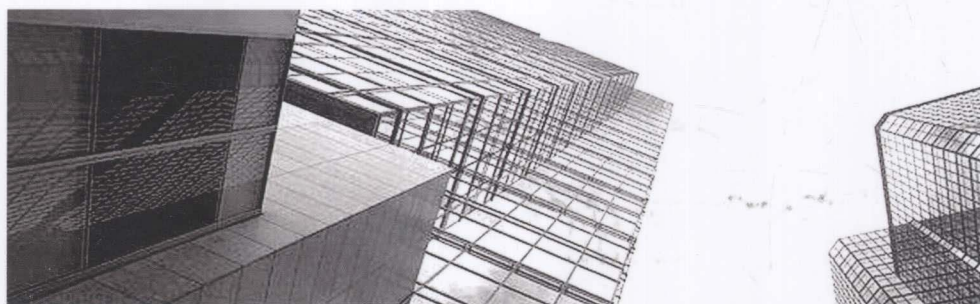
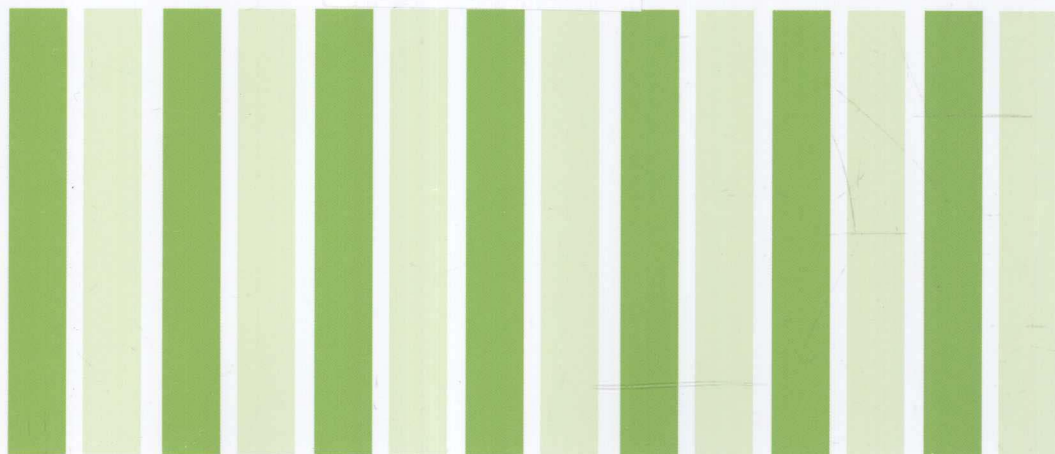


曹 明 著
陈友亮 主审



混合桩型复合地基 的位移相互作用系数解法 及其应用研究



上海科学技术出版社

混合桩型复合地基的位移相互作用系数解法及其应用研究

曹 明 著
陈友亮 主审

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书在等长桩桩-桩之间位移相互作用系数的基础上,提出了桩-土、土-土及非等长桩桩-桩之间的位移相互作用系数,并给出了求解方法。本书在此基础上,分别建立了高承台群桩基础、桩筏基础,以及混合桩型复合地基的位移相互作用系数解法。本书基于积分方程理论和传递矩阵理论,提出一套完整的桩基础和混合桩型复合地基位移相互作用系数分析方法,理论严密、计算效率高,可以应用于大规模群桩的计算分析。本书共分8章,包括:绪论,竖向荷载下两根桩间的位移影响系数特性研究,高承台混合桩型桩基相互作用系数解法及参数分析,低承台混合桩型复合桩基相互作用系数解法及参数分析,带垫层混合桩型复合地基相互作用系数解法及参数分析,层状地基中竖向荷载下两桩位移影响系数特性研究,层状地基中桩基础相互作用系数解法及参数分析,结论与展望。

本书可供从事桩基工程设计和施工技术人员参考使用,也可供土木工程专业的科研人员、高校教师及研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

混合桩型复合地基的位移相互作用系数解法及其应用
研究 / 曹明著. —上海:上海科学技术出版社,
2015.4

ISBN 978-7-5478-2505-1

I. ①混… II. ①曹… III. ①人工地基—位移—计算
IV. ①TU433

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 306513 号

混合桩型复合地基的位移相互作用系数解法及其应用研究

曹 明 著 陈友亮 主审

上海世纪出版股份有限公司 出版
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

上海世纪出版股份有限公司发行中心发行
200001 上海福建中路 193 号 www.ewen.co

上海中华商务联合印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 10.5

字数 200 千字

2015 年 4 月第 1 版 2015 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-2505-1/TU·204

定价: 48.00 元

前 言

桩基础在土木工程中应用非常广泛。但由于在竖向荷载下的群桩基础,桩-桩、桩-土、桩-承台及承台-土相互作用和影响的复杂性,群桩基础的荷载沉降分析方法的研究还不完善,目前的群桩沉降计算理论在计算精度和计算速度上仍有欠缺之处。针对这些问题,本书基于积分方程理论建立了群桩的位移相互作用系数法计算理论,并通过参数分析和与实测资料比较,系统地研究了复合桩基及混合桩型复合地基的沉降,以及桩土荷载分担等工程特性。

本书的研究内容主要包括以下几个方面:

(1) 建立弹性半空间中求解桩-桩之间位移相互作用系数的第二类 Fredholm 积分方程。通过 Mindlin 解积分来求解弹性半空间中圆形荷载的基本解,按照虚拟桩法建立桩-土相互作用分析模型。数值计算结果表明,与现有方法解答相比,本书的方法更合理,能够考虑群桩在土中的“加筋效应”。对桩-桩之间位移相互作用系数进行了参数分析,得出一些具有工程应用价值的结论。

(2) 研究了高承台群桩位移相互作用系数解法。利用叠加原理将桩-桩之间位移相互作用系数法推广至高承台群桩的求解,可用于求解桩长、桩径和桩身刚度不相等的混合桩型问题。将本书计算结果与现有弹性理论方法计算结果进行广泛的对比,验证了本书方法和计算程序的正确性,并且讨论了群桩在土中的“加筋效应”和“遮帘效应”对桩基性状的影响。针对高承台的等长群桩和不等长群桩两种情况,研究了桩身刚度、长细比和桩间距对群桩等效刚度,以及群桩中各桩桩顶荷载分担特性的影响。

(3) 研究了桩筏基础位移相互作用系数解法。根据桩-桩位移相互作用系数,提出桩-土、土-土位移相互作用系数;按照虚拟桩法建立分析模型,基于圆形荷载的基本解及弹性理论推导出求解桩-土之间位移相互作用系数的第二类

Fredholm 积分方程,将高承台群桩位移相互作用系数法推广至桩筏基础的求解,在求解中引入了承台下地基土的共同作用。通过与现有文献结果进行对比,检验了本书方法和计算程序的可靠性。

(4) 研究了混合桩型复合地基位移相互作用系数解法。采用 Winkler 分布弹簧模拟复合地基中的垫层作用,在桩筏基础位移相互作用系数解法基础上,建立了混合桩型复合地基的分析模型,以分析垫层作用下的桩土荷载分担和基础沉降特性。对混合桩型复合地基进行了广泛的参数研究,考查了垫层厚度、垫层弹性模量、桩长、桩间距、桩身刚度和土的泊松比对复合地基等效刚度以及荷载分布规律的影响。

(5) 研究了层状地基中高承台群桩位移相互作用系数解法。基于传递矩阵法,推导出求解层状地基中桩-桩之间的位移相互作用系数的第二类 Fredholm 积分方程。按照虚拟桩方法,建立层状地基中高承台群桩位移相互作用系数解法,并且通过与既有文献计算结果进行对比,验证了本书方法和计算程序的正确性。在参数分析中,研究了桩身刚度、桩长细比和桩间距对群桩等效刚度及群桩中各桩桩顶荷载分担特性的影响。

本书的研究得到了国家自然科学基金会的资助(项目编号 50478022)。

笔者在上海交通大学攻读博士学位期间,得到了导师陈龙珠教授的悉心指导。导师严谨的治学态度,在论文修改以及定稿的全过程都严格把关,提出了许多宝贵意见。在此向他致以衷心的感谢和崇高的敬意。另外,本书的科研工作还得到了陈胜立副教授的耐心帮助和指导。感谢沈水龙教授给我的英文文稿提供了热情指教和帮助;感谢同济大学地下建筑工程系梁发云教授给我提供了大量的参考文献和在科研上给予了大力帮助;感谢上海交通大学张振南副教授在程序方面的帮助;本书由上海理工大学陈友亮教授主审,为本书的顺利出版提供了大力帮助,在此一并致谢。

还要感谢上海开放大学学术专著出版基金为本书出版提供的资助。

限于时间和水平有限,书中难免有错误和不当之处,敬请广大读者批评、指正。

笔 者

2014 年 10 月

主要符号表

正文中主要符号含义如下:

A ——桩截面面积;	$w_i^p(0)$ ——第 i 根桩桩顶沉降;
B_0 ——矩形筏板的短边尺寸;	$w_i^{pp}(0)$ ——桩-桩相互作用中第 i 根桩桩顶沉降;
d ——桩的直径;	$w_i^{ps}(0)$ ——桩-土相互作用中第 i 根桩桩顶沉降;
d'_j ——第 j 个土单元的等效直径;	$w_i^s(0)$ ——第 i 个土单元顶部的沉降;
e ——体积应变;	$w_i^{ss}(0)$ ——土-土相互作用中第 i 个土单元顶部沉降;
E_p ——桩的弹性模量;	$w_i^{sp}(0)$ ——桩-土相互作用中第 i 个土单元顶部沉降;
E_* ——虚拟桩的弹性模量;	$w_{pi}(0)$ ——群桩中第 i 根桩桩顶沉降;
E_s ——土的弹性模量;	$w_{si}(0)$ ——第 i 个土单元顶部的沉降;
E_c ——垫层的弹性模量;	α_{ij}^{pp} ——桩-桩相互作用系数;
h ——垫层厚度;	$\alpha_{ij}^{ps}, \alpha_{ji}^{sp}$ ——桩-土相互作用系数;
L ——桩长;	μ_c ——垫层的泊松比;
$P(z)$ ——真实桩的桩身轴力;	μ_s ——地基土的泊松比;
$P_*(z)$ ——虚拟桩的桩身轴力;	$\varepsilon_*(z)$ ——虚拟桩中心轴线 z 处竖向应变;
P_0 ——作用在各桩或筏板上的总荷载;	$\Phi(z, \xi)$ ——传递矩阵;
P_{0i} ——第 i 根桩桩顶作用的竖向外荷载;	$(\sim)^0$ ——零阶 Hankel 变换;
P_{av} ——桩顶平均荷载;	$(\sim)^1$ ——一阶 Hankel 变换;
$q(z)$ ——沿桩身单位长度上的桩-土间相互作用力;	ξ ——Hankel 变换参数;
Q_{0i} ——第 i 个土单元地基反力的合力;	Π_z ——桩在 z 处的截面;
R_s ——群桩的沉降比;	λ, G ——拉梅常数。
R_G ——群桩折减系数;	
S ——桩间距;	
w_c ——刚性承台的沉降;	

目 录

主要符号表	1
第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 群桩沉降理论计算方法综述	2
1.2.1 桩基沉降理论计算方法综述	2
1.2.2 桩筏基础计算理论方法综述	9
1.2.3 混合桩型复合地基计算理论方法综述	11
1.3 本书主要研究内容	12
1.4 本书主要创新点	13
1.5 本书的内容构成	15
第 2 章 竖向荷载下两根桩间的位移影响系数特性研究	16
2.1 引言	16
2.2 建立两根桩相互作用的 Fredholm 积分方程	17
2.3 桩身位移和轴力的解答	21
2.4 算例验证及两根桩间相互作用系数参数分析	23
2.4.1 算例验证	23
2.4.2 参数分析	27
2.5 本章小结	28
第 3 章 高承台混合桩型桩基相互作用系数解法及参数分析	29
3.1 引言	29

3.2	不同桩长的混合桩型桩基的解法	30
3.2.1	不同桩长的 Fredholm 积分方程的建立	30
3.2.2	桩身位移的解答	33
3.2.3	一般群桩的弹性理论解法	33
3.3	算例比较	34
3.4	混合桩型桩基工程性状参数分析	42
3.4.1	等长桩情况	42
3.4.2	不等长桩情况	47
3.5	本章小结	51
第4章	低承台混合桩型复合桩基相互作用系数解法及参数分析	52
4.1	引言	52
4.2	混合桩型复合桩基的解法	53
4.2.1	Fredholm 积分方程的建立	53
4.2.2	桩顶位移和土单元位移的解答	55
4.2.3	一般群桩的弹性理论解法	56
4.3	算例验证	59
4.4	低承台混合桩型复合桩基工程性状参数分析	67
4.4.1	等长桩情况	67
4.4.2	不等长桩情况	71
4.5	本章小结	75
第5章	带垫层混合桩型复合地基相互作用系数解法及参数分析	76
5.1	引言	76
5.2	带垫层的混合桩型复合地基的解法	77
5.2.1	计算模型简介	77
5.2.2	垫层作用的模拟	78
5.2.3	一般群桩的弹性理论解法	79
5.3	算例验证	81
5.4	带垫层混合桩型复合地基工程性状参数分析	86
5.4.1	等长桩情况	86
5.4.2	不等长桩情况	94
5.5	本章小结	97

第 6 章 层状地基中竖向荷载下两桩位移影响系数特性研究	99
6.1 引言	99
6.2 层状地基传递矩阵方法的建立	100
6.2.1 空间轴对称问题基本解的建立	100
6.2.2 层状地基空间轴对称问题基本解的建立	102
6.3 层状地中两根桩相互作用的积分方程解法	108
6.3.1 计算模型	108
6.3.2 层状地基中的桩身位移	111
6.4 算例验证及两根桩间相互作用系数参数分析	112
6.4.1 算例验证	112
6.4.2 参数分析	116
6.5 本章小结	120
第 7 章 层状地基中桩基础相互作用系数解法及参数分析	121
7.1 引言	121
7.2 层状地基中长短桩桩基础的解法	122
7.2.1 非等长桩桩间相互作用系数的求解	122
7.2.2 层状地基中的桩身位移	124
7.2.3 一般群桩的弹性理论解法	125
7.3 算例验证及参数分析	126
7.3.1 算例验证	126
7.3.2 参数分析	132
7.4 本章小结	137
第 8 章 结论与展望	139
8.1 本书结论	139
8.2 进一步研究设想	140
参考文献	142
附录 1 Fredholm 积分方程系数的求解	157
附录 2 单层地基传递矩阵各元素表达式	159

第 1 章

绪 论

1.1 引 言

随着国民经济的发展,土木工程建设得到飞速的进步,高层建筑纷纷出现。由于高层建筑主要集中在我国沿海或沿河软土地区,地基条件比较差,这就对地基处理的设计与施工不断提出了更高、更严的要求,其中,桩基础(简称“桩基”)是工程结构基础的主要形式。虽然桩基在土木工程中得到了广泛的应用,但是由于桩基的复杂性,到目前为止其受力机理、荷载沉降特性的分析方法仍然没有得到很好的解决。在用桩进行处理地基时,桩-桩之间、桩-土之间、桩-承台之间以及承台-土之间相互作用、相互影响,形成一个复杂的系统。另外,桩基的荷载沉降特性与基础形状、布桩方式、桩间距、桩长、桩的刚度、桩数等因数有关,但当它们取值不同时,桩基表现出的工程性状也将不同。

采用桩来处理地基就是为了提高地基的承载能力、控制沉降;同时为了降低造价,又要在桩的材料选择,以及桩的数量和长度控制上要进行大量的研究。要正确地计算用桩来处理地基时的荷载沉降特性问题,必须找到一种可靠的、能用到工程实际中的计算方法。传统设计方法,如将桩基础等代为实体深基础来计算基础沉降变形能力的计算模型,由于模型过于简化以及使用经验公式,计算出的结果一般偏于保守。按这样的计算结果进行设计,一般桩过多、过长、过粗,因此成为一个过分昂贵的设计。采用理论计算分析的设计,如果理论不够完善,就可能造成设计的桩太少、太短或太细,实际工程中就可能会局部失效或地基沉降过大。

最近几年,混合桩型复合地基在工程应用和理论研究方面受到了较大的关注。混合桩型复合地基指采用几种不同刚度、不同长度的桩体来处理地基。我国学者在混合桩型复合地基的理论研究方面已经取得了一定的研究成果,但仍有许多问题有待解决,如桩-土之间的荷载传递、计算效率等。

因此,有必要对桩-土-承台之间相互作用、相互影响的复杂系统进行深入的研究,寻找一种理论上既可靠、计算工作量又小的桩基工程实用计算方法。目前,有关群桩荷载沉降的理论,在学术界已尝试了多种途径和方法,如荷载传递法、剪切位移法、弹性理论法、有限元法、边界元法、混合法等,其优缺点将在后文予以扼要评述。

1.2 群桩沉降理论计算方法综述

目前群桩沉降理论计算方法大致可以分为三大部分:桩基沉降理论计算方法,桩筏基础理论计算方法,以及混合桩型复合地基沉降理论计算方法。下面将分别简要介绍。

1.2.1 桩基沉降理论计算方法综述

竖向荷载作用下单桩的沉降由三部分组成:桩身弹性压缩引起的桩顶沉降,桩侧摩阻力向下传递引起桩端下土体压缩所产生的桩端沉降,以及桩端荷载引起桩端下土体压缩所产生的桩端沉降(刘金砺,1990)。

当荷载水平较低时,桩端土未发生明显的塑性变形,且桩侧土与桩身之间也尚未产生滑动,此时可以运用弹性理论近似地按照以上三部分沉降来计算单桩的沉降。要计算以上三部分沉降必须知道桩侧和桩端分担的荷载及桩侧阻力沿桩身的分布图式。单桩的沉降组成不仅同桩的长度、桩与土的相对压缩性、土的剖面有关,还与荷载水平、荷载持续时间有关。进行沉降计算时,要根据工程问题的性质及荷载特点等,选择与之相适应的沉降计算方法和计算参数。

目前桩基沉降计算方法主要有荷载传递法、剪切位移法、弹性理论法、有限元法、边界元法、混合法等方法。而本书分析所采用的基于虚拟桩模型的积分方程法则是最近才得到较多重视的一种解析方法,实际上也属于弹性理论法的范畴,现将这些主要的分析方法简要综述如下。

1. 荷载传递法

单桩的荷载传递理论最早由 Seed & Reese(1957)提出,后经许多学者的努力,理论上日趋成熟,并发展成为内容丰富的体系。这种方法的基本思路就是把桩沿长度方向划分为若干弹性单元,每一单元与土体单元的相互作用可用线性或非线性弹簧联系。这些弹簧的应力-应变关系表示了桩侧摩阻力 τ (或桩端阻

力 σ)与剪切位移 s 之间的关系($\tau-s$ 或 $\sigma-s$ 关系),这一关系就是荷载传递函数。此法的关键是荷载传递函数的确定,从而利用已知的荷载传递函数求解荷载传递法的基本微分方程:

$$\frac{d^2 s(z)}{dz^2} = \frac{U}{A_p E_p} \tau(z) \quad (1.1)$$

式中, U 、 A_p 、 E_p 分别为桩身截面周长、横截面积及弹性模量; $s(z)$ 、 $\tau(z)$ 分别为桩身位移和桩侧摩阻力。

式(1.1)就是传递函数法的基本微分方程,它的求解取决于 $\tau(z)$ 和 $s(z)$ 的形式,按照求解微分方程式(1.1)的途径不同,荷载传递法可以分为解析法、位移协调法两种方法。

解析法首先由 Kezdi(1957)及佐藤悟(1965)等提出,他们把传递函数简化假定为某种曲线方程,直接代入微分方程式(1.1)求得解析解。在 Kezdi(1957)提出指数曲线模型和佐藤悟(1965)提出理想弹塑性模型之后,国外学者提出的模型有 Gardner(1975)的双曲线模型,Kraft 等(1981)的可以考虑土非线性特征的传递函数,Vijayvergiya(1977)的抛物线模型以及 Heydinger(1987)和 O'Neill 等(1982)的考虑不排水剪模量的模型。我国学者提出的模型主要有全深度-变深度剪切弹簧模型(罗惟德,1990)、双折线硬化模型(陈龙珠等,1994)、三折线模型(陈明中等,2000)和基于桩岩界面的剪滑扩张理论而建立的模型(董平等,2003)。

位移协调法以 Seed & Reese(1957)、Coyle & Reese(1966)等的方法最为典型,是用实测的传递函数来描述土体与桩单元的相互作用,由于实测的传递函数一般比较复杂,难以直接求得解析解。这时可采用位移协调法求解,将桩划分成许多单元体,先假定桩端位移,考虑每个单元的内力与位移协调关系,用迭代法求解桩的荷载传递及沉降量。Seed 和 Reese(1957)建议桩端的轴向力用虚拟桩长的摩阻力估算,但虚拟桩长的确定比较困难,因此 Coyle 和 Reese(1966)建议用 Boussinesq 解近似计算桩端的轴向力;Gardner(1975)建议用 Mindlin 公式计算桩端的轴向力。国内学者曹汉志(1986)采用不同的迭代方法提出桩尖位移等值法,李镜培(1990)、袁建新等(1991)、彭劼等(2003)等应用数值方法对单桩荷载传递法进行了研究。

传递函数法可以方便地考虑土的分层性、时效性和非线性等特性,但是该法将桩周土当作 Winkler 地基处理,假定桩侧任何点的位移只与该点土的摩阻力有关,而与其他各点的应力无关,忽略了桩周土的应力场效应,也忽略了土的连

续性。此方法在理论上受到一定的局限,不能计算桩-桩之间的相互作用,即群桩效应,因此该方法不能直接应用到群桩情况,更不能反映软弱下卧层的影响。

为将该方法推广至群桩分析,冯国栋等(1990)从桩、承台与土共同作用的机理出发,提出可用于群桩的分析方法;潘时声(1991)提出用分层位移迭代法来求解单桩,并将该方法推广到群桩的分析当中;而王旭东(1994)则通过对 $t-z$ 理论曲线的修正对单桩进行非线性分析,用层状半空间有限层法确定桩间相互作用,并应用于群桩-土-承台结构的非线性共同作用分析;张保良等(1996)通过采用荷载传递法计算单桩沉降,群桩中桩-桩之间相互作用采用近似解析法计算,提出一个半解析的方法分析单桩和群桩基础的沉降;田美存等(1997)采用双曲线传递函数,根据荷载叠加原理,运用分层位移迭代法,把荷载传递法推广至群桩分析,并可考虑地基土的分层性和非线性;赵明华等(2005a)通过考虑邻近桩基的存在所引起的位移折减效应,提出一种新的基于荷载传递法的高承台桩基沉降计算方法。

2. 剪切位移法

Cooke 1974 年根据试验结果提出了摩擦桩的荷载传递物理模型,该模型假定在竖向荷载水平较低时,沉降较小,桩与土之间不产生相对滑移。因此,桩沉降时周围土体也随之发生剪切变形,剪应力 τ 从桩侧表面沿径向扩散到周围土体中。Cooke 通过试验将影响半径 r_m 定为 20 倍的桩半径 r_0 ,认为大于 20 倍的桩半径 r_0 后,土的剪应变很小可忽略不计。Cooke 等(1979)运用上述简化分析方法分析了伦敦软黏土中单桩在工作荷载下的荷载传递和沉降特性,与实测值较吻合。该方法计算简单,但由于忽略了桩端处的荷载传递作用,因此对短桩误差较大。后来,Randolph & Wroth(1978)将 Cooke 方法作了补充和修正,给出了与桩长及土层性质有关的影响半径 r_m ,而 Cooke 提出的影响半径 r_m 只与桩径有关比较简单。Randolph 将桩端视为刚性墩,并按 Boussinesq 解估算其沉降量,使之对单桩沉降的计算更接近实际。随后,Randolph & Wroth(1979)和 Lee(1993a)又将之推广至均质土的群桩分析。Kraft 等(1981)考虑了土体的非线性特性,将 Randolph 解推广至土体非线性情况,Chow(1986a)又将 Kraft 解应用于群桩的分析,Nogami(1984)将桩分成若干段以考虑地基土的不均匀性和成层性。Richwien & Wang(1999)通过应力-应变幂函数关系对 Randolph 模型进行了修正,对原模型进行了改进。国内学者王启铜(1991)将 Randolph 单桩解由均质地基推广至成层地基;宰金珉(1996)将剪切位移法推广到塑性阶段,在得

到桩周土非线性位移场的近似表达式基础上,与层状介质的有限层法和有限元法相结合,给出群桩、承台和土的非线性共同作用分析的半解析半数值方法;之后宰金珉等(2002)采用广义剪切位移法和有限层法建立了考虑筏板刚度的桩筏非线性共同作用分析方法;田管凤等(2002)用剪切位移法建立群桩的柔度矩阵,求解了群桩基础与地基土的共同作用;赵明华等(2005b)则利用剪切位移传递法求得长短桩复合地基计算时的桩-桩、桩-土及土-土相互作用柔度系数,并提出了相应的长短桩复合地基沉降计算方法。

剪切位移法与荷载传递法都是通过得到桩侧位移与桩侧摩阻力之间、桩端位移与桩端阻力之间的相互关系再进行求解,但剪切位移法给出了桩周土体位移场,因此可以方便地对群桩分析。由于剪切位移法推导过程中采用了不少假设,因此该方法也应属于近似解析解。

3. 弹性理论法

弹性理论法假定地基土是均质各向同性的半无限弹性体,且地基土初始应力状态不因桩的存在而发生变化;假定桩土之间无相对滑移,桩身某点的位移为与之相邻点土体的位移;应用半无限体内受集中力的 Mindlin(1936)解答求得桩身任意一点的位移和应力分布。从 20 世纪 60 年代开始,许多学者采用弹性理论方法对桩的性状分析做了大量的研究。各种方法的主要区别在于对桩侧剪应力的简化分布模式的不同假定。

D'Appolonia & Romualdi(1963)、Geddes(1966)用作用在桩轴线的集中荷载代替桩侧剪应力的分布研究了单桩的沉降问题。较完整的弹性理论方法是由 Poulos & Davis(1968)提出的,此后 Poulos(1968)通过引入相互作用系数的概念,应用叠加原理将其推广至群桩,Mattes & Poulos(1969)又将刚性桩解推广至可压缩性桩。通过 Poulos 等人的努力,Poulos & Davis(1980)将弹性理论方法归纳为比较完善和成熟的体系,Poulos 方法用作用在各单元四周侧面积上的均布荷载表示桩侧剪力的分布,通过对单桩差分方程的求解,便可获得桩侧摩阻力、桩底反力及每个桩段的位移和轴力。

由 Muki & Sternberg(1970)和 Lee 等(1987)提出的虚拟桩求解方法,采用积分方程法求解半无限弹性介质中桩的轴向荷载传递问题,已经被应用到桩的计算求解中(陆建飞等,2000;陈龙珠等,2004a;梁发云等,2005a)。采用虚拟桩求解方法计算桩-土相互作用,充分考虑了桩土分离以后桩体孔洞的存在,该方法是一种在理论上更为严格的计算方法。

Poulos(1979)采用 Gibson 土模型提出了一个快速估算分层非均质地基

土中桩的沉降的方法。Lee 等(1987)对竖向荷载作用下双层地基中群桩的工程性状进行了参数研究。Rajapakse(1990)运用积分变换技术求解了 Gibson 土中单桩沉降的解析解,该方法不仅考虑了桩与其相邻土之间竖向位移协调,还考虑了径向位移协调。金波等(1993)利用积分变换和传递矩阵的方法得到了任意 N 层轴对称荷载作用下的基本解,在此基础上,金波等(1996)提出求解传递矩阵的逆矩阵公式,使这种数值计算方法在计算机上用程序实现变得容易,金波等(1997)利用传递矩阵方法得出层状地基在内部轴对称荷载作用下的位移解来求解层状地基中单桩沉降问题。陈镓等(1999)运用薄层法求出层状地基内外荷载作用下的位移格林函数,推出了单桩在竖向荷载作用下桩顶位移与荷载之间的关系。艾智勇(1999)研究了层状地基理论及其工程应用。王建华等(2001)考虑了地基固结和流变特性,研究了任意时刻的桩身沉降、轴力、桩侧剪力和桩轴线处的孔压计算问题。

我国学者对弹性理论法计算桩基沉降方面做了大量的研究,以 Geddes (1966)应力解答为基础,黄绍铭等(1991)假定桩不可压缩,采用分层总和法计算桩基沉降,该方法预先假定桩侧土反力沿桩轴线按线性分布及土仅单向压缩,在理论上不够严密,但该方法直接应用分层总和法的土参数,为工程应用提供了便利;刘前曦等(1996)采用 Boussinesq 解和 Geddes 解相结合的弹性理论求解地基土的应力,假定桩-土地基为弹性半空间,用分层总和法计算桩基沉降,对筏板-土之间的共同作用进行了研究;杨敏等(1997)对应用 Geddes 应力解求解单桩沉降计算时的经验性问题进行了研究,并指出该方法不适合用来求解桩的荷载传递问题。刘杰等(2005)基于俞茂宏教授提出的双剪统一强度理论,通过弹性理论对刚性承台下碎石单桩复合地基的性状进行了分析研究。全国建筑地基基础设计规范(GB50007—2002)已部分采纳了基于弹性理论的桩基设计方法。

弹性理论法的特点是考虑了土的连续性,对桩-土之间相互作用的弹性阶段能够进行比较精确的分析,并可用于群桩的分析。弹性理论法把地基土看成为理想的弹性体,对于非均质土、土的弹塑性或桩土界面发生滑动等复杂情况则需要简化处理。另外,现有方法在计算群桩沉降时,仅仅对各桩变形进行叠加,并未考虑桩的存在对土的变形的影响,即忽略了群桩在土中的“加筋效应”对土性参数的影响。然而,Poulos(1972)已经证实桩基础在工作荷载下,地基土以弹性变形为主,即弹性分析能够反映桩基础在工作荷载下的主要工程性状。弹性理论方法与其他方法结合可以方便地扩展到群桩分析,因此弹性理论法已成为桩基础研究的一种重要理论方法。

4. 有限元法

有限元法克服了其他方法在理论上的局限性,是一种比较成熟的数值计算方法,由于其解决问题的有效性和可靠性,自其问世以来已广泛地应用于包括桩基在内的各类建筑物计算分析当中。Ellison 等(1971)使用二维轴对称有限元模型分析了硬黏土中钻孔灌注桩,通过接触面单元分析了桩端以外土的拉裂现象。自从 Ottaviani 在 1975 年首次运用三维有限元法用于群桩分析桩之后,有限元法在桩土共同作用问题分析中得到了很大的发展(Muqtadir & Desai, 1986; Pressley & Poulos, 1986; Trochanis 等, 1991; Liang Fa-Yun 等, 2003)。有限元法可以考虑非线性、各向异性、界面滑动、动力效应等各种特性,如 Maheshwari 等(2004)采用三维有限元对地震力作用下桩-土-结构的相互作用进行了分析,分析中考虑了土的非线性;Sheng 等(2005)采用有限单元法通过大滑移摩擦接触对沉桩过程进行了模拟,对沉桩过程中应力和位移的特性进行了研究。

我国学者在应用有限元进行群桩分析中也做了很多工作,陈雨孙等(1987)用有限单元法模拟了挖孔灌注纯摩擦桩的荷载沉降曲线,并且通过在桩与土之间引进节理单元,对土的剪切面进入塑性状态后的剪力和位移进行了模拟;律文田等(2005)采用有限单元法对预应力混凝土管桩桩土动力相互作用进行了分析;赵明华等(2006)通过改进有限杆单元方法对复杂荷载及各种边界条件下基桩进行了计算分析;宰金珉等(2005)利用有限单元法模拟出了复合桩基地基土中附加应力的分布特征和变形规律,在此基础上提出了一个复合桩基沉降计算的简化方法;王琤等(2005)采用有限单元法对不同筏板刚度下桩筏基础下卧层附加应力的分布规律进行了分析。

由于有限元法难以模拟无限域,为了保证计算的精度,在实际工程的分析中要考虑很大一部分桩周土体,这样就导致计算量的增大,对计算机的要求很高。对于大规模的群桩问题,有限元的计算工作量使一般的计算机已无法满足要求。另外,有限单元中有关土的本构关系、桩土界面模拟等特性的研究也还很有限,这就使得计算结果的精度受到了多方面因素制约。

5. 边界元法

边界元法也叫积分方程法,边界元方法将区域积分方程化为边界积分方程。在应用于桩基分析时,根据桩土变形协调条件建立桩土共同作用的积分方程,通过对桩-土界面进行离散,化边界积分方程为代数方程组,解代数方程组得到问题的解。边界元只需对边界进行离散化,可以使问题降低一维,使求解规模得以

缩小。同时,由于边界元的基本解自动满足无穷远处的辐射条件,避免了人工边界对计算精度的影响,可以很好地模拟半无限空间土体,因此也是进行桩-土相互作用分析的一种非常有效的方法。

国外学者 Butterfield & Banerjee(1971a)最早用边界元分析了弹性地基上带刚性高承台的群桩;随后 Butterfield & Banerjee(1971b)用边界元分析了弹性地基上的桩筏基础,考虑了地基土的承载力;Banerjee & Davis(1978)又用该法分析了非均匀 Gibson 土中的单桩和群桩特性;Kuwabara(1989)采用边界元法分析了均匀弹性地基中刚性承台下的桩筏基础,考虑了桩的压缩性。

由于边界元方法只需对计算区域表面进行单元划分,不像有限元那样对整个区域进行划分,边界元法相对有限元法有一定的优越性。但对于规模较大的群桩,要划分的子区域太多,而且边界元方程的系数矩阵不具有稀疏性,计算量仍旧很大。

6. 混合法

混合法(Hybrid Approach)就是为减少计算量,提高计算精度,将几种方法结合起来使用而形成的方法。如有限元与边界元相结合的耦合分析方法,因为有限元和边界元在进行桩基础分析中各有其优缺点,所以在进行共同作用问题的分析时,有限元-边界元耦合方法就不失为一种很好的分析方法,该方法用有限元对桩及承台进行建模,用边界元进行半无限地基介质的分析,在有限元区域和边界元区域的交界处加以耦合,并保持两部分区域之间的连续性,从而更加充分地发挥两者的优点,克服各自的缺点,提高了分析的速度和精度。如国外学者 Hain & Lee(1978)、Mendonça & Paiva(2003)采用有限元-边界元耦合方法对桩筏基础进行了研究;Küçükarslan 等(2003)通过在桩土接触面引入非线性弹簧采用有限元-边界元耦合方法对桩土非线性相互作用进行了研究;Filho 等(2005)分别用有限元和边界元对桩和土体进行建模,对竖向荷载以及水平向荷载作用下桩-土之间的相互作用进行了分析。

除了有限元-边界元耦合方法外,有限元与剪切位移法及荷载传递法也可进行耦合对桩基进行分析,如我国学者宰金珉(1996)在将剪切位移法推广到塑性阶段从而实现在桩周土非线性位移场解析表达式的基础上,与有限层法和有限元法联合运用,给出了群桩与土和承台非线性共同作用分析的半解析半数值方法;石名磊等(2003)将杆系结构有限单元法与荷载传递迭代法相耦合,可以模拟桩身与桩周介质边界上剪切滑移的非线性,建立了桩基沉降分析计算的混合法。

有限元与无限元也可进行耦合,如王国才等(2005)采用有限元-无限元耦合