

岩土介质与结构动力 相互作用理论及其应用

● 房营光 著



科学出版社
www.sciencep.com

岩土介质与结构动力 相互作用理论及其应用

房营光 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以结构工程和防护工程为主要应用背景,介绍岩土介质与结构动力相互作用的理论及其工程应用。全书分为上、下篇,共九章。上篇为理论基础,讨论土与结构动力相互作用的基本理论及其分析方法;下篇为土与结构动力相互作用问题的解析分析与应用,介绍由解析法给出的岩土与结构动力相互作用各类工程实例的新解以及动力突变性和有限元法的频散性及稳定性的问题。

本书可供从事土木工程、防护工程和工程抗震等科学技术领域的教学、科研及设计人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩土介质与结构动力相互作用理论及其应用/房莹光著. —北京:科学出版社,2005

ISBN 7-03-015085-6

I. 岩… II. 房… III. 岩土工程-介质-结构动力分析 IV. TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 015562 号

责任编辑:杨家福 / 责任校对:柏连海

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 4 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2005 年 4 月第一次印刷 印张:20 1/4

印数:1—2 000 字数:400 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

编辑部电话 010-62137026 销售部电话 010-62136131

序

岩土介质与结构动力相互作用问题的研究以岩土动力学、结构动力学、固体力学、计算数学和电子计算技术等多个学科为基础,探讨岩土介质与结构动力耦合系统的数学模型、力学机理、耦合效应、界面特性和计算分析方法等众多学术与技术问题,为结构工程、岩土工程、地下工程、防护和抗震工程等土木、水利工程领域的动力分析和动力可靠性设计提供理论基础与分析方法,是一项涉及多个子学科领域并极富学术内涵且又具工程应用前景的科学研究。本书以结构工程和防护工程为主要应用背景,深入系统地介绍了岩土介质与结构动力相互作用的理论及工程应用。全书分为上、下两篇。上篇为理论基础,讨论土与结构动力相互作用的基本理论及其分析方法;下篇为土与结构动力相互作用问题的解析分析与应用,介绍由解析法给出的岩土与结构动力相互作用各类工程实例的新解。

本书主要是根据作者多年来在岩土介质与结构动力相互作用方面的研究成果撰写而成的一本学术专著。书中的内容既包含严密的理论体系,又有丰富的工程分析实例,涉及本门学科领域许多难点和难题的研究以及处理这些问题的数学、力学技巧和方法。书中较全面地介绍了岩土介质与结构相互作用的动力模型以及动力耦合的力学机制和分析方法,对诸多动力相互作用分析的解析法、数值法和半解析法做了相当深度的论述,并讨论了动力有限元法的频散性、数值稳定和收敛性问题,还提出了改进方法;对于一些复杂的数学概念,在保持严谨性的同时更力求阐明其物理内涵,这是十分难能可贵的。另一方面,作者把理论与工程应用紧密结合,解析地给出了动力相互作用问题各类工程实例的一系列新解,展现出灵活多变、多姿多彩的数学技巧;即使采用的是严谨的解析方法,在解决问题方面仍不失其一定的广泛性。本书涉及平面和空间动力问题以及动力突变性问题,研究的结构包括浅基础、桩基础、地下结构、上部结构,涵盖了圆形、方形、椭圆形、直墙拱等断面结构以及相邻多个任意断面结构;在相互作用的介质属性方面,包括了线性和非线性岩土介质、可压缩水介质;系统输入荷载包括了稳态波和冲击波、运动荷载、地震荷载、局部动力荷载等等。此外,书中还包含了不少较深入的理论成果,例如饱和土介质固-流耦合动力方程的势函数分析、动力耗散系统的简谐波叠加法、相邻多体相互作用分析的 Graf 广义公式、动力有限元法频散性及数值稳定性的改进方法等。同时,书中还给出了非常丰富的工程实例计算数据,这对理论的工程应用将发挥有益的作用。

房营光教授早年在以优异的成绩获得博士学位。他基础功底扎实而又勤奋过人,当时莘莘学子却已崭露头角,颇得师生们的赞许;嗣后十数年来他返

家乡广州任教,更是百尺竿头、更上一层楼,在众多学刊上在上述学科领域发表了许多佳作和新篇,实在可喜可贺!相信本书的付梓问世将对介质与结构动力相互作用的理论研究和工程应用两方面的进展将有很大助益,这是可以预期的。为此,我乐于写了以上的一点文字表示赞许和祝贺,是为序。

孙 钧

2004 仲秋佳节日

谨识于广州旅次

目 录

序	i
---------	---

上篇 土与结构动力相互作用的理论基础

第一章 绪论	1
1.1 土与结构动力相互作用的研究对象和内容	1
1.2 相互作用对土与结构系统动力特性的影响	2
1.3 无限域和人工边界问题	2
1.4 土与结构动力相互作用的分析方法	3
1.5 土与结构动力相互作用研究的发展	4
1.6 本书的主要内容	6
参考文献	7
第二章 土与结构动力相互作用的基本理论	9
2.1 岩土介质的动力性质及其力学模型	9
2.2 岩土介质和结构的动力学方程	20
2.3 动力学方程的位移势函数分解	23
2.4 辐射条件和正规性条件	29
参考文献	30
第三章 土与结构相互作用系统的动力学分析方法	31
3.1 动力学分析的解析方法	31
3.2 动力学分析的半解析方法	43
3.3 动力学分析的有限元方法	51
3.4 非线性动力问题的增量分析法	63
3.5 岩土介质-结构的耦合分析	66
参考文献	71
第四章 自由场的波动	72
4.1 波动微分方程	72
4.2 自由场波动问题的解答及其物理意义	79
4.3 运动荷载下的自由场的反应	87
4.4 孔室对波的散射及动应力集中问题	94
4.5 不规则地面对波的散射	104
4.6 动力源作用下正交各向异性层状半平面的响应	114
参考文献	123

下篇 土与结构动力相互作用问题的解析分析

第五章 移动荷载下土体与结构的相互作用分析	125
5.1 爆炸行波下土体-地下室-管道体系的动力分析	125
5.2 横观各向同性地基上无限板的动力反应频域求解	134
5.3 地下轨道交通系统的动力分析与抗振问题	139
参考文献	151
第六章 土体与基础的动力相互作用分析	152
6.1 刚性基础对 SH 地震冲击波的动力反应	152
6.2 桩基-平台-地基-水流系统的动力反应分析	158
6.3 海洋平台-群桩(柱)-地基系统的动力反应分析	171
参考文献	183
第七章 地下结构与围岩介质动力相互作用分析	184
7.1 系统基本方程	184
7.2 输入波在柱面上和球面上的展开	189
7.3 圆柱结构与围岩介质相互作用的平面问题解答	198
7.4 相邻多个结构与围岩相互作用分析的复变函数方法	218
7.5 映射函数的应用	235
7.6 结构与围岩介质相互作用的空间问题解答	241
参考文献	260
第八章 地基与结构系统地震响应的分叉与突变性	261
8.1 地基-结构系统地震响应的分叉与突变性	261
8.2 地基与结构系统地震响应的共振突变性分析	268
8.3 地基-滑动隔震结构地震响应的突变性分析	275
8.4 地基上多自由度非线性结构地震响应的共振突变性分析	280
参考文献	285
第九章 土与结构动力相互作用的有限元解析及稳定性问题	286
9.1 有限元模拟的人工边界条件	286
9.2 离散网格中波动的频散性及稳定性问题	291
9.3 频散性和稳定性的改进	297
参考文献	300
附录	302

上篇 土与结构动力相互作用的理论基础



第一章 绪 论

1.1 土与结构动力相互作用的研究对象和内容

土与结构动力相互作用是新近发展起来的与多学科相互交叉和渗透的学科,它涉及土动力学、结构动力学、固体力学、计算数学和电子计算技术等多个学科,主要研究土与结构动力系统相互作用的数学模型、力学机理、耦合效应、界面特性和计算分析方法等,解决多种介质的动力耦合问题,为结构工程、岩土工程、地下工程、防护工程等众多领域的动力分析和工程的动力可靠性设计提供理论基础和分析方法。随着建设工程安全性要求的不断提高以及抗震防灾工程的迫切需要,今后这门新的交叉学科将有较大的发展。

在动力荷载作用下,土体和结构是一个受力的整体,变形和运动互相制约,无论是土体还是结构的性质,如土层的分布、变形模量和阻尼以及结构的刚度、形状和尺寸等,都将影响土与结构系统的动力特性。因此,对土与结构系统进行分析时必须同时考虑土体和结构的性质以及它们之间的相互影响即相互作用(Interaction)。土与结构动力相互作用是近年来得到广泛关注的课题,主要包括波动场中地基土与结构的相互作用和局部动力源(振源)下土与结构的相互作用两类。第一类课题研究对象主要包括地震波场或其他波动场中与地基或围岩相连接的高层建筑、大型桥梁、地下结构、大型水坝、海洋平台、管道、核电站等;给定输入波场,研究散射体(Scatterer)即结构及其附近土体的动力反应,包括孔洞、裂缝和夹杂物的动应力集中,地上和地下结构在天然和人工地震波作用下的响应等均属于这类课题研究的内容。第二类课题研究对象包括振源或其他动荷载如风载和车辆荷载等作用下与地基或围岩相连接的基础、建筑物、桥梁、路面结构、地铁隧道结构和轨道-道床等;给定动荷下研究这些结构及其附近区域内土体的动力响应是这

类课题的主要研究内容,动力基础问题是最早研究的这类课题之一。

1.2 相互作用对土与结构系统动力特性的影响

在土与结构的动力系统中,由于结构界面对波的散射,自由场的动力反应有所改变。土层的存在通常会放大基岩的输入波(如地震波),这种放大效应对水平运动分量的影响比较明显,使地基上的结构特别是高耸结构产生相当大的摇摆运动分量。对不同频率的输入波,放大效应的影响不同,从而使作用于结构上加速度时程的改变随频率也不同。土层的相对柔软性,使土-结构系统的频率降低,土层较厚时基频会远低于基岩的输入波频率,并且振型也将明显改变,因此,结构动力响应的幅值和特性有所不同。另一方面,结构与土体之间的界面上存在能量交换现象,结构吸收土体中波的动能而产生惯性运动,结构的振动能又通过界面辐射到土体中。土体为无限介质时,能量将辐射到无穷远处而消耗;土体为一有限浅层介质时,能量则主要由土的材料阻尼消耗。结构通过界面辐射能量最终使动力系统的等效阻尼明显增大,导致结构振动急剧衰减。综上所述,动力相互作用有三个明显的效应:一是系统的频率降低,二是系统的等效阻尼明显增大,三是对基岩的输入波的放大效应。这些相互作用效应将显著地改变系统动力响应的性质和特性。因此,在分析土与结构系统的动力时,相互作用的影响是不可忽视的。

1.3 无限域和人工边界问题

结构周围的土体通常是半无限介质,对静荷载下土与结构相互作用进行分析时,由于荷载对远离结构的土体的影响可以忽略不计,因此可在离结构较远处引入虚拟边界,截取有限区域内的土体进行模拟,把问题直接转化为对由结构和有限土体组成的体系的分析。但在土与结构动力相互作用的分析中,由于虚拟边界会把由结构辐射出来的波反射回已被截取出来的有限土体中,使波无法透过虚拟边界而辐射至无穷远处,即无法满足辐射条件(Radiation condition),因而不能简单地截取有限土体进行分析,通常可在虚拟边界上设置人工边界条件如人工透射边界条件(Artificial transmitting boundary condition)或人工阻尼边界条件(Artificial damping boundary condition)等,使截取的有限土体与外部无限土体之间能进行能量交换,保证外行波穿过边界辐射到无穷远处,或使能量消耗在边界上而不反射到已截取的有限土体中。考虑无限域对动力相互作用影响的另一思路是,解析地模拟无限域内波的辐射条件,如使用无限元、边界元、映射单元或分区耦合法等进行分析,由这些方法真实地模拟无限域情况。但每种方法都有一定的局限性。无限元法中形函数衰减因子带来一些不确定性,波数因子的引入带来应用的局限性。边界元法应用于非均质、非线性、不连续等情况存在相当大的困难,全空间的基本解导

致地表无限面域积分,半空间基本解又难于适应复杂的地形的计算。分区耦合法在近区采用数值法或半解析法,而在外区采用适用于无限域的解析法,因此在数学上有一定的难度,也有一定的局限性。

1.4 土与结构动力相互作用的分析方法

土与结构动力相互作用的大多数课题包含在各类相关学科之中,随着这些相关学科的发展建立了相互作用的各种分析方法。这些方法按求解域划分为时域法和频域法,按求解方法划分为解析法、半解析法、数值法和等效法,按求解区划分为直接法和子结构法等。表 1.1 列出了土与结构动力相互作用的各种分析方法。

表 1.1 土与结构动力相互作用分析方法分类

分类方法	分析方法
按求解域划分	时域法:模态分析法——适用于线性问题,积分法 频域法——适用线性问题
按求解方法划分	解析法:微分方程求解法,积分方程求解法 半解析法:有限层法,有限条法,边界元法无限元法,分区耦合法,样条函数法,加权残值法等 数值法:差分法,有限元法,离散元法 等效法:集中质量法
按求解区划分	直接法:整体法 子结构法——适用于线性问题,刚性边界法,柔性边界法,柔性体积分法
按荷载输入方式划分	波场输入法:远场输入法——适用于直接法 波场分解法——适用于子结构法 惯性荷载法——适用于子结构法

在以上各种分析方法中,直接法和子结构法是在各相关学科分析相互作用时较常用的方法^[1],具有概念清晰、物理意义明确的优点。直接法通常采用解析法、半解析法模拟结构周围无限域的土体,或利用人工边界截取有限区域的土体进行模拟,并由其他方法对结构进行模拟,分别给出土体和结构的动力学方程,再由界面条件耦合求解土体和结构这两组动力学方程。直接法可求解非线性、非均质和不连续的相互作用问题,并可以利用接触单元等方法模拟土与结构的界面特性,是一种适应性较强的分析方法。

但直接法在数学处理上有较大的难度,往往是动力自由度数量很多而计算量很大,需要大容量的计算机和较长的算时。子结构法把土体和结构分别作为动力子结构来处理,通常分两步进行分析:第一步,分析土体动力子结构,确定与结构连接的自由度的力-位移关系,由此给出土的动力刚度系数矩阵(Dynamic-stiffness

matrix), 每个动力刚度系数代表一个广义的弹簧-阻尼器, 由弹簧-阻尼器体系与结构连接, 代替土与结构的相互作用。第二步, 分析由此弹簧-阻尼器体系支承的结构的振动。当荷载由波动场(如地震波)产生时, 还需分析自由场(无结构埋设)的动力响应, 以计算出作用于结构上的动荷载。子结构法可将复杂的土-结构体系分解成较容易处理的几个部分, 每一部分可采用不同的方法来计算, 因此方法灵活多样, 适应性较强, 并且计算量小。子结构法还便于系统的参数分析, 易于确定对系统动力特性影响明显的关键参数, 很适合于在工程优化设计分析中应用。当输入波场变化或修改结构设计参数时, 土的动力刚度系数不变, 不必重新计算土的动力刚度矩阵, 因此具有较高的计算效率。但子结构法隐含了叠加原理, 因而通常只适用于线性问题的分析。此外, 子结构法中由广义弹簧-阻尼器体系不能真实地模拟土与结构的相互作用, 动刚度系数也难于真实地模拟能量辐射和结构与土体之间的能量交换, 因此分析动力相互作用问题有较大的误差。

1.5 土与结构动力相互作用研究的发展

虽然土与结构动力相互作用的研究最早大约于 20 世纪 30 年代从机械基础振动问题的研究开始的, 但是研究的迅速发展是从 20 世纪 70 年代末起在防护工程和地震工程领域内取得的。特别是核电工程的发展以及对高耸、超大型结构抗震抗爆性能的研究, 人们已经认识到了土与结构动力相互作用对设计影响的重要性, 动力相互作用课题的研究才日益发展起来, 目前已经成为应用力学最活跃的一个分支学科。土与结构动力相互作用理论及应用研究的发展可从如下三个方面进行叙述。

1.5.1 自由场的响应及结构对波的散射研究

在波动(如地震波)荷载作用下, 自由场地表附近土体的运动不同于下卧基岩的运动; 另一方面, 结构对波的散射又会影响自由场的响应。因此, 不能简单地把基岩的运动作为结构基础底面的运动。为了确定作用于结构上的动荷载, 需要求解自由场的动力响应, 并考虑结构对波的散射的影响。在目前的研究中, 对自由场的响应分析已建立了多种简化分析方法。在水平地震运动作用下的水平土层的响应分析中, 把自由场简化为固定于基岩上的粘-弹性土柱的水平剪切运动来分析^[2,3], 这种处理方法简化了自由场的模型, 可给出解析解。对于非水平地表或地面建造有土坝、路堤等土工结构的不规则自由场的分析, 则采用集中质量法先把自由场用固定于基岩上做水平剪切运动的变质量土柱表示, 再把土柱划分为 N 段并由 N 个质点分别代替, 每个质点等分相邻各段土柱的质量, 相邻质点以剪切弹簧-阻尼器连接, 这一分析模型可大大地简化分析过程。对于波在层状土自由场中传播的分析, 目前大多采用传递函数法^[4], 由传递函数逐层确定土的波动。以上各种简化分析不

能考虑地表特别是不规则地表对波的散射影响。在不规则地面对波的散射研究中,文献[5~7]采用单个或一序列圆柱面与平面组成的曲面代替不规则地面,利用广义 Graf 加法公式和波函数叠加法,由各圆柱面的散射波叠加成散射波场,求出了任意 SH 入射波情况的解析解,给出了自由场地面运动的计算结果。对更复杂的自由场如任意地表边界、非线性、非均质等情况,一般采用数值方法研究^[4,8]。数值方法如有限元法、有限差分法等虽然有广泛的适应性,但这些方法用离散网格模型代替了连续介质模型而产生了一序列的新的问题,如频散性(Dispersion)、寄生振荡(Parasitic oscillation)、各向异性(Anisotropy)以及数值失稳等,这些问题影响波动数值模拟的有效性和精度。文献[8]对离散网格中波的频散、寄生振荡、稳定条件和模拟精度等理论问题做了较深入的探讨,得到了许多有价值的结论,但目前解决上述问题所见的研究成果并不多。文献[9]提出了采用含频率的高阶位移形函数改进有限元网格中波动的频散性与稳定性的方法,通过理论和数值计算,证明了改进频散性与稳定性的有效性。

结构对波的散射研究包括土体中的结构、裂缝、孔洞和夹杂物等形成的不连续面对波传播产生的影响,不讨论结构的动力响应,主要的研究有线弹性、非线性弹性、各向异性土中单个和多个圆柱、椭圆柱和球形结构^[10,11]以及孔洞^[12~14]对 SH 波和 P 波的散射,地面刚性基础对斜入射波的散射^[15,16]等内容。这些研究采用渐近展开法和波函数叠加法以及积分方程技术给出解析解,比较完整地揭示了散射体对行波影响的性质。关于这方面研究的成果十分丰富,这里不可能做全面总结。

1.5.2 土体中结构动力响应的研究

这类问题包括在波动场和局部动力源(振源)作用下土体中结构的变形和运动的研究。严格的解析法通常只适用于形状较简单的结构和线性土体,如圆柱结构、椭圆结构和球形结构等^[17,18]的情况。为分析非线性和形状复杂的结构动力响应问题,作者采用渐近解析法和映射函数方法,给出了非线性弹性土中柱结构^[19~21]、球结构^[11]和非圆结^[22,23]构等情况的解析解。由于数学上的困难,由解析法研究非线性问题的文献较少。随着数值计算方法的发展和计算机性能的提高,数值方法可模拟相当复杂的结构动力响应问题^[24,25],如模拟弹性、弹塑性、粘弹性、粘塑性、各向异性和非均匀土体性能以及各种几何形状的结构大变形和复杂的边界条件等。使用数值方法时需对时间和空间作双重离散,通常有三种离散方法^[26]:第一种方法是把时间作为连续变量,只对空间离散,求得特征频率和振型后,再由振型叠加求得结构的动力响应;第二种方法是对时间和空间同时进行离散,求得各时间间隔的各单元节点位移和力;第三种方法是对空间作离散,对时间直接数值积分求得各时间的结构位移和应力。第一种方法可求得任意时刻的结构响应值,但数学处理较复杂,且只适用于线性问题;第二、第三种方法数学上较容易处理,并可用于非线性问题分析,但计算量大,且只求得一定时间间隔的值。实际上,土中结构的动力响应分

析不能独立地求得,需要同时考虑周围土体对结构的影响。当土体为无限域时需引入人工边界截取结构周围的有限土体进行离散,通常采用的是人工透射边界或人工阻尼吸收边界,以便满足能量辐射条件,并消除外行波向所截取的土体中的反射。此外,由于数值方法巨大的计算量和非线性稳定性的高精度要求,即使有高性能计算机和先进计算技术的今天,发展高效率、高精度的计算理论和方法也是很有必要的。

1.5.3 土与结构系统的动力性能研究

土与结构系统的动力性能研究为动力可靠性设计提供依据。研究表明,在强冲击波作用下,即使结构本身没有破坏,但冲击波引起的强烈震动和冲击会对结构内的人员和仪表造成一定的损伤^[27];长期的地铁运行实践表明,地铁动载虽然对周围建筑物安全不一定构成威胁,但对居民的动力干扰及其造成的心理压力是不可忽视的^[28]。在这些情况下,动力性能是设计的主要控制因素,因此对系统的动力性能分析尤其重要。系统动力性能的分析方法有两种,一种是理论模拟分析,另一种是试验模拟分析。理论模拟分析可提供全面深入的结果,且经济、快捷,但分析结果的可靠性需由试验验证;试验模拟分析可获得较可靠的结果,但耗时耗资较多。因此,这两种方法是相互补充、配合使用的^[29]。系统动力性能研究内容包括结构对波的散射和吸收、结构的位移和应力响应、结构和隔震材料的动力性能及其减震效果、系统随机响应过程的谱分析等。目前已研制出具有高效隔震减震性能的防护结构形式和隔震装置,如具有柔软复合衬垫的结构形式和各种耗能隔震装置^[30,31]。结构外围的柔软复合衬垫材料可吸收波的大量能量,减小传到结构上的冲击力并改善结构的整体受力性能;耗能隔震装置通过摩擦、吸收消耗激振能量,减小结构的激振荷载,以起到减震隔震作用。

以上着重从三个方面总结土与结构动力相互作用研究的进展情况。需要指出的是,必须重视场地实测试验研究,尤其是对地震波动场下动力相互作用的研究更是如此,因为地震波的传播及其对结构的作用受到复杂多变和随机因素的影响,纯粹的理论分析和室内试验难于模拟复杂的现场条件,充分有效地利用地面的地震运动记录资料极为重要。

1.6 本书的主要内容

目前国内外对土与结构动力相互作用问题的研究取得了不少的成果,但这些研究成果大都散落在各相关学科分支的学术刊物和会议资料之中。关于土与结构动力相互作用方面的专著很少,不便于读者查找和阅读。国外此类著作目前仅有 Richart 等人所著的《土与基础的振动》,Wolf 所著的《土-结构动力相互作用》和《土-结构相互作用的时域分析》,其中前两种已有中译本,国内目前未见此类专著

出版。本书主要根据作者多年来在这方面的研究工作写成,全书分上、下篇,共九章。上篇为理论基础,论述土与结构动力相互作用的基本理论及分析方法;下篇为土与结构动力相互作用问题解析分析的内容,介绍由解析法给出的各类土与结构动力相互作用问题的新解。各章相对独立,读者可根据自己的兴趣选读。

第一章为绪论,综述岩土介质与结构动力相互作用的对象和内容、相互作用对土与结构系统动力特性的影响、人工边界问题、分析方法以及研究进展。第二章为土与结构动力相互作用的基本理论,介绍岩土介质的主要动力特性、土和结构的动力学方程及其解耦、辐射条件和正规性条件。第三章为土与结构相互作用系统的动力学分析方法,介绍动力方程求解的解析法、半解析法和有限元法,以及非线性动力问题的增量分析法等。第四章为自由场的波动,介绍自由波动场的求解、动应力集中和不规则地面对波的散射。第五章为移动荷载下土体与结构的相互作用分析,介绍爆炸行波下土-地下室-管道体系的动力分析、横观各向同性地基上无限板的动力反应频域求解、地铁隧道结构-地层系统的参数优化与动力分析和地铁运行荷载下的场地与建筑物的抗振问题。第六章为土体与基础的动力相互作用分析,介绍基础对入射波场的反应、地基-桥梁桩基的地震反应分析以及海洋平台-群桩-地基系统对地震和浪流冲击的反应分析。第七章为地下结构与非线性弹性岩土的动力相互作用,介绍渐近分析方法、结构与围岩介质相互作用的平面和空间问题解答、复变函数和映射函数的应用。第八章为地基与结构系统地震响应的分叉与突变性分析,介绍地基与结构系统地震响应的分叉与突变性以及共振突变性的分析、地基-滑动隔震结构地震响应的突变性分析和地基上非线性多自由度结构地震响应的共振突变性分析。第九章为土与结构动力相互作用的数值模拟,介绍人工边界和有限元模拟、波动的频散、稳定性条件以及频散性和稳定性的改进等。

参考文献

- [1] J. P. Wolf 著,吴世明、唐有职、陈龙珠等译. 土-结构动力相互作用[M]. 北京:地震出版社,1989
- [2] I. M. Idriss and H. B. Seed. Seismic Response of Horizontal Soil Layers [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1968, 94(SM4)
- [3] 房莹光. 土-桩-平台-水流系统的地震反应分析[J]. 广东工学院学报, 1994, 11(4): 8
- [4] 张克绪, 谢君斐. 土动力学[M]. 北京:地震出版社, 1989
- [5] 袁晓铭, 廖振鹏. 圆弧形凹陷地形对平面 SH 波散射问题的级数解答[J]. 地震工程与工程振动, 1993, 13(2): 1
- [6] 房莹光. 二维地表相邻多个半圆弧沟谷对 SH 波的散射[J]. 地震工程与工程振动, 1995, 15(1): 85
- [7] 房莹光. 相邻多个浅圆弧凹陷地形对平面 SH 波散射的级数解[J]. 应用数学和力学, 1995, 16(7): 609
- [8] 廖振鹏. 工程波动理论导引[M]. 北京:科学出版社, 1996
- [9] 房莹光, 莫海鸿. 有限元网格中波动的频散与稳定性的一种改进方法[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(1): 21
- [10] 房莹光. 各向异性介质中椭圆柱面对 SH 波散射的椭圆坐标求解[J]. 广东工学院学报, 1993,

- [11] 房莹光. 非线性岩土中球壳对冲击波的动力响应分析[J]. 爆炸与冲击, 1994, 14(4): 342
- [12] 房莹光. 非线性岩土中圆孔对波的散射和动应力集中问题[J]. 广东工学院学报, 1993, 10(1): 91
- [13] S. Tanimura. Stress Wave Propagation in an Elastic/Viscoplastic Half-Space Containing Spherical Cavity [J]. Ingenieur-Archiv, 1982, 52: 323
- [14] 盖秉政. 弹性波对多个椭圆孔的绕射问题[J]. 固体力学学报, 1985, 3: 353
- [15] 曾心传. SH波作用下基础-土-基础的反平面动力相互作用[J]. 地震工程与工程振动, 1989, 9(2): 67
- [16] 房莹光. 刚性基础对SH冲击波的反平面动力响应[J]. 广东工学院学报, 1995, (4): 69
- [17] H. Carnet and J. H. Pascal. Transient Response of Cylinder of Arbitrary Thickness, in an Elastic Medium, to a Plane Dilatation Wave [J]. J. Appl. Mech., 1966, 521
- [18] A. C. Eringen, E. S. Suhubi. Elastodynamics (Vol. I)—Linear Theory [M]. New York: Academic Press, 1984
- [19] 房莹光, 孙钧. 在冲击波下非线性岩土与圆柱结构的相互作用[J]. 地震工程与工程振动, 1992, 12(3): 55
- [20] 房莹光, 孙钧. 冲击环境下非线性岩土与相邻多个结构的相互作用[J]. 地震工程与工程振动, 1993, 13(2): 38
- [21] 房莹光, 孙钧. 非线性介质中圆柱结构受冲击波作用的动力响应[J]. 振动与冲击, 1994, 13(4): 67
- [22] 房莹光. 非线性介质中波与结构相互作用的研究. 同济大学博士学位论文, 1991. 6
- [23] 房莹光, 孙钧. 瞬态波作用下非线性岩土与非圆结构的相互作用[J]. 爆炸与冲击, 1993, 13(1): 55
- [24] T. Kenzo and S. F. Cheng. Generalized Method for Non-linear Seismic Response Analysis of a Three Dimensional Soil-structure Interaction System [J]. Earthqu. Engng. And Struc. Dyn., 1987, 15: 945
- [25] 孙钧. 地下抗爆结构有限元数值分析的若干问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1984, 2(1): 6
- [26] 孙钧, 汪炳鉴. 地下结构有限元解析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1986
- [27] 宋熙美. 美苏对爆炸条件下结构振动问题的研究[J]. 防护工程, 1982, 2: 43
- [28] 房莹光. 地铁列车运行的环境动力学问题研究. 广东省教育厅重点科研基金项目研究报告, 2000
- [29] 杜宏彪, 房莹光, 沈聚敏. 空间钢筋混凝土框架结构的弹性地震反应. 地震工程与工程振动, 1999, 19(2): 81
- [30] 方秦, 钱七虎. 应力波与带软衬垫的地下结构动力相互作用[J]. 爆炸与冲击, 1988, 8: 289
- [31] 周云, 徐彤, 俞公骅等. 耗能减震技术研究与应用的最新进展[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(2): 122

第二章 土与结构动力相互作用的基本理论

土和结构的动力学方程是土与结构动力相互作用理论的基础。动力学方程的建立借助于土和结构物理本构模型,动力相互作用问题的分析借助于动力学分析方法。本章先讨论岩土介质的动力性质和计算模型,包括线性粘弹性模型、非线性弹性模型、弹塑性模型和非线性等价模型,然后讨论结构的动力学方程、饱和土动力学方程的位移势函数分解,以及动力学方程求解的辐射条件和正规性条件。

2.1 岩土介质的动力性质及其力学模型

2.1.1 阻尼效应和线性粘弹性模型

岩土介质在动力作用下通常显示出较明显的阻尼,阻尼作用使土体中的动能消散而损耗。产生阻尼的机理很复杂,过去有学者做过各种假设,但一直众说纷纭,没有定论。一般认为阻尼的产生主要来源于两个方面^[1]:一是由于土体中水和空气的运动以及滑动面的摩擦产生,呈现出粘性阻尼的性质;另一方面由于土体中非完全弹性引起晶体面之间的内摩擦产生。工程中主要考虑粘性阻尼的影响,这种粘性与土的应变速率或位移速率有关,通常被视为线性阻尼。线性粘性阻尼是一般阻尼的一阶近似,多数情况下可满足工程计算的精度要求,并且很方便于数学上的处理。

具有线性粘性阻尼土介质的应力-应变关系可由线性粘弹性模型中的 Kelvin 模型(又称 Voigt 模型)表示。Kelvin 模型由图 2.1 所示的粘性元件和弹性元件并联而成,粘性元件和弹性元件分别抵抗土的弹性变形和变形速率,它们共同承担土的应力,即

$$\sigma = \sigma_e + \sigma_c = E\epsilon + \eta\dot{\epsilon} \quad (2.1.1)$$

式中: E 为土的弹性模量; η 为土的粘性系数; σ_e 、 σ_c 分别是弹性恢复力和阻尼力; ϵ 、 $\dot{\epsilon}$ 分别为土的应变和应变速率。上式表示的应力-应变本构关系亦可写成

$$\dot{\epsilon} + \frac{E}{\eta}\epsilon = \frac{1}{\eta}\sigma \quad (2.1.2)$$

式(2.1.2)的解为^[1]

$$\epsilon(t) = \exp\left(-\frac{E}{\eta}t\right)\left[\frac{1}{\eta}\int_0^t \sigma(t)\exp\left(\frac{E}{\eta}t\right)dt + \epsilon_0\right] \quad (2.1.3)$$

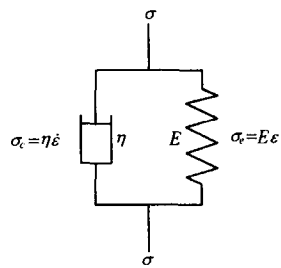


图 2.1 线性粘弹性模型

式中, ϵ_0 是初始应变。为了讨论线性粘弹性模型的动力性质, 假定土体受周期应力的作用, 且初始应变 ϵ_0 为零, 即

$$\left. \begin{aligned} \sigma(t) &= \sigma_M \sin pt \\ \epsilon_0 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.1.4)$$

式中, σ_M 为应力幅值。把上式代入式(2.1.3), 可得

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_M}{(p\eta)^2 + E^2} \left[E \sin pt - p\eta \cos pt + p\eta \exp\left(-\frac{E}{\eta}t\right) \right] \quad (2.1.5)$$

上式中第三项很快衰减为零, 因此得到稳态的应变解

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_M}{(p\eta)^2 + E^2} (E \sin pt - p\eta \cos pt) \quad (2.1.6)$$

把上式改写成

$$\left. \begin{aligned} \epsilon(t) &= \frac{\sigma_M}{\sqrt{(p\eta)^2 + E^2}} \sin(pt - \delta) \\ \tan \delta &= \frac{p\eta}{E} \end{aligned} \right\} \quad (2.1.7)$$

其中 δ 为应力和应变的相角差。比较式(2.1.4)和式(2.1.7)可知, 应变反应滞后于应力一个相角差 δ 。利用式(2.1.4)和(2.1.7), 可得

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_M}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_M}\right)^2 = \sin^2 pt + \sin^2(pt - \delta) \quad (2.1.8)$$

式中

$$\epsilon_M = \frac{\sigma_M}{\sqrt{(p\eta)^2 + E^2}} \quad (2.1.9)$$

是应变幅值。利用式(2.1.4)和(2.1.7)的第一式, 可把式(2.1.8)写成的应力-应变轨迹方程

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_M}\right)^2 - 2\cos\delta \left(\frac{\sigma}{\sigma_M}\right) \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_M}\right) + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_M}\right)^2 = \sin^2\delta \quad (2.1.10)$$

引入坐标变换

$$\left. \begin{aligned} \epsilon &= \frac{\epsilon_M}{\sqrt{2}} (\epsilon' - \sigma') \\ \sigma &= \frac{\sigma_M}{\sqrt{2}} (\epsilon' + \sigma') \end{aligned} \right\} \quad (2.1.11)$$

把式(2.1.10)变换成应力-应变轨迹的椭圆标准方程

$$\left(\frac{\epsilon'}{\sqrt{2} \cos(\delta/2)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma'}{\sqrt{2} \sin(\delta/2)}\right)^2 = 1 \quad (2.1.12)$$

图 2.2 所示是根据方程(2.12)所作的应力-应变轨迹线图案, 图中 $\sigma_m = \sqrt{2} \sin(\delta/2)$, $\epsilon_m = \sqrt{2} \cos(\delta/2)$ 。利用应力-应变轨迹线可求得一个周期内粘性元件消耗的能量为