



岩土工程抗震大型复杂试验设计理论及关键技术应用
国家自然科学基金资助项目（51708163，51808466）
国防基础科研计划项目（A0220110003，B0220133003）

岩土工程振动台试验模型 设计理论及技术

王志佳 吴祚菊 张建经 编著



西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目（C I P）数据

岩土工程振动台试验模型设计理论及技术 / 王志佳，
吴祚菊，张建经编著. —成都：西南交通大学出版社，
2020.8
（岩土工程抗震大型复杂试验设计理论及关键技术应
用）
国家出版基金项目
ISBN 978-7-5643-7554-6

. 岩... . 王... 吴... 张... . 岩土工
程 - 振动台试验 - 研究 . TU41

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2020）第 156751 号

国家出版基金项目
岩土工程抗震大型复杂试验设计理论及关键技术应用
Yantu Gongcheng Zhendongtai Shiyān Moxing Sheji Lilun ji Jishu
岩土工程振动台试验模型设计理论及技术
王志佳 吴祚菊 张建经 编著

出 版 人	王建琼
策 划 编 辑	张 雪
责 任 编 辑	杨 勇
封 面 设 计	何东琳设计工作室
出 版 发 行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发 行 部 电 话	028-87600564 028-87600533
邮 政 编 码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	四川玖艺呈现印刷有限公司
成 品 尺 寸	170 mm × 230 mm
印 张	18
字 数	323 千
版 次	2020 年 8 月第 1 版
印 次	2020 年 8 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-7554-6
定 价	120.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话：028-87600562

前言 PREFACE

振动台模型试验是探索土木工程结构地震响应的重要手段，在工程科学发展进程中的作用是不容忽视的，港珠澳大桥、三峡大坝等重大工程的建设实施大多依赖于模型试验的结果。经过近几十年的发展，振动台试验的研究成果已经越来越多地被应用于科学研究和工程实践中。振动台试验以相似理论为媒介，通过建立缩尺模型，把一个大型工程对象浓缩至一个较小尺寸的模型，通过伺服系统在振动台台面输入地震波后，使工程中发生的震害现象在实验室中得以重现。随着土木工程建设规模的发展，工程抗震的研究对象逐渐呈现出以下趋势： 试验对象大型化，如超高建筑、大型水坝、跨海大桥等试验对象的出现； 试验对象复杂化，主要表现在原型组成介质与作用形式复杂（如含软弱夹层边坡与锚索格构梁加固系统）、动力体系复杂（如风-车-桥-地基耦合系统、地震-波浪-桥梁-地基耦合系统）等； 试验内容多样化，试验内容已从以前的砌体结构、框架结构、水坝等逐渐向建筑安全评价、动力作用机理、极端灾害环境下的行为及防灾减灾措施等多样化方向发展。这些现状正逐渐将岩土工程振动台试验推向一个新的局面。

作者第一次开展岩土工程振动台试验是在 2011 年，至今已主持和指导振动台试验 20 余台，对振动台试验的开展有一些自己的理解和总结，为了将这些经验与更多科研工作者分享，特将以下五部分内容整理于本书中：

（1）对岩土工程振动台试验给予了综合介绍。一次完整的岩土工程振动台试验包含以下六步：试验模型的相似设计理论、

模型土体与岩体的设计、模型结构的设计、模型测试元件的选择与布置、地震波的选择及输入、实验数据的处理。本书分别介绍了各大部分的内容及需注意的细节。

(2) 原有地震动生成模式单纯依赖于震源机制、局部场地条件等两方面的估计,针对该问题,本书提出一种充分结合结构特性、局部场地条件以及震源机制等三者之间相互关系的新型人工地震动生成模式,利用优势频率耦合迭代手段,生成一系列与抗震研究目标(即某场地上的结构物)紧密相关的人工地震动场,其中包含具有空间相关性的多维多点人工地震动的生成理论及应用研究。

(3) 在确定振动台试验模型设计参数时,按照传统量纲分析法推导振动台试验的相似关系,所有参数都被一个特征方程所包含,因此无法实现对土、结构和地震波根据各自特性分别进行相似设计,且推导结果要求每个参数在模型相似设计时均满足相似比要求,这在物理模型试验中几乎是不能实现的。针对该问题,本书提出了复杂岩土工程模型试验设计的分离量纲分析理论,并基于该理论建立了模型试验的分离相似设计方法,该方法可使试验设计较容易地满足所有参数要求的相似比,解决了无法同时满足所有参数相似比要求的问题。

(4) 在进行模型土和结构设计时,动应力-动应变关系的相似是最关键也是最难以实现的关系。本书首先对传统模型土及岩石的设计方法进行分析,指出传统设计方法的局限性,同时提出了保证动应力-动应变关系相似的模型土和基岩设计方法,并对动应力-动应变关系相似程度的判定体系进行了探讨。除此之外,还对破坏特性相似、液化特性相似的模型土设计及常见模型结构的设计方法进行了介绍。

(5) 本书详细介绍了岩土工程振动台试验的实施过程,对模型箱的设计方法、常见传感器性能及使用方法、输入地震波的生成及

选取方法进行了说明。同时还对常见的振动台试验数据处理手段进行了说明。

本书对岩土工程振动台试验的开展和数据分析等具有积极的推动作用,所提出的分离量纲分析理论及新型相似材料设计方法均属于理论和实践的源头创新,具有较大的发展潜力,可保证在未来较长一段时间内满足模型试验研究对象的需求。本书研究内容可在一定程度上缓解试验对象日趋大型化、复杂化与振动台试验理论相对滞后的矛盾,对进一步提高土木工程界对大型、复杂工程地震响应模拟的技术水平有一定的促进作用,可对科研人员实现复杂研究对象的精确模拟,对我国重大工程的实施提供强有力的科学技术支撑。

本书的主要内容源自以下研究项目的成果:国家自然科学基金(51708163, 51808466)、国防基础科研计划(A0220110003, B0220133003)、国家“973计划项目”(2011CB013600-G)、海南大学科研启动经费项目[KYQD(ZR)1722]等课题。

本书的成果是在海南大学土木建筑工程学院和西南交通大学土木工程学院完成的,书中的工程实例均来源于西南交通大学张建经老师和海南大学王志佳老师的课题项目,在开展各个振动台试验的过程中,重庆交通科研设计院桥梁工程分院和中国核动力西南研究院设计院地震台实验室给予了大力支持,在此对他们多年的支持表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和欠妥之处,敬请读者不吝指正。

作者

2019年1月18日

目录 CONTENTS



1	引 言	001
2	人工合成地震动的生成与输入	006
2.1	人工地震动生成的时域调制法和频域调制法	006
2.2	人工地震动的输入	043
2.3	输入波中频率成分的调整	060
2.4	多点相似性波形的生成及输入	067
2.5	输入波形的反应谱与设计谱拟合	074
2.6	本章小结	080
3	振动台模型试验相似律	082
3.1	试验模型相似的概念	082
3.2	相似常数计算方法	084
3.3	模型试验的分离相似设计方法	094
3.4	模型试验分离相似设计实例	101
4	岩土工程振动台试验模型土和基岩相似材料设计	117
4.1	振动台试验相似材料的选择原则	117
4.2	土体动应力-动应变相似关系研究	118
4.3	动力响应特性相似的模型土设计方法	153
4.4	破坏特性相似的振动台试验模型土设计方法	157
4.5	破坏性振动台试验模型相似材料设计方法验证	165
4.6	液化特性相似的模型土设计方法	177
4.7	波传播特性相似的模型基岩设计方法	179
5	岩土工程振动台试验常用模型结构设计方法	190

5.1	常用模型结构相似材料介绍	190
5.2	抗滑桩结构设计	190
5.3	桩板墙结构设计	192
5.4	锚索(杆)结构设计	192
5.5	隧道与地铁车站结构设计	194
6	岩土工程振动台试验测量元件及实施过程	197
6.1	试验设备的选择	197
6.2	模型试验测试元件	199
6.3	振动台试验实施	230
7	振动台试验的数据处理	242
7.1	数据处理异点剔除	242
7.2	数字滤波	242
7.3	反应谱计算	248
7.4	结构自振周期和振型的计算方法	254
7.5	趋势项的消除	257
7.6	振动信号的积分和微分	260
7.7	振动信号的时域分析	264
7.8	振动信号的频域分析	267
7.9	标定变换	268
	参考文献	272

1 引言

地球各大板块之间相互挤压碰撞会造成板块边缘及内部产生错动和破裂，使地壳内部储存的能量得到快速释放，能量释放后，会以波的形式传到地表引起地面振动，这种地面运动就是地震^[1]。地震的突发性极强，如果一次大地震发生在人类的活动区附近，会造成严重的人员伤亡。目前，人类观测到的最大的地震是1960年5月22日发生在南美洲西南部的Mw9.5级智利大地震^[2]，这次地震共造成2 000多人死亡，经济损失达58亿美元。随着时间的推移，抗震技术虽然不断发展，但由于城市化速度不断加快，人类活动范围不断扩张，近年来世界范围内频发的大地震造成的人员和财产损失纪录却不断上升（如图1-1）。

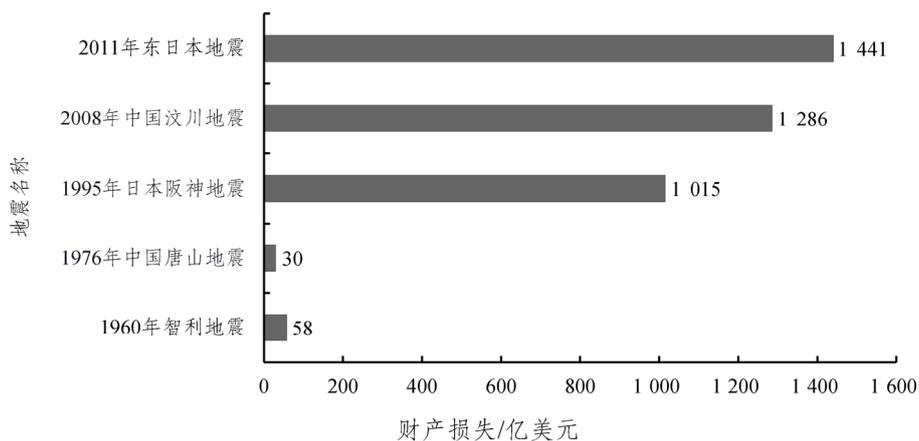


图 1-1 典型大地震造成的经济损失

如：1976年7月28日，我国河北省唐山市（东经118.2°，北纬39.6°）发生了里氏7.8级（矩震级7.5级）地震，释放的能量相当于400颗广岛原子弹爆炸，23 s内，整个唐山陷入瘫痪，682 267间民房中有656 136间受到严重损坏，造成242 769人死亡，16.4万人重伤，直接经济损失超过了30亿美元^[3]；1995年1月17日发生在日本阪神的里氏7.3级大地震，直接导致的

死亡人数超过了 6 500 人，许多桥梁和高速公路受到了破坏，直接经济损失达到了 1 015 亿美元^[4,5]；2008 年 5 月 12 日，发生在我国四川省汶川县的里氏 8 级大地震，震动几乎波及全中国，直接导致 69 227 人死亡，17 923 人失踪，374 643 人受伤，各种城镇基础设施及房屋都遭到了严重破坏，直接经济损失达 1 286 亿美元^[6,7]；2011 年 3 月 11 日，日本东北部海域发生了里氏 9.0 级地震^[8]，并引发超级海啸，影响了太平洋沿岸的大部分地区，造成约 20 000 人遇难，直接经济损失达 1 441 亿美元，间接损失无法估量，同时，地震还造成了福岛第一核电站 1~4 号机组发生严重的核泄漏，造成的核灾难等级与切尔诺贝利事件同级，这次强震使地球自转加快 $1.6 \mu\text{s}$ ，整个本州岛向东移动约 3.6 m。以上历次大地震的震害资料均表明：由地震引起的强震地面运动及地面永久位移会使建筑物和构筑物倒塌、重要设备和设施遭到损坏、通信交通中断、生命线工程设施等遭到破坏。而从我国 2015 年发布的地震区划图可以看出^[9]，国内很多城市都处在地震高发区，而城市恰好是岩土工程结构和生命线设施聚集的地区，这就使得震区工程结构和生命线设施的抗震设计问题得以凸显。

目前常用于研究工程结构地震响应的手段有：震害资料分析^[10-12]、（离心）振动台模型试验^[13,14]、数值分析^[15,16]和抗震计算理论分析^[17,18]。振动台模型试验是目前重现地震的重要手段，在结构地震响应研究工作中得到了广泛应用。振动台试验以相似理论为媒介，通过建立缩尺模型，把一个大型工程对象浓缩至一个较小尺寸的模型，通过伺服系统在振动台台面输入地震波后，使工程中发生的震害现象在实验室中得以重现（如图 1-2 和图 1-3）。经过近几十年的发展，振动台试验已经越来越多地被应用在科学研究和工程实践当中，同时，也有大量的新问题不断出现。

1. 试验对象的大型化

随着国民经济的发展，工程界出现了许多前所未有的大型工程，如高陡边坡、地铁车站、核电站及附属设施和大型水坝等，它们的地震安全性问题对振动台试验提出了更高的要求（如图 1-4）。为了达到理想的试验效果，得到准确的变化规律，需要加大振动台台面的尺寸、提高振动台的承载力，从而满足试验对象大型化的要求，但是大型振动台试验的修建和维护费用很高，这又使得研究人员必须适当控制振动台建造的规模，这时就需要在原有试验理论基础上进行突破，建立新的适合大比尺模型的相似设计体系及模型材料设计方法，以解决试验对象大型化与振动台台面尺寸有限之间的矛盾。



图 1-2 CCTV 主楼振动台试验



图 1-3 上海环球金融中心振动台试验



图 1-4 某高陡边坡地震安全性评价振动台试验

2. 试验对象的复杂化

随着计算机和数值模拟技术的不断发展，一般的工程问题只需进行理论计算或者数值模拟就可以解决，不需要借助模型试验。例如日本坝工设计规范规定，高度在 60 m 以下的拱坝，一般不需要进行试验^[19]。所以，振动台模型试验的重点越来越倾向解决重大、复杂的岩土和结构工程问题，尤其是对于没有建立数学物理方程的复杂问题，振动台试验就成为唯一探索复杂结构地震响应的研究手段。面对这些复杂的研究对象，研究人员需要对已有的相似设计方法进行深化拓展，以充分模拟复杂模型的各个影响因素，同时还需要研究人员不断发展新的相似材料，以满足复杂研究对象物理特性的模拟要求。

3. 试验设备飞速发展而配套理论技术相对落后

目前，世界上已建成百余座振动台设备，但其发展势头依然强劲。从开始的输入规则波到现在的随机波，从开始的单个作动器单独工作到现在的多个作动器共同工作，从开始的单向输入到现在的三向六自由度，从开始的单台工作到现在的多台协同工作，振动台试验设备的发展非常迅速，可以开展的试验类型更加多样化，可以模拟的对象更为复杂，可以研究的内容更加丰富，这就要求有更完善的模型试验相似设计体系、更丰富的相似材料与更高精尖的试验技术，才能使先进试验设备的优势得到充分发挥。

考虑到当前振动台试验在理论和实践上还有诸多问题需要解决，故本书将振动台试验开展过程中作者的经验与更多科研工作者分享，主要内容包含以下四部分：

(1) 在对岩土工程振动台模型试验给予介绍后，首先对人工地震动的模拟进行了研究，原有地震动生成模式单纯依赖于震源机制、局部场地条件两方面的估计，针对该问题，本书提出一种充分结合结构特性、局部场地条件以及震源机制三者之间相互关系的新型人工地震动生成模式，利用优势频率耦合迭代手段，生成一系列与抗震研究目标（即某场地上的结构物）紧密相关的人工地震动场，其中包含具有空间相关性的多维多点人工地震动的生成理论及应用研究。

(2) 在确定振动台试验模型设计参数时，按照传统量纲分析法推导振动台试验的相似关系，所有参数都被一个特征方程所包含，因此无法实现对土、结构和地震波根据各自特性分别进行相似设计，且推导结果要求每个参数在模型相似设计时均满足相似比要求，这在物理模型试验中几乎是不能实现的。针对该问题，本书提出了复杂岩土工程模型试验设计的分离量纲分析理论，并基于该理论建立了模型试验的分离相似设计方法，该方法可使试验设计较容易地满足所有参数要求的相似比，解决了无法同时满足所有参数相似比要求的问题。

(3) 在进行模型土和结构设计时，动应力-动应变关系的相似是最关键也是最难以实现的。本书首先对传统模型土及基岩的设计方法进行分析，指出传统设计方法的局限性，同时提出了保证动应力-动应变关系相似的模型土和基岩设计方法，并对动应力-动应变关系相似程度的判定体系进行了探讨。除此之外，本书还对破坏特性相似、液化特性相似的模型土设计及常见模型结构的设计方法进行了介绍。

(4) 详细介绍了岩土工程振动台试验的实施过程，对模型箱的设计方

法、常见传感器性能及使用方法、输入地震波的生成及选取方法进行了说明。同时本书还对常见的振动台试验数据处理手段进行了说明。

本书对岩土工程振动台试验准备和数据分析等工作具有积极的推动作用，所提出的分离量纲分析理论及新型相似材料设计方法均属于理论和实践的源头创新，具有较大的发展潜力，可保证在未来较长一段时间内满足模型试验研究对象的需求。研究的相关理论和技术可有效缓解试验对象日趋大型化、复杂化与振动台试验理论相对滞后的矛盾，对提高土木工程界对大型、复杂工程地震响应模拟的技术水平有一定的促进作用，可对科研人员实现复杂研究对象的精确模拟，对我国重大工程的实施提供有力的科学技术保障。