



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

李培振 吕西林 著

结构—地基动力相互作用体系的 振动台试验及计算模拟分析

Shaking Table Testing and Computer Analysis on
Dynamic Soil-Structure Interaction System



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

李培振 吕西林 著

结构—地基动力相互作用体系的 振动台试验及计算模拟分析

Shaking Table Testing and Computer Analysis on
Dynamic Soil-Structure Interaction System

 同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书采用振动台模型试验和数值计算方法研究地震荷载下高层建筑结构—地基动力相互作用的有关规律,从实验和计算分析相结合的角度探讨地基土液化对桩基高层建筑地震反应的影响。

本书适合相关专业高校师生、研究人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

结构—地基动力相互作用体系的振动台试验及计算模

拟分析 / 李培振,吕西林著. —上海:同济大学出版社, 2018. 11

(同济博士论丛 / 伍江总主编)

ISBN 978-7-5608-8175-1

I. ①结… II. ①李… ②吕… III. ①地震模拟试验—振动台试验—研究 IV. ①P315.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 226656 号

结构—地基动力相互作用体系的振动台试验及计算模拟 分析

李培振 吕西林 著

出品人 华春荣 责任编辑 熊磊丽 助理编辑 吴敬醒

责任校对 谢卫奇 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 13

字 数 260 000

版 次 2018 年 11 月第 1 版 2018 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-8175-1

定 价 62.00 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	何晶晶
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 钱梦騷
徐 政 徐 鉴 徐立鸿 徐亚伟 凌建明 高乃云
郭忠印 唐子来 闫耀保 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 卢元姗 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

结构—地基动力相互作用(SSD)对于正确预测软土地区的结构地震反应有非常重要的意义,这是当前地震工程研究领域里一个热点,也是一个难点。本书采用振动台模型试验和数值计算方法研究了地震荷载下高层建筑结构—地基动力相互作用的有关规律,并探讨了地基土液化对桩基高层建筑地震反应的影响。本书主要进行了以下工作:

(1) 在查阅大量国内外文献的基础上,总结并简要评述了关于 SSI 的理论、试验分析方法,概述了目前研究中还存在的一些问题。

(2) 进行了均匀土—箱基—单柱结构及分层土—箱基—高层框架结构动力相互作用体系振动台模型试验,分析了主要试验现象、主要试验结果和规律。试验中采用柔性盛土容器来减小土箱边界效应。

(3) 采用 ANSYS 程序对试验结果进行了验证,分析表明:所建立的三维有限元模型可较好地模拟振动台试验。计算中成功地将土体等效线性化模型并入 ANSYS 程序,考虑了土体与结构交界面的接触效应,合理地模拟了柔性容器,考虑了重力的影响。计算得出的规律与试验结果基本一致,主要有:① 箱基基础底面、侧面发生了土与基础接触面的脱离、滑移现象;② 土体的材料非线性对土体和上部结构的地震反应有较大影响,而接触面效应对上部结构的地震反应有一定的影响,对土体基本没有影响;③ 软土地基对地震动起滤波和隔震作用;④ 在软土地基时,考虑基础转动和平动十分必要;⑤ 基础处的有效地震动输入比自由场地震动小;⑥ 竖向地震动对相互作用体系动力反应

规律没有明显的影响。

(4) 进行了高层建筑实际工程的结构—地基动力相互作用的计算分析。介绍了黏—弹性人工边界及其在 ANSYS 程序中的实现,进行了有关的参数分析。参数分析表明:① 土体纵向边界取 5 倍结构纵向尺寸,土体横向边界取 10 倍结构横向尺寸,并在横向边界处施加黏—弹性人工边界,可较好地模拟无限域土体;② 考虑相互作用后,体系的频率比刚性地基时降低,上部结构的位移反应增加,而加速度反应、最大层间剪力、最大倾覆力矩均比刚性地基时减小;③ 上部结构刚度、上部结构形式、地震激励、土性、基础埋深以及基础形式等参数对相互作用体系的动力特性和地震反应有较大的影响。

(5) 为了研究地基土液化时对桩基高层建筑体系地震反应的影响,简要介绍了分时段等效线性有效应力动力分析方法,且将其中的等效线性化方法改进为逐步叠代非线性方法,并利用 ANSYS 程序的参数化设计语言将这一分析方法并入 ANSYS 程序中,最后分析了液化时桩基—高层建筑体系的地震反应。对于单层砂土—桩基—高层建筑体系来说,砂土的液化对上部结构地震反应有较大的影响;而对于本书采用的上海土—桩基—高层建筑体系来说,砂土层的液化未对上部结构的地震反应产生明显的影响。

目 录

总序

论丛前言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 研究现状	3
1.3 研究方法简介	3
1.3.1 理论方法	4
1.3.2 原型测试	9
1.3.3 室内试验	11
1.4 需进一步研究的问题	12
1.4.1 模型试验与原型观测问题	13
1.4.2 地基土的层状特性研究	13
1.4.3 地基土的非线性问题	14
1.4.4 地基土的材料阻尼机制	14
1.4.5 土—结构接触界面非线性的问题	15
1.4.6 人工边界的问题	15
1.4.7 多相介质模型问题	15
1.4.8 地震作用的输入问题	16
1.4.9 计算模型和分析方法	16
1.5 考虑 SSI 的结构地震反应分析常用电算程序	17
1.5.1 CLASSI 程序	17
1.5.2 FLUSH 和 ALUSH 程序	17

1.5.3	SASSI 程序	18
1.5.4	HASSI 程序	18
1.5.5	通用有限元程序 ANSYS	18
1.6	本书的研究内容	19
第 2 章	土—箱基—结构动力相互作用体系振动台模型试验	21
2.1	引言	21
2.2	试验目的及内容	22
2.3	试验装置	23
2.3.1	地震模拟振动台	23
2.3.2	土体边界模拟和试验容器的设计	23
2.4	试验模型设计	25
2.5	材料性能指标	28
2.5.1	模型土的性能指标	28
2.5.2	混凝土材性试验结果	32
2.5.3	钢筋材性试验结果	32
2.5.4	橡胶材性试验结果	33
2.6	测点布置及量测	33
2.7	加速度输入波的选择	35
2.8	试验加载制度	37
2.9	主要试验结果与规律	39
2.9.1	均匀土—箱基—结构相互作用体系振动台试验	39
2.9.2	分层土—箱基—结构相互作用体系振动台试验	44
2.10	本章小结	49
第 3 章	均匀土—箱基—结构动力相互作用体系振动台试验的计算分析	51
3.1	引言	51
3.2	建模方法和计算方法	51
3.2.1	建模方法	52
3.2.2	计算方法	60
3.3	计算模型的合理性	62
3.3.1	网格划分的合理性	62
3.3.2	考虑土体的材料非线性对计算结果的影响	63

3.3.3	考虑土体与结构接触界面上的状态非线性对计算结果的影响	65
3.3.4	计算与试验结果的比较	65
3.4	均匀土—箱基—结构体系试验的计算结果分析	66
3.4.1	基础滑移、脱离与基底接触压力分布	66
3.4.2	加速度峰值放大系数分布	73
3.4.3	柱顶加速度反应组成分析	74
3.4.4	相互作用对基底地震动的影响	76
3.5	本章小结	77
第4章	分层土—箱基—结构动力相互作用体系振动台试验的计算分析	80
4.1	引言	80
4.2	建模方法和计算方法	80
4.3	计算模型的合理性	82
4.3.1	网格划分的合理性	82
4.3.2	考虑土体的材料非线性对计算结果的影响	83
4.3.3	考虑土体与结构接触界面上的状态非线性对计算结果的影响	85
4.3.4	计算与试验结果的比较	88
4.4	分层土—箱基—结构体系试验的计算结果分析	90
4.4.1	基础滑移、脱离与基底接触压力分布	90
4.4.2	加速度峰值放大系数分布	94
4.4.3	结构顶层加速度反应组成分析	95
4.4.4	相互作用对基底地震动的影响	95
4.4.5	软土的滤波隔震作用	97
4.4.6	相互作用对结构动力反应的影响	98
4.4.7	竖向地震激励的影响	105
4.5	结构—地基相互作用体系地震反应的动画显示	108
4.6	本章小结	108
第5章	结构—地基动力相互作用体系的实例分析	111
5.1	引言	111
5.2	工程概况	111

5.3	建模方法和计算方法	112
5.3.1	土体动力本构模型的选取	113
5.3.2	黏—弹性人工边界的施加	117
5.4	参数分析	121
5.4.1	土体计算区域的确定	121
5.4.2	上部结构刚度的影响	125
5.4.3	上部结构形式的影响	129
5.4.4	不同地震激励的影响	138
5.4.5	土性不同的影响	140
5.4.6	基础埋深的影响	144
5.4.7	基础形式的影响	147
5.5	本章小结	150
第6章	考虑地基土液化影响的桩基高层建筑体系地震反应分析	152
6.1	概述	152
6.2	逐步叠代非线性分析方法	153
6.3	有关的计算模型	155
6.3.1	桩基地震反应计算的简化假定	155
6.3.2	土的静力本构模型	156
6.3.3	土的动力本构模型	157
6.3.4	振动孔隙水压力增长模型	159
6.4	分时段逐步叠代非线性有效应力动力分析法的基本步骤	162
6.5	考虑液化的结构—地基动力相互作用体系地震反应分析	163
6.5.1	土体的地震反应分析	163
6.5.2	砂土—桩基—高层建筑体系的地震反应分析	167
6.5.3	上海地区典型建筑的地震反应分析	170
6.6	本章小结	172
第7章	结语	173
	参考文献	178
	后记	188

第 1 章

绪 论

1.1 引 言

地震作为一种重大的自然灾害,给人类带来的灾难不仅仅是山崩地裂、房屋倒塌,还有生产的破坏、人员的伤亡,给人类社会造成巨大的损失。因此,研究建筑物在地震作用下的反应,以便在设计过程中提高建筑物的抗震性能,成为摆在工程科技人员面前的一个重要课题。

传统的分析方法假设地基为刚性,即不考虑结构和地基的动力相互作用。这种方法比较简单,但不符合实际情况。对于大型建筑,如高层建筑、核电站、海洋平台及大型水坝或类似工程,由于地基的柔性和无限性,使得按刚性地基假定计算出来的结构动力特性和动力反应,与将地基和结构作为一个整体计算出来的结果有所不同。显然,由于结构和地基的振动和变形是相互联系的,它们之间必然存在相互作用。而且随着建筑物的增大,相互作用越来越明显。因此,有必要在抗震计算中考虑相互作用。现在计算手段越来越先进,也使考虑相互作用的抗震计算成为可能。所谓动力相互作用是指当建筑物受地震或其他形式的动载作用而振动时,上部结构的振动惯性力必然要通过基础传给地基,从而引起地基的振动和变形或使地基的振动和变形发生改变,而地基的振动和变形又反过来影响结构的振动和变形。

一般认为,土和结构的动力相互作用主要表现在两个方面:① 改变结构周围地基土的运动。由于结构的反馈作用将改变地基运动的频谱组成,使接近结构自振频率的成分得到加强;同时,地基的加速度幅值同无结构存在时(即所谓自由场运动)相比要小一些。② 改变结构的动力特性。考虑地基的变形相当于认为体系刚度降低,所以基本周期要延长。此外,在考虑相互作用时,结构振动