

基于虚土桩法的 桩纵向振动理论

吴文兵 王 宁 王奎华 著



科学出版社

基于虚土桩法的桩纵向振动理论

吴文兵 王 宁 王奎华 著

科学出版社

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229,010-64034315,13501151303

内 容 简 介

桩的振动理论是桩基础抗震减震设计、动力测试和可打入性分析的理论基础,本书结合作者近年来在该领域的研究成果,系统介绍考虑桩侧土-桩-桩端土耦合条件下桩纵向振动理论的建立、解答及其应用。本书首先提出虚土桩法来严格模拟桩与桩端土的相互作用,在此基础上对均质地基、成层地基、径向非均质地基、横观各向同性地基、三维轴对称地基中的桩纵向振动理论开展系统研究,通过考虑桩端动应力扩散模式进一步对虚土桩的设置形式开展研究,并对虚土桩法用于分析新桩型的动力响应进行探索。本书内容系统、新颖、实用性强,使读者能够快速而深入地理解桩基振动理论的相关问题。

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,也可作为高等院校土木工程、水利工程、桥梁工程、港口工程等相关专业研究生和本科生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

基于虚土桩法的桩纵向振动理论/吴文兵,王宁,王奎华著. —北京:科学出版社,2017.12

ISBN 978-7-03-056298-2

I. ①基… II. ①吴… ②王… ③王… III. ①桩基础-垂直振动
②桩基础-径向振动 IV. ①TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 001771 号

责任编辑:杨光华 何 念 / 责任校对:董艳辉

责任印制:彭 超 / 封面设计:苏 波

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>

武汉中科兴业印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2017年12月第 一 版 印张:12

2017年12月第一次印刷 字数:287 000

定价:78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

桩基础因其具有承载力高、变形量小、抗震和抗液化能力强及适用范围广等优点,已成为工业与民用建筑、交通、桥梁、水利、港口及近海钻采平台等基本工程建设各个领域采用最为广泛的基础形式。桩基工程问题因此也成为各相关学科研究的热点,而桩基础在动荷载作用下的动态特性研究一直是桩基工程中面临的重要课题。桩的动态特性研究即桩的振动理论研究是以桩基础在机械动力荷载、地震荷载、波浪往复荷载、风荷载、交通荷载及人工激振等动力荷载作用下的桩土体系动态特性和响应为研究对象的,其主要目的是为桩基础抗震减震设计及桩的动态测试方法提供理论依据。

自 1967 年 Baranov 对简谐荷载作用下埋置刚体基础的纵向振动特性研究起,20 世纪 70 年代后 Novak 及其合作者开始了单桩在简谐荷载作用下纵向和扭转振动问题的系统研究。在随后的 40 多年中,桩的振动理论研究在多个领域得到了较为全面且快速的发展,其研究范围涉及从频域响应到时域响应、从单桩到群桩、从纵向振动到扭转和横向振动、桩侧土从线性到非线性、从单层均质到多层非均质、从各向同性到各向异性(横观各向同性)、从弹性到黏弹性、外荷载从简谐稳态激振到瞬态激振等多个分支领域。解析法、半解析法、有限元法及边界元法等各种解析的和数值的求解方法也被广泛应用。在桩侧土对桩作用的处理上,从比较简单的动态 Winkler 模型,到平面应变模型,再到不考虑桩侧土体径向位移的桩土耦合模型,进一步发展到考虑桩侧土三维波动效应的严密耦合模型及均质弹性半空间连续介质与有限长杆件动力耦合作用模型等。相比之下,由于对桩与桩端土动力相互作用问题建立严格耦合模型的难度较大,桩端土对桩振动特性的影响研究显得非常薄弱。现有的桩与桩端土动力相互作用模型主要有动态 Winkler 模型、固定边界和自由边界模型、虚拟杆与弹性半空间叠加模型等,这些模型均无法考虑桩尖以下土层的成层性因素、持力层厚度、桩尖土体受施工扰动及桩端沉渣等因素的影响。基于此,我们提出了虚土桩法来模拟桩与桩端土的动力相互作用,并基于虚土桩法系统研究了复杂工况下圆截面实心桩、管桩、楔形桩、静钻根植桩等桩型的纵向和扭转振动问题,取得了一系列创新研究成果。研究结果表明,虚土桩法可以实现桩与桩侧土、桩端土的完全耦合,能考虑桩端以下岩土体的非均匀性(成层性)、桩端沉渣等因素的影响,且虚土桩法还可以描述竖向静荷载作用下成层地基中单桩沉降随时间发展的过程。因此,虚土桩法在桩的动、静态特性分析方面有着明显的优势,是一个具有广阔应用前景的理论模型。

本书通过解析方法对基于虚土桩法的桩纵向振动理论进行系统研究。本书力求保证理论体系的完整性,又兼顾理论服从实践的宗旨。本书共分八章,主要内容包括:绪论,均质地基中基于虚土桩法的桩纵向振动理论,成层地基中基于虚土桩法的桩纵向振动理论,径向非均质地基中基于虚土桩法的桩纵向振动理论,横观各向同性地基中基于虚土桩法的桩纵向振动理论,三维轴对称地基中基于虚土桩法的桩纵向振动理论,考虑桩端应力扩

散时基于虚土桩法的桩纵向振动理论,基于虚土桩法的静钻根植桩纵向振动理论。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。

中国地质大学(武汉)工程学院为我创造了良好的科研环境和学术氛围,在此对学院表示感谢。本书得到了国家自然科学基金(50879077,51309207,51678547)、中国博士后科学基金面上项目(2012M521495,2016M600711)、中国博士后科学基金特别资助项目(2013T60759,2017T100664)、岩土钻掘与防护教育部工程研究中心开放基金(201402)和中国地质大学(武汉)第六批摇篮计划(CUGL150411)的资助,在此表示感谢。感谢课题组成员在理论研究与试验研究中给予的帮助和指导。感谢蒋国盛、段隆臣、窦斌、M. H. El Naggar、梅国雄、黄生根、卢春华、向先超、张家铭、郑明燕、李粮纲、段新胜、张智卿、杨冬英、阙仁波、吕述晖、罗永健、刘凯、李振亚、高柳、梁荣柱等为本书所提的宝贵建议和意见。感谢我的博士生刘浩、官文杰、李立辰、宗梦繁和硕士生杨松、田乙、邢康宇、张凯顺在本书出版过程中所做的校对工作。感谢岳父、岳母、爱人和两个孩子对我的支持!

本书是关于桩基动力学方面的理论专著,书中的内容为作者多年来研究成果的总结。由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

吴文兵

2017年9月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 桩-桩侧土动力相互作用模型研究现状	1
1.2.1 Winkler 理论模型	2
1.2.2 平面应变模型	3
1.2.3 三维连续介质模型	4
1.2.4 有限元及边界元数值模型	5
1.3 桩-桩端土动力相互作用模型概述	5
1.4 虚土桩法的提出及本书内容	7
1.4.1 虚土桩法的提出	7
1.4.2 本书内容	9
第 2 章 均质地基中基于虚土桩法的桩纵向振动理论	11
2.1 引言	11
2.2 桩土耦合振动的定解问题	11
2.2.1 计算简图与基本假设	11
2.2.2 桩土耦合振动控制方程	12
2.3 定解问题的求解	13
2.3.1 土层振动问题	13
2.3.2 桩振动问题	15
2.4 桩顶动力响应特性分析	19
2.4.1 不同桩长时桩端土厚度的影响	19
2.4.2 不同桩径时桩端土厚度的影响	22
2.4.3 不同桩身波速时桩端土厚度的影响	25
2.5 虚土桩法与现有桩端支承模型对比研究	28
2.6 本章小结	29
第 3 章 成层地基中基于虚土桩法的桩纵向振动理论	31
3.1 引言	31
3.2 桩土耦合振动的定解问题	32
3.2.1 计算简图与基本假设	32
3.2.2 桩土系统纵向耦合振动控制方程	33
3.2.3 桩土系统边界条件及初始条件	33
3.3 定解问题的求解	34

3.3.1	桩侧土体振动问题	34
3.3.2	第1段虚土桩桩身振动问题	36
3.3.3	成层地基中黏弹性桩振动问题	38
3.4	土层层间动力相互作用假定的影响分析	41
3.5	桩端土性质对桩顶动力响应的影响分析	42
3.5.1	单层桩端土	42
3.5.2	双层桩端土	46
3.6	桩端沉渣对桩顶动力响应的影响分析	47
3.6.1	嵌岩桩	48
3.6.2	非嵌岩桩	51
3.7	工程实例分析	53
3.8	本章小结	54
第4章	径向非均质地基中基于虚土桩法的桩纵向振动理论	56
4.1	引言	56
4.2	桩土耦合振动的定解问题	56
4.2.1	桩-土动力相互作用模型及基本假设	56
4.2.2	桩土系统耦合振动控制方程	58
4.2.3	桩土系统边界条件及初始条件	59
4.3	定解问题的求解	60
4.3.1	土层振动问题	60
4.3.2	桩振动问题	62
4.4	桩侧土施工扰动效应对桩顶动力响应的影响分析	66
4.4.1	径向划分圈层数的影响	66
4.4.2	桩侧土扰动区域扰动范围的影响	68
4.4.3	桩侧土扰动区域扰动程度的影响	72
4.5	桩端土挤密效应对桩顶动力响应的影响分析	74
4.5.1	桩端挤密层厚度的影响	75
4.5.2	桩端挤密层径向挤密范围的影响	76
4.5.3	桩端挤密层径向挤密程度的影响	77
4.6	任意段变阻抗桩振动特性分析	78
4.6.1	任意段变截面桩	78
4.6.2	任意段变模量桩	82
4.7	本章小结	83
第5章	横观各向同性地基中基于虚土桩法的桩纵向振动理论	86
5.1	引言	86
5.2	桩土耦合振动的定解问题	86
5.2.1	计算模型与基本假设	86
5.2.2	定解问题	87

5.2.3 定解条件	90
5.3 定解问题的求解	91
5.3.1 土层振动问题	91
5.3.2 桩振动问题	92
5.4 土的各向异性对桩顶动力响应的影响分析	96
5.4.1 桩侧土各向异性的影响	96
5.4.2 桩端土各向异性的影响	97
5.5 本章小结	98
第6章 三维轴对称地基中基于虚土桩法的桩纵向振动理论	100
6.1 引言	100
6.2 桩土耦合振动的定解问题	100
6.2.1 计算模型与基本假设	100
6.2.2 桩土耦合振动控制方程	101
6.2.3 桩土体系的边界条件及初始条件	102
6.3 定解问题的求解	103
6.3.1 土层振动问题	103
6.3.2 桩振动问题	105
6.4 精度分析	107
6.4.1 关于 g_n 取值的精度问题	107
6.4.2 关于 $\overline{K}^s$ 的精度分析	109
6.5 虚土桩部分对桩体动力响应的影响	111
6.5.1 虚土桩厚度的影响	111
6.5.2 虚土桩弹性模量的影响	111
6.5.3 桩体长径比的影响	113
6.6 轴对称模型与平面应变模型下虚土桩的特性比较	115
6.6.1 摩擦桩	115
6.6.2 端承桩	117
6.7 桩端土成层性对桩体复刚度的影响	118
6.8 本章小结	120
第7章 考虑桩端应力扩散时基于虚土桩法的桩纵向振动理论	122
7.1 引言	122
7.2 桩土耦合振动的定解问题	122
7.2.1 虚土桩模型的分类	122
7.2.2 计算简图与基本假设	124
7.2.3 控制方程及边界条件	125
7.3 定解问题的求解	126
7.3.1 土层振动问题	126
7.3.2 桩振动问题	126

7.4	泡形虚土桩的确定方式	128
7.4.1	B-B 模型	128
7.4.2	B-T 模型	130
7.5	不同虚土桩模型下桩体的动力响应	132
7.5.1	基于 B-B 模型的分析	132
7.5.2	基于 B-T 模型的分析	141
7.6	基于平面应变的各类虚土桩模型对比分析	146
7.6.1	摩擦桩桩体复刚度响应分析	147
7.6.2	端承桩桩顶动力响应分析	147
7.7	工程实例分析	149
7.8	本章小结	151
第 8 章	基于虚土桩法的静钻根植桩纵向振动理论	154
8.1	引言	154
8.2	径向非均质理论下的桩土纵向振动问题	154
8.2.1	数学模型	154
8.2.2	土体纵向振动方程建立及求解	155
8.2.3	桩纵向振动方程建立及求解	157
8.3	静钻根植竹节桩的动力响应特性分析	159
8.3.1	竹节的影响	160
8.3.2	桩端扩径尺寸的影响	162
8.3.3	桩侧注浆的影响	164
8.3.4	浆液配比的影响	166
8.4	静钻根植桩桩顶速度波信号实例模拟	167
8.4.1	单节静钻根植桩实例拟合	169
8.4.2	多节静钻根植桩实例拟合	170
8.5	本章小结	171
参考文献		173

第1章 绪 论

1.1 引 言

桩基础是既古老而又常见的深基础形式,桩的作用是利用自身远大于土体的刚度将上部结构物的荷载传递到桩侧土及桩端较坚硬、压缩性小的土或岩石中,从而达到减少沉降、使建(构)筑物满足正常使用功能及抗震等要求。桩基由于具有承载力高、沉降及差异沉降小、稳定性好、抗震和抗液化能力强、适用范围广等优点,目前已广泛应用于工业与民用建筑、桥梁、港口、船坞、水利枢纽、近海钻采平台、高耸与高重建(构)筑物及动力基础等基础工程中。除了桩基大规模的使用外,随着我国基本建设事业的蓬勃发展,许多新桩型如超长桩、大直径预应力混凝土管桩、大直径钢管桩、挤扩支盘桩(DX桩)、咬合桩、预应力竹节管桩等也不断涌现出来。因此,为适应日益快速增长的经济和基础建设发展的需要,对桩基础在各种不同动力荷载(纵向、横向、扭转等动力荷载)作用下各类型桩振动特性进行研究在桩基础抗震、减震设计及桩的各种动态测试方法中具有十分重要的理论意义和工程使用价值。

桩的动态特性研究即桩的振动理论研究是以桩基础在机械动力荷载、地震荷载、波浪往复荷载、风荷载、交通荷载及人工激振等动力荷载作用下的桩土体系动态特性和响应为研究对象的。对桩基振动理论的系统研究可追溯到 Baranov^[1]对简谐荷载作用下埋置刚性基础的纵向振动特性研究,随后的几十年中,经过几代国内外学者的共同努力,桩的振动理论得到了迅猛发展且渐成理论体系。同时,对于各类桩型,不管采用何种施工方法,都不可避免地出现缩颈、夹泥、混凝土离析或断裂等施工质量问题,这些质量问题不同程度地影响着桩的承载力,威胁到工程的安全,同时桩基工程的隐蔽性,增大了检测的难度,迫使设计人员和研究工作者不断加大对桩基抗震减震设计与桩基动态测试方法的研究力度。从构建理论体系和服务工程实践两个方向出发,国内外学者针对桩的振动特性开展了大量研究工作,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-桩侧土动力相互作用模型、桩-桩端土动力相互作用模型的研究进展做一个扼要回顾,然后重点阐述虚土桩法的核心思想及优点,最后简要介绍本书主要内容。

1.2 桩-桩侧土动力相互作用模型研究现状

由于桩土动力相互作用问题的复杂特性,学者在研究桩土系统在各类动力荷载作用下的动力特性时往往会针对具体实际工况提出一些近似假设,进而由浅入深地对复杂桩

土系统振动问题进行求解分析。迄今为止,这方面的工作已有很大发展并已经取得了大量的研究成果,这些研究成果可以从不同角度进行分类,从桩-桩侧土动力相互作用模型方面来看,主要有 Winkler 理论模型、平面应变模型、三维连续介质模型、有限元及边界元数值模型等。众多学者共同努力,采用这些模型由简单到复杂逐步揭示了桩土动力相互作用的机理。下面分别对这四类桩-桩侧土动力相互作用模型进行详细阐述。

1.2.1 Winkler 理论模型

Winkler 理论模型将桩看成埋置于土介质中的梁,将桩侧土对桩的动力阻抗用连续分布且相互独立的弹簧和阻尼器代替,由于该模型简便实用,且物理概念清楚,它已经在工程实践中得到了广泛应用。纵观前人研究成果,可以看出 Winkler 理论模型具有以下几个优点:①采用 Winkler 理论模型得到的结果与严格解和数值解吻合得较好;②计算工作量小;③采用合理的桩-桩相互作用模型,可拓展到群桩动力响应问题;④可以考虑土体纵向成层及径向非均质特性甚至土体的非线性性质。基于 Winkler 理论模型的常见桩土动力相互作用计算模型如图 1.1 所示。

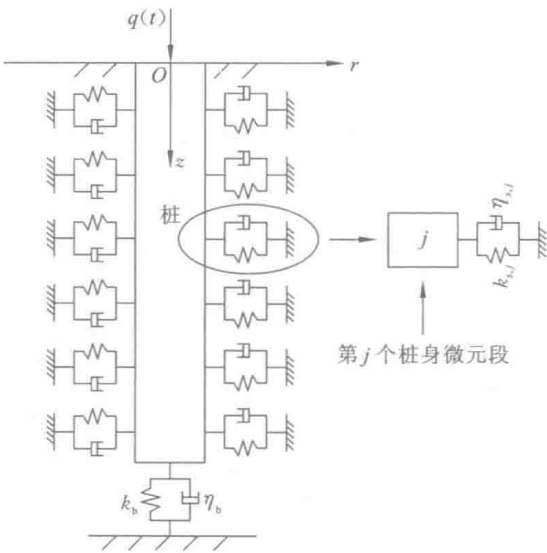


图 1.1 基于 Winkler 理论模型的桩土动力相互作用计算模型

$q(t)$ 为桩顶纵向激振力; k_b 为桩端土黏弹性支承的弹性系数; η_b 为桩端土黏弹性支承的阻尼系数;
 $k_{s,j}$ 为 Winkler 理论模型的弹性系数; $\eta_{s,j}$ 为 Winkler 理论模型的阻尼系数;
 r 为径向坐标,向外为正; z 为纵向坐标,向下为正; O 为坐标原点

现有研究成果中的 Winkler 理论模型已经相当丰富,从线性模型到非线性模型,从单个弹簧和阻尼并联模型到复合的多个 Voigt 体串并联模型,模拟的工况也越来越复杂。Novak 等^[2]采用 Winkler 理论模型将土体对刚性基础的纵向剪切力用一个复杂的包含一部分土体性质的剪切复刚度作用代替。随后,Novak^[3-4]采用广义的 Winkler 理论模型,在频域内分析了桩基纵向和水平向振动特性,并给出了 Winkler 模型中弹性系数和阻尼系数的经验计算方法。Novak 等^[5]结合 Winkler 理论模型采用矩阵刚度法详细研究了频

域内黏弹性桩纵向及横向振动阻抗,并通过现场试验初步验证了 Winkler 理论模型的精度。进一步,Nogami 等^[6-8]把 Novak 等频域内的解答延伸到时域,采用三个 Voigt 体串联来综合考虑桩侧土体均匀及非均匀特性,分别详细研究了横向荷载作用下基桩的弯曲响应。在上述线性 Winkler 理论模型的基础上,Nogami 等^[9-10]提出了一种可用来分析桩侧土非线性行为、桩土界面在大位移条件下相对位移和分离及循环荷载作用下土力学行为的非线性 Winkler 理论模型。El Naggar 等^[11-14]针对瞬态动力荷载和简谐荷载作用下桩的水平振动问题,提出了可以考虑桩侧土体非线性、桩土界面变形非连续性、由各种阻尼产生的能量耗散及荷载比等因素对桩基动力响应影响的非线性 Winkler 理论模型。Rojas 等^[15]提出了可以模拟桩尖、桩轴的应力和变形及由荷载传递和各土层刚度变化引起的径向和轴向土应力增加等力学特性的非线性动力 Winkler 理论模型,但各单元参数取值还有待深入研究。王奎华等将桩侧土对桩的作用简化为单个 Voigt 体,详细研究了完整桩及缺陷桩受纵向振动荷载作用下的振动问题^[16-19]。在此基础上,王奎华等采用广义 Voigt 模型模拟桩侧土对桩的动力作用,详细研究了成层黏弹性地基中黏弹性桩的纵向振动问题^[20-21]。近年来,Matlock 等^[22]、Velez 等^[23]、Randolph^[24]、Liao 等^[25]、Wang 等^[26]、蒯行成等^[27-28]、李炳求等^[29]、李耀庄等^[30]、刘东甲^[31-33]、王腾等^[34-36]、王腾^[37]、王宏志等^[38]、栾茂田等^[39]、孔德森等^[40]、周绪红等^[41]、刘忠等^[42]、王海东等^[43]、吴志明等^[44]、吴鹏^[45]、Wang 等^[46]众多学者也在多种不同工况下采用 Winkler 理论模型对桩的纵向和横向振动特性开展了全面的研究,并取得了丰硕的成果,不断地完善了 Winkler 理论模型。

1.2.2 平面应变模型

平面应变模型(计算简图如图 1.2 所示)是在 Winkler 理论模型基础上发展起来的,该模型将桩侧土体沿纵向划分为一系列无穷薄的土层,各土层之间相互独立,土体中位移、应力分量沿纵向深度的变化可以忽略,进而用桩侧土的复刚度代替 Winkler 理论模型中的弹簧和阻尼对桩土振动特性进行分析。Baranov^[1]首次采用平面应变土体模型研究了稳态纵向和水平荷载作用下刚性埋置基础的振动问题,随后众多学者采用平面应变模型对多种工况的桩土振动问题进行了更加深入的研究。Novak 等^[47]采用平面应变土体模型详细地研究了扭转荷载作用下埋置刚性基础的振动特性,并给出了桩侧土体扭转阻抗的解析表达式。随后,Novak 等^[48-51]采用平面应变模型进一步研究了桩侧土体在滞回阻尼材料情况下桩-土耦合振动问题的频域响应及时域响应。平面应变模型忽略了纵向土层之间的相互联系,从而在理论求解上比较简单,避免了繁杂的公式推导,如果对桩侧土体采用黏弹性、弹性或者弹塑性模型,可以初步反映土体的波动效应和几何阻尼,因此,平面应变模型受到了越来越多的关注和研究。Nogami 等^[6,8]、El Naggar 等^[52-53]、Veletsos 等^[54-55]、Han 等^[56]、Vaziri 等^[57]、Han 等^[58-59]、Militano 等^[60]、燕彬等^[61]、栾茂田等^[62]、王海东等^[63-64]、尚守平等^[65]、王奎华等^[66-67]、杨冬英等^[68-69]、Chen 等^[70]、Yang 等^[71-72]、刘林超等^[73]、吴文兵等^[74-78]、Wu 等^[79-81]、Liu 等^[82]众多学者先后采用平面应变模型对纵向成层、径向非均质地基中各类桩型与土的相互作用系统在纵向荷载及扭转荷载作用下的振动问题进行了深入而广泛的研究,取得了丰富的成果。

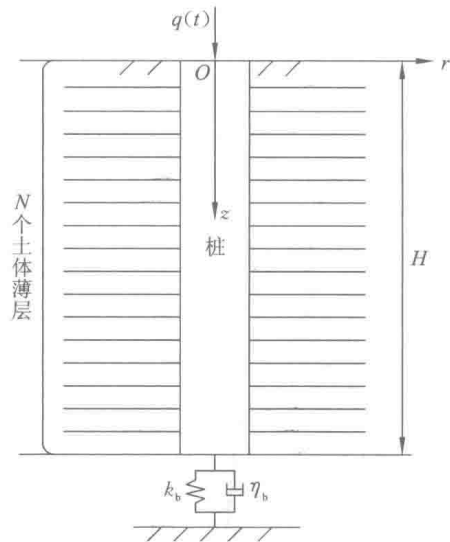


图 1.2 平面应变模型的计算简图
 H 为桩长

尽管已有的平面应变模型能较方便地用来分析各种振动荷载作用下(纵向、扭转、水平、摇摆)桩的振动问题,且具有一定的理论基础,经实践和试验验证也具有一定的适用性,但平面应变模型并未考虑桩侧土体应力、位移分量沿纵向深度的变化,忽略了各土层间联系和土层沿纵向连续等重要特性,即忽略了桩侧土体的三维波动效应、桩-桩侧土之间的三维耦合作用,假设条件与工程实际存在较大近似,理论上不够严密,采用平面应变模型及其演化的模型来分析桩土系统振动特性必定存在一定的误差。

1.2.3 三维连续介质模型

三维连续介质模型是将桩侧土体视为三维连续体,在一定的简化假定下,利用最基本的弹性动力学及波动力学原理,对各种振动荷载作用下的桩土耦合振动问题进行解析及半解析求解。连续介质模型一方面能较好地考虑桩土之间的动力耦合作用,另一方面可以考虑土体几何阻尼和材料阻尼对弹性剪切波向径向远处传播的影响,模型更加接近实际工况。

Nogami 等^[83-84]、Novak 等^[85]率先采用考虑土体竖向波动效应的三维轴对称连续介质模型系统研究了桩土纵向及水平耦合振动问题,在求得土体振动模态特性及阻抗因子后,以小变形条件下桩土接触面的位移连续考虑桩土耦合作用,采用分离变量法等数学方法得到了桩顶位移频域响应及复刚度的解析解。在此基础上,Nogami^[86]把对单桩振动问题的研究扩展到了群桩基础,获得了群桩基础的动力响应特性。但由于该方法事先假定桩振动模态形式,桩顶边界条件不能满足,土体边界条件也单一,不能适应多种土体边界模型,且该理论只能用于频域,应用有很大的局限性。Zeng 等^[87]基于 Biot 三相弹性动力固结理论,采用 Hankel 变换、Fredholm 积分方程等方法研究了均质多孔半空间弹性介

质中稳态纵向荷载作用下圆截面弹性桩的响应问题,得出了饱和均质土体中桩动力响应的理论解。最近20年,关于三维连续介质模型土体中桩土耦合振动问题的研究迎来了一个高峰期。Senjuntichai等^[88-90]、Rajapakse等^[91-92]、Das等^[93]、Chen等^[94]、Wang等^[95]、Zhou等^[96-97]、胡昌斌等^[98-101]、李强等^[102-104]、Chau等^[105]、王奎华等^[106]、阚仁波等^[107-109]、周铁桥等^[110]、Lu等^[111]、Cai等^[112]、张智卿等^[113-115]、Guo等^[116]、尚守平等^[117]、余俊等^[118]、Wang等^[119]、尚守平等^[120]、Wang等^[121-122]、杨骁等^[123-124]、Shahmohamadi等^[125]、刘林超等^[126]、王小岗^[127-128]、Wu等^[129-132]、Wang等^[133]、Lü等^[134-135]、Li等^[136-137]国内外众多学者采用积分变换、分离变量法、积分方程、变分原理及格林函数等方法先后研究了单相、饱和土体中弹性及黏弹性桩在各种激振荷载作用下的响应问题,使三维连续介质模型不断完善,接近工程实际。

尽管基于三维连续介质模型来研究桩基动力学问题已经取得了丰硕的成果,但考虑到求解中数值结果的收敛范围及数值计算的复杂性,此类方法仅适用于一定范围内桩的动力问题。因此,仍有许多基本理论、数值模拟方法及工程应用等问题值得进行更深入的研究。

1.2.4 有限元及边界元数值模型

随着计算机技术的飞速发展,用来分析桩土动力相互作用的数值模型也得到了快速发展。现有研究成果中较为常见的数值模型有有限元和边界元数值模型,这两种数值模型最大的特点就是可以考虑桩侧土体的非均质及非线性、桩土界面的不连续条件、各种形式竖向振动荷载及群桩等复杂的桩土系统动力响应问题。例如,Blaney^[138]利用轴对称有限元法对桩的振动特性进行了三维分析,Banerjee等^[139]应用边界元法研究了单桩和群桩的纵向和水平振动问题,Kuhlemeyer^[140-141]基于边界元和有限元理论对均质土中桩-土动力相互作用进行了分析,Angelides等^[142]利用发展的非线性有限元程序对桩土动力相互作用特性进行了研究,Sen等^[143]利用边界元研究了非均质土中单桩和群桩受纵向与横向动力荷载时的动力特性。此后,Gazetas等^[144-145]、Kaynia等^[146]、Lei等^[147]、赵振东等^[148]、Kattis等^[149]、Maeso等^[150]、Maheshwari等^[151]、Tahghighi等^[152]、Padron等^[153]、Yesilce等^[154]、Lü等^[155]众多学者以各种数值计算方法包括有限元、边界元或者边界元-有限元结合的方式对各类非均质土中的桩基振动进行了研究。

利用数值计算方法研究各种激振荷载作用下桩的动力响应,采用的模型越来越理想,但是,该方法仍无法做到和实际工程情况完全一致。在边界处理上,数值模型通常人为假定一个人工边界,从而导致边界上存在能量反射,极易引起计算误差;另外,要很好地模拟桩土耦合作用,尤其是模拟非均质地基中群桩动力响应问题,既要处理复杂边界条件又要细分单元,计算量极大,某种程度上这些都增加了数值计算实施的难度。

1.3 桩-桩端土动力相互作用模型概述

纵观桩振动理论研究的发展历程,可以看出,解析和半解析理论研究一直占据桩基振

动理论研究的主线,而其进展主要表现在两方面:一是桩与桩侧土相互作用模型方面,从比较简单的动态 Winkler 模型,到平面应变模型,再到不考虑桩侧土体径向位移的桩土耦合模型,进一步发展到考虑桩侧土三维波动效应的严密耦合模型及均质弹性半空间连续介质与有限长杆件动力耦合作用模型;二是桩侧土体自身的物理力学性质方面,从将土体作为单相线弹性材料、线性黏弹性材料、分数导数黏弹性材料到单相非线性、弹塑性材料,进一步发展到将土作为两相的饱和介质材料和三相的非饱和介质材料,从将桩侧土作为均质各向同性材料,发展到非均质、各向异性材料。可以说,在桩与桩侧土的动力相互作用方面,已有的理论研究已相当广泛而深入,采用的模型及所考虑的桩侧土各种参数因素也比较全面。

由于对桩-桩端土动力相互作用问题建立严格耦合模型的难度较大,相比之下,关于桩端土对桩振动特性的影响研究显得非常薄弱。但正如桩的承载力由桩、桩侧土、桩端土共同决定一样,桩的振动特性也是由桩自身、桩侧土和桩端土体共同控制的,且端承比例越高,桩端土的影响程度越大。很多研究成果也已表明,桩端土的支承条件对桩土系统的动力特性有着重要的影响。例如,桩端土的支承刚度直接决定了桩顶的纵向及扭转共振频率(而该参数受桩侧土影响却很小),也直接控制了桩顶时域反射波曲线上桩尖反射的特征和形状(图 1.3)。桩顶共振频率是桩基础抗震减震设计的重要参数(如上部结构的自振频率与桩顶共振频率重复或接近就可能出现共振破坏),桩尖反射波信号在桩的完整性检测及缺陷量化反演中起着重要作用。同时桩端土阻尼对桩顶幅频响应幅值和桩尖反射信号幅值也有较大的影响。因此,很多情况下,桩端土会成为桩振动特性的主要控制因素,研究并准确反映其影响,对正确了解桩的动、静态特性均是非常重要的,也只有这样才能进一步提高桩基振动理论的实用价值。

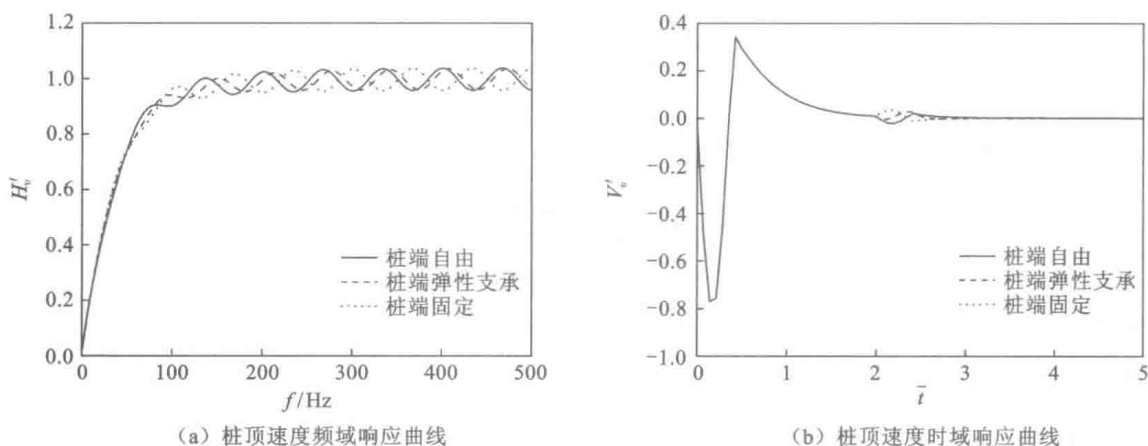


图 1.3 桩端土支承刚度对桩顶动力响应的影响示意图

H_v' 为桩顶速度频域响应函数; V_v' 为桩顶无量纲速度时域响应函数; f 为桩顶激振力的频率; $\bar{t}$ 为无量纲时间

在目前已有的理论中,桩端土对桩的动力作用模型和处理方式有以下几种:①采用简化的动态 Winkler 模型,即桩端土体对桩的作用用分布式线性弹簧和阻尼器并联来代替(如 Lysmer 等^[156]、Nogami 等^[6]、Randolph 等^[157]、Liao 等^[25]、Wang 等^[26]、王奎华等^[16-17,21]、王奎华^[18-20]、王宏志等^[38]、王腾等^[34-36]、王海东等^[43]、吴志明等^[44]、Wang

等^[46]、Wu 等^[80-81]),其参数(弹性系数和阻尼系数)只能根据经验来取常数值,与常规的土参数缺乏联系,无法考虑桩端土与桩的实际动力耦合作用及桩端土体的三维波动效应,可见这种简化模型在理论上存在较大的近似,难以反映桩端土的实际作用。②桩端土对桩尖的作用用非线性的分布式弹簧和阻尼器并联来代替(如 Militano 等^[60]、Gazetas 等^[144-145]、燕彬等^[61]),一般表示成复阻抗函数的形式,其实部和虚部的取值通过均质弹性半空间表面刚性圆盘振动理论计算得到。这种方法相比于第①种处理方式有了一定的进步,但其缺陷是没有考虑桩长范围内土体(即桩侧土体)与桩端土的相互作用影响,也无法考虑桩尖以下土层的成层性因素、持力层厚度及桩尖土体受施工扰动或桩端沉渣等因素的影响,因此,这种方法在理论上也比较粗略,与工程实际情况相差仍然很大。③将桩端边界假设为固定边界或自由边界(如 Novak 等^[49,85]、Nogami 等^[83-84]、李强等^[102,104]、栾茂田等^[62]、张智卿等^[113-115]、尚守平等^[65,117,120]、余俊等^[118]、刘林超等^[73]、Wu 等^[129]),一般对嵌岩桩采用固定边界,对纯摩擦桩采用自由边界。这种处理方式对于嵌岩桩和纯摩擦桩这两种特殊桩型是比较适合的,但对于更加常见的摩擦端承桩和端承摩擦桩都是不适用的。④均质弹性半空间土介质叠加虚拟杆处理方法。早在 1969 年、1970 年, Muki 等^[158,159] 在研究竖向静荷载作用下均质弹性半空间介质中有限长杆件的变形时,利用均质弹性半空间介质与虚拟桩(将实体桩材料参数中减去土参数部分所得到的新参数的桩)的叠加方法进行求解,避免了假设桩端的弹性支承条件问题。1999 年以后, Militano 等^[60]、Zeng 等^[87]、Chen 等^[94]、Wang 等^[95]、Senjuntichai 等^[90]、Cai 等^[112]、Lu 等^[111]、Wang 等^[119]、Zhou 等^[96-97] 将这一叠加方法拓展到多孔饱和介质(土)中桩的振动问题研究,采用积分方程方法来求解稳态简谐荷载作用下饱和均质半空间中截面均匀杆件(桩)纵向振动问题,同样通过弹性半空间介质中叠加虚拟杆避开了桩端土对桩的支承问题,但该方法在数学上并不严密,同时它仅适用于基岩埋深无限大,且整个覆盖层土体性质完全均匀时,均匀截面阻抗桩的振动问题,同样也不能考虑桩尖以下土层的成层性因素、持力层厚度及桩尖土体受施工扰动或桩端沉渣等因素的影响,由于其限制条件较多,因此它仍存在很大的应用局限性。

综上所述,在桩端土对桩的动力作用方面,已有的模型和处理方法都还存在较大缺陷与明显不足,不能适应工程应用的要求,因此急需寻找新的更加有效、更加实用的模型和计算方法来解决或改善这些问题。

1.4 虚土桩法的提出及本书内容

1.4.1 虚土桩法的提出

虚土桩法是为了研究桩端土对桩的动力作用而提出的一种新方法,该方法的基本思路是:把桩身以下正下方(即桩横截面投影范围内)桩端至基岩之间的土体看成“土桩”(即所谓虚土桩,其参数取实际土层的参数,而其变形按类似于桩的平面变形假定,鉴于基岩变形很小,基岩顶面作为刚性边界),根据实际土层成层性情况及桩端是否有沉渣或是否

受到挤密作用而把虚土桩分为若干段(图 1.4)。相关耦合条件如下:桩与桩侧土完全连续接触,虚土桩与其周围土也是完全连续接触,桩端与虚土桩交界面及虚土桩各段交界面之间也是完全连续接触。对于桩身部分按照桩的振动理论进行求解,对于虚土桩部分,采用类似于普通桩身平面变形的假设,建立各层(段)动力平衡方程后按类似于桩的方法求解。陈嘉熹^[160]、杨冬英等^[161]对虚土桩法的可行性进行了初步探讨。随后,吴文兵等^[162]利用虚土桩法求解了半空间地基上刚性圆板的垂直振动问题,并将虚土桩法的解与现有精确解进行对比分析,验证了虚土桩法具有比较高的精度。

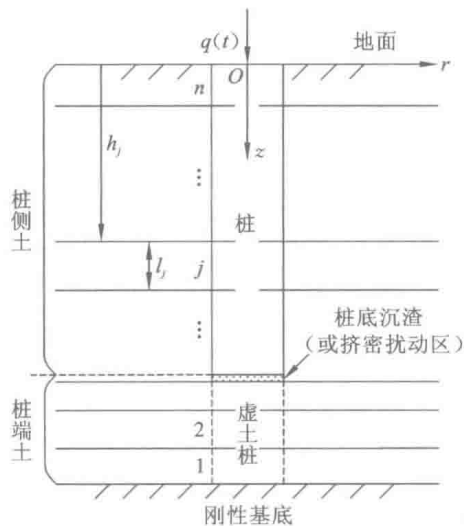


图 1.4 虚土桩法的计算简图

h_j 为第 j 层土体顶面深度; l_j 为第 j 层土体厚度; $1, 2, \dots, j, \dots, n$ 为分段代号

虚土桩法具有如下优点:①桩与桩侧土、桩端土完全耦合,充分考虑了三者的动力耦合作用,是一个比较严格的理论计算模型;②可充分考虑桩端以下岩、土体的非均匀性(成层性)影响;③可以模拟桩端沉渣或桩端土挤密等施工效应的影响;④可以考虑基岩埋置深度的影响(如果基岩埋置深度非常大,且土质均匀,其结果将可以退化为均质弹性半空间中有限长桩的解);⑤可以利用桩顶传递函数和恒荷载的卷积,求得考虑土体固结效应时,竖向静荷载作用下成层地基中单桩沉降随时间发展的过程。进一步地,利用叠加原理可求得上述条件下群桩基础沉降随时间发展的过程,因此可望得到一种新的桩基础沉降计算方法。目前已有的解析和半解析沉降计算方法[包括单桩沉降计算的荷载传递法、剪切位移法、弹性理论法、分层总和法,以及计算群桩沉降的等代墩基法、明德林-盖得斯法、弹性理论法、现行《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)推荐方法等],均不能同时考虑桩、桩侧土、桩端土的耦合效应,桩端土成层性,桩端沉渣(或桩端土挤密效应),特别是地基土固结效应的影响,也无法得到桩基础沉降随时间发展的过程,因此现有沉降计算方法还不能完全满足工程实践的需要。而采用虚土桩法计算桩基础沉降,不仅其模型比较严密,而且可以考虑桩侧土和桩端土的固结效应,因此这一方法将有可能给桩基础沉降计算(特别是弹性理论法)带来重要变革。由此可见,虚土桩法在桩的动、静态特性分析方面有着明显的优势,并具有广阔的工程应用前景。