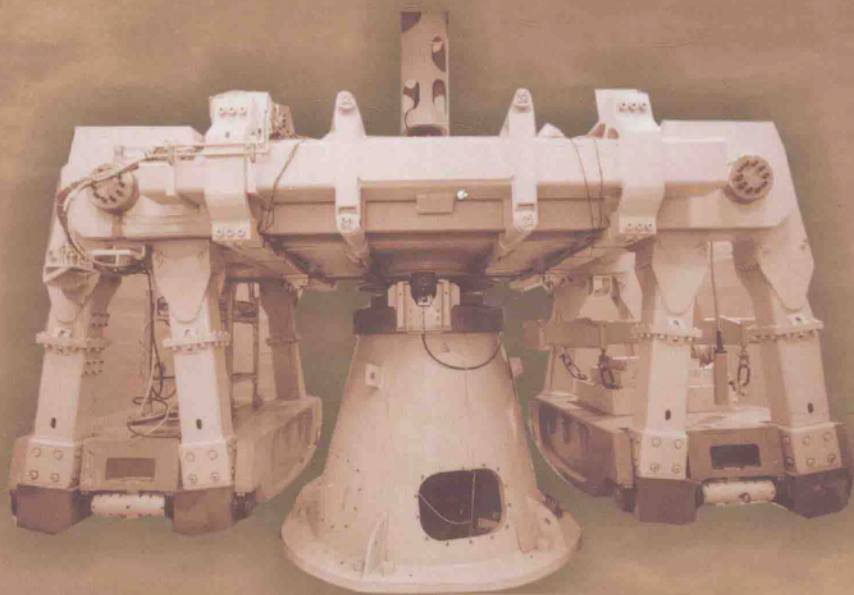


岩土离心模拟技术的 原理和工程应用

《岩土离心模拟技术的原理和工程应用》编委会 编



长江出版社

ISBN 978-7-5492-0517-2



9 787549 205172 >

定价：88.00元

ISBN 978-7-5492-0517-2/1U·18

岩土离心模拟技术的 原理和工程应用

《岩土离心模拟技术的原理和工程应用》编委会 编

长江出版社

图书在版编目(CIP)数据

岩土离心模拟技术的原理和工程应用/《岩土离心模拟技术的原理和工程应用》编委会编. —武汉:长江出版社, 2011.6

ISBN 978-7-5492-0517-2

I. ①岩… II. ①岩… III. ①岩土工程—离心模型
IV. ①TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 121684 号

岩土离心模拟技术的原理和工程应用

责任编辑:贾茜 郭利娜

装帧设计:蔡丹

出版发行:长江出版社

地 址:武汉市解放大道 1863 号

邮 编:430010

E-mail:cjpub@vip.sina.com

电 话:(027)82927763(总编室)

(027)82926806(市场营销部)

经 销:各地新华书店

印 刷:武汉市首壹印务有限公司

规 格:787mm×1092mm 1/16

36.25 印张 750 千字

版 次:2011 年 6 月第 1 版

2011 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5492-0517-2/TU · 18

定 价:88.00 元

序一

离心模拟技术是研究岩土工程问题的重要手段,离心模拟技术用离心力模拟重力,在 N_g 条件下,小比尺模型的应力和应变与原型相同或相似,从而揭示岩土工程边值问题的应力和变形规律。由于岩土体力学性质的复杂性,岩土数值分析很难精确定量的解决岩土工程问题,另一方面,离心模拟技术在施工过程模拟方面尚存在难度,加之模型尺寸的限制,往往也不能完全直接反映原型的工程特性。因此,离心模拟技术与岩土数值分析相结合,可能是解决岩土工程问题的有效途径。

近二三十年来,我国岩土工程实践的迅速发展不断给岩土工程提出新问题,离心模拟试验技术也得到长足进步,离心机的性能愈来愈好,功率愈来愈大,模拟沉桩、开挖、加载、温度控制、含水率控制等附属设备性能愈加完备,离心机与振动台结合可以模拟地震响应,等等。我国一大批岩土科技工作者利用离心模拟技术潜心研究岩土工程问题,取得了丰硕成果,非常有必要总结和提高。

最近有幸拜读了《岩土离心模拟技术的原理和工程应用》书稿,非常感动也备受鼓舞。该著作是在包承纲先生的倡议和组织下编写完成的,参编单位之多,几乎包括了我国所有具有离心机试验系统的单位;编写人员水平之高,均是多年从事离心模拟技术相关研究的专家;研究成果丰富,涉及各类重大工程中的试验成果,包括三峡、南水北调、小浪底等特大型工程;涉及研究内容之广,包括离心模拟的基本原理、相似比尺问题、误差及误差减少方法、试验设备、土石坝和堤防工程、岩土边坡、地下工程、挡土结构与基坑工程、加筋土及软基处理、港口工程与海洋平台、道路工程、环境岩土工程、岩石力学研究、岩土工程动力问题以及若干专题研究等;该著作是众多学者和专家的辛勤工作和聪明智慧的结晶。

作为国内第一部系统介绍离心模拟技术及工程应用的著作,其出版对于普及和推广离心模拟技术的工程应用,对于离心模拟技术的发展,对于推动岩

土工程学科的发展都将具有深远而重大的意义。该著作将成为广大岩土工程学者的良师益友。

谨此,对该著作的出版表示祝贺!

长江水利委员会长江科学院副总工程师
水利部岩土力学与工程重点实验室主任



2011 年 1 月 24 日

序二

早在20世纪50年代国内就开始筹划建设土工离心机,但由于60年代特殊的政治形势,我国土工离心模拟试验工作起步较晚,直到1983年才在长江科学院建成了第一台中型土工离心机。1990年利用国家“七五”科技攻关项目,在中国水利水电科学研究院和南京水科院分别建成了两台大型土工离心机。进入21世纪,中国在土工离心机和离心模型试验研究领域取得了长足的发展,目前我国土工离心机的数量已达20余台,许多新建的离心机都配备了振动台、机械手等多种附属试验设备和各类传感器,相关的研究成果不断发表,使得我国在国际岩土工程物理模拟研究领域也占有了重要的地位。

但是我国在土工离心模型试验方面的相关专著很少,主要参考国外早期的一些土工离心模型试验著作和历次国际土工离心机会议论文集。本书的出版,不仅系统介绍了土工离心模型试验的内容和方法,而且较为全面地反映了国内在离心模型试验研究领域的最新成果。该书由从事土工离心机及模型试验多年的一线人员编写而成,汇总了国内岩土工程各领域利用离心机开展的研究工作,内容相当丰富:有离心机主体设备及其附属试验设备的研制、特点和应用,有离心模型试验相似率的探讨,针对各类土石坝、桩基、边坡、挡土墙、加筋土、港口工程、道路工程、岩石力学,以及环境岩土工程等,还介绍了国内各研究机构大量的离心模型试验工作和主要成果。

本书对于了解离心模型试验的原理、方法和步骤,指导相关离心模型试验研究具有很大的参考价值。相信该书将成为我国从事离心模型试验的工作人员和博士、硕士生必备工具;对于从事工程设计和施工的技术人员,也可以通过此书更好地了解离心模型试验的方法和特点,从而利用土工离心模型试验这一先进有效的试验手段解决更多的工程问题。特为之序。

中国水利水电科学院教授级高工

朱男哲

2011年4月

序三

岩石和土是几千年来人类一直努力认知、改造和利用的对象,如今岩土力学与工程界都认为岩土的性质与其所处的应力状态有关,无法用一个本构模型来全面而正确地描述,因此在采用室内试验和原位测试的方法测试岩土的性质、建立更为合理的本构模型和更为精细的数值计算方法的同时,不断探索更为真实反映岩土性状以及岩土与建筑物相互作用的物理模型试验方法,于是利用离心加速度使岩土模型处于与原型相同的应力状态和应力水平的土工离心模型试验,成为研究岩土力学现象、解决岩土工程问题的重要手段。

早在 20 世纪 30 年代 Виску и Покровский 就进行了土工离心模型试验,但是 30 年后英国建置了大型土工离心机以后,土工离心模型试验技术才在欧洲开始得到较大的发展和应用。在我国土力学奠基者黄文熙先生倡导下,南京水利科学研究院在 1986 年利用 20g-t 离心机研究了活断层上心墙堆石坝的性状,开创了我国土工离心模型试验的先河,不到 30 年的时间,我国土工离心模型试验技术蓬勃发展,取得长足的进步。1991 年南京水利科学研究院和中国水利水电科学研究院建成了 400~450g-t 大型土工离心机,长江科学院、清华大学、浙江大学、成都理工大学、大连理工大学、同济大学、长安大学、西南交通大学、重庆交通大学、长沙交通大学、香港科技大学都相继建成了大型土工离心机,有的离心机容量更大、性能更先进。南京水利科学研究院在“七五”、“八五”、“九五”国家科技攻关项目、“十一五”交通重大科技攻关专项、西部交通科技项目、部重点科技项目、国家自然科学基金项目和重大水利水电工程、交通公路和港区工程、地下工程、地基与基础工程以及边坡工程项目研究中开展了 50 多项土工离心模型试验,为高土石坝、大型港口、高速公路的建设提供了技术支撑。中国水利水电科学研究院进行了小浪底、天生桥一级、洪家渡、察汗乌苏、乌鲁瓦提、黑泉、龙首二级和九甸峡等多座高土石坝和面板堆石坝的离心模型试验,长江科学院完成了三峡工程、南水北调中线工程、小浪底工程、堤防工程、新型海洋平台及码头、公路软基处理、机场填海工程等的离心模型试验,各高等院校也都先后开展了土工离心模型试验研究,在土石坝工程、道路工程、海洋工程、地下工程、边坡工程和环境工程等领域的研究成果可谓五彩缤纷、争奇斗艳,这标志着我国土工离心模拟试验技术已经进

入世界前列。

中国水利学会岩土力学专业委员会在 20 年前就成立了土工离心试验技术专门委员会,举行了多次学术会议,2005 年 10 月与 2007 年 10 月分别在北京和苏州召开了学术研讨会,出版了论文集,促进了我国土工离心模拟试验技术的发展。如今我国土工离心机及试验装置的开发者和岩土工程离心模型试验的研究者一起编写了这本《岩土离心模拟技术的原理和工程应用》,这是我国这方面科技成果的汇集,反映了我国土工离心模拟试验研究的当前水平,对今后的发展有重要的推动作用。因此我乐于为序。

中国水利学会岩土力学专业委员会
南京水利科学研究院教授级高工

邵裕惠

2011 年 3 月

《岩土离心模拟技术的原理和工程应用》编委会

(以姓氏拼音第一字母为序)

包承纲(长江科学院)

蔡正银(南京水利科学研究院)

陈云敏(浙江大学)

程永辉(长江科学院)

侯瑜京(中国水利水电科学研究院)

林明(中国工程物理研究院总体工程研究所)

罗强(西南交通大学)

马险峰(同济大学)

饶锡保(长江科学院)

徐光明(南京水利科学研究院)

张建红(清华大学)

詹良通(浙江大学)

(中国海洋大学杨俊杰参加了部分编写工作)

各章节编写人员一览表

序号	章名	节名	编写人
1	第1章 岩土工程物理模拟的基本理论	1.1 岩土物理模拟技术概况	包承纲
2		1.2 岩土离心模拟的基本原理	吴宏伟、张敏、 彭思远、洪义
		1.3 离心模拟技术的主要应用	
		1.4 离心模拟的主要局限性	
		1.5 岩土离心模拟技术的发展简史	
3	第2章 离心模拟的运动学原理及相似比		吴宏伟、张敏、 彭思远、洪义
4	第3章 离心模型试验的误差与减少误差的方法		张建红
5	第4章 离心模拟试验的主要设备		林明、吴文凯
6	第5章 土石坝和堤防工程的离心模拟	5.1 概述 5.2 土石坝材料的模拟 5.3 局部模型或小比尺模型试验 5.4 模型设计及观测方法 5.5 土石坝、土质堤防离心模型试验实例	侯瑜京
7		5.6 长江堤防防渗墙施工中堤身裂缝机理研究	张建红
8	第6章 土质边坡的离心模拟		蔡正银、徐光明
9	第7章 地下工程的离心模拟		马险峰
10	第8章 挡土结构和开挖工程的离心模拟		马险峰
11	第9章 加筋土工程与软基处理的离心模拟	9.1 概述 9.2 加筋土工程离心模拟的一般问题 9.3 加筋土挡墙的离心模拟 9.4 加筋土边坡的离心模拟 9.5 加筋土地基的离心模拟 9.6 土钉墙与锚杆加固的离心模拟 9.7 软基处理的离心模拟	程永辉
12		9.8 吹填土的离心模拟	程永辉、丁金华

续表

13	第 10 章 港口工程与海洋平台的离心模拟	10.1 概述 10.2 新型遮帘式板桩码头离心模型试验 10.3 沉入式大圆筒码头结构工作机理离心试验研究	蔡正银、徐光明
14		10.4 格形钢板桩码头的离心模拟	饶锡保、程永辉
15		10.5 近海防波堤工程	张建红
16		10.6 海洋平台的离心模拟 10.6.1 海洋平台离心模型试验若干技术问题	程永辉
		10.6.2 梁柱式海洋平台的离心模拟	李玫、程永辉
17		10.6.3 海洋平台吸力式基础的离心模拟	张建红
18	第 11 章 路基加固技术的离心模拟		张良、罗强
19	第 12 章 环境岩土工程的离心模拟	12.1 概述 12.2 固体废弃物填埋场静动力稳定问题的离心模型试验 12.3 填埋场衬垫系统变形与破坏问题的离心模拟 12.4 污染物运移的离心模型试验	陈云敏、詹良通
20		12.5 环境岩土工程中污染物的扩散和迁移	张建红
21	第 13 章 岩石力学研究中的离心模拟		包承纲等
22	第 14 章 岩土工程动力问题的离心模拟		侯瑜京
23	第 15 章 若干专题研究	15.1 专题 1——土工离心机设备的建设和发展	侯瑜京
24		15.2 专题 2——承载力离心模型试验中的粒径效应	杨俊杰
25		15.3 专题 3——国内有关离心模拟技术研究、理论验证和工程应用	张建红
26		15.4 专题 4——香港离心模拟的工程实践	吴宏伟、周正兵、张敏、彭思远、洪义
27	统稿		包承纲
28	编务		程永辉、饶锡保

编者的话

《岩土离心模拟技术的原理和工程应用》一书经过两年多的撰写、统稿、编辑等工作,终于付梓,这是我国第一本全面介绍离心模拟技术的原理、设备,特别是在各种工程,包括堤坝、道路、土坡、港口工程、地下工程、海洋工程、环境工程、加筋工程、地震工程以及岩石工程等方面具体应用的专著,作为编者感到十分欣慰。

离心模拟技术由于具有与原型应力水平相同的优点,在以自重为主要荷载的岩土工程的研究中占有独特的地位。它在 20 世纪 80 年代初在我国首次建设和应用,至今已有 30 年的历史。其间,90 年代初和最近五年是该项技术发展的两次高潮,至今全国已有各种离心机约 20 台,其中大部分为大中型(如 400g-t 或 200g-t 以上)梁式离心机,近年也有大型鼓式离心机出现。更主要的是应用的领域日广,不仅在传统的土坡、地基等工程中已成为常规的手段,而且逐渐扩展到环境、地震和岩石力学等前沿领域,在工程建设中发挥越来越重要的作用。同时,也对土力学的一些理论原理的验证,起到了良好的作用。

但另一方面,这种技术的普及却相当有限,不少岩土工作者对此尚不十分了解,为此,在中国水利学会岩土专业委员会离心机与物理模拟分委员会的倡导下,我国部分已从事离心模拟技术研究的学者组成《岩土离心模拟技术的原理和工程应用》编委会,统一拟定书写大纲,分头撰写,集中统稿,经过几次反复,编就了这本专著(有关章节的撰稿人已详列在前面的表格中),以期对发展我国岩土离心模拟技术有所裨益。书中的内容系统地介绍了有关的试验原理,设备发展现状和各种工程领域的应用,值得指出的是所叙述的实例大多数是撰稿人亲身的实践经验,因此内容丰富、叙述详尽、理论与方法兼备、突出工程实例、成果实用性强,实为值得从事岩土离心模型试验人员参考的一本好书。

鉴于本书各章是由十几位同仁在统一提纲下分头撰写的,因此在体例格式上,文笔风格上难免有不一致的现象。在内容方面,虽经统稿人对全书进行四次调整、核对、修改、润色,也仍会有重复、矛盾等不当之处,敬请读者不吝赐教。此外,某些内容的重复,如相似比尺等可能在不同章节中均有述及,这是考虑到对不同工程类型的离心模拟而言,其相似比尺还是有所差异的,而且保持各章的相对完整,也便于不同行业读者的参阅。此外,不同章节之间的名词术语也可能不完全一致,有的是为了照顾不同行业的习惯,如铁路部门有时采用“沉落”表示“沉降”等。

本书在筹划、编写和出版过程中得到长江科学院、南京水利科学研究院、清华大学、同济大学、香港科技大学、西南交通大学、中国水利水电科学研究院、中国工程物理研究院总体工程研究所和浙江大学(以拼音字母第一字为序)有关方面的鼓励和经费支持,没有他们的远见和慷慨,这本书是不可能问世的。

本书还要感谢我国离心机先驱者朱思哲先生、邝能惠先生和离心机开拓者程展林总工为本书作序,使本书增色不少。本书编写过程中,参阅了国内、外学者有关的大量文献和著作,长江科学院饶锡保、程永辉为本书的出版做了大量的组织、校对和编辑工作,在此一并表示衷心的感谢。

编 者

2011 年 4 月

目 录

第1章 岩土工程物理模拟的基本理论	1
1.1 岩土物理模拟技术概况	1
1.1.1 1g 小比尺模型试验	3
1.1.2 1g 大比尺模型试验	3
1.1.3 校准筒试验(Calibration chambers test , CCT)	3
1.1.4 1g 振动台模型试验	3
1.1.5 离心模型试验	4
1.1.6 地质力学模型试验(Geomechanical model test)	4
1.2 岩土离心模拟的基本原理	5
1.3 离心模拟技术的主要应用	6
1.3.1 原型模拟	6
1.3.2 新课题的研究	6
1.3.3 参数研究	6
1.3.4 数值模型验证	6
1.4 离心模拟的主要局限性	7
1.5 岩土离心模拟技术的发展简史	7
第2章 离心模拟的运动学原理及相似比	12
2.1 离心模拟的运动学原理	12
2.2 离心模拟的相似比概述	13
2.3 静力模型试验的相似比	13
2.3.1 基本相似比	13
2.3.2 渗流问题	15
2.3.3 固结问题	15
2.4 动力模型试验的相似比	16
2.5 非饱和土问题的相似比	17
2.5.1 毛细水上升	17
2.5.2 含水量和吸力分布	18
第3章 离心模型试验的误差与减少误差的方法	20
3.1 相似比方面的误差	20
3.1.1 结构物尺寸与土粒粒径的关系	20
3.1.2 粒径模拟的方法	20

3.1.3	材料结构性(aging)模拟	21
3.1.4	物理现象的耦合	21
3.2	土工离心装置和辅助设备中的误差	22
3.2.1	不均匀加速度场	22
3.2.2	模型箱尺寸和边界	23
3.2.3	科氏加速度的影响	24
3.2.4	量测系统的误差	25
3.3	施工过程模拟中的误差	26
3.3.1	开挖和堆填	26
3.3.2	入桩过程	26
3.3.3	荷载模拟	26
3.4	小结	27
第4章	离心模拟试验的主要设备	29
4.1	概述	29
4.2	土工离心机主机设计	37
4.2.1	离心机主机设计原理	39
4.2.2	机械系统	47
4.2.3	驱动控制系统	52
4.3	数据采集系统	59
4.3.1	概述	59
4.3.2	静态数据采集	61
4.3.3	动态数据采集	62
4.3.4	照相	64
4.3.5	摄像	65
4.3.6	图像处理	66
4.3.7	测量传感器选择	66
4.4	离心模型试验专用装置	67
4.4.1	振动台	67
4.4.2	机械手	70
4.4.3	模型箱	71
4.4.4	加载与卸载装置	72
4.5	中国土工离心机主要性能表(截至2010年)	75
第5章	土石坝和堤防工程的离心模拟	81
5.1	概述	81
5.2	土石坝材料的模拟	81
5.2.1	粒径效应	81
5.2.2	模型箱的尺寸效应	82

5.2.3 模型箱的边界效应	83
5.3 局部模型或小比尺模型试验	83
5.4 模型设计及观测方法	84
5.4.1 模型设计	84
5.4.2 模型制作	89
5.4.3 模型观测技术	90
5.4.4 土石坝施工期的模拟	91
5.4.5 土石坝渗流及溃坝的模拟	92
5.5 土石坝、土质堤防离心模型试验实例	92
5.5.1 混凝土面板堆石坝	92
5.5.2 某心墙堆石坝水力劈裂试验	99
5.5.3 瀑布沟坝基防渗墙离心模型试验	103
5.5.4 三峡二期围堰水下抛填风化砂的密度和坡角的模型试验	106
5.6 长江堤防防渗墙施工中堤身裂缝机理研究	107
5.6.1 缘由	107
5.6.2 试验模型和试验方法	108
5.6.3 试验结果与分析	109
第6章 土质边坡的离心模拟	111
6.1 概述	111
6.2 堤防稳定性离心模型试验研究	112
6.2.1 概况	112
6.2.2 稳定性离心模型试验原理	113
6.2.3 边坡和地基的模型试验	115
6.2.4 试验程序	119
6.2.5 试验结果及分析	119
6.2.6 小结	125
6.3 航道边坡离心模型试验	125
6.3.1 概况	125
6.3.2 模型制备和量测布置	126
6.3.3 模型试验步骤	129
6.3.4 试验结果和分析	129
6.3.5 原型边坡稳定安全系数的估算	133
6.3.6 小结	135
第7章 地下工程的离心模拟	137
7.1 概述	137
7.2 隧道开挖引起的地层变形及土压力分布	138
7.2.1 概述	138