

本书获得浙江海洋学院出版基金资助

饱和土中桩 竖向耦合振动理论与应用

李 强 王奎华 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

饱和土中桩竖向耦合 振动理论与应用

李 强 王奎华 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是关于桩土动力相互作用理论的专著。书中论述了饱和多孔介质中桩的竖向振动模型及其解,研究了桩竖向振动的工程特性,总结了饱和土中桩竖向振动领域近年来的研究进展。全书内容系统、新颖、实用性强。

全书分六章。第1章为绪论,阐述桩竖向振动理论的发展与研究现状;第2章至第4章为单层饱和土中桩竖向振动的基本理论,主要研究不同边界条件和桩土相互作用条件下的桩振动基本解和土层振动模式;第5章为成层饱和土中桩的竖向振动理论;第6章为桩竖向振动理论在大直径桩、冻融地区及海洋环境中的基桩动力特性分析中的应用。

本书可供从事岩土工程、工程抗震领域的教学、科研人员参考使用,并可供相关专业的研究生使用。

图书在版编目(CIP)数据

饱和土中桩竖向耦合振动理论与应用 / 李强, 王奎
华著. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2010. 8
ISBN 978-7-5084-7749-7

I. ①饱… II. ①李… ②王… III. ①桩—耦合—振
动理论 IV. ①TU473.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第149912号

策划编辑: 雷顺加 责任编辑: 张玉玲 加工编辑: 胡海家

书 名	饱和土中桩竖向耦合振动理论与应用
作 者	李 强 王奎华 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (营销中心)、82562819 (万水) 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京市天竺颖华印刷厂
规 格	170mm×227mm 16开本 9.75印张 194千字
版 次	2010年8月第1版 2010年8月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	30.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

桩基是一种古老的基础型式，有着悠久的历史，近几十年来在工程中得到了大量应用，是使用最为广泛的深基础之一。虽然桩基在工程中得到了广泛的应用，研究也比较深入，但是由于桩土相互作用的复杂性，仍然存在大量值得研究的问题，特别是桩土动力相互作用，涉及的问题更加复杂，研究还有待进一步提高。桩土动力相互作用包括桩竖向振动、横向振动、扭转振动及其组合形式，其中桩的竖向振动作用是进行桩基础振动分析、桩基抗震设计、基桩动力检测以及动力沉桩分析的理论基础。有关桩的竖向振动理论研究由来已久，经典的离散文克勒模型可以较好的模拟桩土间的相互作用，但忽略了土层间的相互联系，从平面应变模型发展而来的粘弹性介质连续体桩竖向振动模型考虑了土层之间的联系，但忽略了地基土的多相性，没有考虑孔隙水压力的影响，事实上在桩土耦合振动时，孔隙水特性对桩振动有重要的影响，桩振动造成孔压升高，有效应力发生变化，从而影响桩的动力特性。近年来饱和多孔介质中的桩振动研究引起了研究者的广泛重视，一些研究者采用虚拟桩法开展了饱和土中桩振动的研究，取得了一系列的成果，这些成果在桩振动分析、桩隔振设施分析中发挥了重要的作用，但虚拟桩法的不足在于桩土间必须满足完全黏结条件，这限制了该方法的进一步应用。在实际工程中，诸如基桩动力检测、动力沉桩、强震作用下的桩基振动等问题的分析不可避免的会遇到桩土滑移、桩周扰动等非完全黏结的情况，这些也是桩土动力相互作用理论的重要研究内容之一。随着数值计算技术的不断发展，上述许多桩土动力接触问题可以借助数值计算方法予以解决。数值方法可以分析较为复杂的桩土接触条件，便于群桩分析，使得桩土动力耦合问题的分析和求解快速发展。但是采用解析方法研究桩土振动问题具有许多优点，可以更容易的理解桩土动力相互作用机理，尽管目前对于复杂的边界条件下桩土动力相互作用分析仍存在着一定的困难，但开展桩振动的解析研究仍然具有重要的理论价值和工程意义。

本书通过解析方法求解桩土竖向耦合振动，系统而详细地阐述单桩与饱和土的竖向动力相互作用特性，主要内容包括：单层土中桩与饱和土体竖向振动的理论框架、扰动作用下桩与饱和土的竖向振动理论、桩振动作用下饱和土层振动模式分析、成层土中变阻抗桩的竖向振动理论，并介绍了桩竖向振动理论在大直径检测、冻融土中桩振动和海洋环境下的桩振动中的应用。这些内容对于深入理解桩土动力相互作用具有重要的意义。

由于作者水平有限，书中难免存在不足和疏漏之处，敬请读者批评指正。

李强（浙江海洋学院）

王奎华（浙江大学）

2010年7月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 桩基动力学研究简介	1
1.3 桩土竖向耦合振动理论研究现状	3
1.3.1 单相介质中桩竖向振动研究	3
1.3.2 饱和两相介质中桩竖向振动研究	5
1.4 本书内容编排	7
参考文献	9
第2章 单层饱和土中桩竖向耦合振动理论	15
2.1 单层饱和土中端承桩竖向耦合振动	15
2.1.1 数学模型与基本假定	15
2.1.2 桩土耦合问题求解	17
2.1.3 数值结果与分析	21
2.1.4 工程实例	24
2.2 饱和土中非端承桩竖向振动理论	25
2.2.1 基本控制方程	25
2.2.2 桩土系统振动解	26
2.2.3 桩的复动刚度特性	29
2.2.4 桩顶速度和位移幅频响应	32
2.2.5 桩土系统时域特性分析	35
2.2.6 对比与讨论	37
2.3 径向运动简化的饱和土中桩竖向振动	39
2.3.1 饱和土中桩竖向振动模型分析	39
2.3.2 简化模型竖向耦合振动解	42
2.3.3 模型对比分析	44
参考文献	48
第3章 扰动作用下饱和土中桩竖向振动理论	50
3.1 桩土滑移作用下桩竖向振动理论	50
3.1.1 端承桩考虑桩土滑移时桩竖向振动	50
3.1.2 非端承桩考虑桩土滑移时桩竖向振动	53
3.2 分区土桩竖向振动理论	61

3.2.1	挤土桩竖向振动的简化模型	62
3.2.2	挤土桩竖向振动问题求解	62
3.2.3	数值计算与分析	66
3.2.4	工程应用分析	68
3.3	饱和土中挤密桩竖向振动两阶段分析	69
3.3.1	挤密桩振动简化模型	70
3.3.2	桩土耦合振动分析	71
3.3.3	数值计算与分析	74
3.3.4	工程应用分析	77
	参考文献	78
第4章	桩竖向振动引起的饱和土层振动分析	81
4.1	饱和土层复阻抗分析	81
4.1.1	复阻抗定义	81
4.1.2	桩振动引起饱和土层振动模式	82
4.1.3	土层模态影响因素分析	86
4.1.4	与其他解的对比分析	87
4.2	桩竖向振动引起饱和土中孔压积累	89
4.2.1	桩振动模型	89
4.2.2	桩周土中孔压积累分析	90
4.2.3	数值结果与分析	91
	参考文献	96
第5章	成层饱和土中桩竖向振动理论与应用	98
5.1	成层饱和土中桩竖向振动	98
5.1.1	数学模型与基本假定	98
5.1.2	桩土耦合振动问题求解	100
5.1.3	层间相互作用假定的影响	105
5.1.4	成层土中完整桩的耦合振动特性	107
5.1.5	工程实例	108
5.2	任意段变阻抗桩竖向振动分析	110
5.2.1	任意变截面桩的振动特性分析	110
5.2.2	任意变模量桩的振动特性分析	114
	参考文献	121
第6章	桩竖向振动理论的工程应用	123
6.1	大直径桩竖向振动理论与应用	123
6.1.1	控制方程与定解条件	123
6.1.2	桩土耦合振动解	125
6.1.3	数值分析	127

6.1.4	工程实例	130
6.2	冻融作用下基桩竖向振动特性研究	131
6.2.1	数学模型与基本假定	132
6.2.2	桩土耦合问题求解	134
6.2.3	冻融参数说明	137
6.2.4	数值分析	138
6.2.5	实例分析	141
6.3	海洋基桩的竖向振动特性与应用	142
6.3.1	数学模型与基本假定	142
6.3.2	竖向振动解	144
6.3.3	数值计算分析	144
	参考文献	146

第 1 章 绪论

1.1 引言

桩基作为一种承载力高、强度大、耐久性好的深基础型式，在工程中有着广泛应用，它通常用在浅基础不能满足承载力的要求或需通过桩基来提供横向承载力的工程中，这类情况下桩基主要用来承受静荷载。在高耸结构物、海岸结构、动力基础或地震区的结构工程中，桩基还将承受风力、波浪力、不平衡惯性力以及地震力等动力荷载。动力荷载按荷载特性可分为周期荷载、冲击荷载和随机荷载。桩振动理论就是研究桩基础在各种不同性质动力荷载作用下的动力响应问题，它对于抗震设计及桩基动力检测等工作均具有十分现实的意义。

随着现代桩基工程的发展，出现了各种形式的桩基和施工方法，但不管何种施工方法，都不可避免的出现一些问题，如缩颈、夹泥、混凝土离析或断裂等缺陷，这些缺陷不同程度地影响着桩的承载力，威胁到工程的安全，同时由于桩基工程的隐蔽性，增大了检测的难度，迫使研究工作者和设计人员不断加大对桩基抗震设计和基桩动力检测的研究力度。从这两个实际工程领域出发，研究者一方面开展了桩基振动研究，另一方面对桩的波动传播问题展开研究，逐渐形成了地基基础学科的一个分支——桩基动力学。

本章首先对桩基动力学的研究作一个扼要回顾，然后重点阐述桩土耦合振动理论研究的发展，最后简要介绍本书主要内容和编排体系。

1.2 桩基动力学研究简介

桩基动力问题是一个古老的课题，最早的研究方法是把桩假定为刚体，根据牛顿撞击定律进行分析，这一方法过于简单，用于桩基动力分析偏差较大。1752年，d'Alembert 将离散的弹簧-质量块动力系统方程转化为连续体模型，提出了偏微分理论，建立了一维波动方程，奠定了桩基动力学的基础。Isaacs 考虑桩土动力相互作用，引入了反映桩周土阻力的参数项 R ，得到了^[1]中提出的公式：

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \pm R \quad (1.1)$$

式中： $u(x,t)$ 表示位移为距离和时间的函数， c 是波在介质中的传播速度。

关于桩的振动、波动问题的研究都是基于这一方程展开的。这个方程是一个二阶偏微分方程，有很多求解方法，包括封闭形式解和数值解，可以解决不同类

型的桩基动力学问题。具体说来,该方程的求解可分为波动理论和振动理论两大类,前者是利用波动方程,通过行波方法来反映波在任一时刻在桩身中的传播,后者是以分离变量法研究桩的振动特性,通过驻波的叠加反映波动的本质。波动理论直接在时域内求解,广泛应用于各种打桩分析。本书重点讨论振动理论,有关波动理论可以参见下列文献^[2-5]。振动理论将式(1.1)转换到频域,求解过程比时域解法简单,广泛应用于动力基础分析和基桩动力检测中。振动理论近几十年来深受研究者重视,研究领域包括桩的竖向振动、扭转振动、横向振动、摇摆振动等多个分支,研究内容主要集中在两方面,一是研究桩在较低频率下系统的固有频率问题,考察共振对基础的影响,以指导桩基抗震设计^[6-8];二是研究桩在较高频率下的动力特性,利用桩的共振作用进行基桩动力检测^[9-10]。本书主要讨论桩的竖向振动,其余几类桩振动研究可以参见相关文献^[11-17]。除单桩的线性振动理论外,还有考虑材料非线性^[18-20]和桩土接触面存在滑移^[21]等非线性条件下的桩土耦合振动问题以及关于群桩的分析^[22-25],可以参见 Poulos 对桩性状研究的理论和应用所提出的指导性建议^[26]。

波动理论和振动理论作为分析波动方程的两种方法,虽然在对方程的处理方法上有所不同,但实质上两者是统一的,只是从不同角度描述了桩的运动过程,不存在本质的差异,在工程实践中常需要相互转换。比如,频域分析是以谐和激振的稳态振动为前提,而实际上大量的振动问题是以瞬态或随机振动存在的,频域分析的结果在工程应用分析中往往还需要通过逆变换的方法转换到时域,以便于工程人员使用。对于桩的动力分析来说,时域与频域之间的内在联系集中体现在桩周土对桩的作用模式上。如 Nogami & Konagai 在桩土耦合振动频域分析的基础上,利用平面应变模型,提出了等效于平面应变模型的时域模型,土模型演化为三个粘弹性 Voigt 体,其参数均为与线性频率无关的常系数^[27,28]。利用这一模型, Konagai & Nogami 完成了从频域模型到时域模型的转换,并将之用于单桩和群桩的竖向及横向振动时域响应问题的分析^[29]。张德文遵循桩振动的时域分析研究方法,利用差分法对时间及空间离散后求解^[30-32],他提出的依时性粘性阻尼也是利用 Novak 和 Nogami 的阻抗函数反演得到的等值阻尼比。因此从近年的研究成果来看,频域分析和时域分析正逐步融合。

综上所述,基桩振动理论是桩基动力学的重要组成部分,无论在理论上还是工程实践中都具有重要的意义,桩基动力特性分析水平的提高有赖于基桩振动理论不断完善。桩的竖向振动理论是桩基振动理论的重要内容之一,也是各类基桩动力检测方法的理论基础,这一理论经历了数十年的发展,已取得了较丰硕的研究成果,但与工程应用的要求相比,仍存在很多问题,理论发展还未臻完善。本书正是在此背景下,基于以往的研究成果,系统研究饱和土中桩的竖向振动,采用解析方法对三维轴对称成层饱和土中完整桩及各种变阻抗桩的竖向耦合振动进行理论研究。基于本研究成果,可以深入理解桩土动力耦合作用机理,并为桩基抗震设计及基桩动力检测技术的发展与应用提供理论指导和参考依据。

1.3 桩土竖向耦合振动理论研究现状

基桩竖向振动理论是桩土共同作用理论研究的一个重要方面,研究方法主要有解析法、半解析法和数值方法。桩振动分析的关键在于建立合理的桩土耦合振动的数学物理模型,其中的难点和重点之一是桩周土体的模拟。桩土耦合作用计算模型可分为离散模型和连续体模型,连续体模型依据不同的土体模型假定,又可分为单相介质及饱和双相介质中的桩土动力相互作用模型两类。下面简要介绍国内外桩竖向耦合振动理论研究现状,对国内外的研究成果作一综述。

1.3.1 单相介质中桩竖向振动研究

早期的研究中,多数研究者将土视为单相介质来建立桩土耦合振动控制方程,求解桩的振动特性。常用的方法之一是将桩周土对桩身作用简化为分布式线性弹簧模型或线性粘弹性模型,以离散模型来模拟桩土相互作用,这种模型表达简单,只要确定了合理的弹簧及粘性系数,则可较好的模拟桩土共同作用。图 1.1 为这种模型的简化示意图。经众多研究者的发展,该模型已较为完善,不仅可用来分析线性问题,还可以分析非线性问题和群桩。模型中的系数一般可通过类比的方法确定,如与其他连续体模型对比,或与三维有限元计算结果对比,也可由室内试验或现场原位试验取得。王奎华等对离散粘弹性模型下的桩竖向振动理论进行了系统研究^[33-36],得出了任意段变阻抗桩的竖向振动解析解,并将之应用于 PIT 工程实践中,取得了良好的效果。前面提到的张德文的主要研究也是基于这种粘弹性模型,利用差分法对时间及空间离散后求解桩的时域特性,只是刚度和阻尼系数的取值方法不同,利用了 Novak 和 Nogami 的阻抗函数来反演所需的等值阻尼比。刘东甲同样依据 Novak 的平面应变模型转化得到桩周土等效参数 k 和 c ,并将之应用于多缺陷桩振动分析^[37-38]。Makris 综合分析了桩周土的复刚度的几种取值方法,指出了 Novak 复刚度公式存在的缺陷,给出了对复刚度取值的建议^[39]。利用有限元法和边界元法进行桩土耦合振动分析时所采用的桩土相互作用模型也属于离散模型,有限元法的关键在于半空间动力边界问题的处理。由于桩周土为半无限域,若设置人工边界截断,在动力作用下产生的波会在截断边界处导致波的反射,从而影响计算结果。Banley 较早采用有限元法对线弹性桩土系统进行了分析,致力于寻找较为理想的传递边界,研究了单桩的动力刚度、振动能量的逸散衰减问题。梁国钱通过将有限元和无界元相结合的方法,较好地解决了边界处理问题,探讨了成层地基中桩的振动特性^[40]。边界元法由于其边界积分方程中的奇异基本解满足辐射条件,因此可以满足无限远处边界条件,不需进行特殊处理。Sen 和 Davis 分别利用该方法研究了均质土和非均质土中桩的稳态动力响应问题^[41],Banerjee 直接采用三维时域边界元公式进行瞬态动力分析^[42]。边界元法的不足之处是在较复杂的情况下难以得到通用的基本解,使其在实际应用中受到一定限制。

桩土动力相互作用模拟的另一种处理方法是采用连续体模型, 将桩土接触面以某种连续条件表达, 通过解析或半解析的方法对问题进行求解。Fowler 研究了弹性半空间中圆形杆的竖向稳态激励问题^[43], 继承了 Muki 发展的分析弹性半空间中杆件荷载传递问题的虚拟杆件法^[44], 这一方法将半空间中植入桩的问题分解, 形成一个完整的半空间和一根虚拟桩, 其桩土共同作用计算简图如图 1.2 所示。独立求解两个分解问题, 然后利用虚拟桩与半空间完全接触的耦合条件, 将问题转化为第二类 Fredholm 积分方程, 最终通过数值方法求解可得到桩的振动特性。

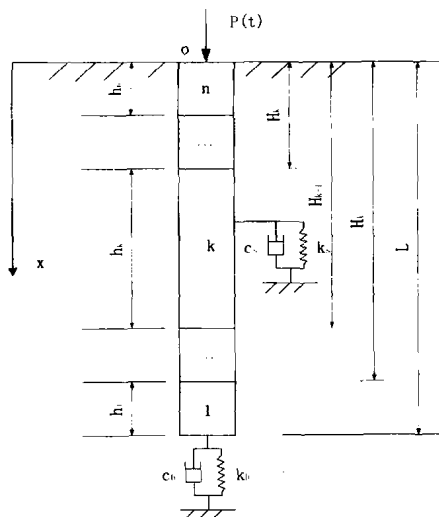


图 1.1 离散粘弹性模型计算简图

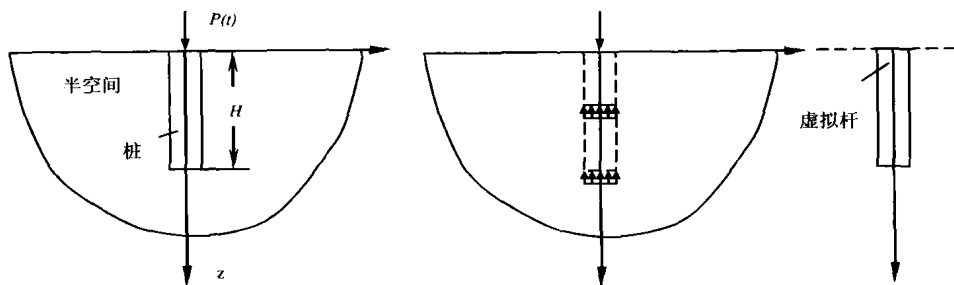


图 1.2 半空间轴对称连续体模型计算简图

Rajapakse 等人指出, 直接将静力荷载传递分析的虚拟杆件法应用于动力分析中可能由于数值计算不稳定和歪曲而造成不能合理解释桩土系统的动力特性, 推导了轴对称谐振环形荷载下的 Green 函数, 基于 Lagrange 运动方程, 运用离散化技术重新解析了桩在半空间中的动力问题^[45]。Green 函数方法是一种较为有力的求解连续体相互作用问题的方法, Ji 用此法分析了 P 波对埋置桩的散射问题^[46], 但

这种方法最终是以积分方程的形式表达出求解变量, 积分方程的求解通常较为复杂, 需要繁琐的数学处理过程。Novak 等人发展的平面应变简化方法 (模型如图 1.3 所示), 大大简化了桩土相互作用问题的求解, 它不仅可用于线性小应变情况, 还可拓展到桩土非线性接触条件^[47,48]。胡昌斌在 Novak 的基础上, 改进了桩土耦合体系的求解方法, 考虑了土层之间的联系, 建立了新的考虑层间相互作用的成层土模型 (如图 1.4 所示), 进而发展了成层土中任意段变阻抗桩的振动解析解, 并将之用于基桩动力检测中, 也取得了较好的效果^[49]。王奎华^[50]进一步提出了考虑土体三维波动效应的桩振动理论, 其解更加严格, 具有一定优越性。

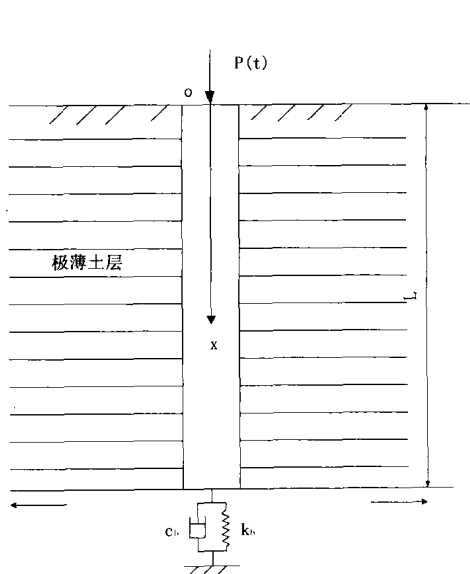


图 1.3 平面应变模型计算简图

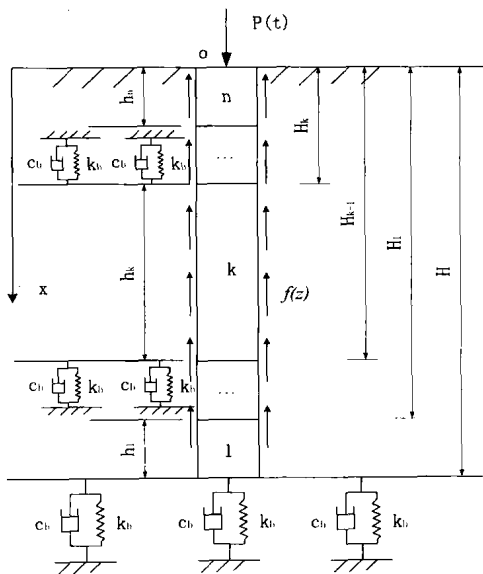


图 1.4 考虑层间相互作用的简化计算模型

1.3.2 饱和两相介质中桩竖向振动研究

上面简要介绍了桩基耦合振动理论的研究现状, 可见, 虽然近年来国内外学者在桩竖向振动理论研究上已取得了丰硕的研究成果, 但还存在很多值得探讨的问题。其中一个重要方面是土中孔隙水对桩竖向振动的影响问题, 由于饱和土中桩土共同作用问题较单相介质复杂得多, 这方面的研究甚少, 无论解析解、半解析解还是数值解研究的均不够充分, 有许多问题尚待解决。就解析解和半解析解而言, 多数是在极其简单 (均质、各向同性、线弹性的一维问题、半空间或全空间问题) 或是在某些极端情形下给出的。但解析方法有着自身的优点, 它可以深入揭示问题的物理本质, 可以检验数值方法的精度和收敛性, 复杂情形的解析或半解析解通常以 Green 函数和积分方程形式出现, 对边界元的应用与发展可起到促进作用。此外, 对一些特定问题建立合理的简化解析模型, 可以减少大量的数

值计算,便于工程应用。因此,探索有效的解析解或半解析解仍然具有比较重要的意义。

桩振动理论中,对于由桩振动引起的土层振动模式一直以来没有形成合理的概念化模型,有时会与由地震波引起的桩振动发生混淆^[51,52],相关讨论也较少。Gazetas 根据平面应变模式给出了分象限假设^[53],对辐射阻尼给出了波动解释。杨军^[54]在 Gazetas 对单相介质辐射阻尼分析的基础上,分析了饱和两相介质中水平振动的辐射阻尼简化算法,阐述了两种纵波的独立作用。Japon 在研究饱和土层上条形基础时对土层共振频率进行了简单的波动分析^[55]。这些讨论并未深入进行,没有建立完整的基础振动引起的土层振动模式。对此进行深入研究,建立合理的由桩振动引起的土层振动模型很有必要。

此外,关于基桩振动理论目前仍是以一维杆件理论为基础,其发展主要在于对桩周土模型的改进,很少有关于桩的三维效应及大直径桩动测的研究和应用。黎正根曾讨论过三维波动方程在大直径桩基动测中的应用^[56],但其分析未考虑桩周土,也未给出桩的动力响应的具体表达,仅对大直径桩的弥散性给出了定性的分析。目前尚未有考虑桩土三维耦合效应的基桩振动理论研究,而实际工程中对于短粗桩动测普遍存在很多问题,因此这方面理论的发展急待解决。

诚如所述,关于结构与地基的动力相互作用问题研究仍集中于地基土为单相介质的情况,对于地基土为两相介质研究得还较少,而对于桩基与饱和土的动力相互作用的研究则更少,发展还很不完善。本书拟研究饱和土中桩的竖向振动理论,因此首先概述饱和和多孔两相介质动力学进展。

饱和和多孔介质是指孔隙中充满流体的多孔连通介质,饱和土是最常见的一种饱和和多孔介质。饱和多孔两相介质动力学在声学、地震工程、地球物理勘探、土动力学和动力基础等方面有着重要的应用,近几十年来,关于饱和两相介质动力学的研究受到广泛的重视,取得了丰硕的研究成果,可参见赵成刚^[57]、陈少林^[58, 59]的研究综述。

目前工程上饱和多孔介质理论的应用主要是基于 Biot 理论或 Truesdell 提出的混合物理论。Biot^[60, 61]通过热力学原理建立了线性本构关系,运用拉格朗日方程,建立了惯性项和粘性项耦合的系统动力方程,前瞻性预言了两相无限介质中存在三种体波:快纵波(P波)、慢纵波(Biot波)和横波(S波),三种波均为频散、衰减波。这一预言历经二十多年后才由试验证实,Plona(1980)首次在实验室用烧结玻璃模拟多孔介质观测到 Biot 波^[62],Nakagawa 在砂砾土中观测到该波^[63]。关于饱和多孔两相介质本构方程的理论研究还可以参见 R.de Boer 所做的文献综述^[64]。本书主要基于 Biot 理论对饱和土体动力响应问题及其与结构的相互作用问题进行研究。

深入了解饱和多孔介质中波的传播对于理解桩土共同作用的机理是非常有益的,国内外大批学者从不同角度对饱和土体中弹性波的传播特性进行过研究^[65-69]。作为研究结构与饱和介质相互作用的理论基础,饱和介质中的力的传递与扩散也

受到广泛关注。Philippacopoulos 利用 Hankel 变换, 采用 Helmholtz 分解, 求解了饱和半空间的 Lamb 问题, 得到了频率~波数域内的解析表达式, 继而分析饱和弹性半空间上覆盖弹性土层的稳态动力响应^[70,71]。陈胜立等利用动力 Green 函数, 求解了饱和地基内部埋置点源荷载的问题^[72]。丁伯阳等利用势场分解较好地解决了饱和两相介质中两种纵波的耦合问题, 并对饱和半空间中的力传递特性进行了研究^[73]。张引科^[74]等基于积分变换法提出位移组合积分变换和应力组合积分变换式, 求解了饱和土三维非轴对称问题的动力方程, 得到了以土骨架位移和孔压为基本未知量的积分解, 系统研究了饱和土的 Lamb 问题。顾尧章^[75]、王立忠^[76]、王建华^[77]、方诗圣^[78]等人分析了低频下饱和成层半空间中力的传递问题, Senjuntichai 给出了饱和土半空间的动态格林函数解^[79], Rajapakse 进而解决了多层饱和介质中的动力响应问题^[80]。Philippacopoulos 从非均质 BIOT 动力固结方程出发得到了饱和多孔介质半空间问题的解^[81]。

以上有关饱和多孔两相介质的本构模型, 饱和土体中弹性波的传播及动力响应的研究为进一步研究桩与饱和介质相互作用奠定了基础。桩与饱和土的动力相互作用的核心问题是流固耦合的解耦以及桩与饱和土体的耦合模型。流固耦合的解耦问题所采用的方法一般可归为两类, 一类是采用 Laplace-Hankle 联合变换, 将动力固结方程化为常微分方程组, 解法上与分析静力问题时的状态空间法类似, 一般用于半空间求解; 另一类是通过引入势函数, 将饱和土动力固结方程解耦, 其优点是可以采用分离变量法求解。Senjuntichai 用此方法求解了饱和多孔介质中含圆孔的平面应变问题^[82], Hasheminejad 分别给出了平面应变和三维非轴对称条件下的饱和土体孔洞解^[83,84]。桩土耦合模型在上一节中已经指出, 主要有离散模型和连续体模型两种, 饱和土中桩振动的离散模型研究主要是利用有限元法和边界元法求解, 而连续体模型主要是在 Novak 平面应变模型及虚拟杆件法基础上的拓展模型。杨军^[85]参照 Novak 平面应变假设和 Gazetas 的分象限假设, 推广了水平振动的辐射阻尼, 并用于桩在饱和土中水平振动问题的求解。Zeng^[86]等将单相介质中发展的虚拟桩法拓展到多孔饱和介质中, 解决了饱和半空间中桩的竖向振动问题, Wang 在此基础上, 利用桩-土-桩相互作用因子, 求解了饱和半空间中群桩的动力响应问题^[87]。Jin 同样采用该方法研究了饱和半空间中桩的横向振动问题^[88]。这类虚拟桩法要求桩土间必须满足桩土完全耦合条件, 不利于处理较为复杂的桩土接触问题。李强等采用分离变量法, 系统求解了桩土竖向耦合振动, 其解可以适用于较为复杂的桩土接触条件, 对于桩土相互作用具有重要意义^[89-100]。本书将对作者近年来关于饱和土中桩竖向振动理论研究成果进行总结。

1.4 本书内容编排

桩基动力学主要研究桩土间的动力相互作用, 其中天然地基土具有多相性和成层性, 而工程中所采用的桩基有很多种型式, 不同的桩型其施工方法不同, 对

地基的扰动作用有很大差异,与地基之间的相互作用也有明显区别,而且桩在施工中也难免会出现一些质量问题。因此研究桩基与饱和土体的竖向耦合振动理论,分析完整桩及各类变阻抗桩在不同桩土条件下的频域和时域竖向振动特性,对于深入理解桩土竖向耦合振动机理,指导基础抗震设计和基桩动力检测,具有非常重要的意义。

本书总结了作者及合作者近年来在饱和土中桩振动领域的主要研究成果,概括来说其理论体系的主线是以单层饱和土中桩竖向振动基本解为基础,向更为复杂的桩土耦合条件拓展,这种拓展有两个方向,其一是向成层土发展,其二是向更为复杂的桩土接触条件发展。为实现成层土中桩振动解析,发展了饱和土中弹性支承桩模型,它是在端承桩的基础上,考虑桩底不是刚性支承的条件下,以弹簧简化桩底支承,同时土层底部边界也用文克勒地基简化。在饱和土层中弹性支承桩的基础上又发展了双层及成层土中的桩振动模型,利用桩端的动力阻抗传递来实现饱和成层土中桩振动的解析。为实现更为复杂的桩土接触条件下的桩振动求解,发展出了桩土非完全耦合的桩振动模型和分区土桩振动模型,前者可以考虑桩土相对运动,后者可以模拟成桩挤土对桩振动的影响。书中还对于饱和土中桩振动的土层振动模式进行了详尽的分析,此外还对于几种工程应用,如大直径桩检测、冻融地区的桩振动和海洋高桩的竖向振动特性进行了分析。这些模型的建立丰富了饱和土中桩振动的内容,提高了对桩土竖向振动理论的认识,形成了较为完整的饱和土中桩竖向振动理论。

本书的主要章节编排如下:

1. 桩土竖向耦合振动的理论研究现状^[89]

从桩基动力学的发展和桩竖向振动理论的三种分析方法入手,介绍了桩竖向振动的主要研究成果。

2. 单层饱和土中桩竖向耦合振动理论^[90-92]

建立饱和土中端承桩及非端承桩在任意激振力作用下的竖向振动模型,通过解析方法求解桩土耦合振动解,从而得出桩顶动力响应解析或半解析解,并对影响桩竖向振动特性的主要因素加以分析,同时也给出了一种简化分析方法。

3. 扰动作用下饱和土中桩竖向振动理论^[93-95]

突破桩土完全黏结限制条件,建立了非完全黏结条件下饱和土中桩竖向振动模型,更加符合桩振动的实际情况;建立了分区扰动土中桩竖向振动理论,可以分析由于桩挤土造成的挤密或松弛作用对于桩振动的影响。

4. 桩竖向振动引起的饱和和土层振动模式分析^[96]

建立了桩竖向振动作用下饱和土层的振动模式,对于饱和土体与桩的共同作用机理从波动和振动两个不同的角度加以阐述,合理地解释了桩竖向振动下的饱和和土层振动问题,并对桩周孔压分布和孔压积累进行了模拟和分析。

5. 成层饱和土中变阻抗桩竖向振动理论研究^[97]

通过分析土层层间相互作用,建立了成层饱和土中变阻抗桩的竖向振动模型,

获得了桩的竖向振动解析解, 分析论证了模型的合理性, 基于所得解, 对成层饱和土中的完整桩及各类变阻抗桩的竖向振动特性进行了分析。

6. 桩竖向振动理论的工程应用^[98-100]

介绍了桩竖向振动理论在工程中的应用问题, 包括大直径桩的动力检测、冻融作用下基桩竖向振动以及海洋环境中桩竖向振动问题, 阐述了考虑横向惯性效应下大直径桩竖向振动的工程意义, 研究了冻融作用对于桩振动的影响, 分析了海洋环境中高桩的振动特性以及由于波浪作用下海床孔压积累对桩振动的影响。

参考文献

- [1] Issacs, D.V. Reinforced concrete pile formulate[J]. J. Inst. Engineers Aus., 1931, 3(9): 305-323.
- [2] Smith, E.A.L. Pile-Driving Analysis by the Wave Equation[J]. J. Soil Mech. Found., 1960, 86(SM4): 35-61.
- [3] Deeks, A.J. & Randolph, M.F. Analytical Modelling of Hammer Impact for Pile Driving[J]. Int. J. Numer. & Analyt. Meth. in Geomech., 1993, 17: 279-302.
- [4] Warrington, D.C. Closed Form Solution of the Wave Equation for Piles[D], University of Tennessee at Chattanooga, 1997.
- [5] Rausche, F., Goble, G.G. & Likins, G.E. Dynamic determination of pile capacity[J]. J. Geotechnical Engng. 1985, 111(3): 367-383.
- [6] Richart, F.E. Foundation vibrations. Transaction, ASCE, 1962, 127(1): 863-898.
- [7] Oweise, I.S. Response of piles to vibratory loads[J]. J. Geotechnical Engng. 1977, 103(2): 136-142.
- [8] Novak, M. Vertical vibration of floating piles[J], J. Engng. Mech. 1977, 103(EM1): 153-168.
- [9] 王奎华, 谢康和, 曾国熙. 有限长桩受迫振动问题解析解及应用[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(6): 27-35.
- [10] 王奎华, 谢康和, 曾国熙. 变截面阻抗桩受迫振动问题解析解及应用[J]. 土木工程学报, 1998, 31(6): 56-67.
- [11] Selvadurai, A.P.S. & Rajapakse, R.K.N.D. Variational scheme for analysis of torsion of embedded nonuniform elastic bars[J]. J. Engng. Mech., 1987, 113(10): 1534-1550.
- [12] Hache, R.A.G. & Valsangkar, A.J. Torsional resistance of single pile in layered soil[J]. J. Geotechnical Engineering, 1988, 114(2): 216-220.
- [13] Novak, M. & Nogami, T. Resistance of soil to a horizontally vibration pile[J], Earthquake Engng. Struct. Dyn., 1977, 5(3): 249-262.
- [14] Novak, M. & Nogami, T. Soil-pile interaction in horizontal vibration[J], Earthquake Engng. Struct. Dyn., 1977, 5(3): 263-281.

- [15] Gazetas, G. Horizontal response of piles in layered soils[J]. J. Geotechnical Engineering, 1984, 110(1): 20-40.
- [16] Gazetas, G. Simple radiation damping model for piles and footings[J]. J. Engng. Mech. 1984, 110(6): 937-956.
- [17] Nogami, T. & Konagai, K. Time domain flexural response of dynamically loaded single piles[J]. J. Engng. Mech., 1988, 114(9): 1521-1525.
- [18] Novak, M. & Han, Y.C. Impedances of soil layer with boundary zone[J]. J. Geotechnical Engng. 1990, 116(6): 1008-1014.
- [19] Nogami, T. & Konagai, K. Dynamic response of vertically loaded nonlinear pile foundations[J]. J. Geotech. Engng. 1987, 113(2): 147-160.
- [20] Veletsos, A.S. & Dotson, K.W. Vertical and torsional vibration of foundations in inhomogenous media[J]. J. Geotechnical Engng. 1988, 114(9): 1002-1021.
- [21] El Naggar, M.H. & Novak, M. Non-linear model for dynamic axial pile response[J]. J. Geotechnical Engineering, 1994, 120(2): 308-329.
- [22] Nogami, T. Dynamic group effect in axial responses of grouped piles[J], J. Geotech. Engng. 1983, 109(2): 228-243.
- [23] Sen, R., Davies, T.G. & Banerjee, P.K. Dynamic analysis of piles and pile groups embedded in homogeneous soils[J]. Earthquake Engng. Struct. Dyn., 1985, 13(1): 53-65.
- [24] Gazetas, G. & Makris, N. Dynamic pile-soil-pile interaction. Part I: Analysis of axial vibration[J]. Earthq. Engng. Struct. Dyn., 1991, 20: 115-132.
- [25] Gazetas, G., Fan, K., Kaynia, A. & Kausel, E. Dynamic interaction factors for floating pile groups[J]. J. Geotechnical Engineering, 1991, 117(10): 1531-1548.
- [26] Poulos, H.G. Pile behaviour—theory and application[J]. Geotechnique, 1989, 39(3): 365-415.
- [27] Nogami T, Konagai K. Time domain axial response of dynamically loaded single piles[J]. J. Engng. Mech., 1986, 112(11): 1241-1252
- [28] Nogami, T. & Konagai, K. Time domain flexural response of dynamically loaded single piles[J]. J. Engng. Mech., 1988, 114(9): 1521-1525.
- [29] Konagai, K. & Nogami, T. Subgrade model for transient response analysis of multiple embedded bodies[J], Earthq. Engng. Struct. Dyn., 1994, 23: 1097-1114.
- [30] Chang, Der-Wen. & Yeh, Shing-Hung. Time-domain wave equation analyses of single piles utilizing transformed radiation damping[J]. Soil & Found., 1999, 39(2): 31-44.
- [31] Chang, Der-Wen, Roesset, J.M. & Wen, Chan-Hua. A time-domain viscous damping model based on frequency dependent damping ratios[J]. Soil Dynamics Earthquake Engng, 2000, 19:551-558.
- [32] 张德文, 李咸亨, 欧阳金福. 时域垂直载重桩反应与土体模式应用[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 162-169.