



同济大学 1907-2017
Tongji University



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

周颖 吕西林 著

复杂高层结构的 整体抗震实验与非线性分析

Structural Model Test and Nonlinear Seismic
Analysis of a Complex Building



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

周颖 吕西林 著

复杂高层结构的 整体抗震实验与非线性分析

Structural Model Test and Nonlinear Seismic
Analysis of a Complex Building



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

在充分了解目前工程抗震动力试验和计算方法现状的基础上,本书按模拟地震振动台试验和非线性时程分析两个步骤,完成了模拟地震振动台试验模型设计、试验方案到试验结果后处理的全过程;对结构的动力特性、位移反应等结果进行分析;提出一种建立构件试验恢复力模型的方法。

本书适合土木工程专业人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

复杂高层结构的整体抗震试验与非线性分析 / 周颖,
吕西林著. —上海: 同济大学出版社, 2018.9
(同济博士论丛 / 伍江总主编)
ISBN 978-7-5608-7426-5

I. ①复… II. ①周…②吕… III. ①高层建筑—高
层结构—抗震试验②高层建筑—高层结构—非线性—分析
IV. ①TU973

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 238476 号

复杂高层结构的整体抗震试验与非线性分析

周 颖 吕西林 著

出 品 人 华春荣 责任编辑 葛永霞 熊磊丽

责任校对 谢卫奋 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)
经 销 全国各地新华书店
排版制作 南京展望文化发展有限公司
印 刷 浙江广育爱多印务有限公司
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 12.25
字 数 245 000
版 次 2018 年 9 月第 1 版 2018 年 9 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-7426-5

定 价 60.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

“同济博士论丛”编写领导小组

组 长：杨贤金 钟志华

副 组 长：伍 江 江 波

成 员：方守恩 蔡达峰 马锦明 姜富明 吴志强
徐建平 吕培明 顾祥林 雷星晖

办公室成员：李 兰 华春荣 段存广 姚建中

“同济博士论丛”编辑委员会

总 主 编：伍 江

副 总 主 编：雷星晖

编委会委员：（按姓氏笔画顺序排列）

丁晓强	万 钢	马卫民	马在田	马秋武	马建新
王 磊	王占山	王华忠	王国建	王洪伟	王雪峰
尤建新	甘礼华	左曙光	石来德	卢永毅	田 阳
白云霞	冯 俊	吕西林	朱合华	朱经浩	任 杰
任 浩	刘 春	刘玉擎	刘滨谊	闫 冰	关侗红
江景波	孙立军	孙继涛	严国泰	严海东	苏 强
李 杰	李 斌	李风亭	李光耀	李宏强	李国正
李国强	李前裕	李振宇	李爱平	李理光	李新贵
李德华	杨 敏	杨东援	杨守业	杨晓光	肖汝诚
吴广明	吴长福	吴庆生	吴志强	吴承照	何品晶
何敏娟	何清华	汪世龙	汪光焘	沈明荣	宋小冬
张 旭	张亚雷	张庆贺	陈 鸿	陈小鸿	陈义汉
陈飞翔	陈以一	陈世鸣	陈艾荣	陈伟忠	陈志华
邵嘉裕	苗夺谦	林建平	周 苏	周 琪	郑军华
郑时龄	赵 民	赵由才	荆志成	钟再敏	施 骞
施卫星	施建刚	施惠生	祝 建	姚 熹	姚连璧

袁万城	莫天伟	夏四清	顾 明	顾祥林	钱梦騄
徐 政	徐 鉴	徐立鸿	徐亚伟	凌建明	高乃云
郭忠印	唐子来	閻耀保	黄一如	黄宏伟	黄茂松
戚正武	彭正龙	葛耀君	董德存	蒋昌俊	韩传峰
童小华	曾国荪	楼梦麟	路秉杰	蔡永洁	蔡克峰
薛 雷	霍佳震				

秘书组成员：谢永生 赵泽毓 熊磊丽 胡晗欣 卢元姍 蒋卓文

总序

在同济大学 110 周年华诞之际，喜闻“同济博士论丛”将正式出版发行，倍感欣慰。记得在 100 周年校庆时，我曾以《百年同济，大学对社会的承诺》为题作了演讲，如今看到付梓的“同济博士论丛”，我想这就是大学对社会承诺的一种体现。这 110 部学术著作不仅包含了同济大学近 10 年 100 多位优秀博士研究生的学术科研成果，也展现了同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色，向建设世界一流大学的目标迈出的坚实步伐。

坐落于东海之滨的同济大学，历经 110 年历史风云，承古续今、汇聚东西，秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念，发扬自强不息、追求卓越的精神，在复兴中华的征程中同舟共济、砥砺前行，谱写了一幅幅辉煌壮美的篇章。创校至今，同济大学培养了数十万工作在祖国各条战线上的人才，包括人们常提到的贝时璋、李国豪、裘法祖、吴孟超等一批著名教授。正是这些专家学者培养了一代又一代的博士研究生，薪火相传，将同济大学的科学研究和学科建设一步步推向高峰。

大学有其社会责任，她的社会责任就是融入国家的创新体系之中，成为国家创新战略的实践者。党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央高度重视科技创新，对实施创新驱动发展战略作出一系列重大决策部署。党的十八届五中全会把创新发展作为五大发展理念之首，强调创新是引领发展的第一动力，要求充分发挥科技创新在全面创新中的引领作用。要把创新驱动发展作为国家的优先战略，以科技创新为核心带动全面创新，以体制机制改

革激发创新活力,以高效率的创新体系支撑高水平的创新型国家建设。作为人才培养和科技创新的重要平台,大学是国家创新体系的重要组成部分。同济大学理当围绕国家战略目标的实现,作出更大的贡献。

大学的根本任务是培养人才,同济大学走出了一条特色鲜明的道路。无论是本科教育、研究生教育,还是这些年摸索总结出的导师制、人才培养特区,“卓越人才培养”的做法取得了很好的成绩。聚焦创新驱动转型发展战略,同济大学推进科研管理体系改革和重大科研基地平台建设。以贯穿人才培养全过程的一流创新创业教育助力创新驱动发展战略,实现创新创业教育的全覆盖,培养具有一流创新力、组织力和行动力的卓越人才。“同济博士论丛”的出版不仅是对同济大学人才培养成果的集中展示,更将进一步推动同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色、明确大学定位、培养创新人才。

面对新形势、新任务、新挑战,我们必须增强忧患意识,扎根中国大地,朝着建设世界一流大学的目标,深化改革,勠力前行!

万 钢

2017年5月

论丛前言

承古续今,汇聚东西,百年同济秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念,注重人才培养、科学研究、社会服务、文化传承创新和国际合作交流,自强不息,追求卓越。特别是近20年来,同济大学坚持把论文写在祖国的大地上,各学科都培养了一大批博士优秀人才,发表了数以千计的学术研究论文。这些论文不但反映了同济大学培养人才能力和学术研究的水平,而且也促进了学科的发展和国家的建设。多年来,我一直希望能有机会将我们同济大学的优秀博士论文集中整理,分类出版,让更多的读者获得分享。值此同济大学110周年校庆之际,在学校的支持下,“同济博士论丛”得以顺利出版。

“同济博士论丛”的出版组织工作启动于2016年9月,计划在同济大学110周年校庆之际出版110部同济大学的优秀博士论文。我们在数千篇博士论文中,聚焦于2005—2016年十多年间的优秀博士学位论文430余篇,经各院系征询,导师和博士积极响应并同意,遴选出近170篇,涵盖了同济的大部分学科:土木工程、城乡规划学(含建筑、风景园林)、海洋科学、交通运输工程、车辆工程、环境科学与工程、数学、材料工程、测绘科学与工程、机械工程、计算机科学与技术、医学、工程管理、哲学等。作为“同济博士论丛”出版工程的开端,在校庆之际首批集中出版110余部,其余也将陆续出版。

博士学位论文是反映博士研究生培养质量的重要方面。同济大学一直将立德树人作为根本任务,把培养高素质人才摆在首位,认真探索全面提高博士研究生质量的有效途径和机制。因此,“同济博士论丛”的出版集中展示同济大

学博士研究生培养与科研成果,体现对同济大学学术文化的传承。

“同济博士论丛”作为重要的科研文献资源,系统、全面、具体地反映了同济大学各学科专业前沿领域的科研成果和发展状况。它的出版是扩大传播同济科研成果和学术影响力的重要途径。博士论文的研究对象中不少是“国家自然科学基金”等科研基金资助的项目,具有明确的创新性和学术性,具有极高的学术价值,对我国的经济、文化、社会发展具有一定的理论和实践指导意义。

“同济博士论丛”的出版,将会调动同济广大科研人员的积极性,促进多学科学术交流、加速人才的发掘和人才的成长,有助于提高同济在国内外的竞争力,为实现同济大学扎根中国大地,建设世界一流大学的目标愿景做好基础性工作。

虽然同济已经发展成为一所特色鲜明、具有国际影响力的综合性、研究型大学,但与世界一流大学之间仍然存在着一定差距。“同济博士论丛”所反映的学术水平需要不断提高,同时在很短的时间内编辑出版 110 余部著作,必然存在一些不足之处,恳请广大学者,特别是有关专家提出批评,为提高同济人才培养质量和同济的学科建设提供宝贵意见。

最后感谢研究生院、出版社以及各院系的协作与支持。希望“同济博士论丛”能持续出版,并借助新媒体以电子书、知识库等多种方式呈现,以期成为展现同济学术成果、服务社会的一个可持续的出版品牌。为继续扎根中国大地,培育卓越英才,建设世界一流大学服务。

伍 江

2017 年 5 月

前言

在地震灾害尚不可避免、结构形式又趋于多样化的时代背景下,对结构尤其是复杂高层结构进行整体抗震性能研究,在改进抗震性能评估方法、促进工程设计合理化方面具有极其现实的意义。在充分了解目前工程抗震动力试验和计算方法现状的基础上,本书将课题研究分为模拟地震振动台试验和非线性时程分析两部分,主要包括:

(1) 针对某底部框支、立面开大洞的复杂高层短肢剪力墙结构,完成模拟地震振动台试验模型设计、试验方案到试验结果后处理的全过程;提出通过已知参数的幂指数列变换使得待求参数的幂指数为零来确定待求参数相似常数的简便“似量纲分析法”;以正截面抗弯等效和斜截面抗剪等效为原则,推导出能考虑混凝土强度和钢筋强度采用不同相似常数影响的模型配筋公式,并应用这些公式完成该复杂高层整体模型结构的设计施工;观察试验现象,处理采集数据,对结构的动力特性、位移反应等结果进行分析。

(2) 在明确动力弹塑性分析(包括输入地震波的选取、建立结构构件的分析模型和恢复力模型、动力反应分析的求解、结果的分析判断)的基础上,以5个型钢混凝土柱为例,提出一种建立构件试验恢复力模型

的方法;比较目前流行的用于构件恢复力模型计算的通用软件,选用 Section Builder[®]对构件的本构关系进行计算。之后分别建立该复杂高层短肢剪力墙模型结构和原型结构的 Strand 7 计算模型,输入 Section Builder[®]确定的主要构件本构关系,以动力试验的台面输入为基础分别对模型和原型结构进行非线性时程分析,将计算和试验动力反应进行详细的比较分析,得到一些计算结论和工程建议。

目 录

总序

论丛前言

前言

第 1 章 结构抗震研究现状及计算方法	1
1.1 引言	1
1.1.1 本课题的研究现状	2
1.1.2 本书的主要内容	5
1.2 结构抗震计算方法的发展	7
1.2.1 基于承载力的设计方法	7
1.2.2 基于损伤/能量的设计方法	9
1.2.3 基于能力的设计方法	11
1.2.4 基于性能的设计方法	12
1.2.5 基于位移的设计方法	19
1.3 结构动力弹塑性分析方法	20
1.3.1 输入地震波的选取	21
1.3.2 计算结果的判断或评价	22
1.4 本章小结	22

第2章 结构构件的简化模型和恢复力模型	23
2.1 引言	23
2.2 简化模型研究	24
2.2.1 结构的简化模型	24
2.2.2 构件的简化模型	26
2.3 恢复力模型研究	30
2.3.1 一种构件的试验恢复力模型研究	30
2.3.2 构件的计算恢复力模型研究	35
2.3.3 通用计算构件恢复力模型软件	37
2.4 本章小结	41
第3章 整体结构动力试验与分析	43
3.1 引言	43
3.2 结构概况	46
3.3 模型设计	49
3.3.1 试验振动台性能	49
3.3.2 模型材料	50
3.3.3 模型相似设计	51
3.3.4 模型施工	54
3.4 试验方案	56
3.4.1 试验定位	56
3.4.2 传感器的布置	56
3.4.3 输入地震激励	58
3.4.4 试验进程	60
3.5 试验结果及分析	62
3.5.1 模型结构试验现象	62
3.5.2 模型结构动力特性	66
3.5.3 模型结构惯性力及层间剪力	68

3.6	原型结构动力反应分析	72
3.6.1	原型结构动力特性	72
3.6.2	原型结构加速度反应	76
3.6.3	原型结构惯性力及楼层剪力	77
3.6.4	原型结构位移反应	79
3.6.5	原型结构刚度分布	81
3.6.6	原型结构倾覆力矩分布	84
3.7	结构动力试验讨论	84
3.8	整体结构动力试验分析小结	87
3.9	本章小结	90
第4章	结构分析软件	91
4.1	引言	91
4.2	国内外结构设计计算软件	92
4.2.1	空间杆系模型类计算软件	92
4.2.2	板-梁墙元模型类计算软件	93
4.2.3	壳元墙元模型类计算软件	94
4.3	有限元分析基本原理	95
4.3.1	有限元分析总体思路	95
4.3.2	有限元分析基本原理	95
4.4	Strand 7 软件介绍	97
4.4.1	Strand 7 软件介绍	97
4.4.2	Strand 7 常用线单元	98
4.4.3	Strand 7 常用面单元	102
4.5	本章小结	104
第5章	整体结构弹塑性时程计算分析	106
5.1	引言	106

5.2	模型结构的弹塑性动力时程计算分析	106
5.2.1	计算相关信息	107
5.2.2	动力特性计算结果	112
5.2.3	弹性静力计算结果	114
5.2.4	单元材料非线性关系	116
5.2.5	弹塑性动力时程计算结果及分析	118
5.3	原型结构的弹塑性动力时程计算分析	132
5.3.1	计算相关信息	132
5.3.2	动力特性计算结果	133
5.3.3	弹塑性动力时程计算结果及分析	134
5.4	弹塑性时程分析小结	140
5.5	本章小结	142
第6章	结论与展望	143
6.1	本书主要结论	143
6.2	进一步工作方向	145
	参考文献	146
	附录 A 国内外主要模拟地震振动台汇总	162
	附录 B Strand 7 应用流程总结	170
	附录 C 模型结构配筋图表	174
	后记	177

第 1 章

结构抗震研究现状及计算方法

1.1 引言

我国是一个地震多发的国家^[1,2]。多次震害使人们认识到地震作用对于结构的安全性影响很大。地震动产生的地震波在场地土中传播,引起场地土的反应,这种反应又通过结构的基础传递给上部结构,激起上部结构的反应造成破坏(图 1-1)。地震作用的大小与场地、结构本身的特性密切相关,结构的质量与刚度的变化将直接影响地震作用的强弱^[3]。历史的经验和教训表明,复杂体形的高层建筑结构体系容易在地震中产生严重破坏^[4,5]。因而,规范规定设计结构要尽可能满足体形简单、规则、对称等要求^[6,7]。而另一方面,由于城市规划和功能等方面的建筑需要以及电子计算机技术和结构分析理论的技术支持,我们周围的复杂体形高层甚至超高层建筑不但不可避免,甚至具有越来越多的趋势。20 世纪 80 年代中期,世界 10 栋最高的大厦中有 9 栋在美国(第 10 栋在加拿大的多伦多),但从 20 世纪 90 年代起,高楼的重心从美国转移到亚洲。目前全球 10 大高楼只有 2 栋在美国(芝加哥的希尔斯大厦和纽约的帝国大厦),其余的都“转移”到亚洲。在这样的时代背景下,研究复杂体型高层建筑在地震作用下