

土工离心模型试验 技术与应用

王年香 章为民 著



中国地质大学出版社

土工离心模型试验技术与应用

王年香 章为民 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

土工离心模型试验技术与应用/王年香, 章为民著. — 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. 2

ISBN 978-7-112-17688-5

I. ①土… II. ①王…②章… III. ①离心模型-土工试验
IV. ①TU41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 018903 号

土工离心模型技术由于能模拟原型应力, 在岩土工程的许多领域都得到广泛关注和应。本书较系统地介绍了土工离心模型试验技术, 重点介绍了作者 20 余年来的离心模型试验技术在岩土工程诸多领域的应用研究成果。全书共分六章, 内容主要包括土工离心模型试验技术、高土石坝离心模型试验研究、高土石坝地震反应离心模型试验研究、软土地基离心模型试验研究、超大型桥梁基础离心模型试验研究、公路膨胀土离心模型试验研究。

全书内容丰富, 理论性、先进性、实用性和可操作性强, 可供岩土工程专业试验研究、设计、施工、建设的工程技术人员使用, 也可供高等院校相关专业的师生参考或作为研究生教材。

责任编辑: 王 梅 辛海丽

责任设计: 张 虹

责任校对: 陈晶晶 刘梦然

土工离心模型试验技术与应用

王年香 章为民 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京天来印务有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 16½ 字数: 402 千字

2015 年 4 月第一版 2015 年 4 月第一次印刷

定价: 49.00 元

ISBN 978-7-112-17688-5

(26993)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

序

土工离心模型试验技术是近二三十年迅速发展起来的一项崭新的土工物理模型试验技术。离心模型试验是通过施加在模型上的离心力使模型的应力状态和应力水平与原型一致,这样就可以用模型反映、再现原型的性状,因此离心模型方法是各类物理模型试验中相似性最好的方法,从而在国内外受到广泛的重视,取得了飞速的发展与进步,试验研究的课题涉及了几乎所有的岩土工程研究领域,成为研究岩土力学现象、解决岩土工程问题的重要手段。

南京水利科学研究院在国内最早开展离心模型试验技术研究,现有 400gt、60gt、50gt 大中型离心机三台,研制成国内首台离心机振动台,在“七五”、“八五”、“九五”国家科技攻关项目、国家自然科学基金项目、“十一五”交通重大科技攻关专项、西部交通科技项目、部省重点科技项目及重大工程项目等的研究中开展了百余项离心模型试验研究,在岩土力学基本理论、模型模拟技术、土与结构物相互作用以及土石坝与地震工程、海洋与港口工程、道桥工程、软土地基加固等方面积累了丰富的研究经验,为高土石坝、大型港口、高速公路、超大型桥梁等的基础设施建设提供了重要技术支撑。

作者从事土工离心模型试验研究工作 20 余年,先后承担了国家 863 计划、国家科技支撑计划、国家自然科学基金项目、部省重点科研项目及重大工程项目等的离心模型试验研究,此书是他们及其团队的科技成果汇集。全书共分六章,内容主要包括土工离心模型试验技术、高土石坝离心模型试验研究、高土石坝地震反应离心模型试验研究、软土地基离心模型试验研究、超大型桥梁基础离心模型试验研究、公路膨胀土离心模型试验研究。

此书注重理论与实践相结合,既论述了土工离心模型试验的原理、设备和模拟技术,突出了理论性和先进性,又系统总结了土工离心模型试验在解决各行业岩土工程技术难题的成果,富有实用性和可操作性。此书反映了我国土工离心模型试验研究的当前水平。我深信其出版对土工离心模型试验技术的发展和推广应用具有重要的推动作用。因此我乐于为序。

中国水利学会理事、岩土力学专业委员会名誉主任
南京水利科学研究院教授级高级工程师

邵能忠

2014 年 12 月 9 日

前 言

土工离心模型试验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研究中占有独特的地位,在岩土工程的许多领域都得到广泛关注和应用。我国岩土力学研究的开拓者[黄文熙]先生称“离心模型是土工模型试验技术发展的里程碑”,在他的倡导下,我国土工离心模型试验技术得到了高速发展,也取得了长足进步。南京水利科学研究院在国内最早开展离心模型试验技术研究,现有 400gt、60gt、50gt 大中型离心机三台,研制成国内首台离心机振动台,在国家 863 计划、国家科技支撑计划、国家 973 计划、国家自然科学基金重大项目、国家自然科学基金项目、部省重点科研项目及重大工程项目等研究中,开展了百余项离心模型试验研究,十余项研究成果获国家和部省级科技奖励。在岩土力学基本理论、土与结构物相互作用以及土石坝与地震工程、海洋和港口工程、道桥工程、软土地基加固、模型模拟技术等方面积累了丰富的研究经验。

本书是作者 20 余年来承担国家 863 计划、国家科技支撑计划、国家自然科学基金项目、部省重点科研项目及重大工程项目离心模型试验研究所取得的研究成果。全书共分六章。第一章阐述了离心模型试验的意义、发展、特点、基本原理,介绍了离心模型试验的主要设备、模拟技术。第二章介绍了离心模型试验在高土石坝中的应用,研究了高心墙堆石坝坝体变形特性、防渗墙和廊道应力规律,分析了初次蓄水速度影响,研究了高面板砂砾堆石坝和高挡墙混凝土面板混合坝的应力、变形和稳定特性。第三章介绍了离心机振动台模型试验在高土石坝地震反应中的应用,推导了离心机振动台模型相似理论,研究了高堆石坝坝体、坝基防渗墙、心墙与岸坡连接部的地震反应特性,分析了大坝极限抗震能力,提出了高堆石坝地震反应复合模型,研究了高面板堆石坝和砂性地层地震反应特性。第四章介绍了在离心模型试验软土地基中的应用,研究了桩基码头与岸坡相互作用、深层搅拌法加固码头软基、重力式码头、长江口深水航道治理工程、深水软基斜坡堤、充填土袋筑堤、软土路基、软土地基微型桩基和大直径超长桩的受力、变形与稳定。第五章介绍了离心模型试验在超大型桥梁基础中的应用,针对苏通长江公路大桥主塔基础,研究了大直径超长单桩、超大群桩基础、主塔群桩基础的竖向承载特性,分析比选了不同设计方案。第六章介绍了离心模型试验在公路膨胀土地基与基础中的应用,研究了雨水入渗条件下膨胀土路基边坡的变形和破坏性状,以及桥涵地基的变形和受力性状,分析了膨胀土挡墙土压力的变化规律。

本书第一章由章为民、王年香编写,第二、四、五章由王年香、章为民编写,第三章由王年香、章为民、顾行文编写,第六章由徐光明、顾行文编写,全书由王年香统稿。本书亦凝聚了研究团队的其他同志的心血与智慧,在此表示诚挚的谢意。

本书得到国家自然科学基金项目（51179106、51379132）、南京水利科学研究院出版基金的资助，中国建筑工业出版社的策划编辑王梅、辛海丽为本书的出版做了大量艰辛、细致的工作，在此作者非常感激，并向支持该书出版的各位领导表示衷心的感谢。

离心模型试验工程技术发展很快，加之作者水平有限，书中定有不足甚至谬误之处，敬请各位专家和广大读者批评指正。

目 录

第一章 土工离心模型试验技术	1
第一节 概论	1
第二节 离心模型试验基本原理	7
第三节 离心模型试验主要设备	15
第四节 离心模型试验模拟技术	24
第二章 高土石坝离心模型试验研究	34
第一节 引言	34
第二节 高心墙堆石坝坝体变形离心模型试验研究	34
第三节 高心墙堆石坝防渗墙和廊道应力离心模型试验研究	49
第四节 高心墙堆石坝初次蓄水速度影响离心模型试验研究	58
第五节 高面板砂砾堆石坝离心模型试验研究	64
第六节 高挡墙混凝土面板混合坝离心模型试验研究	71
第三章 高土石坝地震反应离心模型试验研究	81
第一节 概述	81
第二节 离心机振动台模型相似理论	83
第三节 高堆石坝坝体地震反应离心模型试验研究	85
第四节 高堆石坝坝基防渗墙地震反应离心模型试验研究	94
第五节 心墙与岸坡连接部地震反应离心模型试验研究	100
第六节 大坝极限抗震能力离心模型试验研究	103
第七节 高面板堆石坝地震反应离心模型试验研究	104
第八节 砂性地层地震反应离心模型试验研究	107
第九节 高堆石坝地震反应复合模型研究	110
第四章 软土地基离心模型试验研究	115
第一节 桩基码头与岸坡相互作用离心模型试验研究	115
第二节 深层搅拌法加固码头软基离心模型试验研究	119
第三节 重力式码头离心模型试验研究	126
第四节 长江口深水航道治理工程离心模型试验研究	131
第五节 深水软基斜坡堤离心模型试验研究	141
第六节 充填土袋筑堤离心模型试验研究	150
第七节 软土路基离心模型试验研究	158
第八节 软土地基微型桩基离心模型试验研究	161
第九节 软土地基大直径超长桩离心模型试验研究	165
第五章 超大型桥梁基础离心模型试验研究	169

第一节 概论..... 169

第二节 单桩竖向承载特性离心模型试验研究..... 175

第三节 群桩竖向承载特性离心模型试验研究..... 181

第四节 主塔群桩基础竖向承载特性离心模型试验研究..... 190

第五节 初步设计方案比选离心模型试验研究..... 199

第六章 公路膨胀土离心模型试验研究..... 209

第一节 膨胀土问题研究概况..... 209

第二节 膨胀土路基离心模型试验研究..... 211

第三节 膨胀土挡土墙离心模型试验研究..... 222

第四节 膨胀土地基桥涵离心模型试验研究..... 233

参考文献..... 241

第一章 土工离心模型试验技术

第一节 概 论

一、离心模型试验的作用

土工离心模型试验技术是近二三十年迅速发展起来的一项崭新的土工物理模型技术。通过施加在模型上的离心惯性力使模型的重度变大,从而使模型的应力与原型一致,这样就可以用模型反映、表示原型。离心模型是各类物理模型中相似性最好的模型。我国岩土力学的开拓者黄文熙先生称“离心模型是土工模型试验技术发展的里程碑”。离心模型方法在国内外受到广泛的重视,模型试验技术也有了飞速的发展与进步,试验的研究内容已涉及了几乎所有的岩土工程研究领域,它在岩土工程、岩土力学研究中的作用与意义主要表现为以下的几个方面:

(1) 新现象研究。研究自然现象与复杂工程结构物的工作机理和破坏机理,为建立解释这些复杂现象的理论提供定性依据;

(2) 模拟原型。研究实际工程问题,比选验证优化设计方案,了解工程运行状况,预测未来的运行安全性与可靠性;

(3) 参数研究。针对某些理论和工程设计中的关键技术参数,用离心模型可以提供非常有用的数据资料,解决工程技术难题;

(4) 验证新理论和新方法。用模型试验的结果验证理论与计算方法,检验数学模型;

(5) 用于教学与工程师的培训。

到目前为止,许多复杂的岩土工程问题如非饱和土问题、污染介质的迁移问题、非线性破坏过程、地震反应问题等,运用计算机数值计算仍有不少困难,而模型试验却可以得到直观、清晰的结果。

二、离心模型试验技术的发展简史

1869年1月,法国人 Edouard Philips 在巴黎科学杂志发表了一篇论文,指出了用弹性理论方法解决复杂结构问题的局限性,提出了模型模拟试验的准则与模型试验的方法。非常重要的一点是,他认识到在各种不同工程条件下,自重惯性力在模型试验中所起的重要作用,并推导了一个近似的模拟相似准则。通过这一准则,他认识到通过离心机施加的离心惯性力,就可以使模型的应力与原型相似。Philips 最初设想的目标是研究法国到英国横跨英吉利海峡的大铁桥,他想用离心模型试验方法来解决英吉利海峡大铁桥的复杂结构力学问题。他甚至还很具体、富有创造性地设计了模型试验的模型比尺为 $1:50$,在 $50g$ 离心加速度下进行试验。按他的设想这个模型大铁桥的长度将达到 $8.6m$ 。Philips 还提出用离心模型试验研究在跨海大铁桥建设中可能遇到的地基基础问题。同年 Philips 把他的这一设想提交给了法国科学院。然而,按照当时的条件这一方法不可能得到实现。这样,一个富有创造性的思想在法国科学院的档案柜里躺了 60 年。60 年后,离心模型才真正开始

了它的发展。离心模型的发展过程，大体上可以分为三个阶段：

第一阶段是离心模型试验技术的初创与探索阶段：1931 年美国哥伦比亚大学的 Philip Bucky 发表了用离心模型试验方法研究矿山工程问题的论文。而与此同时，苏联也进行了更大规模的离心模型试验研究。1932 年苏联的波克罗夫斯基教授在莫斯科建成了两台离心机，主要用于土石坝与土坡问题的研究。1933 年苏联水工及水文地质研究所使用半径 110.5cm、最大离心加速度 50g 的离心机为伏尔加工程设计局研究了伏尔加运河引水渠的允许坡降问题，获得成功。同年，苏联的军事工程学院还进行了莫斯科地下铁道高尔基车站的隧洞管壁土压力模型试验，他们用薄膜测压计来观测最大土压力分布，用试验结果来校核原设计的土压力计算。之后，斯大林矿业学院、莫斯科治泽学院、全苏铁路建筑、地基、基础设计及土坝科学研究所、巴库建筑材料研究所等都建设了离心机。1950 年苏联建成了有效半径 2.5m、模型尺寸 80cm×50cm×40cm、最大加速度 250g 的土工大型离心机，可能是那个时期规模最大的离心机。从 1932 年之后约 20 年，苏联先后建设完成了十多台离心机，研究领域涉及了土坝、土坡稳定、隧洞土压力、运河工程、沼泽软土、矿山工程、挡土墙振动土压力以及土木工程的许多领域。波克罗夫斯基教授在他的文章中曾写道：“离心模型及其理论发展的历史，证明了苏联在 20 世纪 50 年代的研究获得了重大成功，并且在土的科学方面解决了一系列重大的实际问题”。他强调要继续发展离心模型技术，指出应当朝着加大离心机尺寸的方向发展。

尽管早在 1933 年就有了用同步摄影机来研究土坝变形的办法。但由于当时包括测量技术在内的试验整体水平不高，影响、限制了离心模型技术在岩土力学、岩土工程中应用的步伐。总体而言，20 世纪 60 年代之前的阶段属于初创的探索时期。这一时期苏联在离心模型试验技术研究方面，从研究的规模、深度、广度等方面都处于世界的领先水平，由于语言以及冷战等方面的原因，世界上多数国家特别是西方国家对苏联的研究成果很不了解。

离心模型试验技术发展的第二个重要阶段是从 20 世纪 60 年代中期开始的，1965 年日本大阪市立大学三笠正人教授开始使用半径为 1.0m 的土工离心机研究软黏土在自重条件下固结特性，此外他还利用离心模型研究地基的承载能力以及边坡的稳定性。在研究地震对土坝边坡稳定的影响时，他依据边坡稳定计算拟静力法的原理，在离心机里把模型偏转一个角度，非常简便地在模型上施加了等效的地震水平惯性力。在此同时，英国剑桥大学 Schofield 教授在一台小离心机上，进行了水位骤降时土坡的稳定性问题研究。1969 年，第七届国际土力学与基础工程学术会议（ISSMFE）在墨西哥举行，在会上来自英国、苏联、日本的学者提交了关于离心模型试验方面的研究论文，研究内容基本上都是土边坡稳定问题。

1968 年，曼彻斯特大学半径 1.5m 离心机建成。1969 年，日本东京工业大学建成两台离心机。1971 年，英国曼彻斯特大学半径 3m 离心机建成。1973 年，英国剑桥大学半径 4m 的离心机建成。1979 年，日本运输省港湾技术研究所有效半径 4m 的大型离心机建成。到 1985 年前，世界上有 20 多个研究小组开展离心模型试验技术研究，分布在英国、美国、日本、法国、丹麦、德国、意大利、荷兰、中国等 10 多个不同的国家。1981 年，国际土力学与基础工程学会成立了离心模型技术委员会，以期扩大在该领域研究中各个国家、机构的联系，促进技术交流。1985 年，国际土力学与基础工程学会在美国旧金山举

办了第一次关于离心模型试验技术的专题学术研讨会，会议出版了离心模型在土力学中应用的第一本论文集。这次会议极大地推动了离心模型试验技术的研究发展，成为离心模型试验技术发展的一个新的起点。

1985 年以后，离心模型试验技术进入了一个新的大发展阶段，这个新的大发展是在前两次发展的基础上、在当代高科技新技术飞速发展的条件下形成的。主要有以下几个特点：(1) 离心机的建设向着大尺寸、大型化的方向发展。日本运输省港湾研究所、美国科罗拉多大学、加州大学戴维斯分校、德国波鸿鲁尔大学、法国道桥研究中心 (LCPC) 都建成了大型土工离心机，20 世纪 90 年代初我国建成了南京水利科学研究院 400gt、中国水利水电科学研究院 450gt 大型土工离心机，1998 年美国陆军工程兵师团 (US Army Corps of Engineers) 建成了容量 1256gt 的超大型土工离心机，2000 年日本的大林组株式会社建成了容量 700gt 超大型土工离心机和目前最大规模的离心机振动台。(2) 微电子等高新技术的发展，为离心模型试验技术提供了重要的技术支撑。早期的离心模型试验只有简单的测量，获得表面变形等少量试验结果，远不能满足试验的要求。20 世纪 80 年代以后，微型传感器等大量微电子新技术成果在离心模型试验中得到应用，通过微型传感器可以获得较为可靠的位移、土压力、孔隙水压力、加速度等结果，通过激光传感器获得结构物的变形，还可以通过 X 光来探测模型内部土体的变形。用于环境污染研究的多功能探头也获得了成功。(3) 大量采用自动机器人、自动机器人手等高科技技术。由于高重力场的作用，在离心模型中采用自动机器人的技术难度很大。进入 20 世纪 90 年代以后，能模拟各种工程结构的作用力与自然作用力的自动化试验辅助装置，成为离心模型试验技术研究的热点。现在已经可以在离心模型试验中模拟土工建筑物所受到的主要作用力，如地震与波浪等循环动力，通过离心机振动台可以研究地震条件下砂土地基的液化与孔隙水压力的变化规律，模拟路堤、大坝对软弱基础的施工加荷过程。还可以模拟施工过程，如既可以模拟桩基础的打桩施工过程，也可以模拟城市地下铁道隧洞的开挖过程。高新技术的应用提高了离心模型试验的技术能力，扩大了研究范围，也越来越受到科学研究与工程设计者的重视。(4) 计算机技术的应用为离心模型试验技术的发展插上了翅膀。计算机技术的应用很好地解决了试验数据采集信号通过集流环传输的瓶颈问题，同时也解决了试验数据信号传输过程中容易受到干扰的技术难题。此外离心机的运转过程控制、离心机振动台、各种自动机器人机器人手的控制、模型变形图像的数字化处理都应用了计算机技术。目前网络技术在离心模型试验中也得到应用，特别是无线网络技术的应用，将有可能使离心模型试验彻底摆脱集流环的约束，有利于采用新技术，并为在更大范围实现资源共享与交流创造了条件。

值得一提的是中国在离心模型试验技术发展过程中所起的作用。由于历史的原因，我国早在 20 世纪 50 年代中就已经开始接触了解离心模型试验方法在模拟土工建筑物性状和研究土力学基本理论等方面的重要作用 and 巨大潜力，并开始研究离心模型试验技术的基本理论与基本方法，中国水利水电科学研究院收集了一些资料，进行了建置离心机的可行性初步论证；长江水利水电科学研究院在苏联专家的协助下也曾经计划筹建容量为 400gt 的大型土工离心机；南京水利科学研究所土工研究所曾就离心模型试验的基本理论开展了专题研究，提出了数篇研究报告。然而由于当时客观条件的限制，直到 20 世纪 80 年代我国才开始进行离心机建置工作。

从 20 世纪 80 年代开始,我国先后建成了南京水利科学研究院 400gt、50gt、5gt 大中小型土工离心机,中国水利水电科学研究院 450gt 大型土工离心机,长江科学院 180gt 大型土工离心机,清华大学 50gt 中型土工离心机,河海大学 30gt 离心机,上海铁道学院 20gt 离心机,成都科技大学 20gt 土工离心机,西南交通大学等 10 余台大中小型土工离心机。南京水利科学研究院、清华大学还建成了离心机振动台。全世界已建成土工专用离心机约 120 余台,容量超过 200gt 的大型土工离心机约为 20 台,我国有 4 台。

与国外主要进行工程机理、验证理论的研究内容相比,我国在运用离心模型试验研究解决工程实际问题方面形成了自己的特色,先后结合三峡围堰工程、三峡高边坡稳定、瀑布沟坝基防渗墙、小浪底斜墙堆石坝、天生桥面板坝、京九铁路加筋挡土墙、深圳五湾码头、上海地下铁道、南水北调穿黄隧道工程、苏通长江大桥超长桩基础等国家大型重点工程项目建设完成了大量的研究工作,还开展了加筋土机理、边坡稳定、非饱和土、地震液化、新型大圆筒码头结构、软土地基加固机理、污染物的迁移等方面的基本理论研究。南京水利科学研究院 1999 年采用计算机网络技术建成的高速数据采集系统,基本与国外同步。

三、离心模型的试验原理与特点

1. 离心模型是力学相似性最好的物理模型

离心模型是力学相似性最好的物理模型试验方法,主要是从满足相似条件的角度来分析的。从连续介质力学的观点来看,物体的平衡可以用下面的方程来描述:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + X_i = 0 \quad (1-1)$$

由此可以得到模型与原型的相似条件,

$$\frac{C_\sigma}{C_l C_\gamma} = 1 \quad (1-2)$$

式中, $C_\sigma = \sigma_p / \sigma_m$ 、 $C_l = L_p / L_m$ 、 $C_\gamma = \gamma_p / \gamma_m$ 是模型物理量与原型物理量之比,叫做相似常数。

为了便于比较,不妨先来看一看常规模型的情况。在常规的结构模型试验中 (1g 条件),模型尺寸缩小,即 $C_l = L_p / L_m = n$,如采用原型材料制作模型,则 $C_\gamma = 1$,由式 (1-2) 的相似条件得到, $C_\sigma = \sigma_p / \sigma_m = n$,表示原型应力是模型应力的 n 倍。即模型应力与对应的原型应力不相等。这样,当原型的应力超过弹性极限进入塑性变形时,模型还在弹性阶段,因此常规模型试验只在弹性范围内有效,进行塑性、非线性试验较为困难,不能进行破坏性试验研究。

在离心模型试验中,模型中的每一点都受到一个比地球重力加速度 (g) 大 n 倍的离心惯性力,由于离心惯性力场的作用,模型的自重被加大了 n 倍,即 $\gamma_m = n\gamma_p$,便得到在离心机的离心惯性力场的作用下产生的特殊相似条件 $C_\gamma = 1/n$ 。把几何条件 $C_l = n$ 代入式 (1-2),得到 $C_\sigma = 1$,即离心模型的应力与原型应力相等。因此,离心模型是一个与原型应力相等的“全真型”模型试验方法。它满足主要的关键相似条件,可以进行直至破坏的全过程等应力力学模拟试验,可以直接采用原型材料,比较简捷地实现“全相似”。因此,离心模型试验方法被认为是迄今为止相似性最好的力学模型试验方法之一。

下面我们来分析图 1-1 中的黏性土坡的施工期稳定问题。采用瑞典圆弧滑动法,考虑

快速施工, 用 $\varphi=0$ 方法来计算其安全系数。稳定安全系数计算公式:

$$F = \frac{\text{抗滑力矩}}{\text{滑动力矩}} = \frac{R \cdot l \cdot c}{\gamma \cdot A \cdot x} \quad (1-3)$$

对于常规模型 (1g), 把相似关系 $R_p = nR_m$ 、 $l_p = nl_m$ 、 $A_p = n^2A_m$ 、 $x_p = nx_m$ 、 $c_p = c_m$ 、 $\gamma_p = \gamma_m$ 代入式 (1-3), 有:

$$F'_m = \frac{R_p/n \cdot l_p/n \cdot c_p}{\gamma_p \cdot A_p/n^2 \cdot x_p/n} = n \frac{R_p \cdot l_p \cdot c_p}{\gamma_p \cdot A_p \cdot x_p} = nF_p \quad (1-4)$$

式 (1-4) 表明常规土坡模型 (1g) 的安全系数是原型的 n 倍, 不能反映原型的实际安全状况。在离心模型中, 由于惯性力场的作用, 使模型的重度增大 n 倍, 即 $\gamma_p = \gamma_m/n$, 可以得到离心模型的土坡安全系数:

$$\begin{aligned} F_m &= \frac{R_p/n \cdot l_p/n \cdot c_p}{n\gamma_p \cdot A_p/n^2 \cdot x_p/n} = \frac{R_p \cdot l_p \cdot c_p}{\gamma_p \cdot A_p \cdot x_p} \\ &= F_p \end{aligned} \quad (1-5)$$

这样离心模型得到的土坡安全系数与原型的的安全系数完全相等, 反映了原型的真实情况。

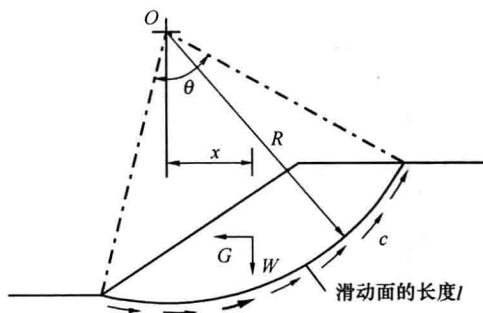


图 1-1 土坡的滑动稳定计算分析

2. 离心模型方法在岩土力学研究中的特殊优越性

土力学所以能从固体力学、材料力学中分离出来, 成为力学学科的重要分支, 是由于岩土类材料具有的特性所决定的。与理想的金属类材料相比, 岩土类材料主要有以下的重要特性:

(1) 应力相关性——土体模量与强度等力学性质随应力水平 (围压) 的变化而变化; 在研究土的单元力学特性时, 常需要采用三轴试验方法, 目的就是为反映土在不同应力水平条件下的性质。而在进行金属材料单元力学特性试验时则不需要三轴试验, 采用单轴试验就可以满足要求, 因为金属材料的力学性质与应力水平无关。

(2) 摩擦性——存在内摩擦角, $\tau = \sigma \tan \varphi + c$, 存在强度与正应力的耦合; 金属类材料的强度一般只有与 c 类似的强度, 没有内摩擦角。

(3) 非线性——应力应变关系呈非线性与弹塑性, 几乎没有弹性变形阶段。

(4) 剪胀性——剪切产生体积的变化, 剪切应力与体积变化的耦合。

(5) 多相性——土、水、气的多相混合体, 带来的特殊问题是非饱和土、渗流问题、固结问题、液化问题等。

(6) 各向异性——历史沉积产生的成层, 以及土石坝的分层填筑。

(7) 历史相关性——土体诸多的力学性质还取决于达到这一应力状态的历史过程。

(8) 随时间变化的特性, 如固结问题、流变 (蠕变) 问题。

(9) 结构性——天然原始状态下土的强度与扰动土的强度有很大的差异。

岩土类材料有别于理想金属材料的上述特性, 使岩土材料成为最为复杂、最为一般、有广泛代表性的工程材料之一, 因为如果上述的性质完全退化, 就得到了理想的金属材料性质。也正是岩土材料的复杂性与一般性, 使得岩土类材料力学性质的研究成为目前工程力学研究中最活跃、最有生气的研究领域之一。

离心模型试验方法在岩土力学研究中的优越性, 主要表现为能准确模拟土的应力相关

性、剪胀性、摩擦性、非线性与多相性等特性。

初次接触离心模型的人常常会这样问一个问题：为什么非要把模型放在离心机上转呢？在地上做试验会有什么区别吗？要说清楚这个问题，就要对土的力学特性作进一步分析，图 1-2 是标准砂的三轴试验结果，它反映了土的几个特点：一是土的应力-应变关系是非线性的；二是土的应力应变、土的强度、变形模量是随它所受到的应力水平（ σ_3 ）的大小而变化的；三是土的体积变形在不同应力水平之下表现不同，有时可能是相反的（如剪胀和剪缩）。

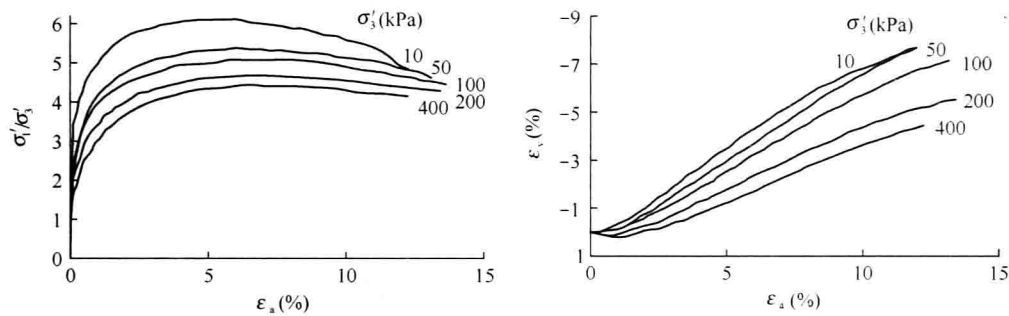


图 1-2 土的三轴试验结果

图中的曲线是在不同的围压条件下得到的，土所受到的围压压力的大小，实际上代表了原型不同位置土体的应力应变状态。可以认为 $\sigma_3' = 10\text{kPa}$ 和 $\sigma_3' = 400\text{kPa}$ 所对应的曲线，分别代表了原型顶与原型底土体的应力应变。在离心模型中，由于受到离心惯性力场的作用，模型中每一点的土体应力都与原型对应点的应力相等，模型的土又与原型相同，显然，相同的土体在相同的受力条件作用下，其力学表现必然是相同的。这样，就保证了模型与原型整体相似性。这就是离心模型的基本原理。因此，把模型放到离心机上转，是为了向模型施加离心惯性力，离心惯性力使模型应力与原型相同，从而达到用模型表现、模拟原型的目的。

在地面上进行模型试验的方法是常规模型方法。常规模型没有离心惯性力场的作用，常规模型的应力是原型应力的 $1/n$ 。我们假定模型比尺 $n=40$ ，此时模型应力是原型应力的 $1/40$ 。从图 1-2 看出，用常规模型的应力水平 $\sigma_3' = 10\text{kPa}$ 的曲线来代表原型应力水平 $\sigma_3' = 400\text{kPa}$ 是不可能得到正确的试验结果的。这实际上也是用常规振动台进行时，得到的水平变形往往很大而与实际不符的根本原因，也是岩土力学研究中已很少采用常规模型试验方法的原因。

从以上的分析可以看出，离心模型中模型应力与原型应力相等的特点，恰好满足了岩土力学模型要求应力相等、应力状态相同的条件，这一功能与要求的完美结合，使离心模型成为目前岩土力学研究中的较为理想、非常有效的物理模型试验研究方法。

应当特别说明的是，离心模型本身与普通的物理模型相同，唯一的区别是试验需要在高重力场下进行。但就模型的性质而言，它是一个一般性的土工结构的整体物理模型研究方法，可以进行各种岩土力学、岩土工程问题的研究。就模型的目的而言，离心模型与我们熟知的常规室内土工试验（三轴剪切、压缩固结等）有着根本性的不同，常规土工试验是土体的单元试验，所研究的是土体结构中的一个点，有明确、理想状态的受力条件；而

离心模型所研究的是土工结构的整体，其受力条件与原型实际相同。离心模型与三轴类型试验的关系，就如同结构模型试验与材料拉伸压缩试验一样。为了消除对离心模型试验方法的误解，进一步扩大离心模型的认知与应用范围，从 2002 年加拿大纽芬兰国际离心模型会议起，原来的“土工离心模型”国际会议（Geocentrifuge Modeling），改名为“土工物理模型”国际会议（Geotechnical Physical Modeling）。把离心模型方法理解为某种特别功能的单元土工试验，或叫离心机试验都是误解。

第二节 离心模型试验基本原理

一、相似的概念

相似是日常生活中常用的一个概念。我们常说某两个人长得很像，可能是眼睛长得像，也可能是脸形或神态相像，没有一个明确的定义。但在科学研究中说相似是有明确含义的。如我们说两个多边形相似，实际上是说它们的边数或角数相同，同时对应边保持相同的比例，或者是说它们对应的角相等。反过来，如果两个多边形满足了这些条件，它们就是相似的。在一个物理过程或物理现象中，如何来确定相似的条件和如何模拟一个物理现象呢？这就是物理相似的作用和目的。在一个力学过程中，常常涉及以下物理量的相似问题：

- (1) 力的相似，方向相同，大小成比例，作用点相同，分布相似。
- (2) 质量相似，质量大小成比例，分布相似。
- (3) 时间相似，对应的时间间隔成比例，频率成比例。
- (4) 变形相似，对应的变形成比例，或应变相同。
- (5) 速度和加速度相似，对应质点的速度和加速度成比例，或者它们的分布成比例。

由此可以看出，所谓物理量的相似，是指原型物理量与模型物理量在方向、大小、分布上存在某种确定的关系，而且有一个确定比例的关系，这个比例关系就是相似常数。用 C_Ω 表示物理量 Ω 的相似常数，如：

应力相似常数：

$$C_\sigma = \frac{\sigma_p}{\sigma_m} = \frac{\tau_p}{\tau_m} = \frac{p_p}{p_m} \quad (1-6a)$$

位移相似常数：

$$C_u = \frac{u_p}{u_m} = \frac{v_p}{v_m} = \frac{w_p}{w_m} \quad (1-6b)$$

体积力相似常数：

$$C_x = \frac{X_p}{X_m} \quad (1-6c)$$

剪切模量相似常数：

$$C_G = \frac{G_p}{G_m} \quad (1-6d)$$

时间相似常数：

$$C_t = \frac{t_p}{t_m} \quad (1-6e)$$

密度相似常数:

$$C_\rho = \frac{\rho_p}{\rho_m} \quad (1-6f)$$

长度相似常数:

$$C_l = \frac{l_p}{l_m} \quad (1-6g)$$

渗透系数相似常数:

$$C_k = \frac{k_p}{k_m} \quad (1-6h)$$

在物理过程或物理现象的相似问题中, 物理量蕴于物理过程之中, 物理现象的相似是通过这个现象的各个特征物理量的相似来表现的。一个物理现象的各个物理量之间是相互联系相互影响的; 相似的物理现象之间的各个特征物理量之间也存在一定的关系, 这个关系就是两个物理现象相似的条件, 也是进行模拟试验必须遵守的原则。

对一般的力学现象而言, 应当满足以下的相似条件:

(1) 物质相似, 指物质本身的力学特性相似, 如, 质量、密度、强度、模量等物理量的相似。

(2) 几何相似。

(3) 动力学相似。

(4) 运动学相似。

以上四个方面的内容不过是一般相似的概念, 对于相似的现象与过程有什么性质, 如何应用现象的相似, 如何才能使现象相似。相似的三个定理可以回答解释上述问题。

二、相似定理

1. 相似的正定理

彼此相似的现象, 相似准数的数值相同或其相似指标等于 1。下面以牛顿第二定律为例, 来解释相似准数与相似指标的含义。

对于原型

$$F_p = m_p \frac{dv_p}{dt_p} \quad (1-7)$$

对于模型:

$$F_m = m_m \frac{dv_m}{dt_m} \quad (1-8)$$

令:

$$\left. \begin{aligned} F_p &= C_F F_m \\ m_p &= C_m m_m \\ v_p &= C_v v_m \\ t_p &= C_t t_m \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

将式 (1-9) 代入式 (1-7), 得:

$$\frac{C_F C_t}{C_m C_v} F_m = m_m \frac{dv_m}{dt_m} \quad (1-10)$$

只有当:

$$\frac{C_F C_l}{C_m C_v} = 1 \quad (1-11)$$

模型与原型相似。我们把 $\frac{C_F C_l}{C_m C_v}$ 称为相似指标，同样由式 (1-11) 得到：

$$\frac{F_p t_p}{m_p v_p} = \frac{F_m t_m}{m_m v_m} \quad (1-12)$$

而 $\frac{F_p t_p}{m_p v_p}$ 、 $\frac{F_m t_m}{m_m v_m}$ 是无量纲量，称为相似准数，相似现象的相似准数应当相同。

2. π 定理

一个物理现象或物理过程往往涉及多个物理量，相似准数也往往超过一个，这时就需要运用 π 定理来研究。 π 定理的表述：描述一个物理现象的函数有 n 个物理量，其中有 k 个物理量 ($x_1 \cdots x_k$) 是相互独立的，那么这个函数可以改变为由 $(n-k)$ 个无量纲准数 (π) 的函数式，可以得到 $(n-k)$ 个相似准数。即，描述物理现象的方程：

$$f(x_1, x_2, x_3, \cdots, x_k, y_{k+1}, \cdots, y_n) = 0 \quad (1-13)$$

可以改写成：

$$\varphi(\pi_1, \pi_2, \cdots, \pi_{n-k}) = 0 \quad (1-14)$$

其中，

$$\left. \begin{aligned} \pi_1 &= \frac{y_{k+1}}{x_1^{a_1} x_2^{a_2} \cdots x_k^{a_k}} \\ \pi_2 &= \frac{y_{k+2}}{x_1^{\beta_1} x_2^{\beta_2} \cdots x_k^{\beta_k}} \\ &\vdots \\ \pi_{n-k} &= \frac{y_n}{x_1^{\xi_1} x_2^{\xi_2} \cdots x_k^{\xi_k}} \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

即 $n-k$ 个无量纲 π 数，可由这 k 个独立物理量的幂乘积得到。对于相似的现象，在对应点和对应时刻的相似准数都保持同值，则它们的 π 关系式也应相同，即：

$$\text{原型:} \quad \varphi(\pi_{p1}, \pi_{p2}, \cdots, \pi_{p(n-k)}) = 0 \quad (1-16)$$

$$\text{模型:} \quad \varphi(\pi_{m1}, \pi_{m2}, \cdots, \pi_{m(n-k)}) = 0 \quad (1-17)$$

其中，

$$\left. \begin{aligned} \pi_{p1} &= \pi_{m1} \\ \pi_{p2} &= \pi_{m2} \\ &\vdots \\ \pi_{p(n-k)} &= \pi_{m(n-k)} \end{aligned} \right\} \quad (1-18)$$

π 定理表明，在彼此相似的现象中，只要将物理量之间的关系式转换成无量纲的形式，其关系方程式的各项，就是相似准数。

3. 相似逆定理

对于同一类物理现象，当单值条件（系统的几何性质，介质的物理性质，起始、边界条件）彼此相似，且由单值条件的物理量所组成的相似准数在数值上相等，则现象相似。

相似的正定理给出了相似现象的必要条件，描述了相似现象的特征与基本性质，相似的逆定理则规定了物理现象之间相似的必要与充分条件。模型试验中，应根据相似的正定