

文章编号:0559-9350(2017)04-0398-10

冻土离心模拟技术研究进展

蔡正银^{1,2}, 张 晨^{1,2}, 黄英豪^{1,2}

(1.南京水利科学研究院 岩土工程研究所, 江苏 南京 210029;

2. 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 210029)

摘要: 冻土工程实践的发展和需求不断给冻土工程提出新的问题。冻土离心模拟技术是专门针对冻土工程的物理模拟技术, 即在已有的土工离心机的基础上实现了温度场与应力场的耦合, 并可在较短的时间内完成对大跨度时间下冻土工程实际问题的模拟。近30年来, 随着热交换装置不断革新、相似准则不断完善以及试验方法不断创新, 使得冻土离心模拟技术在世界范围内发展迅速, 为冻土工程问题的研究开辟了新的途径。本文介绍了试验装置的发展过程, 综述了已开展的主要试验及研究成果, 在此基础上展望了冻土离心模拟技术未来的发展方向。冻土离心模拟技术在冻土工程领域中将拥有广阔的应用前景。

关键词: 寒区工程; 离心机; 试验设备; 离心模拟试验; 研究进展

中图分类号: TU41

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20160731

1 研究背景

自1930年, 前苏联学者崔托维奇在国际上发表第一篇关于冻土的学术论文以来, 有关冻土学、冻土力学、冻土物理学、工程冻土学等方面的理论研究取得了很多具有应用价值的重要成果^[1]。这些成果对永久或季节性冻土层上的公路、铁路路基、建筑基础、水利工程、能源设施以及输送管线等工程的设计及建设有着积极的指导作用。此外, 人工冻土技术的日益成熟使得地基冻结法应用逐渐增多, 且在复杂土层或岩层中地下水整治等工程中有着良好的应用前景。

由于冻土成分的复杂性和对温度、水分等的敏感性, 其力学性质要比融土更为复杂^[2]。近年来, 随着世界寒区能源开发和建筑建构的需求, 涉及冻土的实际问题也越来越多, 早期处理方法的缺点日益显现^[3]。冻土是以“场-时间”为主的课题, “土、水、热、力、(盐)”等因素的相互作用以及随时间表现出的动态效应, 其复杂性在岩土工程领域是很突出的。“预测、观测、分析-映射”是岩土工程问题研究的主要手段, 同样也是冻土工程的主要研究手段, “预测”包含数值分析、物理实验和物理模拟技术, 就物理模拟而言, 开展足尺或大比尺的模拟更接近工程原型, 但该技术通常存在周期较长、人力、物力投入大、数据采集的准确性易受影响, 且造价昂贵等不利因素。传统的室内小比尺模型试验可以解决上述一些问题, 但在传热速率、土壤水分迁移等方面存在比尺失效情形, 且试验结果受边界条件影响, 所获得的温度、基土变形等数据与原型差距较大^[4-5]。土工离心模拟试验是借助离心机高速旋转为模型创造与原型应力水平相同的应力场, 从而使原型的性状在模型中再现的一种物理模拟手段, 极大的弥补了传统小比尺模型试验的不足。与其他岩土工程离心模拟试验不同的是, 冻土问题需要在应力场的基础上进一步施加温度场。近年来, 随着寒区工程问题的日益重视, 冻土离心模拟技术的相似准则、试验设备、试验方法等不断创新, 已经逐渐成为冻土工程问题研究

收稿日期: 2016-07-13; 网络出版日期: 2017-04-12

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20170412.1618.007.html>

基金项目: 水利部技术示范项目(SF-201704); 中央公益性科研院所基本科研专项(Y316023)

作者简介: 蔡正银(1965-), 男, 江苏海安人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事岩土基本理论研究。E-mail: zyc@nhri.cn

的重要手段。

世界上第一台土工离心机于1931年诞生在美国哥伦比亚大学。自20世纪60年代后期以来,土工离心模拟技术得到较快发展,目前已在土石坝和堤防工程、土质边坡、隧道开挖等地下工程、挡土结构和开挖工程、加筋土工程和软基处理工程、港口工程与海洋平台、路基加固、环境岩土、岩石力学、岩土工程动力问题等课题中取得了丰硕成果;土工离心机也从最初半径25 cm的小型离心机发展为容量达到1 080 g-t的大型离心机,并且加载卸载装置、振动台、机械手等离心试验专用装置也日臻成熟^[6-7]。

冻土离心模拟技术的起步与发展则晚于上述课题,这与冻胀理论的研究起步相对较晚以及温度场(主要是低温场)在模型中实现的困难有关。

最初的有关冻胀机理的理论并不能解释不连续冰透镜形成的原因,直到20世纪70年代“第二冻胀理论”的提出才使得冻土的冻胀行为有了较为完备的理论体系。Miller在第二冻胀理论中指出:冻胀作用方向上的有效应力可由孔隙水张力、孔隙冰压力和总应力计算,即有效应力原理适用^[8-9]。将小比尺模型放入离心机中,实现孔隙水张力、孔隙冰压力以及总应力的“应力还原”,可以获得冻土问题中定性和定量的模拟结果。同时期Miller已经形成了利用土工离心机模拟冻土问题的构想,这为开展冻土离心模拟试验奠定了理论基础^[10]。当考虑冻土融沉固结问题时,饱和条件下离心模型中总水头可达到原型的水平,设置与原型相同的排水条件对以自重为主导的冻土融沉固结过程的模拟也是有利的^[11]。20世纪80年代末至今,冻土离心模拟试验的发展经历了热交换设备从可行到完善,比尺准则从推导到验证,研究内容从单一的适用性到具体工程问题的模拟以及辅助理论研究的发展过程。

2 试验装置的发展

2.1 热交换装置的发展 在离心场下模拟土体冻结的作用过程,就需要在模型箱内设置可持续工作的热交换装置。较高的离心加速度会直接导致压缩机等传统热交换设备无法安装在土工离心机上正常使用,这使得离心模拟试验中必须采用可行的且效率较高的热交换装置。第一台具备热交换装置的土工离心机于1983年由Langhorne和Robinson使用,用于开展海洋冰问题的离心模拟试验研究^[12],随着该技术的发展,热交换装置逐步形成了直接导热装置和间接导热装置两大类。

直接导热装置包括热传导装置和强迫对流装置,热传导装置主要以冷管或筒式热源为主,冷管是将通有冷液/气的金属管直接插入土体内部与土体进行热传导换热,这类装置通常出现在埋管冻胀的问题中,涡流管可在试验期间向冷管内持续供冷。而筒式热源是将温度边界施加在模型表面的装置,传热方式为热源与模型表面直接热传导。筒式热源对试验试样的尺寸要求有着严格的限制,文献[10]采用了该装置维持温度边界。

强迫对流装置是冷气或“冷风”直接向模型表面输送而制冷的形式,此类装置需要安装“送风”设备。最早的“送风”方式是利用液氮、液氨、干冰等制冷剂在离心机旋转下沸腾-蒸发生成冷气,从而达到向模型表面“送风”的效果。例如Lovell和Schofield的装置^[13],液氮生成的冷气在模型箱内循环,根据轻木漂浮在气缸盖中表征制冷剂释放量确定制冷水平,如图1所示。此类制冷装置可以提供较低的温度,但主要不足是制冷剂在离心模拟试验过程中需要维持高压,若发生泄漏,带有毒性或腐蚀性的制冷剂可能会腐蚀模型及模型箱。此外,若试验中所需制冷剂量较大,那么制冷剂容器会占据模型箱内较多的空间。此后有学者改进了“送风”方式,采用涡流管等装置将高速旋转的压缩空气分

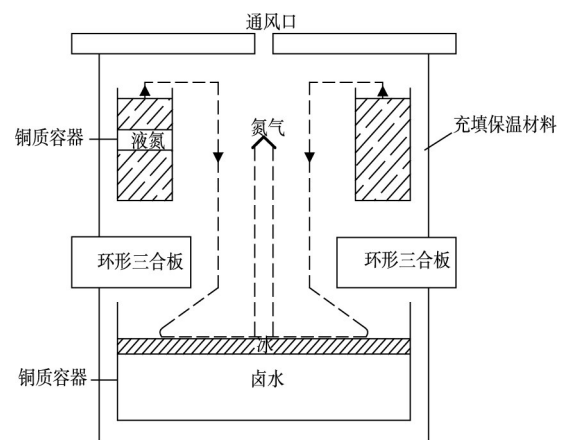


图1 Lovell和Schofield的热交换装置

离成低温气体和高温气体，低温气体直接吹送至模型表面而高温气体向离心机室排放。涡流管可以根据控制阀调整具体的温度，但该装置需要特殊的集流环供电，每一组集流环需要彼此隔离和独立工作，集流环润滑剂不足则会导致设备失效、损坏，从而影响实验设备的使用。强迫对流装置的一个共同特点是水气可能从模型表面转移至冷却系统内的任何位置^[14]。

间接导热装置特指半导体热交换装置，最先由Chen等^[15-16]使用，如图2所示。它是利用帕尔贴效应，即当直流电流通过具有热电转换特性的导体组成的回路时，结点上将产生吸热或放热现象进行制冷或制热。半导体材料通常具有较高的制冷优值系数、合适的屈服极限、耐热冲击性以及一定的可焊性^[17]。将一只P型半导体元件和一只N型半导体元件联结成一个热电偶(P-N结)，如图3所示，图中的“1—4”表示电流流经的虚拟结点。当直流电流经热电偶时，在两端产生了帕尔贴效应，上面形成冷端，从外界吸热，下面形成热端，向外界放热。将若干个这样的热电偶连接构成了一热电堆，把热电堆的冷端放到模型箱内吸热降温，热端热量通过流动水带出，冷端与热端可以通过电流方向相互转换。半导体热交换装置安全性高，工作不受低温、高压、高离心加速度的影响。半导体热电堆的工作示意如图4所示。

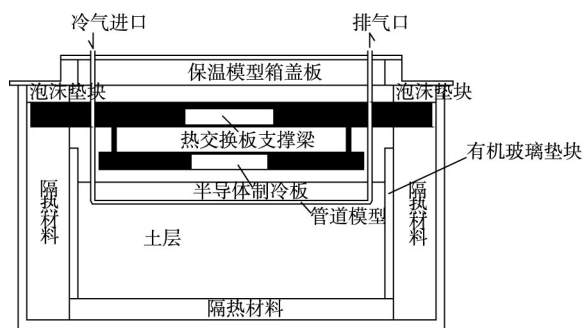


图2 Chen和Smith的热交换装置

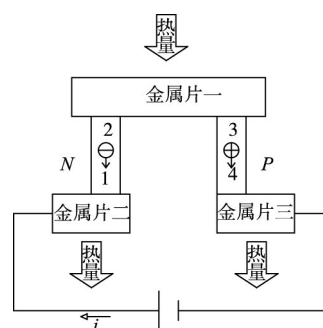


图3 P-N结示意

将半导体热交换装置安装在模型上方，发生热交换的必要条件是热交换板表面与模型表面存在温差以及夹层内具有一定的空气介质。在制冷工况下当热交换板温度低于模型表面时，换热包括热传导、热对流以及热辐射换热三种形式，此时的热对流是由于冷热面的温差形成的自然对流，是主要的换热形式。制热工况下，当模型表面温度低于热交换板温度后热对流效应便会消失，此时的换热方式仅为通过空气的热传导和热辐射^[14]。在较低的离心加速度水平下自然对流换热效率较低，但根据模型率进行合理的试验布置，可以达到一些工程原型的温度边界要求，该装置可根据试验要求开展土的冻结或融化试验。此类装置需要安装架设热交换板的附属设备，包括电源线，旋转接头等，试验过程中需要利用旋转接头为半导体热交换板持续供流动水用以散热。

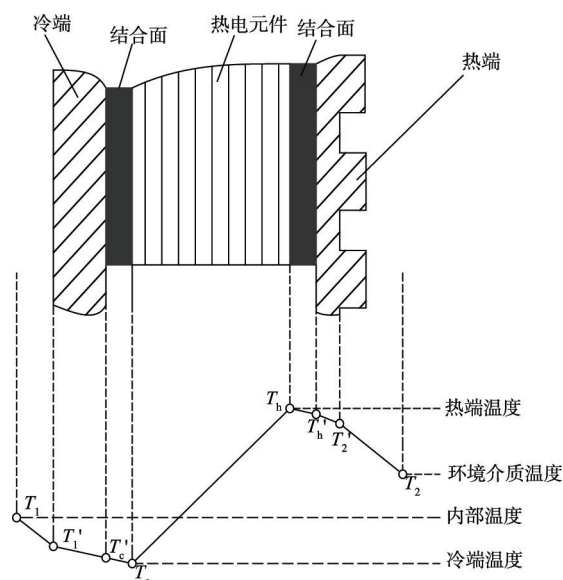


图4 半导体热电堆工作示意

陈湘生在清华大学土工离心机上根据半导体制冷技术开发研制了我国第一套土壤冻胀融沉离心模拟试验装置^[18]，半导体热交换板由6个热电堆构成，该系统最低制冷温度可达 -38°C ，比文献^[15-16]低 18°C ，开创了我国冻土离心模拟技术的先河。

黄英豪等^[19-20]介绍了一种用于渠系工程的冻/融离心模拟试验设备。该设备安装在南京水利科学研究院 TJ-60A 土工离心机上, 同样采用半导体制冷技术, 热交换板由 12 个热电堆组成, 理论输出功率为 3 600 W, 采用基于模糊自整定 PID 控制器的温控系统, 温度输出区间为 -40 ℃~30 ℃, 高压水泵驱动水箱内的水流并结合风冷散热器组成的循环冷却水系统持续为热交换装置冷却降温, 实现了在离心机不具备水旋转接头下的循环水利用, 大大减少了冷却水的用量, 如图 5 所示。

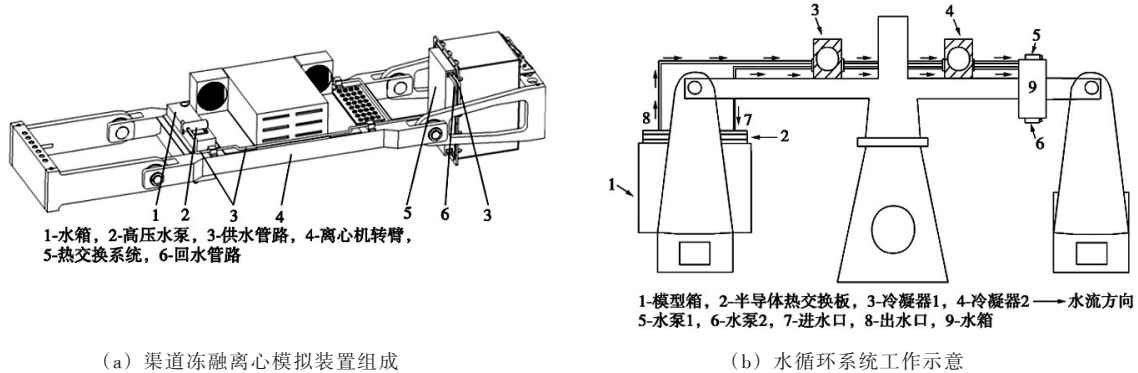


图 5 渠道冻融离心模拟试验设备

相比土体冻结作用过程的离心模拟试验, 考察已冻土的融沉作用问题的离心模拟试验可不必安装持续工作的热交换装置。可以先将模型预先冻结再进行离心模拟试验, 试验过程中使模型自由融化或利用简单的热源控制融化。例如 Zhou 等^[21]同济大学土工离心机上开展的关于人工冻土融沉特性的离心模拟试验, 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, 冻结温度可达 -25℃, 试验开始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。采用类似的试验方法进行研究的有: Smith^[22]、Harris 等^[23-25]、Davies 等^[26]。

2.2 模型箱的发展 冻土离心模拟试验期间必须维持一定的边界条件, 这要求模型箱的设计必须考虑尺寸和保温性。已有的冻土离心模拟设备中的模型箱大多为刚性模型箱, 模型箱的内部结构与制冷装置相匹配, 尺寸则根据实际试验的要求确定。就模型箱内部结构而言, 除布置模型的空间外还需设有热交换装置的附属设备, 例如制冷剂的容器、涡流管以及热交换板的固定装置、电线引口等。文献[15-16]将热交换板安装在模型箱内的固定梁上, 而文献[19-20]将热交换板架设在模型箱顶部兼做顶盖。模型箱材质与通常离心试验模型箱无异, 而内部需要充填保温材料, 例如聚四氟乙烯等以减少热损失。监视、量测系统也是模型箱的主要功能之一, 目前首要的位移量测装置是 LVDT 传感器, 探针与土体或者管道接触, 另一端固定在固定梁或者模型顶盖上与离心机信号接口连通。文献[19]则是直接固定在热交换板上的开孔内。模型箱侧边设置有机玻璃面可用于监视模型剖面内冻胀/融沉变形以及冰棱镜发育等过程。一般常用的铂电阻温度传感器即可满足温度量测的需要。对于需要在离心模型试验开始前预先冻结或预先设定一定温度的试验, 模型箱必须附加构造装置来与外部的热交换设备进行对接。

3 相似准则

相似准则是进行冻土离心模型试验的理论依据。关于冻土离心试验最先使用的相似准则是由 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^[27], Miller 指出了冻土离心模型试验相似准则的核心内容, 即适用于“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 $\sigma_p/\sigma_m=1$ (下标 p 表示原型, m 表示模型, 下同)。就冻土的热扩散效应而言, 已开展的试验中采用的相似准则大都依据 Savvidou 关于土工离心模型试验的中热扩散效应的相似准则^[28-29], 在此基础上开展离心模型试验对相似准则进行了验证, 但冻土作为一种复合多相介

质，孔隙水相变引起的变形是土中“水”、“热”、“力”三场的共同作用的结果，仅从单一地热扩散角度给出相似准则是不完备的；另一方面，在研究相似准则问题中，采用在使用白金汉定理对机理尚不明确的物理过程进行相似分析时，往往很难得到令人满意的结果，原因是白金汉定理只给出了得到不变量的必要条件，若一些不具有量纲或具有相同量纲的变量或参数，或是一些参数加入到无量纲项的定义中，会造成分析结果不能形成一个清晰的量纲结构^[30]。张晨等^[31]充分考虑土体的“水、热、力”耦合作用，采用 Butterfield 量纲分析法确定了控制饱和土体冻融变形性状的无量纲项，验证了试验中孔隙压力、热扩散、融土固结以及冻融变形的相似准则，明晰了未冻水迁移作用的相似准则。当采用与原型相同的土体时，土体热物性参数包括导热系数 λ 、比热 C_p 、热扩散系数 α 等参数的模型比尺均为 1:1，即不受超重力场影响^[32]，此时冻土离心模型试验的基本相似准则如表 1 所示。

表 1 冻土离心模型试验的基本相似准则(原型物理量比模型)

符号	d	ρ	σ	g	h	T	t	t	u	k
物理量	粒径	密度	应力/均布荷载	加速度	位移或变形量	温度	时间(固结)	时间(热交换)	水的迁移流速	渗透系数
相似比尺	1	1	1	N	N	1	N^2	N^2	$1/N$	$1/N$

从表 1 可以看出，模型内传热或传质的时间比尺为 $\tau_p/\tau_m=N^2$ ；而土体融沉过程中若考虑固结效应，对于渗透系数 k ，认为孔隙水动力黏度系数 $\mu=1$ 时， $k_p/k_m=1/N$ 成立，那么，时间比尺与渗流、固结等问题相同，仍为 $\tau_p/\tau_m=N^2$ 。这样，关于模型时间的相似比尺便得到了统一，这意味着在较短时间内可以实现对原型大跨度时间的冻结/融化过程的模拟。有关时间效应、冻胀量的相似比尺，目前大都已得到确认；但对于冻土中水热过程比尺规律的研究还不充分，特别是正冻土中分凝冰演化过程中未冻水流速、渗透系数以及分凝冰的几何尺寸，不同离心加速度、补水条件对冻结速率、冻胀速率的影响等问题仍需要在今后的研究中进一步明确。此外，一些相似准则的矛盾也需要解决，例如多次冻融循环下的加载-卸载-再加载条件下表面开始冻结至出现冻胀力这一期间的时间比尺不符合 N^2 倍，而考虑冻土蠕变和应力松弛的时间比尺与冻胀力的响应的的时间比尺也存在矛盾^[10]，模型表面自然对流换热的无量纲 Rayleigh 数、Grashof 数的相似性仍有待研究。

4 试验研究进展

第一个关于冻土问题的离心模拟试验则是在 1989 年，Jessberger 完成了关于人工冻土蠕变特性的离心模拟^[33]。此后学者们对冻土工程中的埋管工程、地基基础、人工冻土、永久冻土的融沉及富冰土层的边坡稳定等方面进行了试验研究，表 2—6 按研究内容分类，从作者、热交换方式、补水条件以及研究成果等方面综述了主要的冻土离心模拟试验研究成果。

从表 2—6 可以看出，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，通过模型的模拟 (Modelling of models) 验证相似准则的正确性，将试验结果与足尺试验和小比尺试验的对比验证离心模拟试验的适用性，根据试验数据进行工作机理和破坏机制分析，将已有数学模型和数值计算方法进行验证是目前冻土离心模拟试验的重要手段，而对于具体工程的设计参数、设计计算方法和设计方案的验证、比选的研究则较少。总而言之定性结论占绝大多数，而各学者针对的具体工程问题不同，尚未能形成普适性的定量结论。

5 存在的主要问题及发展趋势

5.1 试验方法对试验结果的影响 试验方法对试验结果有一定的影响，主要体现在几何边界、温度边界、固结效应和补水条件等方面。试验中并不必选取较高的加速度水平，较高的离心加速度可能对制冷装置的安全性和传热效果有一定影响^[14]，应根据具体工程原型合理设计模型尺寸和加速度水

表2 寒区埋管工程冻害的离心模拟试验研究			
作者及年代	热交换方式	补水条件	试验方法及评论/结论
Smith ^[22] /1992	预先冻结/加热元件	封闭系统	将富冰砂土和细砂预先冻结后放入模型箱，试验开始时启动埋管内的加热元件。“融化盘”的增长模式对埋管受力有显著影响。
Chen等 ^[16] /1993	涡流管、半导体制冷	封闭系统	利用涡流管将冷气通入模拟管道中，模型顶端用热交换板维持环境温度在0℃。试验中观测到了埋管的冻胀变形现象，模型的模拟具有良好的重复性，所采用的试验方法可行有效。
Clark等 ^[34] /2003	涡流管、半导体制冷	敞开系统	模型根据北极输气管道工程设计，将管道模型埋入不同级配的土中，试验期间利用涡流管向管内通入冷气，热交换板控制环境温度。试验结果表明模拟相同的工程地质条件，冻胀速率变化、管道所受压力等量测结果与足尺试验基本相同，比小比尺试验大，对于1.2m管径3m埋深的输气管道，冻深达到管道下方1m以下时冻结锋面压力将产生显著变化。
Goodings等 ^[5] /2003	涡流管	敞开系统	采用相同尺寸的卵石模拟埋管在一年内受冻融作用的过程，涡流管为模型表面供冷/热，试验观测到埋管经历一次冻融作用后较初始位置上抬3.3cm。采用卵石代替非冷/热埋管进行离心模拟试验是可行的，在，在线性温度边界下观测到埋管冻胀上抬速率与先前土体表面上抬的速率相等。

表3 地基土冻胀/融沉特性的离心模拟试验研究			
作者及年代	热交换方式	补水条件	试验方法及评论/结论
Ketcham等 ^[10] /1997	低温实验室、筒式热源	敞开系统	在67 <i>g</i> 、80 <i>g</i> 、100 <i>g</i> 下模拟了基础受冻胀作用问题。整个试验系统处于低温环境中，筒式热源使试样顶端维持在-2.7℃，底端维持在1.9℃。采用反力架约束基础并量测冻胀力。试验中观测了冰棱镜的生长过程，试验结果验证了冻土离心模拟比尺准则的有效性。
Yang等 ^[35] /1998	涡流管	敞开系统	在20 <i>g</i> 、30 <i>g</i> 、45 <i>g</i> 下设置了4种不同的温度边界模拟季节性冻土的冻结过程。试验结果表明离心模拟试验量测冻胀量与原型相当，敞开系统下上覆荷载对粉土和粉质黏土的冻胀变形有较大的抑制作用，在高离心加速度下生成冰棱镜的大小略小于低离心加速度和小比尺试验。不同的温度边界条件对模型最终冻胀量和冻深有影响。
陈湘生等 ^[18] /1999	半导体制冷	封闭系统	试验在清华大学QH-50 <i>gt</i> 岩土离心机上进行。在30 <i>g</i> 和40 <i>g</i> 下进行了土壤冻胀离心模拟试验，两次试验结果一致，验证了模型传热比尺准则的准确性。
陈湘生等 ^[36] /2002	半导体制冷	封闭系统	在有压和无压条件下开展了两次冻融循环试验，有压和无压时地基冻胀变形形态不同，模型内温度分布与实践相吻合，封闭条件下冻胀量与实际一致。
Han等 ^[37] /2006	涡流管	敞开系统	在35 <i>g</i> 和45 <i>g</i> 下考察黏土的冻胀特性，根据原型设置了两种温度边界形式，试验验证了比尺准则的有效性，结果表明高原位含水量降低了冻结深度，但使得更多的孔隙水参与冻结；因黏土的低渗透性，地下水位对冻胀变形量的影响不大；离心场引起的自重固结对冻胀变形量的影响很小；敞开系统中固结黏土中的冻胀特性更接近于封闭系统。

平。目前采用的温度边界形式主要为恒温边界和线性边界两种形式或组合，恒温边界是室内单元试验常用的温度边界形式，线性边界是以固定的变温速率℃/d升温或降温模拟原型日平均气温的变化，这两种边界形式直接影响着土体模型内的温度梯度的变化和表面冻结指数(℃×天数)水平^[32]，因此在

表4 人工冻土工程的离心模拟试验研究

作者及年代	热交换方式	补水条件	试验方法及评论/结论
H.L.Jessberger ^[33] /1989	冷管(类筒式热源)	封闭系统	开展了冻结凿井中冻结壁的方面的离心模拟试验,模拟了冻结凿井中冻结壁温度场及蠕变的位移场,得出了深冻结井冻结壁温度场和位移场在开挖后随时间而变化的规律。
Zhou等 ^[21] /2015	预先冻结	敞开系统	在同济大学TLJ-150G-A离心机下完成了上海地区人工冻结淤泥质黏土的融沉特性离心模拟试验,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。

表5 永久冻土层退化的离心模拟试验研究

作者及年代	热交换方式	补水条件	试验方法及评论/结论
Harris等 ^[23] /2000	预先冻结	封闭系统	将模拟的永久冻土层(黏土和淤泥)放入模型箱中采用光源照射融化,设置压力传感器监测土层融化后孔隙水压力的变化,试验结果表明永久冻土层的融化引起孔隙水压力升高,在较高的水力梯度下易诱发泥流,但在淤泥质冻土中并不明显。
Davies等 ^[26] /2003	预先冻结	封闭系统	在120g下开展了关于永久冻土层退化对岩质高边坡稳定性影响的离心模拟试验,用钢板将边坡分割为4个滑块,竖节理。根据试验结果采用瑞典法计算了岩质边坡的安全系数,节理面冰层在高温下融化易导致边坡失稳。
Harris等 ^[24] /2005	预先冻结	封闭系统	在30g下完成了关于冰楔融化的力学特性离心模拟试验,将冰楔放入冻结土内,试验期间自由融化,试验探讨了砂土地基和黏性土及淤泥土地基下冰楔融化的变形特性、孔隙水压力和温度场的变化。
Harris等 ^[25] /2008	涡流管、强光源	敞开系统	开展了关于永久冻土层冰缘土坡稳定性分析的离心模拟试验,采用涡流管为冷板通冷气,冷板与边坡直接接触,达到预设温度后采用强光源照射融化,冷板兼做加载装置。试验结果表明富冰土坡融沉固结过程中孔隙水压力升高使得滑前剪应变增大进而导致失稳,最大孔隙水压力值可以用于确定是否产生泥流。最大孔隙水压力在冻融循环周期内的变化表明冰棱镜分布在周期内也发生了改变。根据试验数据分别在总应力和有效应力下利用Skempton分析法系统的分析了冰缘边坡的失稳的影响因素。

表6 渠系工程冻害的离心模拟试验研究

作者及年代	热交换方式	补水条件	试验方法及评论/结论
张晨等 ^[20] /2015	半导体制冷	封闭系统	开发了一套冻融离心模拟热交换系统,在此基础上开展了渠道冻胀离心模拟试验,试验结果验证了模型与原型的热传导比尺为 N^2 倍的有效性,探讨了以半导体制冷为温度边界下的模型内自然对流换热过程。
张晨等 ^[31] /2016	半导体制冷	封闭系统	充分考虑土体的“水、热、力”耦合作用,采用Butterfield量纲分析法确定了控制饱和土体冻融变形性状的无量纲项,验证了试验中孔隙压力、热扩散、融土固结以及冻融变形的相似准则,明晰了未冻水迁移作用的相似准则;完成了一则关于渠道基土冻融作用的离心模型试验。

为模型设定温度边界时应当结合具体问题进行设计。对于饱和细粒土模型,利用离心机对试样进行固结其固结时间较长,推荐采用预先对模型进行排水固结处理。在长时间的冻土离心试验中往往会引起已固结模型土的超固结效应,超固结效应对于土体冻胀变形观测的影响并不大^[34],但对于融沉变形过程有显著影响^[38];敞开系统对于冻结锋面冻结缘的增长有补给作用,但在渗透性较差的黏性土中地下水位对冻胀变形量的影响并不大,冻胀特性更接近于封闭系统^[37],因此封闭系统或敞开系统的设置因结合具体工程问题优化设计。

5.2 目前的局限 虽然冻土离心模拟技术具有显著优势,但仍存在一定的局限性。目前的局限主要存在两个方面,一是土工离心模型试验本身的局限;二是冻土离心模拟技术的局限。就土工离心模型试验本身的局限而言,由于土工离心试验本身存在误差,诸如尺寸效应、系统误差等,离心模型中很难精确再现所有原型结构细节以及所有力学过程。对于冻土离心模拟技术的局限,主要表现在试验设备和测试方法上。现有的热交换设备无法实现对于温度变幅的精确控制,而工程原型中受光照、大气循环等作用,温度变化复杂,有时具有短时剧烈的温度变幅,目前现有的技术很难做到温度场的完全还原。测试方法的局限主要是测试方法、传感器精度受低温环境的影响,例如常用的激光位移传感器在低温环境中漂移较大,难以获得精确的测试数据;而采用LVDT式传感器进行试验,必须对LVDT传感器进行固定,若采用制冷剂制冷,位移传感器就需要占据模型箱内的空间,而采用半导体制冷,由于模型表面需要靠近制冷板以获得更好的制冷效果,使得传感器必须在半导体制冷板上开槽固定,这就限制了传感器的安放位置。这些局限相互影响,导致了试验结果精确性和重复性的下降。

5.3 未来发展趋势 冻土离心模拟试验较传统小比尺试验以及足尺试验具有自身显著的优势,是进行物理模拟研究的最佳手段。虽然我国冻土离心模拟技术仍处在起步阶段,但清华大学、南京水利科学研究院相继开发了冻土离心模拟试验系统;浙江大学开发了具有温控条件的多功能离心试验模型箱,也具备进行冻土工程离心模拟试验的条件,这对于我国冻土离心模拟技术的发展有着积极的推动作用。然而,冻土离心模拟技术还未达到寒区工作者们的理论要求和实际需求,它需要不断的完善和改进。就试验装置和试验方法而言,对于模拟单日气温变幅对季节性冻土层的冻融作用、或是考虑日照辐射条件下局部环境差异的冻土工程离心模型试验还存在较大难度。采用大功率的半导体热交换装置,同时配置先进地自动化温控系统实施温度控制,以实现冻土离心试验的温度的精细模拟将是今后的研究重点。就研究内容而言,目前国内学者已经完成了关于地基土冻融、渠道冻害、人工冻土技术等方面的离心模型试验,诸如寒区水利工程中的冻害问题、冻土路基稳定性以及在行车荷载、地震荷载作用下的动力响应问题、多年冻土退化引起的工程地质灾害等问题的模拟将是国内今后研究中值得关注的课题。冻土离心模拟技术拥有广阔的应用前景,需要广大研究者们不断的探索与实践,使冻土离心模拟技术而更好的服务于寒区工程问题的理论研究与实践应用之中。

参 考 文 献:

- [1] 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): 625-638.
- [2] 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.
- [3] 奥兰多.B.安德斯兰德,布兰科.洛达尼.冻土工程(原著第二版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [4] YANG D, GOODINGS D J. Predicting frost heave using FORST model with centrifuge models[J]. Journal of Cold Regions Engineering. 1998, 12(2): 64-83.
- [5] GOODINGS D J, STRAUB N A. Physical Modeling of Frost Jacking[M]//New Pipeline Technologies, Security, and Safety. Batimore, 2003: 1685-1693.
- [6] 包承纲,蔡正银,陈云敏,等.岩土离心模拟技术的原理和工程应用[M].武汉:长江出版社,2011.
- [7] 包承纲.我国岩土模拟技术的应用与发展[J].长江科学院学报,2013,30(11): 55-66, 71.
- [8] MILLER R D. Frost heaving in non-colloidal soils[C]//Proceeding 3rd International Conference Permafrost. National Research Council of Canada, 1978: 707-713.
- [9] MILLER R D. Applications of soil physics[M]. New York: Academic Press, 1972.
- [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] FOX P J, LEE J, QIU T. Model for large strain consolidation by centrifuge[J]. International Journal of Geomechanics, 2005, 5(4): 267-275.

- [12] LANGHORNE P J, ROBINSON W H . Effect of acceleration on sea ice growth[J] . Nature . 305: 695–698 .
- [13] LOVELL M S, SCHOFIELD A N . Centrifugal modelling of sea ice[C]//Proceedings of the First International Conference on Ice Technology . 1986: 105–113 .
- [14] TAYLER R N . Geotechnical Centrifuge Technology[M] . Glasgow, UK: Blackie Academic and Professional, 1995.
- [15] CHEN X S, SMITH C C . Frost heave of pipelines: Centrifuge and 1g model tests[R] . 1993 . Cambridge University Technical Report (CUED/D-SOILS/TR264) .
- [16] CHEN X S, SCHOFIELD A N, SMITH C C . Preliminary tests of heave and settlement of soils undergoing one cycle of freeze–thaw in a closed system on a small centrifuge[C]//Proceedings 6th International Conference Permafrost. 1993, 2: 1070–1072 .
- [17] 徐德胜 . 半导体制冷与应用技术[M] . 第二版 . 上海: 上海交通大学出版社, 1999 .
- [18] 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 .
- [19] 黄英豪, 蔡正银, 张晨, 等 . 渠道冻胀离心模拟试验设备的研制[J] . 岩土工程学报, 2015, 37(4): 615–621 .
- [20] 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 .
- [21] 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 .
- [22] SMITH C C . Thaw induced settlement of pipelines in centrifuge model tests[D] . University of Cambridge . 1992 .
- [23] HARRIS C, MURTON J B, 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 .
- [24] 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 .
- [25] 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 .
- [26] 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, Lisse, Netherlands, Balkema . 2003: 169–173 .
- [27] MILLER R D . Scaling in soils physics: Principle and Applications[M] . Science Society of America Special Publication, NO.25, 1990 .
- [28] SAVVIDOU . Centrifuge modelling of heat transfer in soil[C]//Centrifuge 88, Corte(ed.) , Balkema, Rotterdam . 1988: 583–591 .
- [29] KRISHNAIAH S, SINGH D N . Centrifuge modelling of heat migration in soils[J] . International Journal of Physical Modelling in Geotechnics . 2004, 4(3): 39–47 .
- [30] BUTTERFIELD R . Dimensional analysis for geotechnical engineers[J] . Geotechnique, 1999, 49(3): 357–366 .
- [31] 张晨 . 渠道冻害过程模拟技术研究[D] . 南京: 南京水利科学研究院, 2016 .
- [32] 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 .
- [33] JESSBERGER H L . Opening address[C]//In: Jones and Holden, eds . Ground Freezing 88, Proceedings of 5th International Symposium on Ground Freezing . Rotterdam: Balkema A A, 1989: 407–411 .
- [34] CLARK J I, PHILLIPS R . Centrifuge modelling of frost heave of arctic gas pipelines[C]//Proceedings of the 8th International Permafrost Conference, Zurich, Switzerland . 2003: 21–24 .
- [35] YANG D, GOODINGS D J . Climatic Soil Freezing Modeled In Centrifuge[J] . Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(12): 1186–1194 .
- [36] 陈湘生, 濮家骝, 殷昆亭, 等 . 地基冻–融循环离心模拟试验研究[J] . 清华大学学报: 自然科学版, 2002, 42(4): 531–534 .
- [37] HAN S J, GOODINGS D J . Practical model of frost heave in clay[J] . Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006 .
- [38] CHAMBERLAIN E J . Over–consolidation effect of ground freezing[J] . Engineering . Geology . 1981, 18(1): 97–110 .

A review on the development of geotechnical centrifuge modeling technique on frozen ground engineering

CAI Zhengyin^{1, 2}, ZHANG Chen^{1, 2}, HUANG Yinghao^{1, 2}

(1. *Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;*

2. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: The development of frozen ground engineering practice put forward some new problems to frozen ground engineering. Frozen ground geotechnical centrifuge modeling technique is an exclusive physical simulation technology for frozen ground engineering, which can realize the coupling of temperature and in-situ stress field, basing on a geotechnical centrifuge. This technique can be used to simulate prototypes in a short time according to the scale factors. In the last thirty years, frozen ground geotechnical centrifuge modeling technique has made rapid development around the world with innovation of heat exchange devices, the consummation of scaling laws and the improvement of testing methods. This technique can provides a new way for the research of frozen ground engineering. The development process of the test devices are reviewed, and the main research and achievements of the research are summarized in this paper. and then, the development trend for frozen ground geotechnical centrifuge modeling technique is predicted.

Keywords: cold regions engineering; geotechnical centrifuge; test device; centrifugal model test; research progress

(责任编辑: 韩 昆)

(上接第 397 页)

Study on the bayesian model averaging coupling with the k -nearest neighbor selection

LIU Kailei¹, LI Zhijia², YAO Cheng², HAN tong², ZHONG li², SUN rufei²

(1. *The Huaihe River Commission of the Ministry of Water Resources P.R.C., Bengbu 233000, China;*

2. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: The BMA (Bayesian model averaging) is a multi-model ensemble forecasting algorithm based on the Bayesian formula to estimate the posterior probability distribution of forecasting variables. The performance of BMA depends largely on the quality of its training datasets. However, there are a lot of redundant samples, which are inconsistent with the current flow state and affect the accuracy and the reliability of BMA forecasts. In this study, the k -nearest neighbor (KNN) method is applied to address the similarities between the historical samples and the most recent flood process to reduce the influence of redundant samples on the parameter estimation of BMA. Two cases of BMA, i.e. with the use of KNN sample selection (namely KBMA) and the original one, are investigated and compared at the Wangjiaba catchment located in the upper region of the Huai River basin. The ensemble means of these two cases were examined against the observations and the forecasts from their ensemble members to test the efficiency of their deterministic forecasts. Additionally, the probabilistic forecasts from these two cases were intercompared on the basis of two assessment criteria including Coverage Rate and Ranked Probability Score. The results indicate that the KBMA can produce improved deterministic and probabilistic forecasts as compared to the original BMA. By employing the KNN sample selection method, the KBMA is able to adjust its parameters according to the real time state of the flood processes and ensemble members, rather than adjusting them through the use of all samples. Our analysis demonstrates that the KNN sample selection method has the potential to substantially improve BMA ensemble forecasts.

Keywords: ensemble forecast; sample selection method; k -nearest neighbor; Bayesian Model Averaging; Gaussian mixture model

(责任编辑: 王成丽)