

DOI: 10.11779/CJGE202007001

季冻区渠道湿干冻融离心模拟试验设备的研制

黄英豪^{1,2}, 蔡正银^{1,2}, 朱锐², 张晨², 郭万里², 朱洵², 陈永²

(1. 土石坝破坏机理与防控技术水利部重点实验室, 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)

摘 要: 季节冻土占中国国土面积的一半以上, 位于季冻区的渠道随着季节变换和通停水的周期变化, 会经历湿润—干燥—冻结—融化 (简称为湿干冻融或者 WDFT) 的循环过程, 从而造成渠道结构的破坏。研制了一套可以在超重力场下模拟渠道湿干冻融反复作用的离心模型试验设备, 该设备主要由干湿系统、热交换系统、模型箱、地面冷水装置和数据采集控制系统等组成。干湿系统主要包括水位升降装置、风干装置等, 热交换系统包括半导体热交换装置、空气内循环装置等, 模型箱采用内外双层隔热结构, 地面冷水装置可以实现将 30℃ 的常温水快速冷却至 3℃~5℃ 以供热交换系统使用, 数据采集控制系统包括干湿控制、热交换控制、数据采集分析等。该套设备可以实现在 50g 离心力场下渠道模型温度在 -40℃~30℃ 之间, 渠基土体湿度在干燥—饱和状态的准确控制, 为季冻区渠道的渐进劣化破坏过程和机理研究提供了新的重要手段, 并可推广应用到寒旱区的水利、交通等领域的工程科研当中。

关键词: 季冻区; 渠道; 湿干冻融; 离心模型试验; 循环冷却水; 水位升降

中图分类号: TU445

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)07-1181-08

作者简介: 黄英豪(1979—), 男, 山东菏泽人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事环境岩土工程和寒区水利工程方面的研究和技术咨询工作。E-mail: yhuang@nhri.cn。

Development of centrifuge model test equipment for canals in seasonal frozen areas under cyclic action of wetting-drying and freeze-thaw

HUANG Ying-hao^{1,2}, CAI Zheng-yin^{1,2}, ZHU Rui², ZHANG Chen², GUO Wan-li², ZHU Xun², CHEN Yong²

(1. Key Laboratory of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-Rock Dam of the Ministry of Water Resources, Nanjing

210024, China; 2. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: Seasonal frozen soil accounts for more than half of China's land area. The canals located in the seasonal frozen areas undergo a wetting-drying and freeze-thaw cycle with seasonal change and periodic change of water supply and suspension, thus causing damage to the canal structures. A centrifugal model test system which can simulate the cyclic action of wetting-drying and freeze-thaw under high gravity field is developed. The system consists of wetting-drying system, heat exchange system, sample model box, aboveground water cooler, data acquisition and control system. The wetting-drying system mainly includes the devices of rising and falling of water level and air drying. The heat exchange system includes the devices of semiconductor heat exchange and air internal circulation. The sample model box adopts double-layer heat insulation structure. The aboveground cooling water device can transfer the normal water of 30℃ to that of 3℃~5℃ for subsequent heat exchange system. The data acquisition and control system includes wetting-drying control, heat exchange control, data acquisition and analysis. The system can accurately control the model temperature between -40℃~30℃ and the moisture of soil in the drying-saturated state under a centrifugal force of 50g. It may provide a new important means for investigating the progressive deterioration process and mechanism of canals in seasonal frozen areas, and it can be applied to engineering researches in the fields of water conservancy and transportation in cold and arid areas.

Key words: seasonal frozen area; canal; wetting-drying and freeze-thaw; centrifugal model test; circulating cooling water; rising and falling of water level

0 引 言

输水渠道是长距离调水工程的主要输水建筑物。中国拥有各类输水渠道 4500000 km, 然而渠系水利用系数仅约 53%, 即有将近一半的水在输送过程中损失

掉了^[1]。渠道渗漏的主要原因是渠基土劣化造成的渠

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0405100); 国家自然科学基金面上项目 (51879166); 国家自然科学基金青年项目 (51709185, 51909170)

收稿日期: 2019-10-14

道结构破坏, 占渠道破坏总量的 40%以上, 严重影响了渠道的正常运行。对于季冻区渠道而言, 当渠道衬砌结构以下冻深范围内的渠基土(渠坡和渠床土体)温度低于 0°C 时, 土中部分水冻结成冰, 发生“冻胀”。而当气温升高时, 由于土中冰的融化, 造成土体结构的破坏和强度的急剧减弱, 使土体在自重下就产生下沉, 即通常所指的“融沉”。不管是渠基土的冻胀还是融沉, 都会造成季冻区渠道的结构破坏, 并进一步造成渠水的长期入渗, 加速渠道的劣化损毁^[2]。

以北疆季冻区某总干渠渠道工程为例, 该供水渠道总长约 133 km, 为国家大 II 型工程, 沿线分布有大量膨胀土、冻胀性土等。所处地区冬季极端低温可达 -40°C , 夏季最高气温 35°C 以上, 从冻深范围内土体的温度变化角度分析, 相当于渠基土每年经历反复的“冻融”循环过程。而季冻区渠道多采取季节性供水, 该渠道每年 4 月下旬通水, 9 月中旬停水, 冬季不供水, 渠道通水期间, 渠水入渗, 渠道处于湿润状态; 停水期间, 渠身内的水回渗, 渠道处于变干的非饱和状态, 从水分变化的角度分析, 可以看作渠基土每年经历反复的“干湿”循环过程。因此, 以渠道每年通水、停水时间以及正负温交变的时间划分, 可以将每年渠基经历的过程看作是湿润—干燥—冻结—融化的交替变化过程, 见图 1。

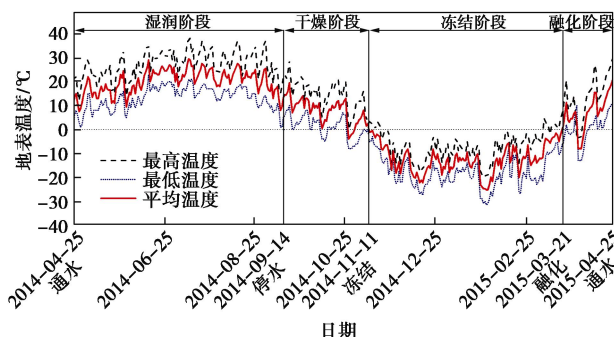


图 1 北疆某供水总干渠典型气象和运行资料

Fig. 1 Weather and operation data for a main canal in northern Xinjiang

冻融和干湿本质都是由于水分的多少或形态的变化引起的工程问题, 而渠道作为输水建筑物, 受水分的影响最为直接和长期。干湿和冻融的耦合循环和相互促进势必会造成膨胀土渠道更加严重的劣化破坏(见图 2), 通水 20 a 的北疆季冻区供水工程总干渠已经证实该现象^[3]。目前, 对于输水渠道劣化破坏的研究主要采用室内单元试验的方法进行探索^[4-6], 但由于应力状态和时间模拟等方面和实际情况差别很大, 只能用作渠基土单元体在干湿或冻融循环作用下基本规律的探讨^[7-8], 而开展渠道破坏的现场研究^[9-10]周期长, 费用高, 难以普遍采用。因此, 在室内进行输水渠道劣化破坏的物理模型试验将是一种有效的研究方法。



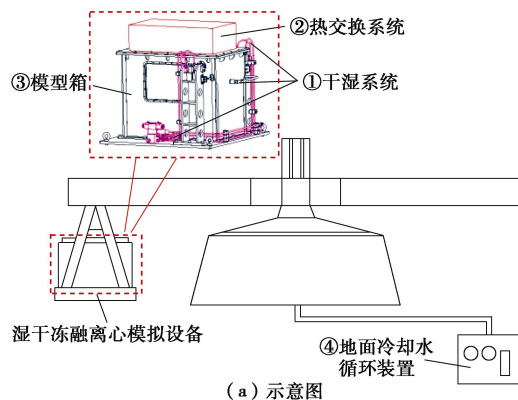
图 2 北疆某供水总干渠典型破坏照片

Fig. 2 Photos of typical damage of a main canal in northern Xinjiang

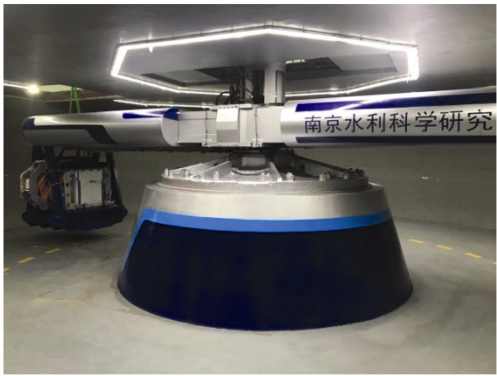
离心模型试验是用离心力场模拟重力场, 既能克服小比尺模型的应力差异过大, 又避免了原位试验复杂耗时的难题, 是近年来应用日益广泛的物理模型试验方法。诸多学者通过离心模型试验对渠道边坡稳定问题进行了一系列研究^[11-13], 而用于模拟季冻区输水渠道工程的离心模拟技术由于起步较晚, 研究成果相对较少^[14-15]。对此, 笔者团队近 10 a 来开展了大量的科研工作^[16-20], 2014 年研发了首套专用于渠道冻融问题研究的离心模型试验系统^[21], 完善了冻土离心模拟技术的同时, 为探索渠道冻害机理与冻害处治方案提供了重要研究手段。随着对于季冻区渠道问题研究的深入, 上述设备已无法对输水渠道现场复杂的多场耦合边界条件(湿干冻融)进行模拟。因此, 本文在上述研制设备的基础上, 考虑现场渠道经历干湿和冻融耦合循环作用的特点, 对上述设备研发工作进一步深化和完善, 研制了一套可以在超重力场下模拟渠道湿干冻融反复循环作用的离心模型试验设备。本文详细介绍了本试验设备的组成、特点及使用方法, 并通过一组离心模型试验论证了该设备进行季冻区输水渠道湿干冻融模拟研究的可行性和有效性。该设备的研制为探索复杂多场作用下季冻区输水渠道劣化破坏机理提供了新的研究手段。

1 试验设备的研制与开发

研制的渠道湿干冻融离心模拟试验系统, 主要包括①干湿系统, ②热交换系统, ③模型箱, ④地面冷却水循环装置, ⑤数据采集控制系统等, 总体的组成结构如图 3 所示。



(a) 示意图



(b) 实拍图
图 3 渠道湿干冻融离心模型试验设备

Fig. 3 Centrifugal model test equipment for canal under cyclic action of wetting-drying and freeze-thaw

1.1 干湿系统

干湿系统包括水位升降装置、风干装置和干湿控制系统, 可用于模拟湿干冻融离心模型试验中“湿”和“干”的过程, 干湿系统整体组成如图 4 所示。

考虑到现场输水渠道运行周期内经历注水期、蓄水期、排水期等, 因此实现渠道模型内水位的升降过程是离心模拟试验的重点之一, 所研制的水位升降装置可用于模拟现场输水渠道不同运行状态, 工作原理如图 5 所示。该装置将密封水箱作为储水装置, 以水箱顶部的两处电磁阀分别控制进充气和排气, 并通过不锈钢输水管进行超重力场下承压水的输送, 如图 4 (a) 所示。此外, 输水管路与模型箱外部连接如图 4 (b) 所示, 可进行拆卸、清洗, 模型内部进出水口设置有透水石作为过滤器 (图 4 (d)), 以防止水中的土体颗粒进入输水管路而导致管路堵塞。

风干装置的主要功能是在离心机运转过程中对模型土体进行干燥, 即通过控制系统远程打开伸缩活塞 (图 4 (e)), 利用离心机高速旋转产生的空气流动带走渠道模型内部的湿气, 以对渠坡模型的表面土体进

行干燥。

干湿控制系统 (图 4 (c)) 用于对离心机上干湿系统进行远程控制, 是可以连续控制的电控系统。为了控制渠道水位升降的精确度, 以孔隙水压力微型传感器作为液位传感器, 通过水压力换算得到液位高度, 控制系统界面可实时显示液位高度。此外, 干湿控制系统运行过程中还具有自检测功能、强制功能以及报警功能。

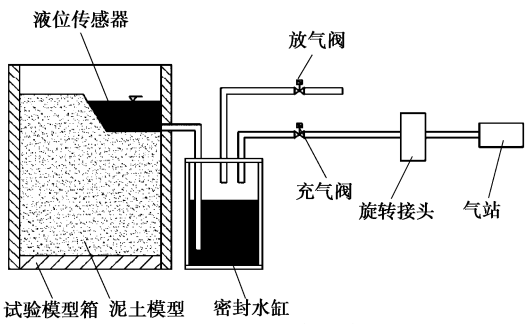


图 5 渠道水位升降工作原理

Fig. 5 Working mechanism of rising and falling of water level

1.2 热交换系统

热交换系统是湿干冻融离心模型试验系统的核心之一, 其主要功能是实现模型的冻融过程。其工作原理是利用直流电通过半导体材料组成的电偶时, 电偶两端可分别吸热和散热的特点来实现制冷和制热的变化过程。

目前可用于超重力场下的热交换装置均是通过冷 (热) 端与空气的自然对流进行热交换, 从而对模型进行冻融过程, 往往热交换效率较低, 所需冻结 (融化) 时间较长。为了提高渠道模型土体表面的气体流速, 在热交换系统一端设置风机, 将热交换装置产生的冷 (热) 量吹向渠底模型表面, 并在模型内部产生空气内循环, 从而增加热传导系统的运行效率, 工作原理如图 6 所示。

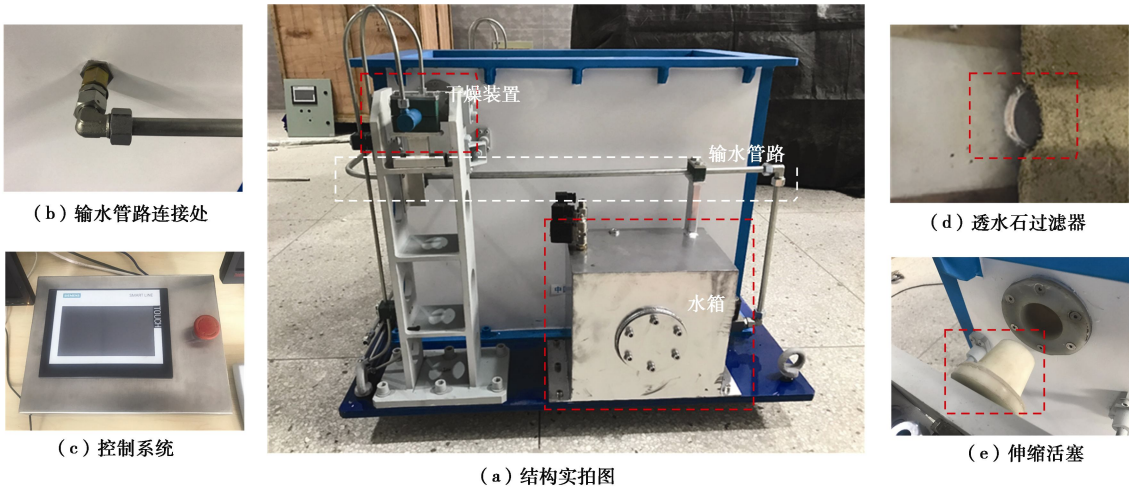


图 4 干湿系统

Fig. 4 Wetting-drying system

由于循环风机在热交换系统内部占有一定空间, 常规的标准半导体器件不能满足使用要求, 采用专用半导体致冷器件, 一级和二级致冷器件优化组合使用, 可实现在相同单位面积下致冷功率比常规冷板多一倍。各组制冷热电堆间串联连接, 理论总制冷功率为 9000 W。热交换器的结构采用 60 mm 或以上的合金铝板加工成多条肋筋, 可最大程度的加大交换面积, 提高交换效率; 半导体致冷器散热水箱采用紫铜板数控加工的一体化加工结构, 满足散热要求; 所有水管的连接都采用耐高压软管, 可以保证在高压循环水条件下正常工作。

热交换装置安装在冻融模型箱上方, 有联接法兰进行紧固, 箱体内部设置一块铝合金材料的换热板, 在换热板的一面紧密安装半导体致冷器件, 制冷和加热分别由不同半导体制冷器完成。通直流电后可向模型箱内自上而下供冷/热。该设备的最大温度变化幅度和温度变化速率分别为 $-40^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ 和 $0 \sim 1.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 通过控制系统可以输出线性温度边界, 也可以按照编制好的温度曲线输出周期性温度边界。

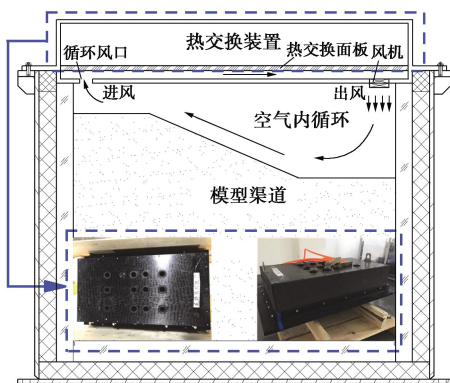


图 6 空气内循环工作原理

Fig. 6 Working mechanism of air internal circulation

1.3 模型箱

模型箱是安放渠道模型的空间, 良好的保温、隔热、防渗漏性能是实现渠道模型湿干冻融过程的前提。模型箱结构由内模型箱、保温层、隔热支撑、外模型箱四部分组成, 如图 7 所示。外模型箱采用 10 mm 厚不锈钢板, 外形尺寸为 $930\text{ mm} \times 530\text{ mm} \times 730\text{ mm}$, 主要起到与其他结构零部件进行联接、紧固、支撑的作用, 其上端设计有法兰和螺纹孔, 与热交换系统进行联接。内模型箱具有保温性能尺寸为 $750\text{ mm} \times 350\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高), 采用有机玻璃板螺钉紧固联接, 为保证密封性在各玻璃板之间设置 O 型密封圈, 接缝处涂抹密封胶; 在内外模型箱之间留有一个 40 mm 的间隙, 用来填充聚氨酯保温材料, 形成保温层, 并用隔热支撑进行内外模型箱支撑和紧固联接, 防止在离心场下, 有机板模型箱被土模型撑压而变形、开裂。另外, 在模型箱一侧开有 $400\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ (长

\times 高) 的加厚有机玻璃可视窗口, 以便于后期进行数字图像采集工作, 经试验检测可视窗口处保温性能良好。模型箱上部覆盖着热交换系统。试验时模型箱内布设一系列传感器, 模型箱整体需固定在在离心机的吊篮内。

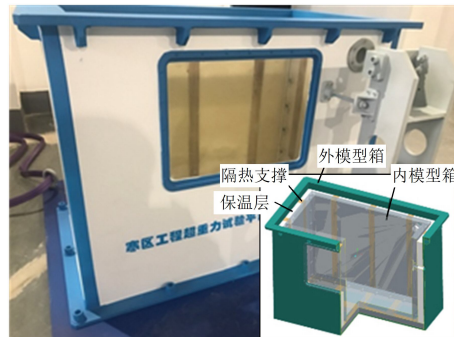


图 7 模型箱整体结构

Fig.7 Integral structure of model box

1.4 地面冷却水循环装置

由于试验过程中制冷(热)所产生的热量需通过流动的水流带走, 从而实现模型箱内的土体变温过程。水旋转接头是从地面向置于高速旋转离心机转臂上的试验设备提供水源的关键部件, 该试验设备安装于南京水利科学研究所 NHRI-400 大型土工离心机上, 该土工离心机配制有水旋转接头, 故可将地面冷却水循环装置连接至水旋转接头, 持续稳定地供应恒温、恒压的水用于热交换系统换热。相比于目前冻融离心模型试验中常用的水旋转接头直接采用自来水, 易造成水温较高且不稳定等, 所研制的该地面冷却水循环装置可以将 30°C 的常温水快速冷却至 $3^{\circ}\text{C} \sim 5^{\circ}\text{C}$ 供热交换系统使用, 使得冻融试验循环过程中单位时间内冷热量交换恒定, 制冷(热)速率稳定可控, 多次试验时试验边界可保持完全一致, 提高了试验的可重复性, 使设备整体性能得到极大提升。

1.5 数据采集控制系统

输水渠道离心模型试验经历湿干冻融 4 个阶段, 在干湿作用下产生胀缩变形和含水率变化; 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、温度传感器、孔隙水压力传感器以分别测试渠基土竖向位移、渠基土温度和渠基土内部孔隙水压力。

渠道湿干冻融离心模型试验的监测设备应具有耐低温、耐腐蚀、防水等特性。温度传感器采用的是 PT-100 铂电阻传感器, 工作范围 $-200^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$, 测量精度为 $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$, 其原理是利用金属铂在温度变化时自身电阻值也随之改变的特性来推算温度值。孔压传感器采用的是微型孔隙水压力计, 防水性好, 体积小, 自重小, 具体尺寸为 $\phi 13 \times 12.5\text{ mm}$, 量程为 $0 \sim 100\text{ kPa}$, 读取精度为 0.01 kPa ; 对于位移的监测, 由

于激光传感器难以在低温下稳定工作,故采用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,外形结构为304不锈钢材料的圆柱体,外径达20 mm,长度达200 mm,圆柱体前端是回弹式探针,后端为导线,量程为0~30 mm,精度为0.02 mm。

2 使用方法与特点

2.1 设备的主要特点

该设备的主要功能为创造“湿、干、冻、融”变化的温度场环境,其具有如下特点:①具有渠道水位升降系统和风干装置,且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,该离心模拟系统可以实现渠道的“湿”“干”“冻”“融”四个过程;②重复上面的试验过程后,该系统既可以实现渠道的反复“湿干冻融”试验;③可靠性强,控制方便,应用广,不但可用于寒区输水渠道的劣化失稳过程的研究,也可用于寒冷地区路基或其他结构物受湿干冻融作用问题的研究。

2.1 使用的方法、步骤

利用该离心模型试验设备进行输水渠道渠基土湿干冻融过程的研究,主要有以下5个步骤:

(1)根据所模拟现场渠道的断面尺寸,结合离心机的模型箱尺寸和最大离心加速度,确定合适的相似比尺,从而计算出模型渠道断面尺寸。

(2)将调配好含水率的土体按照设计干密度进行模型渠道制作,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。

(3)对干湿系统和热交换系统与模型箱体间的缝隙采用聚氨酯泡沫塑料和绝缘胶带进行密封处理,从而更好地控制箱内环境温湿度场。检查试验前的准备工作和设备的连接情况,并在启动各系统控制器后,开启离心机。

(4)通过控制系统对模型依次进行“湿”“干”“冻”“融”4个过程的模拟。

(5)若研究中涉及多个湿干冻融的过程模拟,重复实施步骤(4),则能实现对模型箱内的土体施加“湿干冻融”循环作用。

3 初步应用

3.1 试验方案

前已述及,渠基膨胀土在经历干湿交替、冻融循环的恶劣自然气候作用下劣化明显,采用该试验设备对北疆季冻区输水渠道的劣化过程进行了初步研究,本文仅简要给出一组典型试验的试验结果,以说明利用该试验设备进行湿干冻融耦合作用下输水渠道劣化

过程模拟研究的有效性和可行性。

所模拟的北疆某输水渠道工程,渠道断面为梯形,渠高5 m,渠水深度约4 m,两边渠坡坡比均为1:2。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31.5%和38.6%,颗分曲线如图8所示,液限和塑限分别为52.6%和18.4%,其自由膨胀率为71%,属中等胀缩等级膨胀土。土体以最优含水率18.8%进行配制,基于现场渠道取样实测干密度,取渠基土最大干密度的95%,即1.6 g/cm³进行渠道模型的制作。

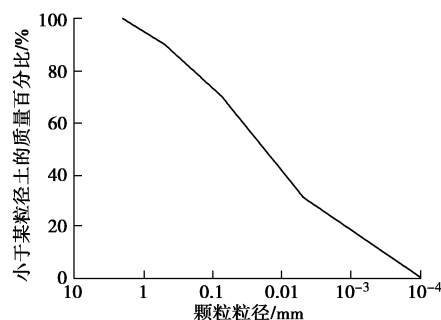


图8 颗分曲线

Fig. 8 Grain-size distribution curve

试验在南京水利科学研究院 NHRI-400 大型土工离心机上完成(见图3),该离心机挂篮侧面搭载了摄像系统,可以对模型箱可视窗口等部位进行监视及录像。试验最大加速度设计值为50g,为了节省模型箱空间,并考虑渠道剖面对称性,本试验以渠道中轴线为界只模拟渠道剖面的一半,该试验过程中布置共9个温度传感器(T1~T9)、3个LVDT位移传感器(L1~L3)、9个孔隙水压力传感器(P1~P9),模型渠道具体尺寸和传感器布置如图9所示。

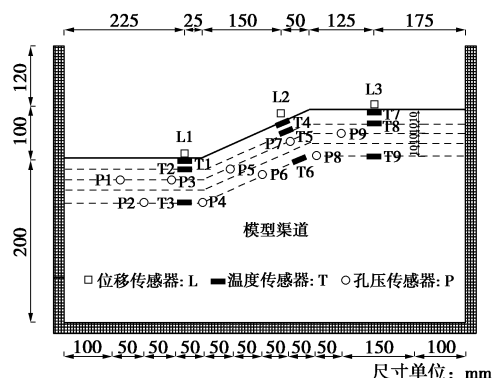


图9 模型具体尺寸和传感器布置

Fig. 9 Specific sizes and layout of sensors for model canal

本次离心模型试验主要模拟渠道的湿干冻融过程,并以此验证该试验设备在模拟渠道湿干冻融耦合循环作用的有效性和可行性,实现了一个完整的湿干冻融循环模拟,其中湿润和干燥阶段的时间分别为80, 33 min,它们是基于图1的湿干冻融耦合循环作用简化边界条件缩尺计算而得。此外,根据现场实际水位进行计算,模型渠道中水位升降过程中的蓄水高

度为 8 cm; 冻结和融化阶段的时间均以冻结深度和融化深度达到现场最大冻深 2 m (即模型渠道法向深度 40 mm) 为停止标准, 冻结和融化温度分别为 -40°C 和 30°C , 温度控制均为线性输出。

3.2 试验结果

(1) 水分场变化

受限于多场耦合下传感器的使用限制, 本次试验仅监测“湿”和“干”阶段的水分场变化, 暂不考虑“冻”和“融”阶段的未冻水迁移等水分微量迁移的影响。其中, “湿”和“干”的过程均通过孔隙水压力传感器监测判断。

图 10 为渠道模型内部孔隙水压力变化曲线。可以看出, 当开始进行水位升降过程模拟时, 渠基土内部孔隙水压力传感器均不同程度地被激活, 其中, P3、P4、P5 处的孔隙水压力值随着渠道模型内水位的上升而增长, 当渠道模型内水位不变时其孔隙水压力值保持平稳, 微弱的降低主要是由于渠水下渗, 当渠道模型内水位降低时, 其孔隙水压力值随之下降并在降至一定数值后保持平稳, 此时渠道模型内水即已排尽。可以认为, 该设备较好地模拟了渠道的水位升降过程, 与现场渠道的注水期、蓄水期和排水期相符。

另外, 当开始干燥过程模拟时, 机室内近 35°C 的热空气通过离心机自身的高速旋转流入模型箱内部并带走渠道模型内部的湿气, 对土体表面进行干燥。从图 10 可以看出, 在干燥阶段后期, 所有测点的孔隙水压力值均略有下降, 其中 P6、P8 处孔隙水压力值接近于 0, P7 处孔隙水压力值显著下降, 表明 P6、P8 处渠基土由于风干作用已由饱和状态转变为非饱和状态, 根据比尺关系换算至原型, 渠坡表面干燥深度可至 1 m 以上。另外, 由于 P6、P7、P8 均处于渠坡, 而渠底仍处于饱和或接近饱和状态, 这是由于渠底表面在排水后仍留有部分水分残留, 加大了干燥难度, 这与渠道现场实际情况是一致的。因此, 可以认为, 该设备较好地模拟了渠道表面的干燥过程。

(2) 温度场变化

图 11 为渠道模型试验中各测点的温度变化曲线。可以看出, 热交换面板温度下降至 -40°C 和上升至 30°C 时的过程均快速、稳定, 显示了热交换系统的可靠性和稳定性。试验中, 所有温度传感器均达到负温, 渠坡、渠顶不同深度处的温度传感器的温度变化速率由于空气内循环装置的运行而接近一致, 同一深度处渠底的升降温速率相对较小, 这主要是由于渠底为饱和和土, 故相对于渠坡、渠顶所需冻融时间较长。将温度场变化深度换算至原型, 冻结深度可至 2 m, 而原型北疆季冻区渠基土最大冻深约 1.8~2.0 m, 可以认为, 该设备可以满足高寒季冻区渠道的冻融过程研究需要。另外, 对于湿润过程中, 土体温度陡增, 这是由于用于模

拟水位升降过程的渠水温度较高, 故使用该设备时应注意保持水箱内水温与土体初始温度一致。

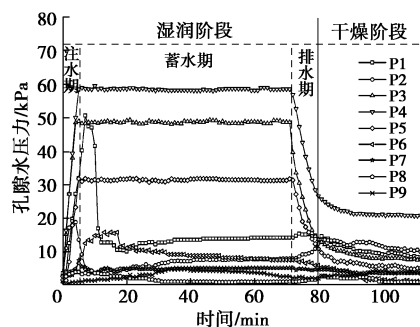


图 10 渠道模型内部孔隙水压力变化曲线

Fig. 10 Variation curves of pore water pressure in model canal

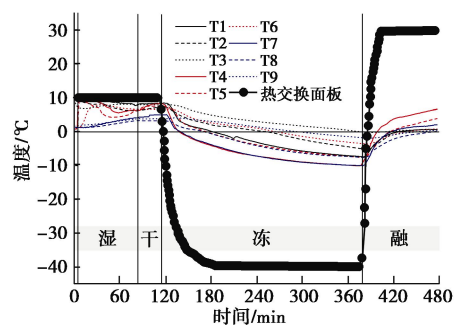


图 11 渠道模型温度变化曲线

Fig. 11 Variation curves of temperature in model canal

(3) 位移场变化

图 12 为渠道模型竖向位移量变化曲线, 其中渠底、渠顶的竖向位移量为位移传感器的测值, 渠坡的竖向位移量为渠坡表面法向位移量, 可由公式 $D = v / \cos\theta$ 计算, v 为位移传感器的测值, θ 为渠道的坡角。

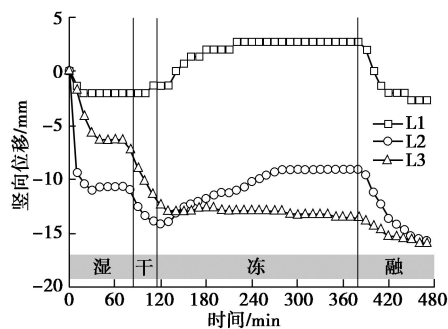


图 12 渠道模型竖向位移量变化曲线

Fig. 12 Variation curves of vertical displacement in model canal

从图 12 可以看出, 渠底和渠坡均出现了显著的冻胀现象, 渠顶的冻胀现象则不明显。渠底和渠坡的冻胀速率在开始时均较大, 当冻结过程持续约 50 min 后, 渠底冻胀量增长变缓并趋于稳定, 而渠坡冻胀量仍在持续增长, 但冻胀速率放缓, 最终渠底和渠坡的冻胀量分别为 2.1, 5.1 mm。当进行融化过程模拟时, 渠底、渠坡和渠顶均出现了显著的融沉现象, 渠底和渠顶融沉速率相近, 渠坡融沉速率显著大于渠底和渠顶, 渠底、渠坡和渠顶的最终融沉量分别为 2.4, 6.9,

2.7 mm。将冻胀融沉量根据比尺关系进行换算,约为10~35 cm,可以认为,该套渠道干湿冻融离心模型试验设备可较好地模拟现场渠基土冻胀融沉现象。

3.3 正在进一步探索的工作

虽然季冻区渠道离心模拟设备已经研制成功并初步开展试验,但在试验模拟过程中也发现存在一些问题,也是目前本团队正在着力探索解决的难题。概括起来主要有以下两个方面:①湿干冻融全过程的相似比尺。由于现场自然气候条件复杂多变,可以认为是一个多场敞开系统,在离心模型试验中采用半导体热交换系统模拟现场环境温度^[20],如按照相似比尺对现场湿干冻融简化边界条件进行缩尺,需在几十分钟内完成对模型渠基土冻结过程的模拟,受目前半导体技术水平所限,尚无法在目标缩尺时间内将模型渠基土冻结至现场最大冻深;而且湿润—干燥—冻结—融化四个过程循环,土体水分场和温度场的持续变化,WDFT四个过程中不同物理量的变化是否遵循统一的相似比尺亟需进一步探讨解决。②量测手段的多样化和精细化。传统离心模型试验测试方法或传感器主要适用于单一环境场中,在湿干冻融耦合循环作用下的复杂环境场中难以胜任。例如,未冻水迁移对冻土冻胀特性影响显著,常规离心模型试验中的含水率传感器^[22]在低温环境下难以测定未冻水含量,且延迟较为严重,难以获得渠基土在冻融过程中的未冻水迁移数据,故目前通过冻土离心模型试验对未冻水迁移流速、分凝现象的相似比尺等进行理论研究还存在较大难度^[23]。在超重力湿干冻融模拟过程中实现温度场、水分场、位移场(冻胀融沉位移)、力场(冻胀作用力)等的精准测试,是揭示复杂作用下渠道劣化破坏机理和建立合理数值计算方法的前提,在此方向仍有许多工作亟需开展。

4 结 论

(1)研制了一套模拟季冻区渠道湿干冻融过程的离心模型试验设备,该设备主要包括干湿系统、热交换系统、可视隔热模型箱、数据采集控制系统等组成,该设备实现了在离心机不停机的情况下对模型土体进行湿干冻融耦合作用的模拟。

(2)开发了考虑负温影响的离心模型试验干湿作用系统,满足了模型箱需密封保温的要求,在不停机状态下较好地模拟了水位自输水渠道底部升降的过程以及土体的风干过程。

(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、位移场和水分场,结果表明,该套设备的温度模拟正确,冻胀量测试准确,水分场同步变化显著,可以很好地适用于输水渠道湿干冻融过程的研究。

(4)该套季冻区渠道湿干冻融离心模型试验设备

兼具干湿系统和热交换系统,它既可以实现水分场的变化,又可以实现温度的升降,因此,它既能模拟干湿过程诱发的渠道劣化失稳问题,又能模拟渠道的冻胀融沉特性,并可循环模拟渠道的反复湿干冻融耦合作用。本设备虽然立足点是季冻区的输水渠道工程,但寒旱区的交通工程、铁路公路工程等,也都存在复杂的多场作用问题,仍然可以采用本设备进行试验模拟研究。

(5)冻土离心模拟技术在中国虽取得了一定的发展,但由于起步较晚,仍存在量测手段匮乏、相似比尺的严格论证等亟需解决的难题,尚需同行们不断地研究和探索,使冻土离心模拟技术更好地应用于解决寒区工程问题。

参考文献:

- [1] 何武全. 渠道衬砌与防渗工程技术[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2012. (HE Wu-quan. Canal Lining and Seepage Control Technologies[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2012. (in Chinese))
- [2] 蔡正银, 黄英豪. 咸寒区渠道冻害评估与处治技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015. (CAI Zheng-yin, HUANG Ying-hao. Evaluation and Treatment Technology of Frost Damage in Canals in Saline and Cold Regions[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese))
- [3] 王怀义, 黄英豪, 贺传卿, 等. 咸寒区灌渠冻害原型段及监测系统的建立[J]. 水利科技与经济, 2015, 21(1): 9 - 12. (WANG Huai-yi, HUANG Ying-hao, HE Chuan-qing, et al. Experimental method of concrete in sulfate erosion and freeze-thaw environment[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2015, 21(1): 9 - 12. (in Chinese))
- [4] QI J L, VERMEER P A, CHENG G. A review of the influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical properties[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2006, 17: 245 - 252.
- [5] 张家俊, 龚壁卫, 胡 波, 等. 干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2729 - 2734. (ZHANG Jia-jun, GONG Bi-wei, HU Bo, et al. Study of evolution law of fissures of expansive clay under wetting and drying cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2729 - 2734. (in Chinese))
- [6] TANG L, CONG S, LING X, et al. A unified formulation of stress-strain relations considering micro-damage for expansive soils exposed to freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 153: 164 - 171.
- [7] 冯德成, 林 波, 张 锋, 等. 冻融作用对土的工程性质影响的研究进展[J]. 中国科学:技术科学, 2017, 47(2): 111 - 127. (FENG De-cheng, LIN Bo, ZHANG Feng, et al. A review of freeze-thaw effects on soil geotechnical

- properties[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2017, **47**(2): 111 - 127. (in Chinese))
- [8] ZEMENU G, MARTINE A, ROGER C. Analysis of the behavior of a natural expansive soil under cyclic drying and wetting[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2009, **68**(3): 421 - 436.
- [9] 詹良通, 吴宏伟, 包承纲, 等. 降雨入渗条件下非饱和膨胀土边坡原位监测[J]. *岩土力学*, 2003, **24**(2): 151 - 158. (ZHAN Liang-tong, NG C C W, BAO Cheng-gang, et al. Artificial rainfall infiltration tests on a well-instrumented unsaturated expansive soil slope[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, **24**(2): 151 - 158. (in Chinese))
- [10] 刘 鸣, 龚壁卫, 刘 军, 等. 膨胀土(岩)渠坡现场监测技术研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(增刊 1): 83 - 91. (LIU Ming, GONG Bi-wei, LIU Jun, et al. Monitoring technology for canal slopes of expansive soil (rock) [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(S1): 83 - 91. (in Chinese))
- [11] 饶锡保, 陈 云, 曾 玲. 膨胀土渠道边坡稳定性离心模型试验及有限元分析[J]. *长江科学院院报*, 2002, **19**(增刊 1): 105 - 107. (RAO Xi-bao, CHEN Yun, ZENG Ling. Centrifugal model test and FEM study on slope stability of expansive soil channel of Water Transfer Project from South to North[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2002, **19**(S1): 105 - 107. (in Chinese))
- [12] LING H I, WU M H, LESHCHINSKY D, et al. Centrifuge modeling of slope instability[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, **135**(6): 758 - 767.
- [13] 程永辉, 程展林, 张元斌. 降雨条件下膨胀土边坡失稳机理的离心模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(增刊 1): 416 - 421. (CHENG Yong-hui, CHENG Zhan-lin, ZHANG Yuan-bin. Centrifugal model tests on expansive soil slope under rainfall[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(S1): 416 - 421. (in Chinese))
- [14] 陈湘生, 濮家骝, 罗小刚, 等. 土壤冻胀离心模拟试验[J]. *煤炭学报*, 1999, **24**(6): 615 - 619. (CHEN Xiang-sheng, PU Jia-liu, LUO Xiao-gang, et al. Centrifuge modelling tests of soil freezing heave[J]. *Journal of China Coal Society*, 1999, **24**(6): 615 - 619. (in Chinese))
- [15] ZHOU J, TANG Y Q. Centrifuge experimental study of thaw settlement characteristics of mucky clay after artificial ground freezing[J]. *Engineering Geology*, 2015, **190**: 98 - 108.
- [16] 蔡正银, 吴志强, 黄英豪, 等. 北疆渠道基土盐-冻胀特性的试验研究[J]. *水利学报*, 2016, **47**(7): 900 - 906. (CAI Zheng-yin, WU Zhi-qiang, HUANG Ying-hao. Salt-frost heave properties of channel bed soil in the Northern Xinjiang[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, **47**(7): 900 - 906. (in Chinese))
- [17] 张 晨, 蔡正银, 黄英豪, 等. 输水渠道冻胀离心模拟试验[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(1): 109 - 117. (ZHANG Chen, CAI Zheng-yin, HUANG Ying-hao, et al. Centrifuge modelling of frost-heave of canals[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(1): 109 - 116. (in Chinese))
- [18] 蔡正银, 朱 洵, 黄英豪, 等. 湿干冻融耦合循环作用下膨胀土裂隙演化规律[J]. *岩土工程学报*, 2019, **41**(8): 1381 - 1389. (CAI Zheng-yin, ZHU Xun, HUANG Ying-hao, et al. Evolution rules of fissures in expansive soils under cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(8): 1381 - 1389. (in Chinese))
- [19] 蔡正银, 陈 皓, 黄英豪, 等. 考虑干湿循环作用的膨胀土渠道边坡破坏机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, **41**(11): 1977 - 1982. (CAI Zheng-yin, CHEN Hao, HUANG Ying-hao, et al. Failure mechanism of canal slopes of expansive soils considering action of wetting-drying cycles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(11): 1977 - 1982. (in Chinese))
- [20] 张 晨, 蔡正银, 徐光明, 等. 冻土离心模型试验相似准则分析[J]. *岩土力学*, 2018, **39**(4): 1236 - 1244. (ZHANG Chen, CAI Zheng-yin, XU Guang-ming, et al. Dimensional analysis of centrifugal modeling of frozen soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(4): 1236 - 1244. (in Chinese))
- [21] 黄英豪, 蔡正银, 张 晨, 等. 渠道冻胀离心模型试验设备的研制[J]. *岩土工程学报*, 2015, **37**(4): 615 - 621. (HUANG Ying-hao, CAI Zheng-yin, ZHANG Chen, et al. Development of centrifugal model test facility for frost-heave of channels[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(4): 615 - 621. (in Chinese))
- [22] 刘小川. 降雨诱发非饱和土边坡浅层失稳离心模型试验及分析方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2017. (LIU Xiao-chuan. Centrifuge Modelling and Analysis of Rainfall-Induced Shallow Failure in Unsaturated Soil Slope[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese))
- [23] 蔡正银, 张 晨, 黄英豪. 冻土离心模拟技术研究进展[J]. *水利学报*, 2017, **48**(4): 398 - 407. (CAI Zheng-yin, ZHANG Chen, HUANG Ying-hao. A review on the development of geotechnical centrifuge modeling technique on frozen ground engineering[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, **48**(4): 398 - 407. (in Chinese))