

# 我国土工离心模型试验技术发展综述\*

冯 振<sup>①②</sup> 殷跃平<sup>③</sup>

(①国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室 北京 100081)

(②中国地质科学院地质力学研究所 北京 100081)

(③中国地质调查局 北京 100037)

**摘 要** 小尺寸物理模型试验是岩土力学与岩土工程研究的重要手段。常规小比尺模型由于其自重产生的应力远低于原型,以及原型材料明显的非线性,因而不能再现原型的特性。解决这一问题的唯一途径是提高模型的自重,使之与原型等效。提高模型的自重应力水平、增大材料自重的最简便的方法就是用离心机。本文在总结回顾大量文献资料的基础上,根据离心模型试验技术的研究深度和应用范围,将我国土工离心模型试验技术的发展历史分为3个阶段,并分别阐述了各阶段土工离心模型试验技术在我国的类型及应用研究状况,介绍了试验设备、试验技术、数据采集等几个方面的发展历程。最后,总结指出了目前离心模型试验技术研究存在的问题,并对今后的研究和工作做了展望。

**关键词** 离心模型试验 研究状况 应用 展望

中图分类号:TU41 文献标识码:A

## STATW OF THE ART REVIEW OF GEOTECHNICAL CENTRIFUGE MODELING TEST IN CHINA

FENG Zhen<sup>①②</sup> YIN Yueping<sup>③</sup>

(①Key laboratory of Neotectonic and Geohazard MLR, Beijing 100081)

(②Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100081)

(③China Geological Survey, Beijing 100037)

**Abstract** Small-scale physical modeling is an effective method for examining structural and geotechnical problems. However, the stress of a small-scale physical model under gravity is much lower than those in its prototype. In addition, the nonlinearity of the prototype materials is also not easily to be represented in the small-scale physical model. So, a regular small-scale physical model can hardly reproduce the behavior of its prototype. One way to resolve these difficulties is to raise the self-weight of the small-scale physical models up to its prototype. The most convenient tool to increase the self-weight stress is the so-called geotechnical centrifuge. This paper presents a state of the art review of relevant literatures and materials on geotechnical centrifuge technologies in China. It summarizes the geotechnical centrifuge modelling projects that have done up to now in China. According to level of research and applications, the development history of centrifuge technology in China can be divided into three phases. This paper illustrates applications and situation of research by each phase and introduces the development course of instru-

\* 收稿日期: 2010-08-20; 收到修改稿日期: 2011-03-10.

基金项目: “十一五”国家科技支撑课题(2006BAC04B02).

第一作者简介: 冯振, 地质工程专业. Email: fengzhengs@yahoo.cn

ments, test techniques and data acquisition. in conclusion, some unsolved problems in centrifuge research in China have been pointed out. Outlook on centrifuge research and work is presented.

**Key words** Centrifuge modeling test, Situation of research, Applications, Outlook.

## 1 引言

在许多工程学科中,常常用小比例尺物理模型重现某一事件来推断原型中可能存在和发生的现象,揭示和分析现象的本质和机理。如:结构工程中的液压机、航天工程中的风洞、水利工程中的波浪水槽以及岩土工程中的三轴压力室等。以上各种试验都是通过模型测试得出结果,然后反推原型的状态。原型和模型的相似性通过相似律来关联。在岩土工程中,土工结构主要荷载是土的自重,岩土自重引起的应力通常占支配地位,而土的力学行为与应力水平和应力历史有关<sup>[1]</sup>。常规小比尺模型由于其自重产生的应力远低于原型,以及原型材料明显的非线性,因而不能再现原型的特性。解决这一问题的唯一途径是提高模型的自重,使之与原型等效。为提高模型的自重应力水平,增大材料自重的最简便的方法就是使用离心机。由于惯性力与重力绝对等效,且高加速度不会改变工程材料的性质,因而模型与原型的应力应变相等、变形相似、破坏机理相同,能再现原型特性<sup>[2~4]</sup>。

土工离心模型试验的基本原理是:将土工模型置于高速旋转的离心机中,让模型承受大于重力加速度的离心加速度作用,来补偿因模型尺寸缩小而导致土工构筑物自重的损失,重现现场的应力水平,从而可以较好地预测岩土工程的工作状况。所以,它对模拟以自重为主要荷载的岩土结构物性状的研究特别有效,因此获得了广泛的应用,如边坡稳定性分析<sup>[5~8]</sup>、土石坝及防渗墙的应力变形<sup>[9~12]</sup>、软土地基及固结沉降<sup>[13~15]</sup>、挡土墙稳定性及土压力测定<sup>[16~18]</sup>、结构-岩土相互作用研究<sup>[19~20]</sup>、污染物运移扩散<sup>[21~23]</sup>、施工过程模拟<sup>[10, 24, 25]</sup>、海洋工程结构设计<sup>[19, 26~28]</sup>等。本文在总结回顾大量文献资料的基础上,根据离心模型试验技术的研究深度和应用范围,将我国土工离心模型试验技术的发展历史分为3个阶段,并分别阐述了各阶段土工离心模型试验技术在我国的应用类型及研究状况,介绍了试验设备、试验技术、数据采集等几个方面的发展历程。最后总结指出了目前离心模型试验技术研究存在的问题,并对今后的研究和工作做了展望。

## 2 引进及尝试(~1987)

早在20世纪50年代,中国岩土界在前苏联学术界的影响下开始对离心机在土工试验中的应用有所认识;60年代郑人龙已经翻译了不少苏联的相关文献。长江科学院曾在1957年提出建立一台大型的水利工程综合应用的离心机,并进行了可行性研究。在苏联专家的协助下,于1958年完成了整体设计,但最终未能实现。到60年代后期,为研究核能和航空航天技术,有关部门设计制造了几台大尺寸离心机,但都为训练飞行人员和检验设备使用。

真正着手土工离心模拟试验是20世纪80年代初在黄文熙教授的倡导下开始的。1980年黄文熙教授访问了英国剑桥大学和曼彻斯特大学;1981年水利电力部又派朱维新等5人考察了日本港湾技术研究所1980年建成的当时日本最大的离心机。美国加州大学 K. Arulanandan、沈智刚以及英国的 Schofield 先后于1980年及1983年来华讲学,介绍了离心模拟技术。南京水利科学研究所与华东水利学院率先开展了土工离心模型试验工程应用研究,并于1982年进行了国内首次土工离心模型试验。但当时的试验大都是将光弹离心机加以改装而后进行的<sup>[29, 30]</sup>。长江科学院从1984年开始着手土工离心模型试验设备的设计和研制,1985年开始应用于解决工程问题,并将试验结果、土力学的数值分析和现场的原型观测相结合,对工程问题进行分析。为确定我国建置大型土工离心机的必要性和可行性,水利电力部1984年再次派出黄文熙、朱维新等5人赴美考察美国大学和一些土工试验研究机关的设备与科研动向,并于1984年11月正式提出“关于建置土拱大型离心机的必要性与可行性报告”。经同行专家评议,一致建议先建一台半径5m、容量400gt,具有模拟地震功能的大型离心机。国家“七五”科技攻关期间,由中国水利水电科学研究院承担建造。之后,相继有长江科学院、河海大学、上海铁道学院(今同济大学沪西校区)逐步建立了自己的离心机并进行了大量的土工模型试验研究。1987年首届全国离心模拟技术学术讨论会在武汉召开,提交会议交流的有21篇论文,但是仅限于比较简单的路堤

路基和码头的小型试验。试验目的比较单一,主要用于模拟现场特征情况,指导设计研究与项目凭借;测量设备比较简单,可用数据信息有限。许多专门技术问题,如动态水、动态加料等技术还未解决。

### 3 推广应用及研究(1988~1998)

如果说20世纪80年代中国土工离心模型试验研究是三足鼎立(南京水利科学研究院、长江科学院、中国水利水电科学研究院)的时代,那么90年代更多的科研设计单位和科研人员加入到土工离心模拟试验技术的研究和应用行列,则打破了这种局面。河海大学俞仲泉、施建勇从土工织物加筋的离心模型试验,有限元分析法和实际工程应用研究其加筋机理,并与南京水利科学研究院朱维新就“土工织物加固地基的离心模型试验”分别撰文探讨。成都科技大学(今四川大学)以张利民、胡定为主,对各种离心模拟技术进行了研究,在仪器设备上也有一定的贡献。他们在1989年即研制出了离心机专用加水和排水设备,并成功应用于瀑布沟土石坝在施工完毕、水库蓄水、稳定渗流和水位骤降等4种工况下的离心模拟试验;之后又研制出离心试验加荷设备、模型参数量测设备,成功地进行了多次桩基原型性能试验。此外,在模型理论以及岩土本构关系方面,也做了研究探讨。以杜建成、张利民为主要的四川联合大学(今四川大学)研究团队,在前期科研工作基础上,对黄土路基的湿化特性、斜坡高路堤的稳定及变形和黄土强度特性进行了离心模型试验研究。为了对土石坝及防渗墙设计进行论证,成都勘测设计研究院利用土工离心机,先后对铜街子和瀑布沟土石坝及防渗墙工程进行离心模型试验,并与数值计算及混凝土结构模型试验结果对比分析,取得了满意的结果。1988年4月在巴黎召开的国际土工离心模型试验研究学术会议上,成都勘测设计研究院刘麟德和唐剑虹的《巨型离心机用于土工试验研究》及《深厚覆盖层坝基建土石坝及混凝土防渗墙离心模型试验研究》两篇论文被会议论文集所收录。他们还对土石坝材料的粒径效应进行的离心模拟试验研究。上海铁道学院于1988年建成L-30型土工离心机,以张师德为代表的研究团队,以上海软黏土为主要研究对象,进行了大量的离心模型试验研究,如加筋土地基、软土地基上结构物的稳定性和变形、基坑侧向土压力、土工离心模拟试验的应变分析研究以及饱和黏土模型的拟合制作等。

1991年6月在上海铁道学院举行第二届全国离心模拟试验技术学术讨论会,是对中国在该项技术发展的一次检阅。会议提交论文23篇,内容涉及设备研制、量测技术、工程应用或专题研究。工程应用包括土石坝、地下支挡结构、路堤、码头、土工合成材料复合地基、地质力学模型等方面的问题。关于土力学的专题研究,则有土压力、固结理论、加筋无黏性陡坡计算等。同时还有一些研究工作,如土石混合体边坡、海洋采油平台、地下连续墙、土工织物软基加固等多类型的新课题也在进行。上述土工离心模型试验技术成果在工程中起到良好作用,对某些工程设计计算方法有一定改进,并对土力学的理论课题有进一步的认识<sup>[31]</sup>。

20世纪90年代,土工离心模拟试验技术在中国得到广泛的推广应用,新技术研究和应用领域,以及基础理论研究范围不断拓展。如不稳定边坡的工程处理、边坡稳定性的震动响应、地下水作用对边坡稳定性的影响、天然滑坡稳定研究及工程处理、地下洞室应力变形稳定研究、建筑物和岩石基础联合受力的强度储备、类似混凝土面板堆石坝复合结构研究。

南京水利科学研究院在国内最先开展正、逆断层的模拟技术研究,先后研制了切断器式正断层发生器、爆破式逆断层发生器以及机械式正断层发生器。在高速旋转的重力场中,真实再现土石坝分层分期的施工过程非常困难。根据相似理论,南京水利科学研究院提出了用控制离心加速度来模拟坝体升高并按原型方式叠加模型变形的方<sup>[10]</sup>法,得出坝体变形分布与实际相符,且最大值也基本合理。该方法的提出,不仅对土石坝的模拟有直接的意义,对分析其他类型的离心模拟试验成果也有一定的指导意义。南京水利科学研究院还研制出土工离心模型填料装置<sup>[32]</sup>,可模拟堤坝分层填筑过程。尽管存在填铺的几何形状、密度控制、填土应力条件、黏性材料、传感器埋设等问题,但在模拟较矮小的堤坝时仍具有一定的优越性。

长江科学院首次将离心模型试验技术应用于岩石边坡应力应变和稳定性以及边坡不连续面构造部位破坏机理<sup>[7]</sup>。长江科学院还做土工织物加固地基的离心模型试验,验证地基在施工过程中的稳定性,并进行了加筋软基承载力的计算方法研究和验证。土石坝的离心模型试验是离心试验技术中比较难的项目之一,长江科学院针对土石坝的离心模型试验,对模型断面设计、粗粒材料的模拟问题、砼防

渗墙及其他砼构件的模拟问题、模型的加水和加荷技术以及内测信息采集技术进行了研究探讨<sup>[11]</sup>。

中国水利水电科学研究院杜延龄从半无限地基自重应力模拟和基本控制方程、能量方程相似以及量纲分析等方面论证了离心模拟的相似性,并对离心模拟的固有误差作了深入系统的分析。中国水科院同样对软基处理进行了离心模型试验研究,系统分析了深厚软基采用碎石振冲置换后筑坝的变形性状,并通过不同振冲置换量对比分析,优化出经济合理的方案<sup>[33,34]</sup>。汪小刚、张建红等利用离心机模拟块状岩体的倾倒过程,并进行了处理工程(锚索加固)的离心模型试验。

成都科技大学的张祥康首次将地下洞穴坍塌机理的土工离心模型试验介绍到国内,而吴子树、张利民、胡定等进行了国内首次土洞研究的离心模型试验。结合理论分析及实地调查,综合研究了土拱效应的形成机理及存在机理,分析了土中成拱洞室的稳定性,推导出土洞的上覆土厚度及相应的最大跨径公式,对土拱效应的利用有着重要的指导意义。长沙矿山研究所周正濂、王维德进行了我国最早的土工离心动力模型试验<sup>[35,36]</sup>,用安装在离心机框架上的冲击器冲击模型模拟爆破荷载,以评估爆破和地震荷载对矿柱回采中胶结充填体的影响。水利部大坝安全监测中心对水库蓄水时黄土的湿陷和渗流作用进行了离心模型试验,结合原型观测、渗流模拟试验、有限元计算和现场检查,对其提出的悬坝渗流分析理论公式进行检验。淮海大学施建勇提出了离心试验中的固结问题并求出其解答,相应的研究成果对黏土特性研究有重要的意义。

在理论和背景研究中,有长江科学院龚召熊及岳登明就“用离心机研究强度储备”分别撰文进行探讨;铁二院唐志成、中国科学院岩土研究所陈丛新、长江科学院包承纲等对离心模型试验误差的探索,并针对性地提出一些解决方法和对策;南京水利科学研究院徐光明、章为民对离心模型中的粒径效应和边界效应进行了研究;上海铁道大学郭昭、王景铭等对离心模拟试验的应变分析,并提出了一种实测位移-应变-应力的反分析途径等。

离心机配套设备的研究涉及水流控制<sup>[37]</sup>、桩的加载设备<sup>[38]</sup>和填料装置<sup>[32]</sup>等,但主要还是集中于数据采集与监测系统的研究。数据传输多采用数字信号传输方式,非接触式的光纤滑环、无线电地区网络(LANs)已在土工离心模型试验中得到应用。但大多数离心机的传输通道基本上都是接触式滑环进

行传输。滑环数据传输时产生的间断跳跃以及滑环周围的强电干扰都严重影响了试验水平的提高。变形量测可采用云纹照相、高速摄像或外部位移量测的位移传感器,非接触的激光位移计(精度可达 $2\mu\text{m}$ )也已在土工离心模型试验中应用<sup>[39]</sup>。模型内部位移量测仍然是难点之一,一般采用外部可测点进行反分析。总之,整体来说,离心机数据采集与监测系统数字化水平仍然较低,非电量电测技术不够成熟,离心模拟量化较难。

20世纪90年代土工离心模拟实验技术在中国得到广泛应用,更多的科研设计单位加入到土工离心机模拟技术的研究和应用中;而且随着计算机在岩土工程中的迅速普遍及应用,土工离心模型试验技术也取得了长足进展。应用领域也得到了进一步的扩大,不仅有一般的土工问题如边坡、地基、土压力、海洋工程、隧道工程,而且有渗流、地震、爆破和模拟大地构造等领域的内容。模拟技术上,包括岩石边坡及治理工程中、类似混凝土面板堆石坝复合结构研究、结构-岩土相互作用、地下洞室的应力和变形稳定性研究、动力模型试验等。然而,相对国外的发展来说,应用研究领域还有待拓展,模拟技术一般比较简单,不能贴切地表现原型的状况,并且基础理论的研究也较少。

## 4 新世纪的快速发展(1999~2010)

20世纪90年代以来,离心模拟技术在岩土工程各领域得到普遍的认可及发展,土工离心机的数量及尺寸也不断增加,应用领域也不断扩大。西南交通大学运用离心模型试验技术,开展了散粒体沙堆模型试验,分析了散粒体斜坡崩滑地质灾害的自组织临界性现象和地震诱发作用下散粒体斜坡崩滑失稳的模式与规律。清华大学在国内首次进行了环境岩土力学和运移过程研究,利用土工离心机进行了轻非水相流体污染物、重金属离子等在非饱和土中迁移的模拟,研究污染物的迁移机理及其对地下水的影响,同时也研究了土性对污染物迁移机理的影响,为选取合适的清污技术提供了依据。岩土及结构的地震动响应是最近10a来我国土工离心模型试验的研究热点,如地基的地震反应,混凝土面板堆石坝的地震反应,结构-岩土相互作用的动态响应,黄土震陷性研究,边坡及其处治措施的地震响应特征,砂土液化等。随着城市基础建设的不断发展,地铁隧道施工及其相关问题也越来越突出,对此的

研究也越来越多。如隧道结构的受力及变形特征,隧道开挖对地表及建筑物影响的研究与分析,黏土的成拱能力<sup>[40]</sup>等。2001年,世界上最大、最先进的土工离心机之一在香港科技大学正式完工,研制出世界上第一台双向振动台,安装了先进的4轴向机械手,并配备了精确的数据采集和控制系统。先后在这台土工离心机上进行了船舶撞击桥桩、松散填土的潜在静态液化机理、土钉加固边坡的效果、浅表层松散填土边坡稳定性研究等<sup>[41~44]</sup>。

岩土及结构的地震动响应是最近10a来我国土工离心模型试验的研究热点。在进行地震、爆破等研究时,需要把土工模型置于离心场的同时,再耦合一定频率的振动,能提供该振动的是放置于工作吊篮的离心振动台。除香港科技大学外,我国已建立的3套土工离心振动台(清华大学2001年、南京水利科学研究院2004年、同济大学2006年)均停留在一维水平,振动能力较小,精度不高(表1)。目前,浙江大学和中国水利水电科学研究院的振动台正处于研制阶段。中国水利水电科学研究院的振动台将可能成为我国首台可在水平和垂直方向同时振动的水平垂直2D振动台。

凭借拥有数量最多的土工离心机(1998年有37台,其中建筑承包商和咨询设计公司占25%,国家研究机构占25%),日本成为世界上土工离心模拟技术应用最成熟的国家,不仅提高了建筑施工技术,通过试验验证的创新性设计,也极具国际竞争力。我国的土工离心机都集中在高校和国家科研设计单位,目前共拥有土工离心机14台,同时长沙理工大学、浙江大学和成都理工大学正在建造各自的土工离心机(表2)。在增加土工离心机数量的同时,也应该加大现有离心机的利用率,提高工作性能,加强对先进模拟技术的研究。我国的一些私人机构和公司也开始接受这项技术,进行了一系列的工程研究,如边坡破坏机理试验、加筋土挡土墙、贮灰场灰渣沉

积特点及深埋管道上覆土压力的变化规律、水库土工防渗膜、隧道施工及其相关问题、桥涵及回填、基础承载力及固结沉降、基坑工程等,得到了对工程实践有意义的一些结论和建议。但总体来说,应用领域较窄,研究深度不够,并多是依托高校或科研单位的研究团队完成。

我国土工离心模拟实验技术就其应用类型而言大致有如下4类:

(1)原型的模拟。这是最常用的方面,用来预测和验证工程的工作状态。尤其适用于地震和降雨导致边坡破坏,以及近海石油勘探中,风荷或浪涌作用下桩的特性研究。很多场合,对工程结构作原位试验以验证其安全性是极为困难的。如高土石坝性态预测、深水结构及近海桩结构的安全性评定等。在我国已用土工离心机完成了挡土墙与岩土-结构相互作用、埋入式结构与地下开挖、基础承载力及稳定性、动力响应、环境岩土力学与运移过程等方面的设计研究工作。由材料试验和数值计算、反馈分析向结构设计与离心试验并举,是未来岩土工程设计的发展趋势。

(2)新现象和新理论的研究。离心模拟技术已经成功应用于研究各种难解的现象。如大地构造、土的液化研究、污染物运移、渗流研究等,他们所用的材料与原型材料没有相似的关系。

(3)参数研究。这也是应用很广的一个方面,因为这是比较容易和比较可靠的测定方法。一般来说,在实际测试和参数变化试验之前,必须设计一个测试试验。通过改变模型参数(如几何性状,荷载以及边界条件,降水强度或土的类型等),可以获得测试结果对各参数变化的敏感度以及关键参数,从而指导工程设计。

(4)数值分析成果验证。无论是数值模拟还是物理模拟,都必须进行条件简化及假设。很多情况下,数值模拟仍然受限于进行二维模拟。而土工离

表1 我国土工离心机振动台主要技术指标

Table 1 Main technical specifications for the shakers in China

单位	时间	负荷/kg	最大离心加速度/g	最大振动加速度/g	最大振动频率/Hz	最大振幅/mm	振动时间/s	台面尺寸(mm×mm)	激振力/kg	备注
清华大学	2001	100	50	20	10~250	10	2~4	400×600	30	单向
南京水利科学研究院	2004	200	100	15	100	0.5	2	700×500	20	单向
同济大学	2006	180	50	20	300	10	1~2	700×600		单向
香港科技大学	2001	300	75	40	0~350	3	2	600×600	35	2D水平
浙江大学	建设中	500	150	40	10~200	3	3	900×800		单向
中国水科院	建设中	400	120	30/20	400	10	3	1000×700		2D水平+垂直

表2 我国主要离心机及主要技术性能指标  
Table 2 Technical specifications geotechnical centrifuges in China

单位	建成时间	有效半径/m	最大加速度/g	模型规模	最大荷载/kg	容量/gt	备注
中航 511 厂	1960	6.5	80	动力 145kW. D. C	800	140	飞机工业
第七机械工业部		1.7	80	动力 5kW	20		飞机工业
第二机械工业部	1969	10.8	70	直径×高度 0.98×0.88m	2000	140	飞机工业及模拟飞行器
中国工程物理研究院 第四研究所	1968	10.8	90	长×宽×高 0.92×0.3×0.67m*	2400	216	飞机工业及模拟飞行器
	1985	10.8	110	0.92×0.67×0.3m	3000	330	主要为军品需求。
国防科工委 507 所		10	25		5000	125	模拟飞行器
华东水利学院(河海大学)		2.4	100~250	0.48×0.28×0.15m	100	10	1982 年与南水进行 我国首次离心模型试验
南京水利科学研究院	1982	2.4	250	0.9×0.16×0.35m	100	25	
	1982	2.5	300	0.5×0.3×0.15m 0.45×0.2×0.3m	100	20 30	
	1988	2.1	250	0.7×0.35×0.5m 0.52×0.4×0.6m	200	50	NH-89 型
	1992	5.0	200	1.1×1.1×1.1m	2000	400	NS-400gt
	1983	3	300	1.1×0.33×0.5m	500	150	
长江水利水电科学院 (长江科学院)	1983	3	300	1.1×0.21×0.5m* 0.76×0.3×0.41m*	10000	180	
	1985	3	300		1000	300	
成都勘测设计院		5	200		1000	200	
上海铁道学院	1987	1.55	200	0.48×0.24×0.32m*	100	20	L-30 型
四川(联合)大学	1990	1.5	250	0.48×0.31×0.3	100	25	
成都科技大学(今四川大学)	1991	1.54	250	0.6×0.4×0.4m	100	25	
中国水利水电科学研究院	1993	4	300	1.5×1.0×1.5m	1500	450	LXJ4-450 NS-89 型
						50	
清华大学	1993	2	200	0.75×0.5×0.6m, 拟静力 0.495×0.2×0.3m, 动力固壁式 0.5×0.2×0.35m, 动力叠环式	250	50	TH-50gt
香港科技大学	1997	4.5	150 拟静力 75 动力	1.5×1.5×1.0m, 拟静力 0.6×0.6×0.4m, 动力	2670	400	机械手和 2D 水平振动台
西南交通大学	2002	2.7	200	0.6×0.4×0.4m	500	100	
重庆交通大学	2005	2	200	0.7×0.6×0.4m	300	60	
长安大学	2005	2	200	0.6×0.36×0.5m	300	60	
同济大学	2005	3	200	0.7×0.7×0.9m	750	150	安装机械手
长沙理工大学		3.2	150	1.1×0.92×1.5m	1000	150	研制中
浙江大学		4	150	1.5×1.2×1.5m	2500	400	研制中
成都理工大学							研制中

心模拟则不存在这些问题,相反,其模拟三维问题比二维平面应变问题更简单。数值分析的精度不仅取决于材料所用的模型,也取决于参数的选取。通常,模型参数可能不具备任何物理意义或者通过试验手段难以确定。由此得出的模拟结果和基于此的工程设计必然会存在争议。例如,对于离岸石油钻井平台的升降式或铲罐式钻油台,受竖向、横向和弯矩荷

载的作用,数值模拟的效果并不理想。应力条件和参数已知的离心模拟试验就成为校正数值分析最可靠的手段。

## 5 结论与展望

步入 21 世纪,土工离心机作为一种重要的工具

得到了广泛的推广和发展。随着离心机应用范围的不断扩展,基础机械也在不断发展,将能够模拟的各种可能状况。通过上述回顾与总结,可以看出近年来我国离心模拟技术发展表现出以下特点:

(1)土工离心机设备在试验技术水平、规模和数量上,都已经基本达到了国际先进水平;

(2)离心模型试验的工程应用领域不断扩大,如岩石工程、环境岩土力学等方面的应用;

(3)离心模拟技术可用于验证土的本构关系和土力学的理论,但是并未充分发挥;

(4)量测设备是试验取得成功的前提保证,具有独立知识产权的量测仪器开发仍需努力。

基于以上分析,可以对我国今后离心模拟技术的发展提出几点展望:

(1)在增加建造土工离心机数量的同时,应该加大现有离心机的利用率,在使用中积累经验,提高工作性能,加强对先进模拟技术的研究;而且更具专业针对性的土工离心机的建造将是下一步发展的趋势之一。

(2)量测设备仍是薄弱环节,尤其是在高离心力作用下散体的压力量测技术。尺寸小、质量轻、对模型影响尽量小的高精度、非接触式的量测仪器是今后发展的方向。

(3)多数土木工程的关键在于施工过程及方法,因此施工过程模拟是发展离心模拟技术的重要内容。多种技术手段被应用于离心模拟试验中应力变化的模拟,包括开挖——机械手移除,流体的加排,土体的提升,填土过程等。但是还有大量模拟技术(如填料装置等)及理论(如填土应力条件、粒径效应等)有待研究和解决。

(4)如何用局部的模型推延到大的原型情况,仍是需要研究和验证的课题。模型箱尺寸和离心机最大加速度有限的情况下,进行高大尺寸原型的模拟,始终存在如何合理选取试验断面的问题,而减小边界对研究对象的影响是关键。

(5)动力设备的研制(振动台、模型箱等)对于模拟振动或地震的离心模拟试验是必不可少的。动力离心模型试验存在的惯性效应、振动加速度与科氏加速度耦合等问题也有待进一步研究。

(6)对于力的比尺与几何比尺不相等的不等应力模型,要研究其相似律以及解决由两种比尺不等引起的其他问题。对于这种试验,材料的非线性往往被忽视,应逐步积累经验,尽量减少误差。

(7)模型的制备技术还有待进一步研究。例如

薄板、薄壁等小尺寸结构物的模拟,其尺寸没有严格的相似率,如何根据研究重点进行参数和材料选择,值得深入探讨和研究。

(8)误差研究。包括不均匀高离心加速度场、粒径效应、边界效应、科氏加速度、离心机启动与制动时的误差对模型试验成果的影响研究及其解决方法。

(9)数值模拟结合。无论是数值模拟还是物理模拟,都必须进行条件简化及假设。数值模拟和离心模型试验相互校核,结构设计与离心试验并举,是未来岩土工程设计的发展趋势

(10)标准化研究。例如,原型材料往往无法直接用来制作模型,但材料缩制一直没有标准可循。全球化的趋势不断加快,国际交流也不断增多,在研究的基础上,建立同国际接轨的土工离心模型试验标准非常必要。中国水利水电科学研究院于2000年,在参考国内外同类规范及手册的基础上主持制定了水电行业规范:《土工离心模型试验规程》。但从近几年的应用来看,还需要根据新的科研成果进行修订,完善已有规范,补充新的内容,以适应当前离心模型试验的发展需要。

(11)进一步拓展离心模拟技术在工程领域中的应用,如岩石力学、采矿工程、寒区工程等。对土的本构关系和土力学基本理论进行更多更深入的离心模拟试验验证。

(12)土工离心机在日本商业方面的多样发展表明,大量的技术创新都是由建筑商推动的,未来创新的施工技术必须经快速发展的模拟研究评价来验证。未来应对离心模拟技术的优点及研究成果和效益进行广泛交流和宣传,推动离心模拟技术的研究和实践应用。

## 参 考 文 献

- [1] Taylor RN, Corporation E. Geotechnical Centrifuge Technology. Blackie Academic and Professional. 1994.
- [2] 黄志全,王思敬. 离心模型试验技术在我国的应用概况[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(2): 199~203.  
Huang Zhiquan, Wang Sijing. A survey of application of centrifugal model testing in China. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 1998, 17(2): 199~203.
- [3] 冯光愈. 离心模型在土工试验研究中的应用综述[J]. 土工基础, 1982, (1): 86~91.  
Feng Guangyu. Comprehensive research on application of centrifugal model testing in geotechnical test study. Soil Engineering and Foundation, 1982, (1): 86~91.
- [4] 朱朝峰, 赵荣炼. 离心模型模拟法在若干土工工程中的应用状

- 况[J].水力发电学报,1993,(1):102~107.
- Zhu Chaofeng,Zhao Ronglian. Application of centrifugal modeling in several geotechnical programs. Journal of Hydroelectric Engineering, 1993,(1):102~107.
- [5] 汪小刚,张建红,赵毓芝,等.用离心模型研究岩石边坡的倾倒破坏[J].岩土工程学报,1996,18(5):14~21.
- Wang Xiaogang,Zhang Jianhong,Zhao Yuzhi, et al. Investigations on mechanism of slope toppling failure by centrifuge model testing. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996,18(5):14~21.
- [6] 邓卫东,吴光勇,唐树名.路堑边坡破坏机理的试验与计算分析[J].中国公路学报,2001,14(3):21~24.
- Deng Weidong,Wu Guangyong,Tang Shuming. Test and calculation on the failure of cutting slope. China Journal of Highway and Transport, 2001,14(3):21~24.
- [7] 韩世浩,王慧华.离心模型技术在三峡工程高边坡研究中的应用[J].长江科学院院报,1991,(S1):32~38.
- Han Shihao,Wang Huihua. Application of the centrifugal modeling technique to the Research of rock slopes in the Three Gorges Project. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,1991,(S1):32~38.
- [8] 陈祖煜,汪小刚,邢义川,等.边坡稳定分析最大原理的理论分析和试验验证[J].岩土工程学报,2005,27(5):495~499.
- Chen Zuyu,Wang Xiaogang,Xing Yichuan, et al. Theoretical study and physical modeling on 'Principle of Maximum' in slope stability analysis. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005,27(5):495~499.
- [9] 李青云,濮家骝,张建民,等.防渗墙施工中堤身裂缝机理的综合研究[J].人民长江,2002,33(8):54~56.
- Li Qingyun,Pu Jialiu,Zhang Jianmin et al. On mechanism of dyke cracks during construction of seepage prevention wall. Yangtze River, 2002,33(8):54~56.
- [10] 章为民,徐光明.土石坝填筑过程的离心模拟方法[J].水利学报,1997,(2):8~13.
- Zhang Weimin,Xu Guangming. Study on modeling the construction process of embankment dams in centrifugal test. Journal of Hydraulic Engineering, 1997,(2):8~13.
- [11] 饶锡保,包承纲.离心试验技术在土石坝工程中的应用[J].长江科学院院报,1992,9(2):21~27.
- Rao Xibao,Bao Chenggang. The application of centrifugal modeling techniques in earth rockfill dams. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,1992,9(2):21~27.
- [12] 郚能惠,孙大伟,王年香,等.混凝土面板堆石混合坝性状的预测[J].岩土工程学报,2009,31(8):1149~1155.
- Li Nenghui,Sun Dawei,Wang Nianxiang, et al. Prediction of performance of concrete face rockfill dam combined with toe retaining wall. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2009,31(8):1149~1155.
- [13] 冯光愈.岱黄公路软土地基土工离心模型试验[J].长江科学院院报,1987,(2):72~81.
- Feng Guangyue. A centrifuge model test for soft caly foundation of Dai-Hai highway. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,1987,(2):72~81.
- [14] 杜建成,张利民.广钢站软基处理的离心模型试验研究[J].四川建筑,1997,17(3):44~45.
- Du Jiancheng,Zhang Limin. Centrifuge modeling study on soft foundation treatment of Guang-Gang station. Sichuan Architectural, 1997,17(3):44~45.
- [15] 董云,柴贺军,阎宗岭.土石混填路基沉降变形特征的离心模型试验研究[J].公路交通科技,2007,24(3):25~29.
- Dong Yun,Chai Hejun,Yan Zongling. Centrifugal model test study on the settlement character of the rock-soil filled roadbed. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2007,24(3):25~29.
- [16] 唐志成,彭胤宗,宋教吾.无黏性土中刚性挡土墙离心模型试验研究[J].重庆交通学院学报,1988,(2):48~58.
- Tang Zhicheng,Peng Yinzong,Song Jiaowu. Centrifugal modeling study of rigid retaining wall in cohesionless soil. Journal of Chongqing Jiaotong University, 1988,(2):48~58.
- [17] 殷跃平,鄢毅,陈波,等.三峡库区巫山新城超高加筋挡墙变形破坏及修复研究[J].工程地质学报,2003,11(1):89~99.
- Yin Yueping,Yan Yi,Chen Bo, et al. Deformation and failure of super-high reinforced retaining wall and its remediation in Wushan new town on Three-Gorges Reservoir. Journal of Engineering Geology,2003,11(1):89~99.
- [18] 宋飞,张建民.考虑侧向变形的各向异性砂土土压力试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(9):1884~1895.
- Song Fei,Zhang Jianmin. Experimental study of earth pressure for anisotropic sand considering lateral displacement. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(9):1884~1895.
- [19] 李玫,包承纲,单人.梁柱式海洋平台基础与土相互作用的离心模型试验[J].岩土工程学报,1995,17(5):1~6.
- Li Mei,Bao Chenggang,Shan Ren. Centrifugal model test of the interaction between the foundation of beam-pillar offshore platform and the soil. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1995,17(5):1~6.
- [20] 曾友金,章为民,王年香,等.某大型哑铃型承台群桩基础与土体共同作用竖向承载变形特性数值模拟分析[J].岩土工程学报,2005,27(10):1129~1135.
- Zeng Youjin,Zhang Weimin,Wang Nianxiang, et al. Numerical analysis of interaction between group piles and dumbbell shaped cap in a super large bridge. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2005,27(10):1129~1135.
- [21] 张建红,劳敏慈,胡黎明.非饱和土中水分迁移及污染物扩散的离心模拟[J].岩土工程学报,2002,24(5):622~625.
- Zhang Jianhong,Lo Irene M. C.,Hu Liming. Centrifuge modeling of moisture and contaminant migration in unsaturated soils. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2002,24(5):622~625.
- [22] 张建红,吕禾,王文成.铜离子在非饱和土中迁移的离心模型试验研究[J].岩土力学,2006,27(11):1885~1890.
- Zhang Jianhong,Lü He,Wang Wencheng. Centrifuge modeling of copper ionic migration in unsaturated soils. Rock and Soil Mechanics,2006,27(11):1885~1890.
- [23] 张建红,胡黎明.重金属离子和LNAPLs在非饱和土中的运移规律研究[J].岩土工程学报,2006,28(2):277~280.
- Zhang Jianhong,Hu Liming. Migration behavior of heavy metal

- and LNAPLs in unsaturated soils. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 277 ~ 280.
- [24] 牟太平, 张嘎, 张建民. 土坡破坏过程的离心模型试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, **46**(9): 1522 ~ 1525.  
Mu Taiping, Zhang Ga, Zhang Jianmin. Centrifuge modeling of failures of cohesive soil slopes. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2006, **46**(9): 1522 ~ 1525.
- [25] 周小文, 程展林, 孙常青, 饶锡保. 软土地基路堤施工控制的离心模拟试验研究[J]. 岩土力学, 2009, (5): 1253 ~ 1256.  
Zhou Xiaowen, Cheng Zhanlin, Sun Changqing. Centrifuge modeling construction of road embankment on soft clay ground. Rock and Soil Mechanics, 2009, (5): 1253 ~ 1256.
- [26] 蔡正银, 李景林, 徐光明, 焦志斌. 土工离心模拟技术及其在港口工程中的应用[J]. 港工技术, 2005, (S1): 47 ~ 50.  
Cai Zhengyin, Li Jinglin, Xu Guangming. Centrifugal simulation technique of soil mechanics and its application to port engineering. Port Engineering Technology, 2005, (S1): 47 ~ 50.
- [27] 一明. 土工离心模型试验为沙漠、浅海石油勘探开发服务的潜在优势[J]. 石油工程建设, 1989, **15**(3): 9 ~ 10.  
Yi Ming. Potential development of geotechnical centrifuge modeling test in oil exploration in desert and shallow sea. Petroleum Engineering Construction, 1989, **15**(3): 9 ~ 10.
- [28] 闫澍旺, 李飒, 邓卫东. 波浪作用下海底软黏土的离心模型试验研究(英文)[J]. 天津大学学报(英文版), 1999, **5**(2): 206 ~ 210.  
Yan Shuwang, Li Sa. Centrifugal test study on the behavior of soft clay at sea bottom under the action of wave force. Transactions of Tianjin University, 1999, **5**(2): 206 ~ 210.
- [29] 马迁, 何英杰. 光弹模型离心加载技术的新发展[J]. 长江科学院院报, 1992, **9**(1): 73 ~ 76.  
Ma Qian, He Yingjie. The new development of the centrifuge-loading technique in photoelastic models. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1992, **9**(1): 73 ~ 76.
- [30] 王城, 于晓瑞. 光弹模型离心加载技术的进一步研究[J]. 长江科学院院报, 1990, **7**(1): 50 ~ 55.  
Wang Cheng, Yu Xiaorui. Further study on technique of centrifuge loading for photoelastic model. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1990, **7**(1): 50 ~ 55.
- [31] 包承纲. 我国离心模型试验技术的现状与展望[J]. 岩土工程学报, 1991, **13**(6): 92 ~ 97.  
Bao Chenggang. The state and prospect of centrifugal model test in China. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, **13**(6): 92 ~ 97.
- [32] 刘守华, 蔡正银. 土工离心模型填料装置研究[J]. 岩土工程学报, 1996, **18**(3): 74 ~ 79.  
Liu Shouhua, Cai Zhengyin. Research on sprinkling device for geotechnical centrifuge modeling test. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **18**(3): 74 ~ 79.
- [33] 李崛华. 用振冲法加固土石坝软基的离心模型试验研究[J]. 水力发电学报, 1995, (2): 17 ~ 28.  
Li Juehua. Centrifugal modeling study on vibroflotation method for improving soft clay substratum of earth-rock dam. Journal of Hydroelectric Engineering, 1995, (2): 17 ~ 28.
- [34] 李崛华, 张天明, 林天宏, 等. 深厚软基筑坝可行性——离心模拟试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 1995, **3**(2): 137 ~ 147.  
Li Juehua, Zhang Tianming, Lin Tianhong, et al. Centrifugal modeling study on vibroflotation method for improving soft clay substratum of earth-rock dam. Journal of Basic Science and Engineering, 1995, **3**(2): 137 ~ 147.
- [35] 周正濂, 田良灿. 胶结充填设计的离心模型研究[J]. 采矿技术, 1988, (7): 8 ~ 11.  
Zhou Zhenglian, Tian Liangcan. Centrifugal modeling of cemented filling body. Mining Technology, 1988, (7): 8 ~ 11.
- [36] 周正濂, 王维德. 充填体爆破载荷的离心模型研究[J]. 采矿技术, 1992, **8**(8): 12 ~ 14.  
Centrifuge modeling of explosive load of cemented filling body. Mining Technology, 1992, **8**(8): 8 ~ 11.
- [37] 张利民, 胡定. 高重力场中离心模型的水流控制设备[J]. 四川大学学报(工程科学版), 1989, (3): 93 ~ 97.  
Zhang Limin, Hu Ding. Development of a water control facility for centrifugal model testing in high gravitation fields. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 1989, (3): 93 ~ 97.
- [38] 张利民, 胡定. 用离心模型模拟横向受荷桩中残余效应研究[J]. 土木工程学报, 1992, **25**(3): 42 ~ 50.  
Zhang Limin, Hu Ding. Simulation of residual stress in laterally and vertically loaded piles by centrifugal model. China Civil Engineering Journal, 1992, **25**(3): 42 ~ 50.
- [39] 濮家骝. 土工离心模型试验及其应用的发展趋势[J]. 岩土工程学报, 1996, **18**(5): 92 ~ 94.  
Pu Jialiu. Future development tendency of geotechnical modeling test and its application. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **18**(5): 92 ~ 94.
- [40] 徐东, 周顺华, 黄广军等. 上海黏土的成拱能力探讨[J]. 上海铁道大学学报, 1999, **20**(6): 49 ~ 54.  
Xu Dong, Zhou Shunhua, Huang Guangjun, et al. Discussion about the arching capacity of shanghai clay. Journal of Shanghai Tiedao University, 1999, **20**(6): 49 ~ 54.
- [41] Ng C W W, Springman S M, Norrish A R M. Centrifuge modeling of spread-base integral bridge abutments. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, **124**(5): 376 ~ 388.
- [42] Ng CWW, Li XS, Van. Laak PA, et al. Centrifuge modeling of loose fill embankment subjected to uni-axial and bi-axial earthquakes. Soil Dynamics and Earthquake Engineering (1984), 2004, **24**(4): 305 ~ 318.
- [43] Lam SY, Ng CWW, Leung CF, et al. Centrifuge and numerical modeling of axial load effects on piles in consolidating ground. Canadian Geotechnical Journal = Revue Canadienne de Geotechnique, 2009, **46**(1): 10 ~ 24.
- [44] Zhang LM, Ng CWW, Chan F, et al. Termination criteria for jacked pile construction and load transfer in weathered soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(7): 819 ~ 829.