1 - 6. (WU Zi-wang, MA Wei, PU Yi-bin, et al. Submicroscopic analysis on deformation characteristics in creep process of frozen soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, **19**(3): 1 - 6. (in Chinese))
- [14] LI Zhuo, LIU Si-hong, WANG Liu-jiang. Experimental study on the effect frost heave prevention using soilbags[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, **85**: 109 - 116.
- [15] KETCHAM S A, BLACK P B, PRETTO R. Frost heave Loading of constrained footing by centrifuge modeling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, **123**: 874 - 880.
- [16] 陈湘生, 濮家骝, 殷昆亭, 等. 地基冻 - 融循环离心模型试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, **42**(4): 531 - 534. (CHEN Xiang-sheng, PU Jia-liu, YIN Kun-ting, et al. Centrifuge modelling tests of foundation undergoing two cycles of frost heave and thaw settlement[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science), 2002, **42**(4): 531 - 534. (in Chinese))
- [17] CHEN Xiang-sheng, SMITH C C, SCHOFIELD A N. Frost heave of pipelines: centrifuge and 1g model tests[R]. Cambridge: Cambridge University Technical Report, 1993.