

地震响应并行计算 理论与实例

金先龙 楼云锋 著



科学出版社

地震响应并行计算 理论与实例

金先龙 楼云锋 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对结构抗震问题,系统介绍了地震响应并行计算的理论方法、数值建模方法、介质参数等效方法和应用实例。主要包括:地震响应研究发展现状,结构动力学并行计算的基本理论,复杂结构数值建模方法,非线性介质参数等效方法,以及高性能超级计算机平台和高性能并行计算技术在工程场地、海岸工程、隧道工程、核电工程、桥梁工程和建筑工程中的典型应用实例。

本书结构体系完整、研究内容丰富。可供从事计算数学、计算力学、并行计算、高性能计算、计算机仿真、计算机辅助工程、防浪堤抗震设计、隧道抗震设计、核电站抗震设计、桥梁抗震设计、建筑结构抗震设计等领域研究与应用的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地震响应并行计算理论与实例 / 金先龙,楼云锋 著. —北京:科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-049510-5

I. ①地… II. ①金…②楼… III. ①地震反应分析—并行算法
IV. ①P315.61

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 179336 号

责任编辑:杨向萍 张晓娟 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:左 讯

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016 年 8 月第一次印刷 印张:13 1/2

字数:321 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者介绍

金先龙 男，博士，1961年8月出生。现任上海交通大学机械与动力工程学院二级教授和博士生导师。

金先龙教授长期致力于应用计算数学、计算力学的最新理论及计算机科学与工程的最先进技术解决工程实际问题。在理论上，主要研究非线性结构动力学、流固耦合动力学的拟实建模理论和并行数值计算方法；在技术上，主要研究并行计算、网络计算、云计算和分布计算等先进计算技术；在应用上，主要集中在解决交通运输、现代工业、重大工程、国防装备等领域的复杂系统动力学问题。

金先龙教授以第一作者、第二作者或通信作者（第一作者是其指导的研究生）共发表学术论文250余篇，其中，被SCI收录50余篇，被EI收录200余篇。以第一作者出版了《交通事故数字化重构理论与实践》和《结构动力学并行计算方法及应用》两部学术专著。

2000年至今，金先龙教授作为项目负责人和主要贡献者先后承担了30余项国家和上海市的科研项目。其中包括：国家自然科学基金重点项目1项、国家自然科学基金面上项目5项、国家高技术研究发展计划（863计划）课题6项、上海市科学技术委员会攻关项目5项、上海市信息化委员会专项6项等，有13项成果通过了上海市科学技术委员会组织的鉴定，达到了国际先进水平，并获得国家发明专利授权28项。

2005年，金先龙教授作为第一完成人的科研成果“基于超级计算机的结构动力学并行算法设计、软件开发与工程应用”获得了上海市科学技术进步奖一等奖。2008年和2014年，作为主要贡献者，分别获得上海市科学技术进步奖一等奖和二等奖。

楼云锋 男，博士，1987年1月出生。现于上海交通大学机械与动力工程学院任专职科研博士后，研究方向为并行计算、结构动力分析和流固耦合分析。

近年来，在国内外SCI/EI源期刊以第一作者发表论文7篇，其中，被SCI收录2篇，被EI收录5篇。参与完成国家自然科学基金项目1项，上海市科学技术委员会攻关项目1项，企业委托项目3项。参与申请发明专利3项，软件著作权1项。

前 言

当今中国,各类重大工程不断刷新世界纪录。例如,我国高速铁路运营和在建里程、城市轨道交通运营和在建里程等均居世界第一,并且世界上直径最大的隧道、跨度最长的桥梁也已经或即将诞生在我国。同时,我国地域辽阔,地质结构复杂,地震灾害时有发生,导致重大人员伤亡和财产损失。因此,抗震性能是重大工程设计中必须考虑的主要因素,而地震响应计算是重大工程抗震设计的重要环节。受限于计算机的运算速度,传统地震响应计算不得不忽略实际工程结构中一些复杂因素和详细结构,采用比较简单的动力学有限元模型和材料模型。

近十多年来,高性能计算机发展迅速,其计算能力已经成为一个国家综合国力的一种标志。随着多个系列的国产高性能计算机的相继投入使用,我国在高性能计算机硬件技术方面已经取得了重要进展。但与国际先进水平相比,我国在高性能计算机的工程应用方面还存在较大差距。

近十多年来,上海交通大学金先龙教授及其研究团队采用高性能计算机这个先进工具,开展了重大工程地震响应的拟实建模理论和并行计算方法研究,并广泛应用于工程场地、海岸工程、隧道工程、核电工程、桥梁工程、建筑工程等重大工程领域的地震响应计算。这不仅有利于提高重大工程地震响应计算的可靠程度,更加全面地评价重大工程结构的抗震性能,而且对于推广普及高性能计算机的工程应用,都具有重大的理论研究意义和工程应用示范价值。

本书是对这些研究成果的系统总结。全书共10章,第1章是绪论,对地震响应并行计算的相关国内外研究现状进行了总结和分析;第2~4章研究了地震响应并行计算的基本理论、拟实建模方法和介质参数等效方法;第5~10章则介绍了作者在工程场地、海岸工程、隧道工程、核电工程、桥梁工程、建筑工程等六大工程领域中开展地震响应并行计算应用实例研究的经验。

本书的出版获得了国家高技术研究发展计划(863计划)课题“大型工程设备结构力学并行计算软件及应用(2012AA01A307)”的资助。作者要特别感谢上海超级计算中心在研究并行计算方法中的密切合作,以及在提供高性能计算资源方面的长期支持。还要感谢上海市地震工程研究所、上海核工程研究设计院、上海市隧道工程轨道交通设计研究院、上海城建集团公司、上海市城市建设设计研究院、华东建筑设计研究总院等在地震响应并行计算应用实例研究中的全力支持和密切合作。

本书研究成果还包含了金先龙教授所指导的研究生学位论文的部分研究内容。其中,海岸工程相关论文包括:王欢欢博士论文(2016年)、杨勋博士论文(2016年)、楼云锋博士论文(2015年);隧道工程相关论文包括:胡豹硕士论文(2015年)、王建伟博士论文(2012年)、郭毅之博士论文(2006年);核电工程相关论文包括:占昌宝硕士论文(2016年);桥梁工程相关论文包括:陈向东博士论文(2009年);建筑工程相关论文包

括：杨颜志博士论文（2012 年）；介质参数等效方法相关论文包括：张伟伟博士论文（2014 年）；并行计算方法相关论文包括：苗新强博士论文（2015 年）；拟实建模方法在上述论文中均有涉及，另外与之相关论文还包括：邓容兵博士论文（2010 年）、杜新光博士论文（2010 年）等。读者如有需要，可查阅以上研究生学位论文。

重大工程领域众多，地震响应计算理论和并行计算方法还处在逐步发展和逐渐完善中，加之作者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

作 者

2016 年 6 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	3
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 地震动力作用研究现状	3
1.2.2 结构地震响应研究现状	6
1.2.3 地震响应并行计算研究现状	14
1.2.4 对研究现状的总结	15
1.3 本书的研究内容	15
第 2 章 地震响应并行计算的基本理论	18
2.1 引言	18
2.2 几何非线性基本理论	18
2.2.1 变形和运动	18
2.2.2 更新拉格朗日格式	19
2.2.3 完全拉格朗日格式	21
2.2.4 几何非线性问题的数值计算方法	21
2.3 显式有限元方法基本理论	22
2.3.1 显式时间积分算法	22
2.3.2 显式算法时步控制	24
2.3.3 显式算法沙漏控制	25
2.4 结构地震响应并行计算理论	26
2.4.1 并行计算机体系结构	26
2.4.2 曙光 5000A 高性能计算机	28
2.4.3 有限元的区域分解方法	29
2.4.4 负载均衡的分区方法	31
2.5 结构地震响应并行计算分析	31
2.5.1 土体-建筑结构耦合系统并行计算	32
2.5.2 土体-桥梁结构耦合系统并行计算	34
2.5.3 土体-隧道结构耦合系统并行计算	35
2.6 本章小结	37
第 3 章 地震响应并行计算的拟实建模方法	39
3.1 引言	39

3.2	地震响应分析系统的力学建模方法	39
3.2.1	土体-结构耦合作用的力学模型	39
3.2.2	土体-结构耦合作用的数值计算	42
3.2.3	土体-结构耦合作用的参数控制	45
3.3	非线性土体建模方法	46
3.3.1	土体分层模型	46
3.3.2	土体单元尺寸控制	47
3.3.3	土体材料模型	48
3.4	黏弹性人工边界建模方法	49
3.4.1	三维黏弹性人工边界法向条件	49
3.4.2	三维黏弹性人工边界切向条件	51
3.4.3	黏弹性人工边界	52
3.4.4	黏弹性人工边界验证及土体区域选取	53
3.5	本章小结	55
第4章	地震响应并行计算的介质参数等效方法	56
4.1	引言	56
4.2	衬砌环正交各向异性参数等效方法	56
4.2.1	广义代表性体积元法	56
4.2.2	盾构隧道三维精细有限元模型与验证	59
4.2.3	盾构隧道参数静力等效数值模拟	67
4.2.4	盾构隧道参数模态等效数值模拟	72
4.3	土层阻尼参数等效方法	77
4.3.1	等效流程	77
4.3.2	阻尼参数等效	78
4.3.3	计算结果验证	79
4.4	本章小结	82
第5章	工程场地地震响应并行计算的应用实例	83
5.1	引言	83
5.2	场地地震响应系统全三维非线性数值建模	83
5.2.1	场地情况简介	83
5.2.2	场地三维几何模型建立	84
5.2.3	场地地质材料分层曲面建立	86
5.2.4	场地有限元模型	86
5.3	工程场地地震响应分析	88
5.3.1	场地地震荷载	88
5.3.2	典型地点加速度时程	88
5.3.3	场地地表峰值加速度等值线	93
5.4	本章小结	96
第6章	海岸工程地震响应并行计算的应用实例	97
6.1	引言	97

6.2	防浪堤地震响应系统三维非线性数值建模	97
6.2.1	防浪堤有限元模型	97
6.2.2	土体有限元模型	100
6.3	防浪堤结构地震响应分析	102
6.3.1	防浪堤地震荷载	102
6.3.2	超强地震输入动力响应分析	102
6.3.3	两级地震输入动力响应分析	106
6.4	本章小结	112
第7章	隧道工程地震响应并行计算的应用实例	113
7.1	引言	113
7.2	隧道地震响应系统三维非线性数值建模	113
7.2.1	隧道三维有限元模型	114
7.2.2	联络通道三维有限元模型	115
7.2.3	工作井三维有限元模型	115
7.2.4	隧道结构-土体耦合体系三维有限元模型	116
7.2.5	材料模型和参数	118
7.3	隧道结构一致激励地震响应	119
7.3.1	隧道一致地震荷载	119
7.3.2	横向一致激励下隧道地震响应	120
7.3.3	纵向一致激励下隧道地震响应	122
7.4	隧道结构非一致激励地震响应	125
7.4.1	隧道非一致地震荷载	125
7.4.2	横向行波激励下隧道地震响应	125
7.4.3	纵向行波激励下隧道地震响应	127
7.5	一致激励与行波激励隧道地震响应对比	129
7.5.1	横向输入时地震响应对比	129
7.5.2	纵向输入时地震响应对比	130
7.6	本章小结	131
第8章	核电工程地震响应并行计算的应用实例	132
8.1	引言	132
8.2	核岛地震响应系统三维非线性数值建模	132
8.2.1	核岛厂房有限元模型	132
8.2.2	土体有限元模型	136
8.2.3	桩基有限元模型	138
8.2.4	整体耦合模型	139
8.2.5	模型质量估算及模态分析	141
8.3	核岛地震响应及影响因素分析	142
8.3.1	核岛结构加速度时程分析	143
8.3.2	核岛结构应力分析	144
8.3.3	核岛结构位移分析	146

8.4	本章小结	148
第9章	桥梁工程地震响应并行计算的应用实例	150
9.1	引言	150
9.2	土体-桥梁结构耦合系统全三维非线性数值建模	150
9.2.1	主梁三维有限元模型	151
9.2.2	主塔和桥墩三维有限元模型	152
9.2.3	斜拉索三维有限元模型	153
9.2.4	桥梁整体三维有限元模型	153
9.2.5	桥梁结构-土体耦合体系三维有限元模型	153
9.2.6	材料模型和参数	154
9.3	土体-桥梁结构耦合系统一致激励地震响应	156
9.3.1	桥梁一致地震荷载	156
9.3.2	横向一致地震激励下桥梁地震响应	156
9.3.3	纵向一致地震激励下桥梁地震响应	160
9.4	土体-桥梁结构耦合系统行波激励地震响应	163
9.4.1	桥梁非一致地震荷载	163
9.4.2	横向行波地震激励下桥梁地震响应	164
9.4.3	纵向行波地震激励下桥梁地震响应	167
9.5	一致激励与行波激励桥梁地震响应对比	170
9.6	本章小结	172
第10章	建筑工程地震响应并行计算的应用实例	173
10.1	引言	173
10.2	土体-超高层建筑结构耦合系统全三维非线性数值建模	173
10.2.1	大厦主体结构三维有限元模型	175
10.2.2	大厦幕墙结构三维有限元模型	176
10.2.3	大厦结构-土体耦合体系三维整体有限元模型	178
10.3	超高层建筑主体结构地震响应	181
10.3.1	建筑地震荷载	181
10.3.2	主体结构位移分析	182
10.3.3	主体结构分层内力分析	185
10.3.4	主体结构弹塑性分析	188
10.4	超高层建筑幕墙结构地震响应	189
10.4.1	幕墙支撑结构变形分析	189
10.4.2	幕墙支撑结构内力分析	193
10.5	本章小结	196
	参考文献	198

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景和意义

1.1.1 研究背景

地震灾害是人类长期面临的严重自然灾害之一,给人类社会带来了巨大的生命和财产损失。地震灾害的显著特点是造成的人员伤亡和经济损失几乎都与工程结构的破坏程度密切相关,为避免和减少地震灾害造成的损失,对工程结构进行抗震分析和设计非常必要。图 1.1 为强烈地震中建筑结构破坏情况。

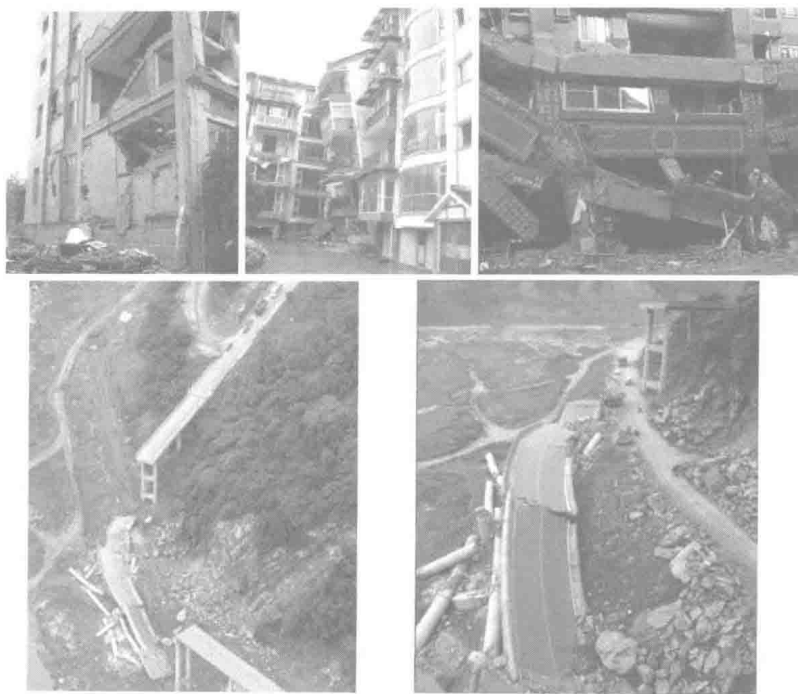


图 1.1 强烈地震中建筑结构破坏情况

21 世纪以来,地震灾害频发,造成了数以千计的人员伤亡和数以十亿计的财产损失,同时也造成了大量建筑结构和地下结构的损毁。表 1.1 列出了近年几次强烈地震所造成的人员伤亡和财产损失情况汇总。我国是一个地震多发国家,地震区域广阔而分散、频繁而强烈。我国有近一半的大、中城市位于地震基本烈度为 7 度或 7 度以上的地震区,北京、天津、西安等大城市更是位于地震基本烈度为 8 度的高烈度地震区。

表 1.1 近年地震灾害造成的人员和财产损失情况

地震发生地点	发生时间/(年-月-日)	地震强度/级	死亡人数/人	财产损失/亿美元
日本东海岸	2011-03-11	9.0	>1.5 万	2000
智利	2010-02-27	8.8	>800	300
青海玉树	2010-04-14	7.1	2698	>100
海地	2010-01-13	7.3	22.25 万	77.5
四川汶川	2008-05-12	8.0	6.92 万	1300

另外,随着我国经济社会的不断发展,使得城市人口的急剧增加,随之带来的是拥挤的建筑空间、交通空间等诸多的城市问题。尤其是进入 21 世纪以来,我国城市化建设进入高速发展期,各类建筑结构的设计、计算和施工发展迅速。以高层建筑为例,各大、中城市的高层办公楼、宾馆和住宅如雨后春笋般拔地而起。高层建筑一方面追求极限的高度,如在建的上海中心大厦设计总高度达到 632m^[1,2];另一方面,高层建筑也更趋向于多功能、多类型、独特性,追求复杂的内部结构和独特的外部造型,从而在保证其功能多样化的同时满足建筑的审美要求,这在一定程度促进了建筑幕墙结构的广泛应用^[3,4]。此外,以桥梁和隧道为代表的交通设施也进入了高速发展期。截至 2009 年年底,我国已建成公路隧道 6139 座,总里程 394.20 万 m,其中特长隧道 190 座、82.11 万 m,长隧道 905 座、150.07 万 m^[5]。据国家有关部门预测,截至 2020 年,国内将完成 6000km 的各类地下隧道建设。桥梁方面,我国已建成主跨超过 400m 的斜拉桥 12 座,主跨超过 450m 的悬索桥 13 座^[6]。大量长大隧道和大跨距桥梁的建设,给抗震设计带来了极大的挑战。

目前应用较多的抗震设计分析方法有:底部剪力法、反应谱法和动力时程法^[7,8]。无论是高层建筑、桥梁之类的地上结构,还是隧道之类的地下结构,抗震设计均存在土体与结构的动力耦合作用问题。土体-结构动力耦合作用^[9](soil-structure dynamic interaction, SS-DI)就是把土体和结构看成一个彼此协调工作的整体,在接触位置满足变形协调条件下求解整个系统的变形和内力。该问题是一个多学科的交叉性研究课题,涉及土动力学、结构动力学、非线性振动理论以及地震工程学等众多领域,也是一个涉及大变形、接触面、局部不连续等众多理论研究前沿课题,同时又是一个与交通、市政、水利和建筑等众多国民经济领域安全性密切相关的研究课题。因此,几十年来引起了广泛关注,姜忻良等^[10]、Carbonari 等^[11]、Ulker-Kaustell 等^[12]、Asgarian 等^[13]、Shamsabadi 等^[14]和 Kocak 等^[15]均进行过相关研究。大量研究表明,土体-结构耦合作用对结构的反应主要有两个方面的影响:一是地基基础对上部结构体系振动特性(包括自振周期、阻尼和振动模态等)的影响;二是上部结构对底部输入地震波的反馈作用。为了能反映结构在地震作用下真实的响应情况,出现了考虑土体-结构动力耦合作用的抗震设计方法,即土体-结构动力耦合作用分析方法。

计算技术的发展和数值算法、理论的成熟,进一步扩大了数值模拟技术在科学研究、工程决策等领域的应用。并行计算技术的发展,超级计算机在科学计算中的应用,更推动了数值计算在大规模、复杂系统计算领域的广泛应用。相对于传统的试验方法,数值模拟具有成本低、研究周期短、可重复操作性强等优点。

1.1.2 研究意义

综上所述,频繁的地震灾害和潜在的地震威胁时刻警示我们,加强复杂结构的抗震设计,提高其抗震能力,减轻灾害损失具有重要的意义。数值模拟已经成为工程结构抗震设计中一个必不可少的环节,将数值分析应用到工程设计领域对提高结构抗震性能具有重要意义。地震响应问题仿真过程中往往计算量巨大,同时为保证仿真过程中结构局部的仿真精度,又必须对实际工程结构进行精细建模,节点与单元数目巨大,需要占用大量内存、硬盘资源和快速求解能力。基于超级计算机平台的高性能并行计算技术很好地解决了计算精度和计算效率问题,使得数值模拟技术在大规模工程问题中得以应用,具有广泛的实践意义。本书针对地震响应问题,结合显式计算方法和高性能的并行计算技术,同时以上海某液化天然气工程接受码头场地、浙江沿海某核电站防浪堤、上海某长江双线隧道、国内某核电站核岛结构、上海某桥梁结构、上海某大厦结构为背景,研究了地震响应数值模拟方法和并行计算方法在以上工程中的应用,对结构抗震设计具有十分重要的理论意义和工程价值。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 地震动力作用研究现状

地震动力作用从20世纪50年代逐步开始研究,经历了大致以下几个研究阶段^[16~18]。20世纪50~60年代,是基本理论准备阶段。这一时期的主要工作是求解无限土体上刚性基础的动力阻抗,并且建立刚性基础振动力与位移之间的解析关系。这一时期比较典型的研究成果包括:1956年,Bycroft推导出弹性半无限空间圆形刚性基础板平动、转动状况下的瞬态解和稳定解;1962年和1963年,Kobori和Thomson分别求解出弹性半无限空间矩形基础板的解析解;1967年,Parmelee在已有研究基础上建立了土体-结构动力耦合作用方程,初步揭示了土体-结构惯性动力耦合作用的基本规律。这一时期的研究工作为进一步土体-结构动力耦合作用研究奠定了理论基础。20世纪70~80年代,土体-结构耦合作用的计算方法成为研究重点。这一时期多种计算方法开始应用到该领域,包括有限元法、边界元法和有限差分法等。由于计算方法的进步,大大扩展了土体-结构耦合作用的研究范围,具体应用对象扩展到地下结构、高层建筑结构、桥梁结构、水坝和海洋结构等。20世纪80年代中期以后,得益于技术的进步,土体-结构耦合作用研究进一步深化,且主要朝两个方向发展。一方面开始进行大规模模型试验和现场振动试验,研究各种影响因素和作用效果;另一方面将时域分析方法应用于土体-结构耦合作用,从而使该问题从线性研究阶段进入到非线性研究阶段。

林皋^[19]、窦立军等^[20]、梁青槐^[21]和熊建国^[22,23]等对土体-结构耦合作用问题进行过系统的总结。目前土体-结构动力耦合作用研究方法可分为两种:理论研究方法和试验研究方法。试验研究方法可以获得最直接的研究数据,但由于受到各方面条件的限制,其获得的数据是非常有限和片面的。理论分析方法则可对土体-结构耦合作用的规律和形态进行分析总结,并且可以获得大量试验方法无法获取的数据,是试验研究方法的有效补充。

1. 地震动力作用理论研究方法

地震动力作用理论研究方法在土体-结构耦合作用研究中得到了最广泛的应用,是土体-结构耦合作用研究的基础。理论研究方法一般可分为三种:集中参数法、子结构法和整体分析法^[24,25]。

1) 集中参数法

集中参数法又称为多质点系模型法,将半无限地基简化为弹簧-阻尼-质量体系,这种方法概念明确,简单方便,在工程应用中具有广泛的应用前景。该方法常采用的计算模型有SR(sway-rocking)模型和并列质点系模型等。

SR模型^[26,27](图1.2)是将结构基础周围的地基土等效为与水平位移和转动有关的水平弹簧和转动弹簧,模拟结构基础和地基土之间的耦合关系。该模型将上部结构体系简化为可考虑弯剪效应的多质点系,模型基础处的输入地震动即为自由场地表面的加速度反应。该模型主要用于了解土体-结构动力耦合作用对上部结构地震反应的影响,为提高模型高振型的分析精度,可将水平、转动弹簧刚度作为频率的函数,将部分地基土作为参振质量加到基础上予以考虑。该模型虽然应用了叠加原理,但场地土只能在线性范围内考虑。

图1.3为并列质点系模型。并列质点系模型^[28,29]是在SR模型的基础上进一步发展起来的,它将土体-结构体系看成是由上部结构、结构基础、桩和附加地基土构成的结构体系和不受结构影响的多质点自由场地土体系两个子体系组成。这时把自由场地土体系简化为单位面积的土柱,并且考虑了不同土层的实际分层情况,各土层质量集中于土层的界面。上部结构简化为可考虑弯剪效应的多质点系,桩的质量集中于地基土的各水平土层界面上,并作为弯剪型质点系处理。两个子体系之间通过水平弹簧和阻尼连接。并列质点系模型考虑了场地土的土层特性和边界效应,较SR模型更为精确,同时又比其他数值方法简单得多,因此得到较为广泛的应用。

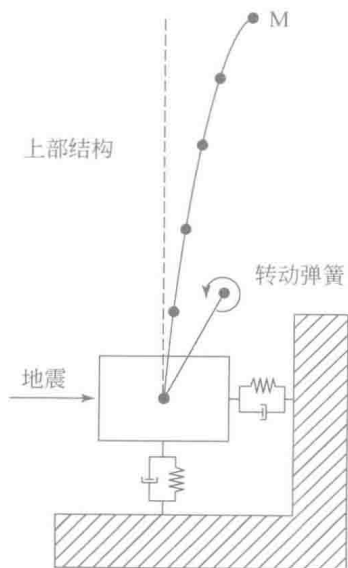


图 1.2 SR 模型

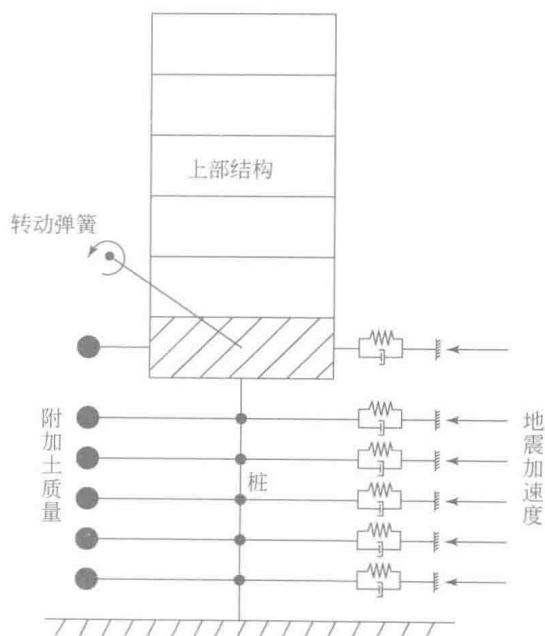


图 1.3 并列质点系模型

集中参数法由于物理概念清晰,应用简便,在工程中应用较广。但由于无法考虑场地土的非线性特征,因此,对于非均匀、非线性以及地形变化较大的复杂地基情况,集中参数法不再适用。

2) 子结构法

子结构法是将土体-结构体系分解为土体、结构两个子体系或多个子体系,每个子体系可以分别独立的采用数值模型进行分析,然后通过各子体系交界面的协调条件进行综合求解^[30,31]。

子结构法求解原理和步骤如图 1.4 所示,其中,位于土体-结构交界面上的模型动力节点用圆圈表示。子结构法求解过程分两步:第一,将无解土体作为一个动力子结构来分析,确定与结构连接的那些节点自由度的力-位移关系,称之为土体的动力刚度系数,在物理意义上可解释为一只广义弹簧,即弹簧-阻尼体系;第二,分析由此弹簧-阻尼器体系支承的结构,它的荷载由自由场的运动决定。采用子结构法可将复杂的土体-结构体系分解成较容易处理的几个部分,也更便于验算。中间结果也具有意义,可将一些不确定因素考虑在内。在某些情况下,研究参数的影响可以局限于某一部分,这样,比较容易确定最重要的参数和弄清他们对动力反应的影响程度。

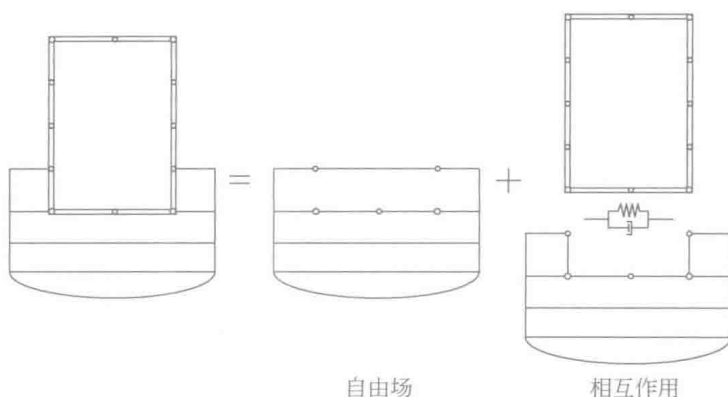


图 1.4 子结构法求解原理和步骤

子结构法利用了叠加原理,理论上只适用于线性系统,因而其应用范围受到限制。此外,子结构法无法直接获得土体中的位移与应力场的变化情况,因而无法用来研究土体-结构动力耦合作用对地基稳定的影响。

3) 整体分析法

整体分析法将结构、地基和土体作为一个整体进行分析,该方法可以考虑土体和结构的非线性特征,结构与地基间滑移和脱离影响,以及动力耦合作用对地基承载力和结构稳定性的影响等,是研究土体-结构耦合作用问题非常有效的方法。但是整体法由于模型自由度多,存在计算量大、耗费大等缺点,因此该计算方法在应用上有一定的局限性,尤其是针对三维动力问题时更为明显。目前常用的整体分析方法包括有限元法、边界元法、无限元法等。

有限元是大家所熟知的一种数值计算方法,该方法由于物理概念清楚、数学过程简单、计算程序编制具有有序性、一致性和适用性,以及计算机技术的发展而使其在工程中得到了广泛应用。但是有限元单元的网格尺寸由于受到输入波频率的影响,为了保证一定频率波在单元中的传播,往往需要将单元划分较细,这就增加了计算量;同时该方法无法直接模拟

无限地基的辐射阻尼,因此要引入各种人工边界才能得到合理的结构响应。目前人工边界的研究已取得一定的研究成果,比较常用的人工边界有:黏弹性边界、一致边界和透射边界等^[32~34]。上述人工边界通过有限元程序,或者通用有限元平台均可非常方便地应用。

边界元法只需对边界进行离散化,使问题的维数至少降低一维,因而待求未知量少,计算数据准备工作量少;并且由于边界元法能自动满足远场的条件,无需引入人工边界,因此在土体-结构动力耦合作用研究中得到比较广泛的应用。Wolf 等^[35]和陈清军等^[36]分别将边界元方法应用于非线性土-结构相互作用以及桩-土-桩相互作用。但是采用边界单元法对土体进行模拟时,把土体视为均质弹性体,未考虑土体的分层和不均匀特性,土体本构关系也未考虑到非线性特性。

无限元法是在有限元法的基础上,将计算域边界处的单元沿外法线无限延伸,沿延伸方向引入解析函数,故属于半解析半数值方法的一种。由于无限元在边界处采用了满足波动方程的位移模式,因此也就满足了波的无穷远域辐射条件,对于土体-结构动力耦合作用分析采用无限元法是非常合适的。Bettess 等^[37]和赵崇斌等^[38]采用无限元法在土体-结构动力耦合作用领域进行了研究。

2. 地震动力作用试验研究方法

土体-结构动力耦合作用虽然在理论分析方法上取得了很大进步,但不同计算方法均有一定的假设和简化,有其局限性。因此,采用试验方法进行检验是非常必要的。土体-结构动力耦合作用试验研究在 20 世纪 70 年代之前相对较少,而随着理论研究的深入,测试设备的不断完善以及试验技术的进步,近年来,模型试验的研究已经越来越受到学者的重视,并且取得了一定的研究成果^[39~44]。试验研究方法正逐渐成为土体-结构动力耦合作用研究不可或缺的方法之一。

1985 年,台湾电力公司与美国电力研究所合作在台湾罗东地震活动区建造了比例分别为 1:4 和 1:12 的两座核电站钢筋混凝土安全壳模型^[45~47]。模型接受了 20 余次震级为 4.5~7.0 级的地震测试,取得了大量强震观测资料。结果表明:所采用的各种模型只要对土的分层、阻尼等做出合理的选择和考虑,都能得到非常近似有效的解答。

2010 年,徐炳伟等^[48]以天津站交通枢纽的复杂结构-桩-土振动台试验为背景,详细介绍土箱设计特别是其边界设计,通过试验数据并结合模型模态分析对边界效应进行定量分析。结果表明:在土箱底部,通过设置分割条嵌入模型土中做成摩擦边界的效果较好;在土箱垂直于地震动两侧壁上,用聚苯乙烯泡沫塑料做成的柔性边界对 Taft 波和人工波加载的效果比较好,而对天津波加载效果略差。

1.2.2 结构地震响应研究现状

结构地震响应所涉及的工程领域非常广阔,比较典型的有工程场地地震响应、隧道结构地震响应、核岛结构地震响应、桥梁结构地震响应、高层建筑结构地震响应以及防浪堤结构地震响应。结构各部件在地震作用下的动力响应问题一直是国内外研究的热点^[49~53],以下针对本书的工程应用对象,如超高层建筑结构、桥梁结构和隧道结构,总结地震作用下结构动力响应的国内外研究现状。

