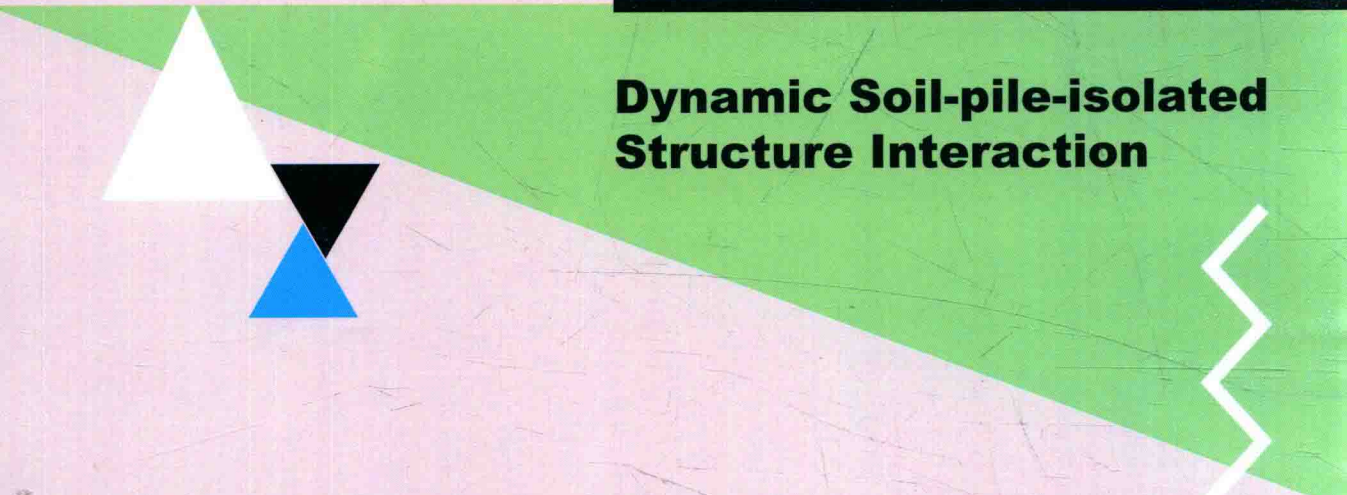




土－桩－隔震 结构动力相互作用

庄海洋 于旭 著



**Dynamic Soil-pile-isolated
Structure Interaction**

中国建筑工业出版社

土-桩-隔震结构动力相互作用

Dynamic Soil-pile-isolated Structure Interaction

庄海洋 于 旭 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

土-桩-隔震结构动力相互作用/庄海洋, 于旭著. —北

京: 中国建筑工业出版社, 2016. 3

ISBN 978-7-112-19056-0

I. ①土… II. ①庄…②于… III. ①隔震-抗震结构-
结构动力学 IV. ①TU352②TU311. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 024908 号

本书是作者经过多年潜心研究之后完成的专著。隔震技术是结构抗震领域中的一个热点。作者通过本书向广大读者展示了在此领域的研究高度和深度。本书共包括 10 章: 第 1 章 绪论, 第 2 章 土-桩-隔震结构动力相互作用有限元分析方法, 第 3 章 土-桩-隔震结构动力相互作用振动台模型试验技术, 第 4 章 刚性地基上隔震结构动力反应的模型试验研究, 第 5 章 一般土性地基上土-桩-隔震结构动力相互作用模型试验研究, 第 6 章 软夹层地基土-桩-隔震结构动力相互作用模型试验研究, 第 7 章 不同土性地基上隔震结构振动特性的对比分析, 第 8 章 土-桩-隔震结构动力相互作用的数值计算与模型试验对比分析, 第 9 章 土-桩-隔震结构动力相互作用的简化计算方法, 第 10 章 考虑 SSI 效应时土-桩-隔震结构动力相互作用动力的能量分析法。

全书具有相当的理论深度, 适合广大建筑结构、岩土工程专业的师生阅读使用。

责任编辑: 张伯熙

责任设计: 董建平

责任校对: 陈晶晶 姜小莲

土-桩-隔震结构动力相互作用

庄海洋 于旭 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

唐山龙达图文制作有限公司制版

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 9¼ 字数: 228 千字

2016 年 3 月第一版 2016 年 3 月第一次印刷

定价: 28.00 元

ISBN 978-7-112-19056-0

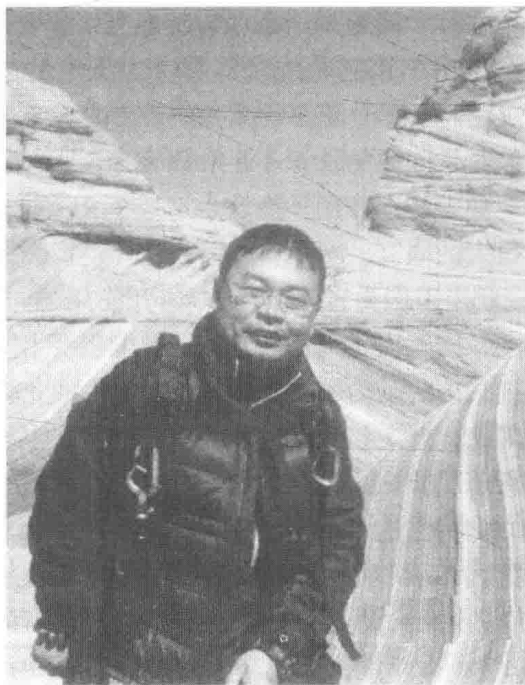
(28317)

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)

作者简介



庄海洋，1978年2月生，南京工业大学教授，东南大学和山东大学博士后，江苏宿迁人，国家注册土木（岩土）工程师。现任南京工业大学岩土工程研究所副所长、交通学院轨道交通系主任。主要从事土动力学、地铁地下与高架结构抗震和土-隔震结构动力相互作用等相关的教学与科研工作。目前，已主持国家自然科学基金项目2项，省部级项目6项，参与国家自然科学基金重大研究计划培育项目、面上项目和省重点项目5项。已在《Soil Dynamic & Earthquake Engineering》、《Bulletin of Earthquake Engineering》、《Bulletin of Engineering Geology and Environment》和《岩土工程学报》等期刊上发表学术论文70余篇，其中被SCI、EI检索论文近四十篇。曾获“江苏省优秀博士学位论文”、军队科技进步一等奖、中国地震局防震减灾优秀成果奖一等奖。2012年入选江苏省“青蓝工程”优秀中青年骨干教师培养计划、2013年入选江苏省“333高层次人才工程”中青年科学技术带头人培养计划，2012受“江苏省首批高校优秀中青年和校长境外研究计划”项目资助赴美国南加州大学（University of Southern California）访学一年。现兼任中国岩石力学与工程学会地下工程分会理事、中国土木工程学会土力学与岩土工程青年工作委员会委员、江苏省地震学会地震工程专业委员会委员、国际土力学与岩土工程学会会员。

序 一

土与结构动力相互作用的科学问题无论是在岩土地震工程领域还是在结构抗震工程领域都是一个重要的研究方向。由于该问题的求解需考虑土体的边界效应、动力接触非线性、材料非线性和输入地震动特征等,诸多因素组合在一起使得求解动力相互作用问题变得尤为困难。鉴于目前对该科学问题的认识不足和研究条件所限,在现有的结构抗震设计中通常都不考虑土与结构的动力相互作用,由此也造成了相关抗震设计方法和计算方法在生产实践中的应用受到了很大的限制。

土-桩-隔震结构动力相互作用作为土-结构动力相互作用的一个研究方向,既有土-结构动力相互作用的一般特点,同时由于隔震的加入,又具有了相互作用效应的新特征,其必然对特殊地基条件下隔震结构的动力学特征、动力反应程度和隔震层的隔震效率等等方面都将产生不利的影响。因此,开展该问题的研究具有重要的科学意义和工程实用价值。

青年学者庄海洋教授所著《土-桩-隔震结构动力相互作用》一书主要基于土与结构动力相互作用对隔震结构动力学特性的影响出发,通过系列振动台模型试验,探索了不同地基上土-桩-隔震结构动力相互作用机理及其程度,以及对隔震结构动力反应特征及其影响规律,并通过建立的土-桩-隔震结构动力相互作用的整体三维有限元分析,验证了模型试验中相关的重要发现与规律。同时,基于模型试验和数值分析的研究成果,建立了土-桩-隔震结构动力相互作用的简化分析模型和计算方法以及该相互作用体系的能力分析法。书中介绍了作者在土-桩-隔震结构相互作用方面的研究成果,不仅能够为隔震结构技术的进一步推广应用提供科学依据,其相关大型振动台模型试验技术、有限元数值分析方法和相关的简化理论分析方法也能为隔震结构的抗震分析提供有效的实用计算方法。

相信该书的出版、发行,对推动土与结构相互作用理论和隔震结构技术应用等方面的教学、研究和工程实践工作大有裨益,相信本书会成为相关专业人员的必备用书。



长江学者奖励计划特聘教授

2016年1月9日

序 二

青年学者庄海洋教授于 2001~2006 年在南京工业大学师从于我攻读研究生学位。在此期间优秀表现和突出的研究成果,他博士毕业后留校任教,继续在我的课题组从事土动力学、地铁地下结构抗震和土与结构动力相互作用等科学问题的研究。这期间,他对学业和研究孜孜不倦、锲而不舍,非常敬业。十余年来,庄海洋教授在岩土地震工程学科的研究方面做了不少有价值的工作,作为他的研究生导师、课题组负责人和同事,对于他在研究工作中取得的进展和贡献我也深感自豪和欣慰。

目前有关结构主、被动控制的设计理论大多数是建立在刚性地基假定之上,把结构的基础和地基看成是刚性体,不考虑地基对结构动力反应特性的影响。对于建在基岩上或者坚硬场地上的结构,地震波可以近似不改变地作用在结构的基底上,上述假设是可以的。但是,软弱场地条件下基岩输入地震动将出现长周期变化,同时建筑物—地基的相互作用对输入地震波特性和土的动力学特性都将发生明显变化,从而导致在刚性地基假定下设计的结构隔震控制体系在柔性地基条件下并未能体现出较好的控制效果。有鉴于此,开展土—桩—隔震结构动力相互作用机理及其程度的研究具有重要的科学意义和工程应用价值。

本人有幸对庄海洋教授即将由中国建筑工业出版社出版的著作《土—桩—隔震结构动力相互作用》先睹为快。本书主要介绍了土—桩—隔震结构动力相互作用科学问题涉及的大型振动台模型试验技术、三维整体有限元数值模拟技术和简化的理论分析方法等,重点介绍了作者对该科研问题的最新研究成果和重要发现。据我所知,土—桩—隔震结构动力相互研究工作是庄海洋教授在近三年延续已逝宰金珉教授的科研方向所开展的科学研究,在有限的科研经费资助和较短的科研时间内能在该研究方向取得如此的科研成果,实属不易。也正因为我对庄海洋教授在这一领域的研究工作非常了解,感到有必要向读者推荐,便欣然为序。

庄海洋教授勤奋敬业,严谨的科学精神受到众多业内同行的称赞,对他的著作面世表示祝贺,并希望他再接再厉、精益求精,在此基础上做出更好和更多的研究成果。

陈国兴

2015 年 12 月 25 日

于南京

前 言

已有地震震害调查已充分说明,地震房屋倒塌是造成人员伤亡的主要原因。为了提高建(构)筑物在强地震下的安全性,学者们研究了多种方法,如抗震技术、隔震技术、振动控制技术等。在众多技术中,由于隔震技术设计思路简单明确且行之有效,已被工程界广泛接受。在第九届世界地震工程会议上,隔震技术被列为对未来地震工程有重要影响的先进技术,多年来关于隔震技术的研究一直是结构抗震领域研究的一个热点问题。然而,已有的研究表明:土与结构的动力相互作用效应(Soil-structure Interaction,简称SSI效应)对隔震结构的动力学特性以及基底输入地震动影响很大,进而影响隔震结构的地震反应规律及其程度。但是,目前在基础隔震结构体系的设计中,通常在理论分析中忽略SSI效应,对于深厚软弱地基上的隔震结构来说将会造成隔震效率没有预想的那么好。

有鉴于此,宰金珉教授和本书作者庄海洋曾在合著论文“对土-结构动力相互作用研究若干问题的思考”中针对上述问题的研究意义进行了阐述,此论文也是2005年《徐州工程学院学报》首刊第一篇论文的邀请稿。自此,在宰金珉教授的指导下,于旭博士进行了土-桩-隔震结构动力相互作用机理的博士学位论文的课题研究。可是,让作者悲痛的是,敬爱的宰金珉教授于2009年驾鹤西去。因此,于旭博士2009年完成了博士学位论文内容的研究后,对该课题的研究没有得到很好的延续。为了让该课题能够继续研究,2012年本书作者庄海洋指导于旭博士以“深厚软弱场地土-隔震结构动力相互作用”为主要研究内容,成功申请了江苏省自然科学基金项目(BK2012477)和住房和城乡建设部科研项目(2013-K3-1)的资助,继续开展土-桩-隔震结构动力相互作用及其简化计算方法的研究。因此,该专著的主要研究成果包括宰金珉教授和庄海洋教授、加上于旭博士(现就职于南京工程学院)和朱超硕士在研究生学习期间及毕业后工作期间的主要研究成果。在此,作者对一系列课题资助的相关部门一并表示感谢!同时,作者谨以此专著的出版对已故宰金珉教授对课题组曾给予的开创性指导工作和大力支持表示最深切的怀念!

在本书涉及的课题研究过程中,得到了南京工业大学陈国兴教授、河海大学高玉峰教授、东南大学王修信教授、南京航空航天大学陈少林教授和南京工程学院宗兰教授等专家的支持和鼓励。本书出版也得到了南京工业大学科学研究部、研究生院、交通运输工程学院的大力支持,对此表示衷心的感谢!

作者虽长期从事岩土地震工程领域的科学研究与工程实践,但限于知识面的局限性,书中难免存缺点和错误之处,敬请读者批评赐教指正。

庄海洋

2015年12月于南京工业大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 课题研究背景和意义	1
1.2 隔震技术的研究现状	2
1.2.1 抗震与隔震的对比	2
1.2.2 隔震结构的基本原理	2
1.2.3 隔震结构国内外研究现状	3
1.3 土-结构相互作用的研究现状	4
1.3.1 土-结构相互作用的基本概念	4
1.3.2 土-结构相互作用研究现状	5
1.4 土-隔震结构动力相互作用的研究方法	6
1.4.1 模型试验	6
1.4.2 数值分析法	7
1.4.3 简化计算方法	8
1.5 研究课题的提出及本书研究内容	9
1.5.1 研究课题的提出	9
1.5.2 本书主要内容	9
第 2 章 土-桩-隔震结构动力相互作用有限元分析方法	12
2.1 引言	12
2.2 土-桩-隔震结构动力相互作用的非线性问题	12
2.2.1 土体的非线性动力本构模型研究	12
2.2.2 钢筋混凝土的非线性动力本构模型	17
2.2.3 铅芯橡胶支座的非线性恢复力模型	19
2.2.4 土-桩动力相互作用的接触非线性	20
2.3 土-桩-隔震结构动力相互作用体系的人工边界	23
2.3.1 粘滞边界	23
2.3.2 有限元与无限元耦合法	23
2.4 土-桩-隔震结构动力相互作用体系的网格划分技术	24
2.5 动力平衡方程的积分方法及其稳定积分时间步长	25
2.5.1 基于隐式的动力平衡方程积分法	25
2.5.2 基于显式的动力平衡方程积分法	27

第3章 土-桩-隔震结构动力相互作用振动台模型试验技术	28
3.1 引言	28
3.2 模型体系相似比设计	28
3.3 隔震结构模型设计	29
3.3.1 上部结构设计	29
3.3.2 隔震支座设计	31
3.4 模型桩基础设计	34
3.5 模型箱和模型土的设计	35
3.5.1 模型箱设计	35
3.5.2 模型土的选取和制备	36
3.6 输入地震动的特性	37
3.7 试验过程设计	39
3.7.1 刚性地基上隔震结构体系振动台模型试验	39
3.7.2 不同土性地上非隔震结构振动台模型试验	40
3.7.3 不同土性地上隔震结构振动台模型试验	43
第4章 刚性地基上隔震结构动力反应的模型试验研究	45
4.1 引言	45
4.2 模型体系的动力学特性分析	46
4.2.1 模型隔震结构的自振频率	46
4.2.2 模型隔震结构的振型	46
4.3 模型隔震结构加速度反应及层间变形	47
4.4 隔震结构层间剪力反应	52
4.5 刚性地基上隔震结构体系的隔震效果分析	54
4.6 隔震层恢复力特性分析	59
4.7 隔震支座竖向力和位移特性分析	60
4.8 本章小结	63
第5章 一般土性地上土-桩-隔震结构动力相互作用模型试验研究	65
5.1 引言	65
5.2 一般土性地上模型试验体系的动力学特性	65
5.3 一般土地基的动力反应分析	66
5.3.1 模型地基的边界效应验证	66
5.3.2 一般土地基的动力放大效应	67
5.3.3 一般土地基的滤波作用	68
5.4 一般土地基上基础及隔震层的转动效应	70
5.5 一般土地基上隔震结构的动力响应分析	71

5.5.1 隔震结构楼层加速度放大倍数	71
5.5.2 隔震结构层间剪力反应	73
5.6 本章小结	75
第6章 软夹层地基土-桩-隔震结构动力相互作用模型试验研究	77
6.1 引言	77
6.2 软夹层地基的地震反应分析	78
6.3 隔震层的振动特性分析	80
6.4 隔震结构的振动特性分析	81
6.5 基础及隔震层的转动效应	83
6.6 本章小结	84
第7章 不同土性地基上隔震结构振动特性的对比分析	86
7.1 引言	86
7.2 不同地基条件下的试验概况	86
7.3 试验宏观现象分析	87
7.4 不同地基上隔震结构体系动力特性的对比分析	87
7.5 不同地基上隔震结构地震反应的对比分析	88
7.6 不同地基上隔震层隔震效率的对比分析	90
7.7 本章小结	92
第8章 土-桩-隔震结构动力相互作用的数值计算与模型试验对比分析	93
8.1 引言	93
8.2 土-桩-隔震结构动力非线性相互作用的有限元分析模型	93
8.2.1 模型材料本构模型及参数	93
8.2.2 土-桩-隔震结构三维有限元模型的建立	95
8.3 有限元模型的模态分析	96
8.4 模型试验体系地震反应的对比分析	98
8.4.1 刚性地基隔震结构模型试验与数值计算结果对比	98
8.4.2 软夹层地基上隔震结构模型试验与数值计算结果的对比	100
8.5 SSI效应对隔震结构动力反应的影响分析	106
8.6 软夹层地基结构地震反应的数值分析	107
8.7 本章小结	108
第9章 土-桩-隔震结构动力相互作用的简化计算方法	110
9.1 引言	110
9.2 土-桩-隔震结构动力相互作用体系动力特性的简化算法	110
9.3 基础隔震结构地震反应的简化算法	113

9.4	模型振动台试验工况	114
9.5	简化计算方法的验证	115
9.5.1	结构的动力特性的对比	115
9.5.2	隔震结构的地震反应	116
9.6	简化计算模型参数分析	117
9.7	本章小结	119
第 10 章	考虑 SSI 效应时土-桩-隔震结构动力相互作用动力的能量分析法	120
10.1	引言	120
10.2	能量分析的基本原理和平衡方程	120
10.3	基于试验的土-桩-隔震结构动力相互作用体系耗能分析	123
10.3.1	耗能分析计算参数	123
10.3.2	刚性地基上隔震结构体系的耗能分析	124
10.3.3	软夹层地基上土-桩-隔震结构动力相互作用体系的耗能分析	125
10.4	本章小结	129
参考文献		130

第 1 章 绪 论

1.1 课题研究背景和意义

地震是一种地球运动的自然现象，同时也是发生较为普遍的地质现象，地球上绝大部分人口都生活在地震发生区域。根据有关的统计资料显示，全球平均每年要发生约 500 万次有震感的地震，其中，5 级以上的强烈地震大约 1000 次^[1]。由于地震的发生毫无预兆，地球上大部分地区都有发生地震的可能，同时地震又是很难提前预测的，因而预防措施很难起到作用。全球地震主要集中于两个地震构造系：其一是环太平洋地震构造系，全球 75% 地震都在此发生；其二则是大陆地震构造系，全球 90% 陆地地震都在这里产生。

中国是世界上遭受地震灾害影响最严重的国家之一，这是因为我国位于环太平洋地震带和欧亚地震带两大地震带之间，受太平洋板块、印度板块和菲律宾海板块相互挤压作用，地震断裂带十分丰富^[2]，地震活动也相当频繁。

我国人口众多，但分布不均，主要集中地分布于东部沿海发达地区。由于相当数量的大中型城市都建造在地震易发区，因此，一旦发生地震，极易危及人民生命。我国地震活动有频度高、强度大、震源浅、范围广等特点，巨大的能量伴随着强烈地震而来，破坏力十分惊人。而随着社会的发展，城市化进程的不断深入，建筑群越来越密集，建筑物的高度也在不断攀升，如果发生强震，造成的灾害将非常巨大。如何提高建筑物的抗震性能，已然成为全世界关注的焦点。

历次地震震害调查结果表明^[3-6]：大量的人员伤亡和财产损失是由于地震引发的次生灾害造成的。地震以波的形式从震源向四周传递能量，地震波从自由场地经结构基础向上部传递过程中，与结构产生共振，强度不断被放大；若能量超过房屋结构的承载极限，结构便遭到破坏，甚至无法修复。

2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分，中国四川省汶川地区发生 8.0 级特大地震，由于震源深度较浅，汶川地区的余震更是不断，大大小小的有上千余次，加之震源附近群山环绕，极易发生山体滑坡等次生灾害，因而造成了巨大的人员、财产损失。

2011 年 3 月 11 日日本东北部海域发生 9.0 级地震并引发海啸，浪高达数十米，海水迅速淹没临海陆地，原本为了提高抗震性能建造的木结构房屋，在海啸到来时变得不堪一击，给当地人民造成了巨大的伤害。因此，在提高结构抗震性能的同时，如何保证结构在有效抵抗次生灾害的同时，控制结构的地震反应是十分必要的。而隔震结构更好地满足了人们对建筑物安全性的强烈要求。

2015 年 4 月 25 日尼泊尔又发生了 8.1 级地震，由于当地建筑物大多比较陈旧，没有设置相应的抗震措施，因此人员伤亡十分惨重。同时也再次提醒人们抗震研究的必要性。

1.2 隔震技术的研究现状

1.2.1 抗震与隔震的对比

近年来,隔震技术的发展让人们不再只一味增强结构抗性与地震“正面交锋”,而是找到更合适的办法阻隔其传播路径。在传统的结构抗震设计方法主要有:①基于承载力设计方法;②基于承载力和构造保证延性设计方法;③能力设计法;④基于损伤和能量设计方法;⑤基于性能/位移设计方法^[7]。其设防目标是结构在产生较大变形的情况下不至于出现整体倒塌,其重点主要放在提高结构的延性,从而更好地分散结构的塑性变形,通过变形达到增大结构整体耗能,使结构趋于稳定。在地震作用时,尽量使建筑结构处于弹性或弹塑性状态,使结构不至于出现整体破坏是抗震设防的基本目标。事实上,建筑结构的地震反应因地震动频谱特性的不同有很大差异。结构的损坏往往集中在某一特定薄弱层,而薄弱层往往由地震动特性决定,且地震发生之前无法预估。

建筑物最重要的功能是要能够持续承受外部荷载的作用,维持一个安全封闭的内部空间,同时在地震、洪水等突发性自然灾害发生时具有一定的抵御能力。大部分地震灾害是由于结构的剧烈往复晃动而造成了破坏,建筑物支承能力下降而坍塌。因此抗震设计时首先要做的是保证建筑物有足够的支承能力,其次是提高结构的整体抗震性能。传统抗震设计的重点可概括为“小震不坏、中震可修、大震不倒”。也就是说小震发生时,建筑物应力应变处于线弹性范围内,结构无任何损伤;中震发生时,只出现非结构构件的损坏,未发生主体结构的破坏,不影响正常使用;大震发生时,允许结构产生裂缝或钢材有塑性变形,但主体结构梁柱不致倒塌。很多情况下,由于地震在传播过程中不断被放大,最终因加速度、速度及层间变形过大而发生建筑物严重破坏。

虽然现代结构的变形性能已大大提高,但一般结构外墙和内墙的非结构构件仍以脆性材料为主,主体结构的延性增大必然导致结构的晃动更加剧烈,层间变形更大,非结构构件的破坏将会非常严重。而隔震建筑的上部结构即使遭遇罕遇地震,产生的层间变形量也很小,结构几乎处于平动状态。因此非结构构件使用脆性材料,并不影响整体安全性,结构的优势得到体现。

隔震结构,即将结构从地震中“隔离”出来,通过延长结构自振周期,阻隔高频能量传播,传递到上部结构的能量将大大减小,同时加入阻尼器耗能,从而限制隔震层位移反应,以达到减小结构地震反应的效果。同时,通过试验表明隔震层受地震波频谱特性的影响不大,对任何输入波均具有一定的隔震效果,因此地震发生前就可以预测结构的薄弱部位。

1.2.2 隔震结构的基本原理

隔震结构种类可根据隔震装置的安放位置大致分为两种^[8],一种是基础隔震,即在基础与结构之间设置隔震装置;另外一种则是中间楼层隔震,即在上部结构层间安装隔震装置。目前基础隔震使用较为广泛。传统结构的柱和梁等往往是使用刚性连接形成整体

的, 从而其力学特性也会相互影响, 因此试验得到的构件的力学性能无法简单的推算出结构整体的运动情况。相反, 隔震结构的变形和能量耗散主要集中在隔震层处, 可针对隔震层进行研究或试验, 然后再综合考虑隔震结构的整体特性, 研究也更具针对性。

其中隔震支座要有足够大的竖向刚度, 使其可以稳定支承建筑物重量等外部荷载; 水平向刚度要较小, 使其具有足够的水平变形能力。因此, 隔震结构是一种遵循抗震设计两个基本要素^[9]的结构形式, 发生罕遇地震时, 作用于上部结构的水平力比一般建筑要小很多, 即使遭遇罕遇地震隔震结构的基本功能也不会遭到破坏。因此上部结构可以使用线弹性方法进行设计, 同时可大大降低工程造价。

1.2.3 隔震结构国内外研究现状

由于日本是一个地震频发的国家, 人们为了建成更加安全的住所, 迫切需要找到更有效的抗震方法, 日本在抗震研究方面投入了更多的精力和时间, 这就促使隔震理念首先在日本产生。1881年, 河合浩藏提议将原木放入房屋地基中, 这样在地震发生时, 上部房屋便会随着原木一同滚动, 这也标志着隔震思想初步形成。1927年中村太郎提出在建筑物基础下安装两根长柱, 并将其铰接在一起, 在相对变形较大的柱头安装消能设备, 即泵式阻尼器。1928年岗隆一将结构与基础使用隔震柱铰接, 建成了第一栋钢筋混凝土隔震建筑。1954年, 小堀铎二等人在进行非线性振动理论研究的基础上提出了“控制结构”的方案, 同时对此方案进行了分析研究^[10]。1982年日本建造了第一栋叠层橡胶支座建筑, 为了对隔震结构的隔震效果加以验证, 分别在结构基础和顶部安装了加速度计。从1987年地震时记录到的数据看, 隔震层上部地震加速度不但没被放大, 而且还小于基础处的加速度值, 这同时也证明了隔震结构的隔震效果十分明显。1987年日本东北大学为了研究隔震建筑的优越性, 分别建了两栋完全相同的钢筋混凝土建筑, 一栋为抗震结构, 一栋为隔震结构, 同时在相同位置安装了加速度计。不久后, 在一次有感地震中, 记录到了地震加速度反应。记录数据表明, 抗震结构的加速度反应大约是隔震结构5倍, 这一结果也进一步证明了隔震结构的隔震效果。20世纪90年代阪神地震后, 抗震结构的梁、柱等结构构件均出现不同程度的破坏, 结构基本丧失使用功能。但是隔震结构梁、柱等结构构件均未发生破坏, 仅有非结构构件损坏, 修后可继续使用。

与此同时欧美国家的隔震研究也在如火如荼的进行。20世纪70年代, 以美国为代表的隔震技术较先进的国家对叠层橡胶支座性能进行了大量的实验研究, 并成功应用到工程建设中。虽然天然叠层橡胶材料变形性能和竖向承载能力都较好, 但其阻尼较小, 耗能能力也十分有限。为了改善这一状况, 新西兰科学家发现在橡胶中心插入铅芯, 铅芯可以起到很好的耗能作用。同时由于生产过程简单易操作, 从而得到了很好的推广和使用。南加州大学医院建造时使用了铅芯橡胶垫, 在1994年Northridge地震中医院完好无损, 表现出很好的隔震性能。同时记录显示: 南加州大学医院的楼顶地震加速度反应缩小到了基础处的1/3, 地震反应大大减小。

我国对基础隔震的研究起步较晚。1966年, 为了改进隔震材料的性能, 李立对隔震材料进行了试验研究和理论分析, 受限于当时的试验条件, 研究范围也十分有限。到了1980年前后, 随着隔震技术的不断推广, 一些中小建筑中逐步开始使用隔震装置。1995~

1997年,周锡元等重点研究了隔震支座在工程上的应用,对橡胶支座的动力性能以及简化设计方法等进行了深入而细致的试验研究^[11]。随着各类研究的不断深入,隔震技术也得到了长足的发展,我国研制出了半径达500mm和550mm(设计荷载13000kN)的橡胶隔震支座,并且在日本多项工程中得到应用,且具有很好的工作性能^[12]。

近些年来,国内研究成果也相当丰硕。杜永峰^[13-14]结合了减震和隔震优点,建立了考虑SSI效应的三维有限元模型,得出了场地频率与结构基频变化对结构隔震效果的影响;与此同时使用了bouc-Wen模型^[15],利用空间迭代法模拟了隔震结构的地震反应,使理论研究进一步深入。周福霖^[16-17]分别建立了20层框架、框剪结构,通过使用底部剪力法、振型分解反应谱法和时程分析方法对钢结构和钢筋混凝土结构隔震结构的隔震性能进行分析;同时提出了将普通橡胶隔震支座、铅芯橡胶隔震支座和弹性滑板支座根据其各自的性能优势进行组合建成组合式基础隔震结构,结果表明各支座的隔震特性得以充分发挥,隔震效率显著提高^[18]。刘伟庆^[19]主要研究了高层隔震建筑的地震反应,提出了隔震支座拉应力改进计算方法以及相应的设计优化法。得出了地震动类型以及地震动强度均会对SSI效应产生影响。并通过有限元模型,模拟了隔震支座在不同竖向拉压刚度,不同类型隔震支座的水平力学特性,研究了不同地震输入和不同输入角度对隔震支座受拉情况的影响^[20]。吕西林等^[21]在组合隔震系统的前提下,将试验与有限元模拟进行对比,对比结果表明隔震层滞回变形有效吸收了地震动输入能量,减小了结构模型的累计变形和塑性损伤。陆伟东^[22-23]进行了目前世界最大隔震结构—昆明新国际机场航站楼(A区)振动台模型试验,并根据模型尺寸参数力学参数建立了有限元模型进行对比,表明基础隔震结构能有效降低大跨网架结构的竖向振动,隔震结构的减震效率可达50%左右。尚守平^[24]提出了利用地基换填法进行结构隔震,同时研究了地基动力特性对地基阻抗的影响,得出对桩基周边土使用软化换填后,可以起到一定的隔震作用。

我国最新的抗震规范《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010^[25]对隔震结构的高宽比放大至4,同时取消了对结构类型及周期的限制。随着国家对房屋安全性能及使用性能要求的不断提高,隔震技术具有非常广阔的发展前景。只要合理设置结构的高宽,合理布置隔震支座以及设置抗拔桩,高层建筑的倾覆问题可以得到很好的解决^[26]。同时为了保证隔震建筑的质量,我国先后颁布了隔震支座的标准^[27],以对隔震建筑形成更有效的监管。

5.12汶川地震抗震结构房屋损坏十分严重,因此灾后重建中大多采用了橡胶垫隔震技术。由广州大学工程抗震研究中心设计的四川省绵竹市遵道学校成为灾后重建项目中第一个采用隔震技术建造的建筑^[28],竣工之后,经过数次余震的检验证明隔震能力良好。使用基础隔震技术建造的芦山县人民医院主楼,地震后结构主体部分几乎没有损坏,再次证明隔震结构的优越性。

1.3 土-结构相互作用的研究现状

1.3.1 土-结构相互作用的基本概念

传统的结构数值计算中,通常将下部的地基视为刚性体,即不存在结构激震在材料间

的相互传递。而实际上,由于地基材料的非绝对刚性,甚至相比于结构材料来说,其非线性变形性质非常明显,在动力荷载作用过程中,结构物与地基之间既存在着着力的相互作用,也存在着变形的相互约制,进而引起振动能量的相互传播和交换,使得实际结构物的动力反应与在刚性地基假设下所算得的反应有很大差别。因此把结构和地基基础作为一个整体的开放体系,而不是单独把结构当作一个封闭的,与地基介质之间没有任何能量交换的系统来研究其在动力荷载作用下的反应,即构成了土-结构动力相互作用问题。

由于地基土与建筑物基础一般情况下材料特性(主要指弹性模量)差异很大,其上部结构的反应与刚性地基假设研究得到的结果有较大偏差。研究土-结构相互作用的目的在于更好地还原结构物在外力作用下的反应,以便更清晰地找到结构的薄弱部位,并有针对性地加强某些部位,从而使结构稳定性增强,使用性能也得以提高。土-结构动力相互作用指的是地震动以波的形式从震源传递到周边的结构物上时,由于结构物质量不可忽略,结构产生的惯性力返回传递到地基土中,如此反复相互传播和交换,使结构、地基、基础形成一个彼此协调工作的整体。相比于土-结构的相互作用(soil-structure interaction, SSI),土-结构动力相互作用问题的研究,不仅仅需要进行运动问题的求解,而且土体的边界效应、动力接触非线性、材料非线性和输入地震动特征等都需加以考虑,诸多因素组合在一起使得求解动力相互作用问题变得尤为困难^[29]。

1.3.2 土-结构相互作用研究现状

近年来中国建筑行业的发展十分迅速,结构的安全性越来越受到重视,SSI问题的理论研究逐步展开。SSI问题在理论分析和数值模拟的研究上取得了重大进步,由于SSI问题十分复杂,这些分析计算都是基于一些前提条件下的,因而结果也会出现不同程度的偏差,部分研究成果至今无法确定是否正确。因此,对SSI效应更加全面的认识与研究将极具价值。

土-结构相互作用的研究最早开始于19世纪,距今已有100多年。Lamb^[30]使用弹性半空间理论对弹性地基问题进行了分析;随后Reissner对Lamb解析进一步深化,并基于此前的研究求解出了在竖向荷载作用下针对刚性基础稳态解析解,同时这也标志着土-结构相互作用研究的正式开始。1953年Sung^[31]研究了不同类型振动作用及地基反力条件下结构基础的理论解。1955年Arnold^[32]及Bycroft^[33]首次提出了频率会影响基础的地基动反力分布概念。1966年Lysmer和Richart^[34]提出了具有频率无关性的由质量-弹簧-阻尼器组成的集总参数模型。1967年加速度峰值Parmelee^[35]提出了的单一自由度模型,从而实现了地震反应分析时可以考虑结构、地基整体相互作用的影响,与此同时一些基本规律得到了很好的总结,使得更多学者对相互作用研究产生了兴趣。Tajimi(1969)^[36]和Novak(1978)^[37]得出了圆柱形埋入式基础的近似解析模型,使得土-结构相互作用理论得到了进一步的发展。

20世纪70年代后,伴随着数值计算方法迅猛发展,一些复杂地基形式上的土-结构相互作用问题的求解得以实现。与此同时,理论求解方面也在不断发展中,1972年Wass^[38]提出了能够反映地基水平方向无限延伸特性的传递边界理论,随后Wass^[39]和Tajimi^[40]提出了新的地基分析方法,即通过弹性半无限空间层状地基相互作用问题分析

的薄层法。

Abascal 和 Dominguez (1985)^[41]将 FEM-BEM 法应用到柔性基础的相互作用问题的分析中,进而求得了地基的动力反应。Karabalis 和 Beskos (1985)^[42]以及 Gamtanaros 和 Karabalis (1988)^[43]进一步将 FEM-BEM 方法应用到对埋置基础问题的分析中,分别求得了埋置地基模型的时域和频域解。阎俊义、金峰等^[44]和 Lehmann^[45]使用了将有限元与边界元耦合的方法来分析土-结构动力相互作用问题。

楼梦麟^[46-48]通过一系列钢框架结构模型振动台试验研究了 SSI 效应对钢结构动力特性和地震反应的影响,表明考虑 SSI 效应后结构模型的基频比要比不考虑时小,结构的地震反应有所减小,自振周期有效延长。吕西林^[49-50]通过利用群桩-土-桩波动阻抗效应,简化了桩基础模型,使得考虑 SSI 效应更为简便。同时针对高层框架结构的研究建立了相应的有限元模型,使用因素分析方法对不同变量对结构动力相互作用体系地震反应的影响进行了细致的研究。数值计算结果表明,上部结构的动力反应并未随着土体动剪切模量的不断增加而一直增大;随着结构刚度增大,上部结构的加速度也随之增大。陈跃庆^[51-52]进行了不同基础类型不同相似比下的振动台试验,软土地基中考虑 SSI 作用体系的频率远小于刚性地基,因此软土地基有滤波和隔震效果,桩身应变表现为顶部较大下部较小的倒三角形。尚守平^[53-55]建立了六层框架高层有限元模型,表明考虑 SSI 效应后结构基频有所减小,结构的自振周期大大延长。与此同时在简化分析方面也取得了相当丰硕的成果,基于简化分析理论建立了简谐剪切波速激励下三维土-桩-结构线性耦合体系简化分析模型桩,结构采用简单的梁模型简化,结果表明耦合体系的固有频率受到结构的高度、质量以及地基土厚度、结构和地基土刚度等因素的影响。

1.4 土-隔震结构动力相互作用的研究方法

土-隔震结构动力相互作用作为土-结构动力相互作用的一个分支既有着土-结构动力相互作用的一般特点,同时由于隔震的加入使相互作用效应具有了新的特征,因此非常具有研究意义。

通常情况下,土-基础-隔震结构动力相互作用的分析方法主要分为以下几种:①模型试验,其主要可以用来研究土-基础-隔震结构相互作用对上部结构的地震反应的影响^[56-57];②数值分析法,即有限元方法(FEM)、边界元法(BEM)等,模拟出连接土与基础间的非线性介质,以及复合地基^[58-59];③简化计算方法,此法可快速计算出桩-基础-隔震结构相互作用系统的动力特性^[60]。

1.4.1 模型试验

由于地震发生非常突然,因此要得到实测数据往往比较困难。因而,通过模型试验模拟地震对结构物的影响比较普遍,从而对理论和数值分析方法加以完善和改进。使用较广泛的模型试验方法主要有振动台试验和离心机试验。

模型试验即对原型结构按一定相似比进行缩尺,通过模拟真实应力环境,使得结构自重与原型情况相同。实验结果不但可以与理论分析进行对比分析,而且可以为现场施工提