

DOI: 10.11779/CJGE201601011

# 输水渠道冻胀离心模拟试验

张晨, 蔡正银, 黄英豪, 徐光明, 任国峰

(南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 冻胀破坏是导致寒冷地区渠道输水利用系数低的主要原因。依托南京水利科学研究院大型土工离心机成功研制了热交换试验装置, 该装置实现了渠道模型在离心场中与温度场的耦合。在此基础上开展了 20g 和 30g 下的不同渠基土含水率冻胀离心模拟的模型试验, 根据试验结果探讨了渠道离心模型的换热过程以及封闭系统中渠基土含水率对渠道法向冻胀位移的影响。此外, 根据试验结果验证了离心场下土体模型内传热速度是原型的  $N^2$  倍的关系。所提出的渠道冻胀离心模拟装置和试验方法为北疆地区输水渠道冻害处治提供了新的研究手段。

**关键词:** 输水渠道; 寒区; 冻胀; 离心模拟; 换热过程

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)01-0109-09

**作者简介:** 张晨(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事寒区水利工程冻害防护理论和技术方面的研究。E-mail: zcjr1256@163.com。

## Centrifuge modelling of frost-heave of canals

ZHANG Chen, CAI Zheng-yin, HUANG Ying-hao, XU Guang-ming, REN Guo-feng

(Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** The frost heave problem is the primary reason for low-utilization rate of canals in cold areas. Relying on the large-scale geotechnical centrifuge in Nanjing Hydraulic Research Institute, a heat exchange test device is designed. It can realize the coupling interaction between the centrifugal and temperature fields. Subsequently, the modelling tests on the frost-heave of canals in soils with different moisture contents under 20g and 30g respectively are performed. The results indicate that the distance between model and heat exchanging plate has great influence on heat exchange process. The moisture content has a significant effect on the frost-heave displacement. In addition, the law of heat migration rate in the soil, which is  $N^2$  times that of the prototype, is confirmed by the test results. The designed test device and the corresponding test method provide a new approach for the researches on frost-heave damage of canals in the northern areas of Xinjiang Uygur Autonomous Region.

**Key words:** canal; cold area; frost-heave; centrifuge modelling; heat exchange process

## 0 引言

中国季节性冻土面积分布占国土面积的 48.5%, 广泛分布于东北、内蒙古、华北及西北地区<sup>[1]</sup>, 北方寒区工程中的各类建筑物在冬季普遍存在着冻胀破坏问题。在受地基土冻胀作用而破坏的各类建筑物中, 水利工程中的渠道构筑物 and 衬砌渠道冻害最为普遍, 冻害造成渠道的裂缝、结构断裂以及滑坡等破坏最为突出<sup>[2]</sup>。在水资源短缺的新疆北疆地区, 农业用水主要依靠渠道输水工程, 但该地区渠系水利用系数往往只有 50%, 经调研, 冻胀破坏是造成北疆地区渠道输水效率偏低的主要原因, 每年需要耗费大量财力、物力和人力进行渠道冻害处治和修复。为了给北疆地区输水渠道的冻害处治提供切实可行的解决思路和技术方案, 水利部设立了公益性行业专项项目《咸寒区灌

区冻害评估预报与处治技术》。目前, 依托于该项目已经进行了大量室内试验和现场试验段研究, 本文旨在介绍依托该项目所研发的输水渠道冻害物理离心模型试验装置及初步研究成果。

## 1 背景

目前对输水渠道冻害方面的研究, 主要是采用室内单元试验研究渠基土自身冻胀特性, 但在应力状态和时间模拟等方面和实际情况差别很大, 只能用作渠基土冻/融基本规律的探讨, 对于地基土冻胀模型的试验装置也多是用于常应力状态下的地基冻土冻融试验

**基金项目:** 水利部公益性行业科研专项(201201037); 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:** 2014-12-30

装置。自 20 世纪 80 年代以来, 岩土离心模拟技术迅速发展, 通过对土工缩尺模型附加离心力场来模拟原位自重应力, 进而获得定性和定量的模拟结果<sup>[3]</sup>。而时间效应对于土体冻胀离心模型试验至关重要, 因为根据离心模拟的相似比原理, 增大模型加速度可在数小时内模拟原型在几个月、几年甚至更长时间的温变所引起的结果<sup>[4]</sup>, 这意味着采用离心模拟试验研究渠基土的冻胀特性较传统小比尺模型试验更具优势。

冻土离心模拟技术起步于 20 世纪 80 年代末, 借鉴有关海洋冰问题的离心模拟试验技术与方法, 国外学者对人工冻土蠕变特性<sup>[5]</sup>、寒区埋管工程<sup>[6-9]</sup>、基础受冻胀力<sup>[10]</sup>、地基土的冻胀/融沉特性<sup>[11-12]</sup>、永久冻土层的边坡稳定<sup>[13-16]</sup>、人工冻土的融沉特性<sup>[17]</sup>等问题进行了定量和定性的分析。已开展的冻土离心模拟试验涵盖了众多冻土工程的实际问题, 模拟类型逐渐从传统向复杂岩土工程问题发展, 模型条件也从单一封闭系统向复杂的多层敞开系统拓展。上述试验为冻土工程问题的研究开辟了新的途径, 也为冻土离心模拟技术的推广和应用提供了重要的参考。

中国冻土离心模拟技术的研究起于 20 世纪 90 年代, 陈湘生等<sup>[18]</sup>研制了中国第一台土壤冻/融离心模拟装置并成功完成了土壤冻融离心模拟试验, 利用半导体制冷技术实现低温控制, 在 30g 和 40g 条件下考察了地基土受冻胀变形规律, 并验证了土壤冻胀离心模型试验中热传导缩比关系的正确性, 在此基础上进行了有荷/无荷条件下地基冻-融循环离心模拟试验, 验证了该试验装置和测试系统的可行性和重复性<sup>[19]</sup>。周洁等在同济大学 TLJP—150G 土工离心机上开展了关于人工冻土融沉特性的离心模拟试验<sup>[17]</sup>, 采用乙二醇作为循环制冷剂, 在 1g 常重力场下预先将乙二醇通入模拟的管道冻结系统对土样进行冻结, 融沉试验前乙二醇停止循环制冷, 达到目标温度后再启动离心机进行试验, 试验期间温度自由回升。试验结果表明对于融沉固结问题, 离心模型试验比小比尺试验可靠; 采用灰色预测模型预测融沉位移与试验结果有较好的一致性。此外, 一些学者基于力学相似性即选用与冻土的力学特性相似的材料开展冻土离心模拟试验<sup>[20-21]</sup>, 但试验中并不涉及制冷装置, 此类试验只能用作冻土力学行为的探讨, 没有实现“温度场-重力场”的耦合。

冻土离心试验模型比尺最早是由 Miller 类比非饱和土中毛细水上升以及表面张力问题的控制方程和边界条件导出<sup>[22]</sup>, Miller 指出适用于“刚性冰”模型中的土体应力, 包括孔隙冰压力、有效应力的相似比尺为  $\sigma_p/\sigma_m=1$  (角标 p 代表原型, 而 m 代表模型); 根据 Savvidou 等的结论, 模型内传热或传质的时间比尺  $\tau_p/\tau_m=N^2$ <sup>[23-24]</sup>; 而土体融沉过程中若考虑固结效应, 时间比尺与渗流、固结等问题相同, 仍为  $\tau_p/\tau_m=N^2$ ,

这样, 冻土问题的模型时间比尺便得到了统一 (冻土蠕变问题除外)。此外有关土体热物性参数包括导热系数  $k$ 、比热  $C_p$ 、热扩散系数  $\alpha$  等参数的相似比尺均为 1:1, 即不受超重力场影响, 已有试验得到了证实<sup>[25]</sup>。当采用与原型相同的土体时, 冻土离心模型的基本相似比尺如表 1 所示。

表 1 原型物理量比模型

Table 1 Prototype versus model

物理量	相似比尺
粒径 $d$	1
密度 $\rho$	1
应力/均布荷载 $\sigma$	1
加速度	$N$
集中荷载 $Q$	$N^2$
位移 $l$	$N$
温度 $T$	1
时间 (固结)	$N^2$
时间 (热交换) $\tau$	$N^2$

虽然近 20 a 来冻土离心模拟技术得到了较快的发展, 但国内外目前有关寒区水利工程的冻害问题的离心模拟试验还未有报道。研制热交换装置, 通过离心模型模拟渠道受冻胀作用下的换热以及变形的规律, 这对于合理解决新疆咸寒区输水灌渠冻害问题及对对中国冻土离心模拟技术的发展都具有显著地意义。

## 2 试验装置及试验方案

### 2.1 试验装置

整套渠道冻胀离心模型试验装置安装在南京水利科学研究所 TLJ-60A 岩土离心机上, 岩土离心机的技术特征如表 2 所示。

表 2 岩土离心机技术特征

Table 2 Technical indices of geotechnical centrifuge

技术特征	技术指标
离心机最大容量	60 g·t
有效半径	2.0 m
转速幅值	5~200g
有效负荷(模型箱+模型)	100g 时 600 kg; 200g 时 300 kg
加速度稳定性	$\pm 0.5\%F \cdot S$

半导体热交换板是利用帕尔贴 (Peltier) 效应工作的制冷设备, 它与模型箱、渠道模型的关系如图 1 所示。热交换板的冷端位于模型箱内的正上方, 冷面向下, 自上而下向模型箱内提供冷量, 热端采用水冷散热将模型箱中的热量带出实现制冷。

半导体热交换板由 12 组半导体热电堆组成, 每一组热电堆的热端设有小型储水箱 (如图 2), 总制冷能力为 3600 W。该装置采用基于模糊 PID 自整定温度控制器输出热交换板的温度, 可提供  $-40^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$  的工作环境, 如有需要, 也可开展升温条件下的土体融沉模拟试验。半导体热交换板工作条件只需直流电, 无须制冷剂, 且工作环境不受离心场的影响。水冷散热

的效率较高, 换热系数通常比采用空气对流散热大 100~1000 倍<sup>[26]</sup>。

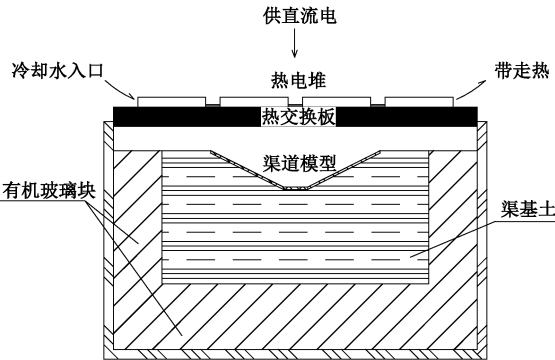


图 1 渠道冻胀离心模型

Fig. 1 Centrifuge model for frost-heave of canal

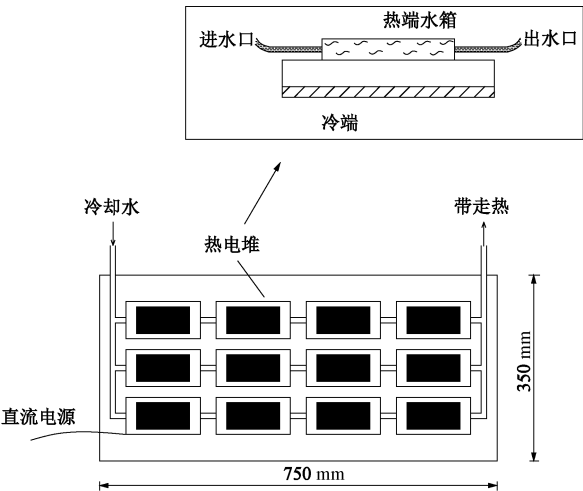


图 2 半导体热交换板的组成与结构

Fig. 2 Composition and structure of peltier heat exchanger

水循环系统安装在离心机转臂上, 由水泵、水箱、风冷散热器及输水管组成, 水泵共 4 台, 单个水泵的扬程为 110 m, 最大输出压力 1.1 MPa; 水箱容积为 50 L。输水管与半导体热交换板内每一组热电堆的热端小型水箱连接, 利用水泵将冷却水输送至半导体热交换板内热端的热量带出, 再通过风冷散热器进行二次散热, 最终回到水箱, 实现一次制冷工作循环。该装置在试验过程中不必为热交换设备持续供水, 大大节约了冷却水的用量。整套渠道冻胀离心模型装置的相互关系如图 3 所示。

试验用模型箱外层为不锈钢板, 内层为有机玻璃箱, 层间填充聚四氟乙烯泡沫塑料起保温作用。整个模型箱是密封的 (图 4), 模型箱的有效尺寸见表 3。

表 3 离心模型箱的基本参数

Table 3 Basic parameters of model box

名称	指标
内箱尺寸	750 mm×350 mm×450 mm
有效尺寸	450 mm×350 mm×275 mm

注: 模型箱初始尺寸偏大, 经调试后加入有机玻璃垫块缩小尺寸。

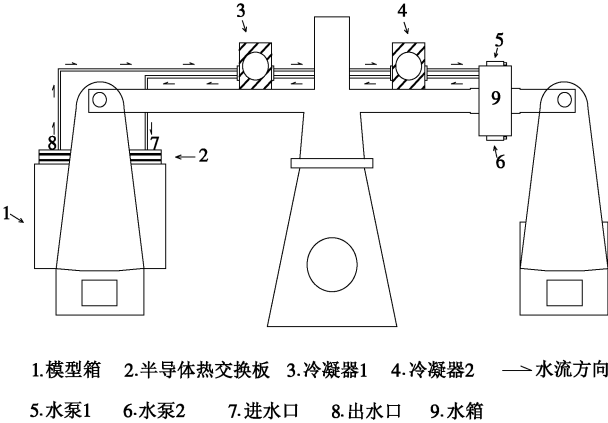


图 3 冻融离心模型装置示意图

Fig. 3 Sketch of centrifuge setup for frost-heave



图 4 冻融离心模型装置实物图

Fig. 4 Photo of water tank and pumps of centrifuge model for frost-heave

2.2 试验方案

试验的渠道断面尺寸按照公益性科研行业专项项目在北疆建立的现场试验段的断面进行缩尺。该试验段建设在乌鲁木齐南郊, 当地冬季最冷月月平均气温为-15.2℃, 试验渠段渠基土采用北疆渠道工程现场土换填, 衬砌为预制砼板铺设, 具有不铺设防渗膜以及铺设两布一膜和聚苯板保温材料两类断面形式, 其中不铺设防渗膜的试验段横断面尺寸如图 5 所示。

模型用土取自中国新疆北疆地区某渠系工程现场的渠基土, 该土为具有冻胀敏感性的低液限黏土, 颗粒级配和物理力学性质指标如表 3 所示。冻胀变形量及无侧限抗压强度显著受到含水率和盐分含量的影响<sup>[27-28]</sup>。铺设衬砌材料需要考虑几何相似、刚度相似以及热学相似。原型采用预制混凝土六棱柱衬砌块铺设, 这种刚性衬砌形式抵抗冻胀变形的能力是较弱的, 而当渠道内满水运行时, 冻胀作用将会消弱, 事实上很多渠道冻胀破坏发生在冬季不供水时。为突出渠基土的受冻融作用, 试验中渠道内不设自由水面, 按几何相似与热学相似原则选取导热系数与原型相近的水泥砂浆制作衬砌块模型, 水泥砂浆配比为水泥: 砂浆=1: 2.5, 导热系数约为 1.1 W/m·k。

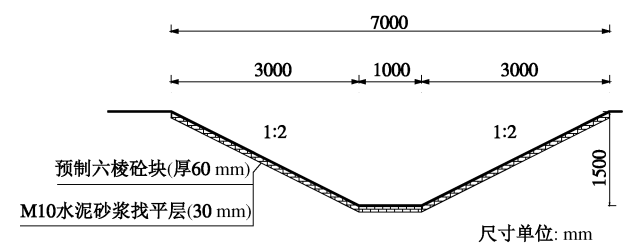


图 5 监测试验段渠道横断面尺寸示意图

Fig. 5 Cross-sectional sizes of monitoring test canal

表 3 渠基土的基本性质

Table 3 Basic properties of test soils

粒度组成/%			$w_L/\%$	$w_P/\%$	$\rho_{dmax}/(g\cdot cm^{-3})$	$w_{opt}/\%$
$>0.075$ mm	$0.075\sim 0.05$ mm	$<0.05$ mm				
17.9	62.1	20	29.1	15.2	1.89	13.5

设计 3 组离心模拟试验, 试验#1、试验#2 设置离心加速度分别为 20g, 30g, 用于考察渠基土在不同 g 值下的渠道温度变化和换热规律, 试验#1, #2, #3 组合用于考察不同基土含水率条件下渠坡与渠底的法向冻胀变形规律, 试验设计明细见表 4。

表 4 试验设计明细

Table 4 Test schemes

试验组号	$N$	渠基土参数		目标边界温度 / $^{\circ}C$
		$w/\%$	$\rho_d/(g\cdot cm^{-3})$	
#1	20	13.5	1.89	-30
#2	30	13.5	1.89	-30
#3	20	17.5	1.70	-30

离心模型断面形式为梯形断面, 坡比为 1:2, 3 组试验的模型总长为 350 mm, 高 275 mm。渠顶至热交换板的距离都为 10 mm, 目的是为了尽可能贴近热交换板。制作时首先按设定含水率和干密度分五层击实, 每层用土 27 kg, 击实完成后, 首先挖至渠顶设计标高, 再将渠顶与渠底设计坡比放坡, 表面预留 10~30 mm 用于铺设渠道衬砌和埋设传感器(渠顶不铺设)。

将距模型箱长度方向的侧边 100 mm 处作为一量测剖面, 剖面上渠坡和渠底中心衬砌的上表面、下表面, 表面下 10 mm 和 50 mm(20g)和 6.6 mm 和 33 mm(30g)都对应于原型的 0.2 m 和 1 m 处埋设 PT-100 铂电阻温度传感器, 单只温度传感器的长度为 20 mm, 直径为 1 mm, 精度 0.01 $^{\circ}C$ 。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); 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)都对应于原型表面以下 0.2 m 处埋设温度传感器, 传感器编号记为 T9, T10(20g), Ti, Tj(30g)。布设完成后将土体表面轻压、碾平。随后铺设模型衬砌, 现场衬砌板边长 25 cm, 厚 6 cm。试验中衬砌板尺寸为: 20g 值下边长 12.5 mm, 厚 3 mm, 质量平均约 1.25 g; 30g 值下边长 8.4 mm, 厚 2 mm, 质量平均

约 1.17 g。衬砌铺设缝隙用少许砂浆勾缝, 并做平整处理。渠道模型断面如图 6 所示, 铺设的衬砌如图 7 所示。

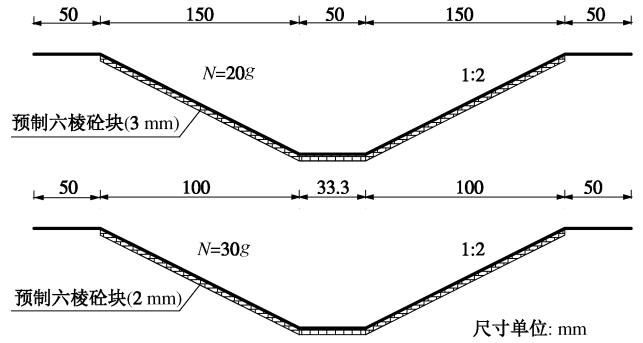


图 6 不同 g 值下渠道离心模型横断面尺寸示意图

Fig. 6 Sketches of modelling tests with different centrifugal accelerations



图 7 缩尺的衬砌板模型

Fig. 7 Reduced-scale model for lining plates

渠道中心和渠坡中点 1/2 处的表面放置两个 LVDT 位移传感器, LVDT 传感器量程 0~50 mm, 精度 0.02 mm, 如图 8。LVDT 传感器底端探针与衬砌材料触碰, 方向在量测剖面上竖直向下。温度和位移传感器数据线通过热交换板上方的洞口穿出, 与数据采集系统接口连接, 模型制作完毕后安装在离心机上。试验前在热交换板的四周贴上保温泡沫板增强模型箱的保温性。温度及位移传感器位置示意如图 8, 模型箱外观如图 9。

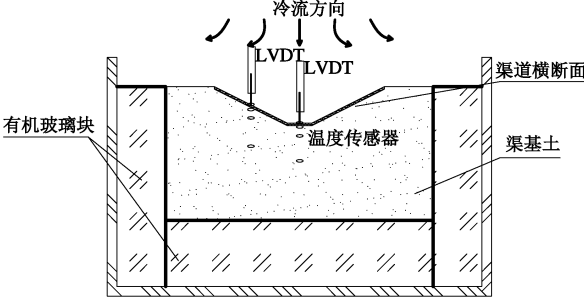


图 8 温度及 LVDT 传感器示意图

Fig. 8 Setting of temperature and LVDT sensors

### 3 试验结果

实验在观察到两组 LVDT 传感器所测法向自由冻胀量达到稳定后终止。将 20g 和 30g 值下的#1, #2 试验所得渠底、渠坡不同位置的热传递曲线, 根据时间

比尺准则转化成原型如图 10 所示。



图9 离心试验模型箱外观图

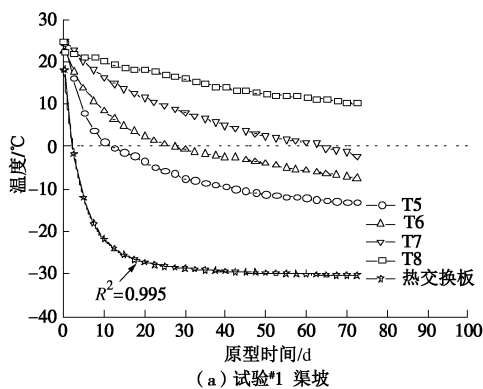
Fig. 9 Photo of centrifuge model container

根据试验结果, 在#1 试验中热交换板的温度起初下降较快, 在原型时间 20 d 时达到 $-27.25^{\circ}\text{C}$ , 此后温度变化极为缓慢, 最低温度出现在 75 d, 为 $-30.3^{\circ}\text{C}$ 。试验#2 中温度边界的输出工况与试验#1 基本相同, 最终热交换板温度达到 $-30.62^{\circ}\text{C}$ 。温度变化曲线可用衰减指数函数描述, 如图 7。衰减函数为

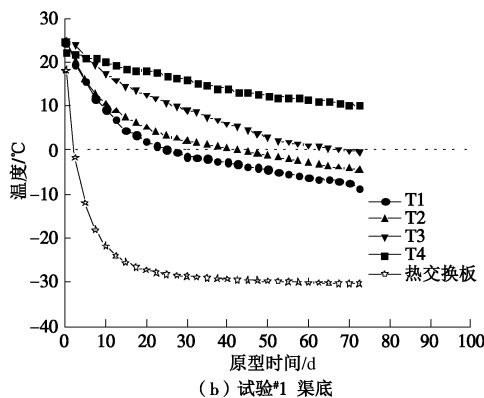
$$T = Ae^{(-\tau/t_1)} + Be^{(-\tau/t_2)} + C \quad (1)$$

式中,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  为拟合参数,  $\tau$  为时间变量。

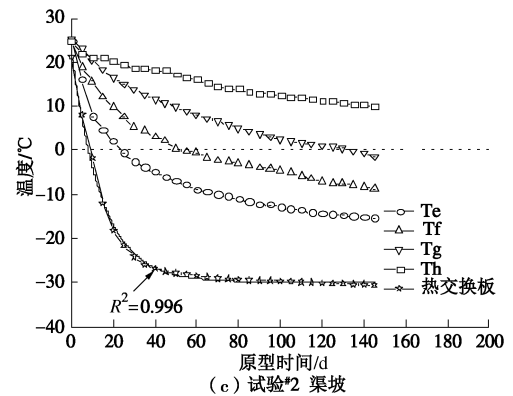
根据式 (1), 模型时间  $\tau \rightarrow \infty$ , 输出温度  $T \rightarrow C$ , 事实上达到一定时间点后, 热交换板的温度变化便极为缓慢了, 例如试验#1 中原型时间 20 d 至终止时间 72.5 d, 热交换板降温速率仅为  $0.006^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , 可近似认为热交换板温度输出为定值。



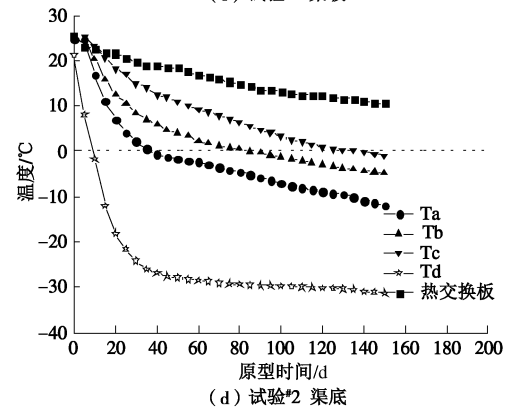
(a) 试验#1 渠坡



(b) 试验#1 渠底



(c) 试验#2 渠坡



(d) 试验#2 渠底

图10 渠坡、渠底温度变化曲线

Fig. 10 Temperature curves on slope and bed of canal models

根据图 10, 试验#1, 试验#2 渠坡、渠底表面以及基土内不同位置处各测点的温度表现为: 深度越小即距离热交换板越近, 降温幅度越剧烈, 距离较远位置处的渠基土内部温度变化相对平缓, 其中试验#1, #2 中渠坡及渠底下对应于原型 1 m 处的最低温度并没有降至负温以下, 各测点温度变化“先陡后缓”, 与热交换板类似。试验#1 中渠底下表面在原型时间 42.5 d 达到负温, 而试验#2 中渠底下表面达到负温的原型时间为 85 d, 是试验 1 的两倍, 采用模型时间则分别是 153 min 和 135 min, 试验#1 晚于试验#2, 同样的渠坡达到负温的时间分别试验#1 为 27.5 d, 试验#2 为 53 d, 采用模型时间分别是 99 min 和 85 min, 同一原型深度下渠坡下表面比渠底下表面先达到负温。两组试验中最大冻深均达到了 200 mm 以下。

为方便起见, 将 3 组试验中渠坡和渠底实测换算成实际原型的冻胀量曲线并同时给出渠坡和渠底衬砌下表面的温度曲线, 如图 11 所示; 不同含水率、不同  $g$  值下的渠坡、渠底冻胀量对比, 如图 12 所示, 其中设渠坡坡面的坡角为  $\theta$ , 由位移计测得的竖向位移值为  $v$ , 则根据几何关系可以换算得到渠坡的冻胀位移为  $D = v / \cos \theta$ 。LVDT 传感器均是在衬砌下表面达到负温后测出冻胀位移, 试验#1 中渠基土的含水率为 13.5%, 在渠坡开始出现冻胀的 28 d 至 50 d 时的冻胀速率约为  $0.6 \text{ mm}/\text{d}$ , 50 d 后冻胀位移量增长较缓并逐渐稳定, 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 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。试验#3 中渠基土含水率为 17.5%, 开始发生冻胀的时间点与试验#1 基本无异, 渠坡在 45 d 时冻胀量基本稳定, 较试验#1 略早, 最终冻胀位移量为 15.71 mm, 第 30 天至 45 天的冻胀速率约为 0.94 mm/d; 渠底最终法向冻胀位移量为 10.32 mm。两组试验对比中发现, 渠坡和渠底衬砌下表面进入负温的时间点基本相同, 但之后含水率较高#3 试验的降温幅度小于#1 试验, 最低温度在两组试验中相差分别为渠坡 1.82℃, 渠底 1.99℃。而#1 和#2 试验中冻胀位移量差别不大, 但#2 试验中冻胀作用时间较#1 试验滞后。

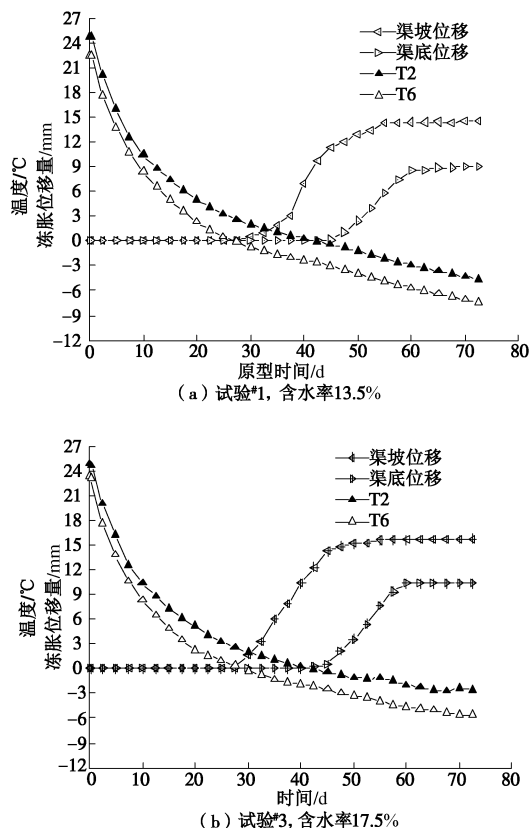


图 11 渠坡、渠底冻胀位移和温度曲线

Fig. 11 Curves of frost-heave displacements and temperatures on slope and bed of canal models

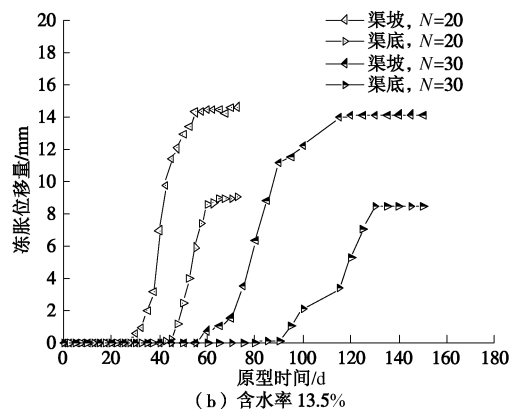
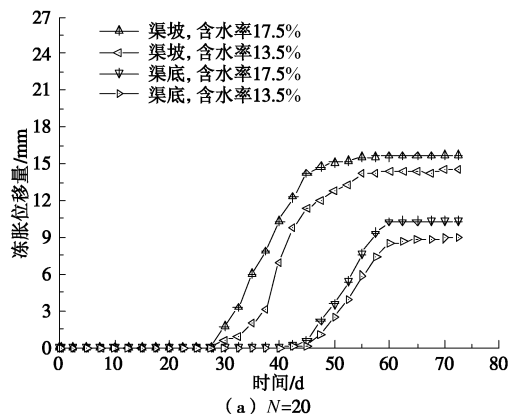


图 12 冻胀量的对比

Fig. 12 Comparison of frost-heave displacements

## 4 试验分析

### 4.1 模型内传热过程分析

试验#1 和试验#2 对应原型的几何尺寸是相同的, 但表面与热交换板的距离有所不同, 使得试验中模型表面距离热交换板近的位置降温速率快些, 导致各测点温度和变形随原型时间的变化并不同步, 并不具备模型的模拟 (Modelling of models) 的重复性, 这说明模型任一位置带出的热量与模型表面至热交换板的距离有关。

热交换板为温度边界, 位于模型上方, 模型四周为绝热边界, 模型内无热源。当上方热交换板温度低于模型表面温度时, 模型箱内便会形成以冷面朝下, 热面朝上的夹层空间的对流换热作用<sup>[29]</sup>; 其后模型表面与土体的热交换通过衬砌的热传导进行; 进一步的, 模型土体内通过土颗粒间的热传导以及孔隙间流体介质的对流作用将热量带出。首先考察空气表面与模型表面的对流换热过程, 以大地为参照物, 对流换热过程中空气介质具有绝对速度  $U=u+u'$ , 线速度  $u$  由离心机旋转产生, 相对速度  $u'$  则是由温度变化引起, 以模型箱为参照物, 空气仅具有流速  $u'$ , 模型内无风机等强迫对流装置, 属于自然对流换热范畴。流体侧空气介质的重度由常应力场中的  $\rho_g$  变为  $N\rho_g$ , 在离心力作用方向上, 对流换热过程中空气所受浮升力为  $-N\rho_g$  (负号表示与离心力方向相反, 不考虑哥氏力的作用)。试验中热交换板温度随时间变化, 因此表面来流速度与来流温度也是变量 (即非稳态)。此类问题通常没有解析解, 工程中常用无量纲数 Rayleigh 数和 Nusselt 数表征这一热交换过程<sup>[30]</sup>。Rayleigh 数为

$$Ra = \frac{g\beta\delta^3\rho^2c_p\Delta t}{\mu k} = \frac{g\beta\delta^3\Delta t}{\frac{k}{\rho c_p} \cdot \frac{\mu}{\rho}} = \frac{g\beta\delta^3\Delta t}{\alpha\nu} \quad (2)$$

式中,  $g$  为重力加速度,  $\alpha$  为空气膨胀系数,  $\nu$  空气动力黏度系数,  $\beta$  为空气热膨胀系数, 数值为膜温度

的倒数,膜温度即模型表面和热交换板的平均开氏温度, $\delta$ 为特征尺寸即热交换板与模型表面的垂直距离, $\Delta t$ 为模型表面与热交换板的温差。

Nusselt 数为

$$Nu = \frac{h\delta}{k} = \frac{q_{\text{conv}}}{q_{\text{cond}}} \quad (3)$$

式中, $k$ 为空气热传导系数,1标准大气压下空气在0℃时的热传导系数为 $k=0.022 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , $h$ 为模型表面换热系数, $\delta$ 同样为模型表面的垂直距离, $q_{\text{cond}}$ 为通过空气作用的纯热传导热量, $q_{\text{conv}}$ 即为自然对流换热热量。

其中热传导热流密度值由下式确定:

$$q_{\text{cond}} = k \frac{\Delta t}{\delta} \quad (4)$$

式中各符号意义同前。 $Ra$ 数与 $Nu$ 数两者之间的关系通常为

$$Nu = CRa^n \quad (5)$$

式中, $C$ 为试验常数。恒定温度边界情况下,在常重力场中层流运动的 $n$ 的典型数值为1/4,紊流则为1/3<sup>[29]</sup>。Tayler<sup>[31]</sup>指出离心场下自然对流换热的Rayleigh数中重力加速度 $g$ 替换为 $Ng$ 表示:

$$Ra = \frac{Ng\beta\delta^3\Delta t}{\alpha\nu} \quad (6)$$

同时给出了具有水平表面条件下换热过程的式(4)中的 $C$ , $n$ 的关系见表5。

表5 Rayleigh数中的参数关系

Table 5 Correlations between Rayleigh number and relevant parameters

$Ra$	$C$	$m$
<1700	1	0
1700~7000	0.059	0.40
7000~ $3.2\times 10^5$	0.212	0.25
$>3.2\times 10^5$	0.061	0.33

根据式(2)~(6),离心场下水平表面对流换热的热流密度计算公式为

$$q_{\text{conv}} = \frac{k(T_s - T_p)}{\delta} C \left[ \frac{Ng\beta\delta^3(T_s - T_p)}{\alpha\nu} \right]^n \quad (7)$$

根据式(7)可知,当瑞利数 $Ra$ 表征同一流动水平时,空气对流传热量与夹层间距成反比。说明距离热交换板越远,单位时间内模型表面对流换热带出的热量也就越小。渠道模型断面为变截面,而渠底为水平表面,与热交换板表面的距离试验#1为85 mm,试验#2为60 mm。现计算渠坡、渠底对流换热的热流密度 $q_{\text{conv}}$ ,根据式(1),热交换板在一定时间后温度可近似认为恒定,现选择温度相接近的时刻计算,试验#1渠底位置处在原型时间50 d时上表面温度为-4.45℃,热交换板温度为-29.72℃;试验#2渠底位置处在原型时间80 d时上表面温度为-4.52℃,热交换板的温度为-29.79℃。两者温度相接近,那么空气的热物

性参数也相接近,查得此膜温度条件下, $\alpha \approx 1.68 \times 10^{-5}$ , $\nu \approx 1.21 \times 10^{-5}$ <sup>[32]</sup>,代入式(6),试验#1、#2 Rayleigh数水平分别为 $1.28 \times 10^8$ , $1.92 \times 10^8$ ,根据表5, $C$ 取0.061, $n$ 取0.33。根据式(7),两者对流换热热流密度 $q_{\text{conv}}$ ,试验#2是试验#1的2.26倍,再根据式(4),试验#2热流密度值则更大。然而此时试验#1基土内部温度均比试验#2低,这说明变断面的渠道离心模型表面对流换热热流密度计算并不能单一的采用Tayler给出的计算方法。目前研究的结论是:离心场中在小的特征距离情况下夹层空间内水平面的对流换热过程的Rayleigh数具有与原型相同的量级。但渠道离心模型表面同时存在水平面和倾斜面,使得换热过程十分复杂,因此有关热流密度的计算方法还需进一步的研究和探讨。

封闭系统中渠基土内部的换热主要是通过土颗粒和孔隙水的导热完成,假设土体是均匀的各向同性材料,无量纲数Fourier数 $=k\tau/\rho C_p \delta^2$ 可以反映在模型竖直方向上的非稳态导热过程中热扩散深度与时间的关系,其中 $\tau$ 为时间变量, $k$ , $\rho$ , $C_p$ 分别为土的导热系数、密度和比热。若原型与模型满足Fourier数相似,在不考虑土中未冻水迁移和相变潜热的情况下,模型内热传导的时间是原型的 $N^2$ 倍。

为验证模型内热传导相似准则的有效性,在试验#1和试验#2中的渠顶土体表面T9,Ti及对应原型表面下0.2 m并转化成相应原型时间的热传递曲线如图13所示。

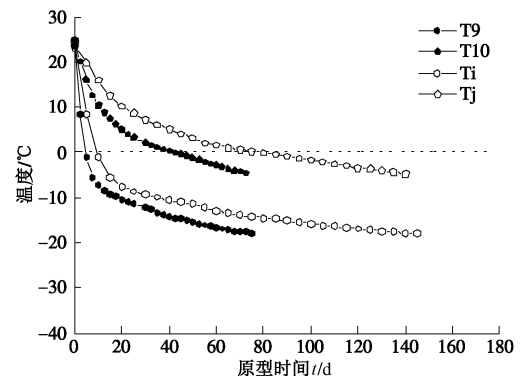


图13 渠顶热传递温度曲线

Fig. 13 Temperature curves on top of canal models by heat transmission tests

试验#1和试验#2渠顶与热交换板的距离都是10 mm,现定义无量纲温度 $\mu$ :

$$\mu = 1 - \frac{t}{t_0} \quad (8)$$

式中, $t_0$ 为测点的初始温度, $t$ 为一定时刻对应于原型的测点温度。无量纲温度用于表征温度增长的百分率,若满足相同的时间相似比尺,那么不同离心加速度条件下温度增长的百分率随时间的变化应当可以由同一函数表出。现选取 $t=5, 15, 30, 45$ 和 $60 \text{ d}(20g)$ , $t=25,$

50, 75, 100 和 125 d(30g)。将各散点绘制在  $t-\mu$  坐标中并拟合, 如图 14 所示。

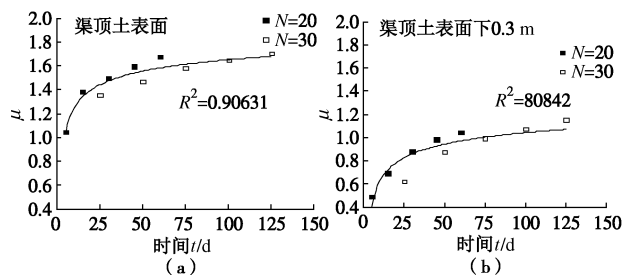


图 14 模型的模拟

Fig. 14 Modelling of model test No. 1 and No. 2

根据拟合曲线所示, 对不同试验  $N$  值下的  $\mu-t$  关系, 各散点吻合度较高, 这说明在土工离心模型中, 加速度为  $N_g$  条件下, 模型内传热速度是原型内的  $N^2$  倍的结论是正确的。

#### 4.2 冻胀变形分析

对于渠基土含水率较高的渠道模型, 虽然渠基土内同一位置处的降温幅度小于低含水率下的渠道模型, 但渠坡与渠底表面的法向冻胀位移值相对较高些。渠基土的冻胀变形存在明显的速变形和缓变形阶段, 在无外供水源的封闭系统中, 渠底及渠坡冻胀量主要是由渠基土中水相变成冰后体积膨胀产生的, 渠基土达到一定冻深后, 渠基土进入速冻胀阶段, 此阶段的特征是冻胀量大, 作用时间短。此后缓冻胀阶段, 形成缓冻胀阶段的原因可能是浅层土体已经冻结, 而较深的土体由于冻结速率 (即冻结锋面推进的速率) 较慢, 原位孔隙水发生部分冻结, 但细粒土中的未冻水迁移十分微弱, 没有产生对冻结缘的补给作用。

## 5 结 论

(1) 研制了一套用于输水渠道冻胀离心模型试验的热交换试验装置, 该装置可以根据试验要求在相应离心加速度场中提供相应的箱内温度环境, 开发了水循环系统, 有效解决了冷却水不能循环使用的问题, 整个装置在试验过程中运行良好。冻胀离心模型装置可以较好的模拟在冬季停运期内渠道衬砌受冻胀变形的情形, 为寒区输水渠道冻害的研究提供了一种新的研究手段。

(2) 所测渠基土温度变化呈现出所处深度越小降温幅度越大的规律, 试验所测最大冻深可达原型深度 200 mm 以下。换热程度与模型表面距热交换板的距离有关。

(3) 渠基土含水率较高的模型产生的冻胀变形较大, 渠基土的冻胀变形存在明显的速冻胀和缓冻胀阶段。封闭系统中细粒土的冻胀仍是以原位孔隙水冻结为主。

(4) 有关离心场中在小的特征距离情况下夹层空

间内水平面的自然对流换热的热流密度计算方法并不适用于变几何断面的渠道模型。通过分析, 土体模型内传热速度是原型内的  $N^2$  倍的关系是正确的。

本文采用新研制的渠道冻胀离心模型试验装置, 开展了初步的探索性研究, 但由于渠道冻害问题受土、水、温等多因素影响, 异常复杂。笔者尚在开展的工作主要有: ①考察渠道衬砌对自由冻胀量的约束效应, 给出渠道在铺设衬砌下产生的法向冻胀量和渠基土未铺设衬砌条件下自由冻胀量的关系; ②在离心模型试验中, 实现防渗保温措施的模拟; ③在离心模型试验中, 实现地下水水位、阴坡、阳坡等对实际渠道冻胀的模拟。

#### 参考文献:

- [1] 赖远明, 张明义, 李双阳, 等. 寒区工程理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (LAI Yuan-ming, ZHANG Ming-yi, LI Shuang-yang, et al. Theory and application of cold regions engineering[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [2] 李 卓. 土工袋防渠道冻胀试验及数值模拟[D]. 南京: 河海大学, 2013. (LI Zhuo. Experimental and numerical study on channels of frost heave prevention using soilbags[D]. Nanjing: Hohai University, 2013. (in Chinese))
- [3] 包承纲. 我国岩土离心模拟技术的应用与发展[J]. 长江科学院学报, 2003, 30(11): 55 - 66, 71. (BAO Cheng-gang. Application and development of centrifugal modeling technology for geotechnical engineering in China[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2003, 30(11): 55 - 66, 71. (in Chinese))
- [4] 陈湘生. 人工冻结黏土力学特性研究及冻土地基离心模型试验[D]. 北京: 清华大学, 1999. (CHEN Xiang-sheng. Study on mechanic properties of artificially frozen soil and centrifuge modelling of frozen soil[D]. Beijing: Tsinghua University, 1999. (in Chinese))
- [5] JESSBERGER H L. Openingaddress[C]// Proceedings of 5th International Symposium on Ground Freezing. Rotterdam: Balkema A A, 1989: 407 - 411.
- [6] CHEN X X, SMITH C C. Frost heave of pipelines: centrifuge and 1g model tests[R]. Cambridge: Cambridge University, 1993.
- [7] SMITH C C. Thaw induced settlement of pipelines in centrifuge model tests[D]. Cambridge: University of Cambridge, 1992.
- [8] CLARK J I, PHILLIPS R. Centrifuge modelling of frost heave of arctic gas pipelines[C]// Proceedings of the 8th International Permafrost Conference. Zurich, 2003: 21 - 24.
- [9] GOODINGS D J, STRAUB N A. Physical modeling of frost



- jacking[C]// Proceedings of the ASCE International Conference on Pipeline Engineering and Construction, 2003.
- [10] 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**(9): 874 - 880.
- [11] YANG D, GOODINGS D J. Climatic soil freezing modeled in centrifuge[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, **124**(12): 1186 - 1194.
- [12] HAN S J, GOODINGS D J. Practical model of frost heave in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(1): 92 - 101.
- [13] HARRIS C, MURTON J, DAVIES M C R. Soft - sediment deformation during thawing of ice - rich frozen soils: results of scaled centrifuge modelling experiments[J]. Sedimentology, 2000, **47**(3): 687 - 700.
- [14] DAVIES M C R, HAMZA O, HARRIS C. Physical modelling of permafrost warming in rock slopes[C]// Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost. Zurich, 2003: 169 - 173.
- [15] HARRIS C, MURTON J B, DAVIES M C R. An analysis of mechanisms of ice-wedge casting based on geotechnical centrifuge simulations[J]. Geomorphology, 2005, **71**(3): 328 - 343.
- [16] HARRIS C, SMITH J S, DAVIES M C R, et al. An investigation of periglacial slope stability in relation to soil properties based on physical modelling in the geotechnical centrifuge[J]. Geomorphology, 2008, **93**(3): 437 - 459.
- [17] 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.
- [18] 陈湘生, 濮家骊, 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))
- [19] 陈湘生, 濮家骊, 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, LUO Xiao-gang, et al. Centrifuge modelling tests of foundation undergoing two cycles of frost heave and thaw settlement[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2002, **42**(4): 531 - 534. (in Chinese))
- [20] 苏 谦, 钟 彪, 王 迅, 等. 青藏铁路多年冻土斜坡路基失稳变形特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, **41**(5): 1939 - 1943. (SU Qian, ZHONG Biao, WANG Xun, et al. Instable deformation characteristics of sloping subgrade in permafrost region for Qinghai-Tibet railway[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, **41**(5): 1939 - 1943. (in Chinese))
- [21] 黄俊杰, 苏 谦, 钟 彪, 等. 多年冻土斜坡路基失稳变形影响因素及特征研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(3): 703 - 710. (HUANG Jun-jie, SU qian, ZHONG Biao, et al. Deformation failure characteristics and influential factors of subgrade upon slope in permafrost area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(3): 703 - 710. (in Chinese))
- [22] MILLER R D. Frost heaving in non-colloidal soils[C]// Proc 3rd Int Conf On Permafrost, National Research Council of Canada. Ottawa, 1978: 707 - 713.
- [23] SAVVIDOU. Centrifuge modelling of heat transfer in soil[C]// Centrifuge 88. Balkema, 1988: 583 - 591.
- [24] KRISHNAIAH S, SINGH D N. Centrifuge modelling of heat migration in soils[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2004: 39 - 47.
- [25] KRISHNAIAH S, SINGH D N. Determination of thermal properties of soils in a geotechnical centrifuge[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2006, **34**(4): 319.
- [26] 徐德胜. 半导体制冷与应用技术[M]. 2版. 上海: 上海交通大学出版社, 1999. (XU De-sheng. Semiconductor refrigeration and application technology[M]. 2nd ed. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1999. (in Chinese))
- [27] 蔡正银, 吴志强, 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. (CAI Zheng-yin, WU Zhi-qiang, HUANG Ying-hao, et al. Influence of water and salt content on strength of frozen soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(9): 1580 - 1586. (in Chinese))
- [28] 吴志强. 北疆渠基土冻胀特性的实验研究[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))
- [29] KARLEKAR B V, DESMOND R M. Engineering heat transfer[M]. New York: West Publ, 1977.
- [30] HOLMAN J P. Heat transfer[M]. Singapore: McGraw-Hill Book Co, 1986.
- [31] TAYLOR R N. Geotechnical centrifuge technology[M]. London: Blackie Academic and Professional, 1995.
- [32] 许国良, 王晓墨, 郭田华, 等. 工程传热学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010. (XU Guo-liang, WANG Xiao-mo, WU Tian-hua, et al. Engineering heat-transfer theory[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010. (in Chinese))