

隧道及岩土工程专业方向研究生系列教材

重庆交通大学研究生教育创新基金支持出版

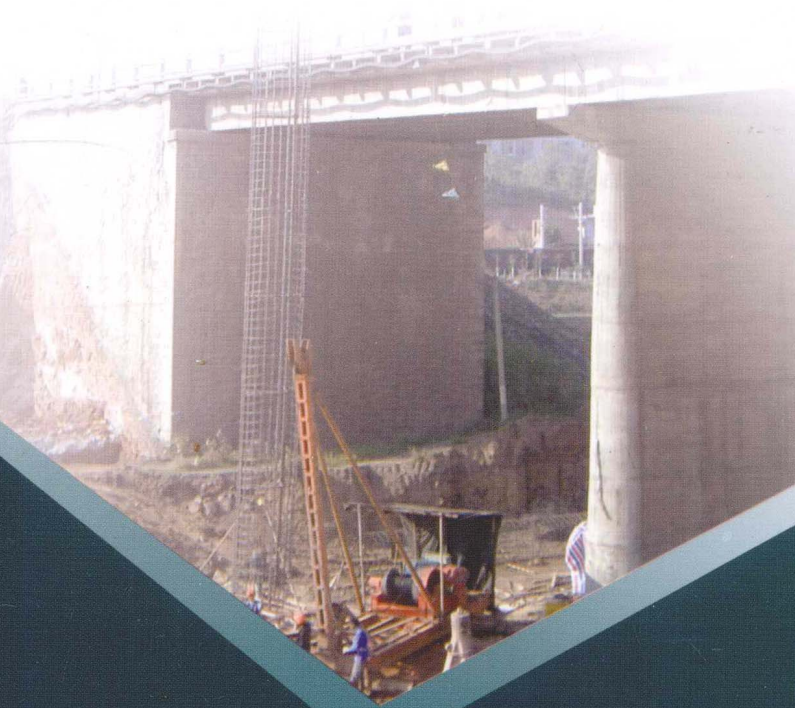
桩基计算 理论及实例

ZHUANGJI JISUAN LILUN JI SHILI

王 成 编著



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)



隧道及岩土工程专业方向研究生系列教材
重庆交通大学研究生创新基金支持出版

桩基计算理论及实例

王 成 编著

西南交通大学出版社

• 成 都 •

图书在版编目 (C I P) 数据

桩基计算理论及实例 / 王成编著. —成都: 西南
交通大学出版社, 2011.1

隧道及岩土工程专业方向研究生系列教材
ISBN 978-7-5643-0976-3

I. ①桩… II. ①王… III. ①桩基础—计算—研究生
—教材 IV. ①TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 238088 号

隧道及岩土工程专业方向研究生系列教材

桩基计算理论及实例

王 成 编著

责任编辑	高 平
特邀编辑	胡晗欣
封面设计	墨创文化
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 87600533
邮政编码	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	四川森林印务有限责任公司
成品尺寸	170 mm×230 mm
印 张	19.375
字 数	351 千字
版 次	2011 年 1 月第 1 版
印 次	2011 年 1 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-0976-3
定 价	36.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

随着现代科学技术的进步,桩基计算理论不断完善和发展,目前桩基础已经成为我国桥梁工程、高层建筑等主要的基础类型。为了适应我国桥梁基础工程的应用,本书以近40年来国内大型桥梁基础建设期间的工程试桩的研究成果、室内模型试验研究成果以及相关工程设计与施工规范等为基础,较系统阐述了复杂地质条件下桩基础的受力性状和承载力计算问题。

全书共分7章,主要内容有:竖向荷载作用下单桩计算理论及实例,包括桩土界面特征研究、轴向刚度计算与实例分析、超长桩模型试验分析等;考虑桩身稳定的超长桩的临界荷载,结合苏通长江大桥和模型试验给出了算例分析;竖向荷载下群桩计算理论及实例,包括几种群桩效率系数计算公式的比较分析,结合超长群桩模型试验分析了合理桩间距和有效桩长;水平推力作用下单桩计算理论及实例,主要包括双参数法及其综合刚度原理,并结合典型土质中大型现场试桩资料进行算例分析;水平荷载作用下群桩计算理论,主要包括水平荷载群桩效率系数的地基系数折减法、试验方法及其对比分析等;桩基动力计算理论及实例,主要包括竖向动荷载和水平动荷载作用下桩基的动力特性分析。

全书在编著过程中力求由浅入深,易于理解,并尽量做到系统和简洁,便于学习和应用,部分内容有一定的深度和难度。本书可作为土木工程、水利工程以及港海工程等专业的高年级本科生和研究生的教材,也可供有关工程技术人员和科研人员参考。

本书是作者在重庆交通大学使用多年的研究生讲义基础上,融入了作者及其研究生多年的论文成果编写而成。

桩基工程涉及的地质条件复杂、内容丰富、发展迅速,有些新技术及其应用尚不成熟。此外,限于作者水平,疏漏、不足之处实属难免,请读者批评指正。

作 者

2010年7月于重庆

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 桩基的特点	1
1.2 桩基的发展概况	2
1.3 桩基的研究现状	3
1.4 桩基研究的难点	13
1.5 桩基研究存在的不足	13
思考题	15
第 2 章 竖向荷载作用下单桩计算理论及实例	16
2.1 单桩的荷载传递及其破坏模式	16
2.2 确定单桩容许承载力的常规方法	18
2.3 桩的侧阻力分析	28
2.4 桩土界面特征研究	54
2.5 单桩轴向综合刚度计算及实例	68
2.6 超长单桩模型试验结果分析	87
2.7 桩承受负摩阻力的计算	98
思考题	106
第 3 章 考虑桩身稳定的超长桩临界荷载计算	108
3.1 超长桩稳定性分析特点	108
3.2 能量解法的基本原理	111
3.3 超长桩稳定性算例分析	115
思考题	122
第 4 章 竖向荷载下群桩计算理论及实例	123
4.1 群桩分析方法概述	123
4.2 群桩效率系数计算公式	127
4.3 超长群桩模型试验	137

4.4 超长群桩的有效桩长	145
4.5 黏性土中超长群桩的合理桩距	160
思考题	161
第 5 章 水平推力作用下单桩计算理论及实例	163
5.1 推力桩计算现状及存在的问题	163
5.2 推力桩的极限地基反力法	169
5.3 推力桩的双参数弹性地基反力法	175
5.4 推力桩与土共同作用的综合刚度原理及实例分析	194
5.5 推力桩容许极限荷载的确定	207
5.6 计算推力桩的 p - y 曲线法	215
5.7 提高桩基水平承载力的措施	217
思考题	219
第 6 章 水平荷载作用下群桩计算理论及实例	220
6.1 水平荷载作用下群桩的工作性状	220
6.2 水平荷载群桩的计算	226
6.3 水平荷载群桩的模型试验	234
6.4 计算水平荷载群桩效率的地基系数折减法	241
6.5 抗滑桩的计算理论	258
思考题	269
第 7 章 桩基动力计算理论及实例	270
7.1 轴向荷载桩的动力计算	270
7.2 水平荷载桩的动力计算	274
思考题	285
符号索引	286
参考文献	291

第1章 绪 论

本章从力学角度出发,对桩基工程中一些有意义的问题进行简洁的介绍和归纳比较,包括桩基的作用及其特点、发展简史和研究难点,桩基的研究概况与存在的不足,本书的主要内容与难点和特色等,至于未能包括的其他一些有关问题,读者可查阅相关文献。

1.1 桩基的特点

桩基础(简称桩基),一般是指利用设置在地基中的桩(或墩)来加固地基时,桩和桩间土以及连接于桩基顶端的承台联合构成的一种复合地基,而且主要是纵向增强体复合地基,其中,桩体是纵向增强体,而桩间土体则为基体。随着地基处理技术的发展,桩基的应用已不只局限于承受竖向荷载的情况,工程实践中出现了以承受水平荷载为主的围护桩、抗滑桩、锚桩等,因此,广义的“桩基”概念应该也包括这些类型的桩及其基体^[1]。

许多地区的天然地基土(特别是软土)一般都不能满足上部结构荷载及沉降变形要求,因而需要采用桩基和各种类型的复合地基。由于桩基是由承台将若干根桩的顶部连接成整体,以共同承受荷载的一种深基础,因此具有比较大的整体性和刚度,能承受更大的竖向荷载和水平荷载,能适应高、重、大建筑物的要求,在近代土木工程的发展中,桩基起了越来越重要的作用。根据工程特点,桩基的作用主要表现为下面几个方面^[1,2]:

(1) 通过桩的侧面和土体接触,将荷载传递给桩周土体,或深层岩层、砂层或黏土层,从而获得较高的承载能力以支撑重型建筑物。

(2) 对于液化的地基,为了保护建筑物的安全,通过桩穿过液化的土层,将荷载传递给稳定的未液化的土层。

(3) 桩基具有较高的竖向刚度,因此采用桩基础的建筑物,沉降比较小,而且比较均匀,可以满足对沉降要求特别高的上部结构的安全需要和实用要求。

(4) 桩基具有较大的侧向刚度和抗拔能力,能抵抗台风引起的巨大水平

力、上拔力和倾覆力矩，并能抵抗强烈的地震作用，保持高耸结构物和高层建筑物的安全。

(5) 改变地基的动力学特性，提高地基的自振频率，减小振幅，保证机器设备的正常运转等。

1.2 桩基的发展概况

桩基是应用广泛的一种基础类型，也是最古老的基础形式之一。早期的桩基是由天然材料做成的，如木桩、竹桩和石桩。早在新石器时代，人类便通过打入木桩和竹桩在湖泊与沼泽地搭台作为水上住所，特别是木桩，迄今仍在我国西南一些少数民族地区使用着。20 世纪初，在上海建造的国际饭店、锦江饭店等 20 层左右的标志性建筑物，都采用 10 多米长的木桩。随着人类活动逐渐向空间、海洋发展和延伸各类高层建筑物层出不穷，对桩基的要求也越来越迫切，要求也越来越高，传统的木桩和竹桩逐渐被各种新材料的桩所取代。19 世纪 20 年代，已经开始有人使用铸铁板桩修筑围堰和码头，第二次世界大战后，无缝钢管被作为桩基材料用于桩基工程，上海宝山钢铁厂曾经使用直径 90 cm、长约 60 m 的钢管作为桩基，19 世纪中叶以后，由于水泥工业的出现和发展，钢筋混凝土在建筑工程中开始广泛应用，于是出现了种类繁多的混凝土桩和钢筋混凝土桩。20 世纪二三十年代出现了沉管灌注混凝土桩，当时上海修建的一些高层建筑物曾采用 Franki 桩和 Vibro 桩等沉管灌注桩。随着大型钻孔机器的发展，我国铁路和公路桥梁大量采用了钻孔灌注混凝土桩和挖孔灌注桩。1949 年美国雷蒙德混凝土桩公司利用离心机生产出中空预应力钢筋混凝土管桩。我国亦于 20 世纪 50 年代开始生产和使用这种钢筋混凝土管桩。但在初期，由于所采用的混凝土强度和钢筋强度都较低，钢筋混凝土的理论也才刚建立，那时的钢筋混凝土桩，无论从桩型或桩基施工技术来看都是比较“低档”的。

第二次世界大战以后，桩基的理论和技術有了更大的发展，新材料和新施工机械的出现为桩基的飞跃发展创造了条件，桩基的应用范围不断扩大，出现了形形色色、花样繁多的桩型，如预应力钢筋混凝土桩、高强度的钢筋混凝土桩以及钢管桩等。到 20 世纪末，上海建造的 88 层金茂大厦等超高层建筑已经采用了 80 多米的钢管桩。桩基从古老、简陋的形式发展成为现代各种不同体系，桩基的形式、规格和工作机理都有了质的变化。如今，大型桥梁及超高层建筑等工程建设，桩基直径接近 3 m，桩长超过 110 m。桩基已成为高层建筑、桥梁、海上平台、水利设施和核电站等许多工程中最常用

的基础形式^[1,2]。特别是对于软土地区,由于地质条件比较差,所以桩基的应用更为广泛,一般高于6层的建筑物就需要采用桩基。据不完全统计,全球每年平均使用桩约3亿根,仅就我国而言,平均每年用桩量在几百万根以上,费用占工程总造价的25%~30%,施工周期约为总周期的25%,对于软土地基和深基础,所占费用更高,周期更长。

随着城市建设的飞速发展,各种高层建筑如雨后春笋般拔地而起,选择合理的基础形式也成为结构工程师面临的首要问题,由于桩基具有承载能力高、稳定性好、基础沉降及差异变形小、抗震性好以及能适应各种复杂的地质条件等特点,除了在一般民用建筑中用来承受竖向抗压荷载外,还在港口、桥梁、船坞、近海钻采平台、高耸及高层建(构)筑物、支挡结构以及抗震工程中,用于抵抗波浪力、土压力、地震力、车辆制动力等水平荷载及竖向抗拔荷载等。因此,桩基的应用也越来越广泛,其种类也越来越多。有人统计,如果考虑用于复合地基的各种柔性桩(如粉喷桩、碎石桩、CFG桩)和近年发展起来的异型桩(如树根桩、支盘桩、后压浆桩等),目前各种类型的桩基多达300余种。

最近几年,人们在研究因地震液化导致的横向地面移动对桩基及其力学行为的影响时,发展了一种高柔韧性抗震接头桩(high ductility astigmatic joint spliced pile, HDAJ桩)来抵抗地震引起的破坏。同时,随着桩基施工技术的发展,各种长桩、超长桩、海洋平台桩等新型桩基在工程实践中越来越多地被使用,为了增加桩基的刚度及稳定性,各类具有接头的桩基也越来越广泛应用于众多工程领域中。

1.3 桩基的研究现状

自20世纪20年代开始桩基的研究以来,特别是在第二次世界大战以后,桩基的理论技术有了很大的发展。不论是在桩基理论研究还是数值模拟计算和实验方面,也不论是在桩基的设计理论还是施工技术方面,更不论是在桩基的规范还是质量检测方面,所取得的成果是巨大的,以至于无法一一列出其中的许多主要工作。本节仅根据作者以往所进行的一些研究课题的调研,并结合相关的研究,着重从力学与工程相结合的观点来简述与桩基力学特性分析有关的理论分析与数值模拟方法等方面的部分研究成果。

经过半个多世纪的努力,已基本形成了桩基力学特性研究的主要理论和方法,即连续介质力学的研究方法、地基响应法和实验方法等。

1.3.1 连续介质力学方法

连续介质力学方法是基于连续介质力学理论及其框架来建立桩基力学特性分析的数学模型,其中,桩基和土体的材料可以是弹性、黏弹性和弹塑性材料等。这种理论和方法概念清晰、理论性强,因而得到比较广泛的认同,比较流行。Tajimi^[3]首先采用连续体模型模拟土体,之后许多学者对这一理论方法做了进一步的研究。Mattes 和 Poulos^[4-6]假定土体为连续弹性体,在弹性半空间中得到了竖直和水平单位荷载作用下土体位移的 Mindlin 积分解,讨论了单桩的力学特性。Novak^[7]基于平面应变假设,将土体看成线性黏弹性半空间,首先运用连续介质力学理论,研究了在线性黏弹性土体的假设下桩 - 土的相互作用,并在其后的文献^[8,9]中进一步发展和完善了这一理论。Novak 和 Aoul-Ella^[10]在假设桩 - 土完全接触不分离和小变形等条件下,求得了桩周土体的动刚度和阻尼参数的表达式。Kuhlemeyer^[11]对土体模型进行了讨论,给出了桩基纵向振动复刚度,并将所得到的解析结果和有限元计算结果作了对比。结果显示,在工程上感兴趣的频率范围内,二者吻合较好。Novak 和 El Sharnouby^[12]认为,在一定条件下,Novak 的土体平面应变模型可以被常数黏滞阻尼和频率无关线性弹簧并联 (Vogit 体和 Maxwell 体) 模型近似等效代替。Anestis^[13,14]在 Novk 模型的基础上提出了非线性黏弹性模型,得到了在非线性黏弹性情况下桩 - 土的相互作用。Roeset^[15]基于土体的非线性均匀假设,对桩基进行了动力学及参数的研究,并发展了相应的有限元方法。Aboal-Ella^[16]将土的均匀平面应变方法推广到层状介质,得到了一个既简单又多用途的解。Nogami 和 Novak^[17,18]在考虑了桩 - 土纵向共同作用的基础上,假设桩周土体无径向位移,波同时从桩基表面以纯剪切波的形式向桩周土体径向辐射传播,桩头为刚体支撑,求得了桩基、土体复刚度及其位移和频率的表达式。Rajapakse^[19]采用格林函数法分析了弹性半空间中桩基和土体的动力学特性。Poulos 和 Davis^[20]研究了土体的屈服、土体的有限深度和非均匀土层对桩基力学特性的影响。Sen 等^[21]、Kishnan 等^[22]、Rajapakse 和 Shah^[23]、Mamoom 等^[24]也分别用解析法或数值方法研究了在成层土或非均匀土的条件下桩基的简谐振动。Liu 和 Novak^[25]采用有限元方法分析了横观各向异性成层土中桩基的动力响应。Chow^[26]和宫全美^[27]将一维桩基和土体的 Mindlin 积分解耦合求解了桩基的力学特性。Roeset^[15]总结了各种土层条件,给出了分析群桩的简化模型。Xu 和 Poulos^[28]总结了运用弹性理论来求解单桩和群桩的计算方法。Koo 等^[29]研究了在 SH 波下,桩 - 土 - 结构间的相互作用。Chau 和 Yang^[30]在此基础上研究了具有差异性的两桩之间的线性

相互作用因子。Wong 和 Poulos^[31]假设嵌岩桩桩周土体的内层土是非线性的, 而内层土之外的土体为线性黏弹性土体, 建立了一种分析圆柱形桩基在水平振动下的桩 - 土非线性相互作用下的力学模型。程昌钧等^[32,33]将桩 - 土系统看成一个嵌入桩基的黏弹性半空间, 在空间柱坐标系中建立了非线性桩 - 土相互作用的数学模型, 并在频域内研究了水平振动下桩基的非线性动力学特性, 考查了参数对桩基动力学特性的影响。研究发现, 在竖向荷载作用下, 桩基将可能发生失稳。Hik-met^[34]将土体看成无限延伸的土体片, 研究了在组合荷载作用下, 半刚性连接和部分埋入桩的自由振动。

近年来, 胡育佳等^[35, 36]分别在土体的材料非线性和几何非线性的条件下, 把桩 - 土系统看成是在一个无限大的圆柱形弹性介质中嵌入圆截面桩基, 并将其作为一个整体利用弹性力学的理论建立该耦合系统非线性力学行为分析的数学模型, 其中在桩 - 土系统的连接面上, 桩基和土体的位移和应力满足适当的连接条件。提出了求解这类具有间断性条件的空间轴对称桩 - 土耦合系统的控制方程的无网格 Galerkin 方法 (element free Galerkin method, EFGM)、微分求积法 (differential quadrature method, DQM) 及微分求积单元法 (differential quadrature element method, DQEM), 并求得了几何非线性条件下, 层状介质中桩 - 土耦合系统的 DQEM 解; 同时根据在土体材料非线性条件下得到的 EFGM 解, 提出了群桩非线性相互作用影响因子的概念及计算群桩非线性整体沉降的方法。

随着多孔连续介质力学理论的深入研究, 饱和土和非饱和土中桩基力学行为的研究也开始受到越来越多研究者和工程师的关注。早期, 饱和土中桩基力学行为的研究大都将饱和土近似为泊松比为 0.5 的单相介质, Apirathvorakij^[37]应用 Biot 固结理论分析了饱和土中桩基横向变形的初值和终值两种极限情况。比较系统研究饱和土中桩基力学行为是近十年才开始的。Zeng 和 Rjapakse^[38]首先在频域内研究了饱和土中垂直受载单桩的动力影响, 王建华等研究了土体固结和流变对垂直振动桩的影响, 李强等^[40]给出了饱和土中桩基纵向振动复阻抗的解析解, Jin 等^[41]、陆建飞和王建华^[42]、陆建飞^[43]研究了饱和土中单桩水平运动的动力行为, 杨军等^[44]给出了饱和土中水平振动桩辐射阻尼的一个简化算法, Wang 和 Zhou^[45]、Maeso 等^[46]研究了饱和土中群桩的若干问题。研究发现, 土 - 桩界面间的渗透率对桩基刚度有显著的影响; 群桩的动力阻抗对频率的依赖性较单桩更为敏感; 桩基附近的孔隙水压依赖于桩间距和上部结构质量等因素, 孔隙水压既可大于, 也可小于自由场处的孔隙水压。

最近, 作者将连续介质力学的建模方法进一步推广到流体饱和多孔弹性

和黏弹性土中桩基力学行为分析,建立了流体饱和多孔弹性土中桩基力学行为分析的数学模型,并分析了流体饱和多孔弹性土中端承桩的动力学特性。

人们认为,在求解桩-土相互作用问题时,连续介质力学模型是比较合理的,此类模型的概念清楚、公式直接,可应用到弹塑性问题、黏弹性问题、饱和土问题和稳定状态和瞬时地下水渗透等问题中,还能够更有效地分析群桩的力学特性,但是一般的理论分析、数值模拟等方面比较困难,特别是在分析由几何和材料引起的非线性问题时,具有更高的难度。虽然,相关方面的研究已获得了一定的成果,但是仍然有许多基本理论、数值模拟方法及工程应用等问题值得深入的研究。

1.3.2 地基响应法

地基响应法是将桩基看成一种梁-柱结构,土体对桩基的作用力表述为一系列的方程,包括各种广义 Winkler 地基模型、地基反力系数法等。

Winkler 地基模型是把桩周的土体离散为一个个单独作用的弹簧,某一弹簧受力时,仅该弹簧发生与作用力成正比的压缩而与其他弹簧无关。这种把地基看成非连续介质且地基反力系数在整个位移过程中均为常数的假定虽和实际不太符合,但与其他一些较复杂的解析方法相比较,在许多情况下,特别是当基础的容许位移较小时,这种方法仍可得出比较接近实际的结果。当桩基的位移比较大时,土体的非线性变得比较突出,这时土体的反力与位移之间的线性关系假设不再成立,而且随着荷载的增大,线弹性地基反力法也不能准确地反映桩-土之间的相互作用,不能反映出最大弯矩所在位置向桩体深度方向发展的规律,从而推动了 Winkler 模型的发展,出现了各种广义的 Winkler 模型^[47],这些模型的出现,在很大程度上能够更准确地描述土体对桩基的作用。胡安峰和谢康和^[47]基于广义动力 Winkler 模型研究了水平荷载下单桩的动力响应。黄茂松等^[49]采用广义动力 Winkler 模型模拟了桩-土间的动力相互作用,并采用传递矩阵法考虑了土体的分层特性,研究了层状地基中群桩的水平振动特性。基于 Winkler 地基模型的研究思路,Cai 和 Wang^[50]在孤立子内波引起的荷载的作用下,研究了桩基的动力学特性,这种分析方法可以用来研究在波浪力作用下平台桩的动力学特性。Nogami 和 Novak^[17]、EI Nagggar 和 Novak^[47]相续对动力 Winkler 地基模型开展了一些研究。他们认为,该模型的局限性是仅通过水平弹簧和水平阻尼器来考虑土体对桩基的动力作用,较难反映土体中应力波的传播及软化、液化等土体动力学性状变化。最近,Hu 等^[51-56]将广义 Winkler 模型系统地推广用来研究了非线性弹性、黏弹性、弹塑性地基上具有初始位移和间断性条件的桩基大变

形分析的静动力学响应问题,得到了以下有益的结论。

基于广义 Winkler 模型的桩基非线性动力学特性研究也越来越受到研究者的关注, Matlock^[57]和 Reese 等^[58]考虑到土体抗力集度 P 的非线性特点,提出了反力挠度曲线法,即 P - Y 曲线法,并被列入美国 API 规范。 P - Y 曲线是指在水平力作用下,地面某深度 z 处土体的反力 P 与该点桩基挠度 Y 之间的关系曲线,它综合反映了桩周土体的非线性、桩基的刚度和外荷载作用的性质等特点, P - Y 曲线能如实地把地基的非弹性性质,以及由土体地表开始的进行性破坏现象反映到桩基的计算中, P - Y 曲线不仅可应用于静力的短期荷载和循环的反复荷载,也适用于任意尺寸、刚度和嵌固状态的桩基,在发生了弹性变形以至产生塑性变形和达到或超过剪切破坏时的内力和变位计算。在海域工程结构中, P - Y 曲线法已有较广泛的应用,它克服了单一参数法(如 m 法)计算水平承载桩,所得挠度、转角和桩身最大弯矩不能同时与桩基的实测数据和边界条件很好吻合的缺点,解决了桩基发生大变位时土压力和位移呈线性关系的求解方法和土体的实际非线性反映不相适应的问题,能比较全面地反映桩基的工作性状。一般要求,由 P - Y 曲线法求得的桩基变位或内力应同由弹性力学方法求得的结果相协调,还应使地基反力系数法所用的地基反力系数同由 P - Y 曲线求得的土模量一致。

P - Y 曲线法认为沿桩身各深度处,可根据土体的实际情况确定出土体抗力集度 P 与挠度 Y 之间的非线性关系曲线。由于这种方法是根据模拟实际桩-土相互作用提出的,关键问题是建立一族 P - Y 曲线。Reese 等^[58]、O'Neill 等^[59]通过由经验或试验得到的土体对桩基的特殊曲线来描述土体的非线性作用,对桩-土的非线性行为进行了研究。O'Neill 等^[60]、Bogard 和 Matlock^[61]、Brown 等^[62]提出和改进了修正的地基相应法。Kraft 等^[63]、Gazioglous 和 O'Neill^[64]试图得到一些理论曲线来描述不同性质的土层。Nogami 等^[65,66]提出了传递矩阵法。Focht 和 Koch^[67]将 P - Y 曲线与弹性理论结合起来,利用 P - Y 曲线法计算单桩的水平位移并考虑桩-土荷载位移关系的非线性性质,利用弹性理论考查群桩中各桩的相互作用。由于 Pocht-Koch-Poulos 综合法理论性强,因而不失为一种计算群桩力学特性的方法。

1984 年,田平和王惠初等^[68,69]利用上海近郊的饱和黏性土完成了一系列不同尺度的受横向荷载桩的现场试验,提出了黏土中横向静载桩 P - Y 曲线新的统一法和黏土中横向周期荷载桩的 P - Y 曲线统一法。章连洋和陈竹昌等^[70]通过室内模型试验。讨论了黏性土中 P - Y 曲线的计算方法。程泽坤^[71,72]基于 P - Y 曲线法考虑桩-土相互作用的高桩结构物,对水平力作用下高桩结构物进行了分析。胡立万等^[73]用 P - Y 曲线法计算了板桩结构。杨国平和张志明^[74]

对大变位条件下水平受力桩的 P - Y 曲线进行了研究。

近些年来,人们对桩基非线性振动问题研究的兴趣大增。Balachandran 等^[75]总结了结构中的非线性相互作用现象,包括带有相互联系振荡器的结构的自由振动。El Naggar 和 Novak^[47]研究了在瞬态动力荷载和间谐波荷载作用下桩基的横向响应,考虑了桩-土交界面上的不连续条件和不同阻尼方式下的能量耗散。Nayfet 和 Lacarbonara^[76]讨论了在非线性弹性基础上欧拉-伯努利梁的振动的近似分析方法,研究了主共振和次谐波共振。王奎华和谢康和^[77]得到了有限长桩基受迫振动问题的解析解,王腾等^[78]得到了任意变截面桩基纵向振动的半解析解,刘东甲研究了非均匀土体中多缺陷桩基的轴向动力响应问题,黄雨等^[80]综述了近几年桩基抗震研究的现状,王奎华和应宏伟^[81]探讨了广义 Voigt 土模型条件下桩基的纵向振动响应及应用。胡春林等^[82-84]在假设桩基和桩周土体材料为非线性弹性和线性黏弹性材料的情况下,综合利用复模态分析法、多时间尺度法、Galerkin 方法及非线性动力学中的方法,系统研究了非线性弹性和线性黏弹性桩基的轴向自由振动和受迫振动及横向自由振动,发现了一些新发现,揭示了一些新规律。

P - Y 曲线或 Q - S 曲线法原理简单、计算可信度较高、实用范围较广,特别是对于复杂工况下桩基力学特性的研究,有较大的用途。由于是通过试验得到土体对桩基的作用力。因而能够较好地刻画桩-土系统的实际工况条件,可以得出在轴向荷载分布、沉陷值、弯矩和剪力等方面较令人满意的结果,但是由于其试验成本昂贵,故只能在少数重大工程中得到应用,并且具有一定的地域特性。

1.3.3 数值计算方法

不管是采用连续介质力学方法还是地基响应法来建立桩基力学行为分析的数学模型一般都是十分复杂的,特别是非线性数学模型,直接得到问题的解析解或半解析解是很困难的,因此常常采用各种数值计算方法来模拟桩基的力学特性,其研究内容和成果也是桩基研究内容中最为丰富的一部分。主要的数值计算方法包括有限元方法、样条有限元方法、边界元方法和它们相组合得到的混合方法等,对于动力学问题,还经常采用各种类型的摄动法、复模态分析法、多时间尺度法、Galerkin 平均化方法以及非线性动力系统中的方法等。Butterfield 和 Banerjee^[85]应用 Mindlin 基本解建立了弹性土体的边界积分方程,并应用边界元求解了桩-土相互作用的问题。Ellison 等^[86]、Christiano 等^[87]、Faruque^[88]和 Desai^[89]利用有限元方法研究了轴向力作用下桩基的力学特性问题。Muqtadir 和 Ddsai^[90]利用三维有限元模型求解了双曲

型本构模型条件下桩 - 土的相互作用。Kuhlemeyer^[11]首先在频域内利用有限元方法对线弹性桩 - 土系统的动力响应问题进行了分析。Angelides 等^[91]发展了这种有限元方法, 在一定的条件下提出非线性黏弹性的线性化计算方法, 并对非线性桩 - 土系统进行了研究。Aristonous^[92]利用有限元方法系统研究了在弹塑性模型下桩土滑移、间隙等对桩 - 土相互作用的影响。Poulos^[5, 6]、Poulos 和 Davis^[20]在侧向循环荷载作用于桩头的条件下研究了非线性土体对桩基动力响应的影响, 在桩基附近区域采用有限元模型, 而在稍远处则采用一致边界矩阵来体现辐射效果, 同时采用一种等效线性化技术来估计土性随应变水平的变化。Makris 和 Gazetas^[93]、Kimura 等^[94]、Badoni 和 Makris^[95]、Wu 和 Finn^[96, 97]、Guin 和 Banerjee^[98]、Akihiko 等^[99]利用有限元方法对群桩问题、水平力作用下的桩基力学等问题进行了研究, 取得了一系列的研究成果。赵振东等^[100]分析了桩头作用有侧向脉冲动荷载时桩 - 土系统的非线性动力学性质, 采用了一个三维显式有限元程序 DYNA3D 来计算单桩的动力响应。Hsueh 等^[101]用有限元程序 ABAQUS 分析了非线性桩 - 土 - 结构体系的横向运动特性。Liyanapathirana 和 Poulos^[102]用有限元方法进行了液化土中桩的地震性能分析。Liu 等^[103]用有限元方法进行了柔性群桩和土之间相互作用的非线性分析。Anandarajah 等^[104]用现场试验资料, 结合等效线性有限元方法分析了桩和土之间相互作用。Tang 和 Sato^[105]用 H-adaptive 有限元方法进行了桩基和土体非线性相互作用分析。傅旭东和称晓平^[106]运用非线性摄动随机有限元方法分析了单桩承载力的可靠度。Semih^[107]在空域内采用杂交边界元方法, 时域内采用隐式差分格式, 研究了在激励荷载作用下群桩的动力学特性。近年来, 有人应用边界元 - 有限元耦合法, 边界元 - 差分耦合法, 有限元 - 无限元耦合法等联合求解了桩 - 土相互作用问题^[108, 109]。

虽然, 有限元方法是解决桩基力学问题较一般的方法, 但在模拟桩 - 土 - 结构相互作用等方面有独到之处。人们用有限元应用软件, 可实现各类工程结构的应力场、应变场、温度场以及动力响应分析的定量计算, 对施工中碰到的实际问题, 可利用计算机进行模拟和优化, 从而大大缩短设计周期、节省材料、减少施工时间、提高工程结构的稳定性和安全性。但是, 用有限元程序对桩基结构进行非线性分析仍有一些不足, 主要是计算过程复杂、计算工作量大、耗时多、计算成本较高、不便于讨论相关参数的影响, 而且, 在计算材料非线性、几何大变形和边界移动等问题的过程中, 往往要计算网格重构, 这样做不仅费时、费资金, 而且会使计算精度受损, 甚至会得出不符合实际的结果。因此, 对于复杂的桩 - 土耦合系统, 特别是耦合非线性系统而言, 寻找精度高、计算量小、收敛速度快、稳定性好的数值方法仍然是

非常值得关注的研究课题。近些年发展起来的无网格方法、微分求积法和微分求积单元法是求解工程和科学中初边值问题比较有效的方法^[110-113], Hu 等也用这些数值方法求解了单桩和桩 - 土耦合系统的非线性力学特性的问题^[51-56], 但是还有许多问题有待进一步研究和发展。

由于非线性或者黏弹性系统的复杂性, 使对结构动力响应、动力稳定性的动力学行为等问题的研究十分困难, 目前关于这类问题的数学理论和数值方法还不十分完善。虽然人们通常将桩基看成是梁 - 柱结构, 但由于桩周土体可能是非线性黏弹性的, 土体对桩基反力的描述比较困难, 因此, 非线性弹性或者黏弹性桩基的动力学行为的研究显然是一个更为复杂的问题。可见, 在桩基的理论分析与数值模拟的领域中, 值得研究的课题仍相当多。

1.3.4 试验方法

模型试验和现场试验是桩基力学特性研究的另一类主要的研究方法, 它与桩基力学特性分析的数值建模和数值模拟是同等重要的, 虽然作者并不从事试验研究, 但是对桩基的模型试验和现场试验研究同样非常关注, 因为各种类型的试验结果不仅可以用来检验理论分析和数值模拟结果的正确性, 同时, 试验也是理论分析的先导, 试验还可以发现新现象, 因此, 试验研究和理论分析与数值模拟是相辅相成的。

随着我国经济建设的迅速发展, 各种形式的高层建筑越来越多, 其形式也越来越复杂, 规模也越来越大, 在许多情况下, 我国高层建筑均采用以桩 - 箱为主的深基础, 随着上部结构的高耸化、体型复杂化, 对高层的设计理论和施工技术提出了许多新的理论课题, 对其力学特性分析与数值模拟也提出了新的要求, 特别是建造在地震可液化地基上的高层建筑, 更有许多复杂的理论和实践问题。由于地基 - 桩 - 结构动力相互作用问题, 特别是液化地基 - 桩 - 结构动力相互作用问题的复杂性以及试验研究的困难, 许多理论研究结果和数值模拟结果都得不到试验验证, 难以直接指导工程设计。所以, 如何用现场模型试验来验证理论研究成果显得非常重要, 这方面已经引起了许多研究者的重视, 并已取得了不小的成果。例如, Reese 等^[58]、O'Neill 等^[59]通过试验得到的土对桩的特殊曲线来描述土的非线性作用, 根据试桩资料提出试桩地区 P - Y 曲线与现场及室内及试验参数的关系, 对桩 - 土的非线性行为进行了研究。为了描述非线性岩土阻抗 - 挠度的模型, 1986 年美国石油研究所根据黏土和砂土的试验结果得到的 P - Y 曲线, 并指出了静态和循环加载的区别, 成为人们广泛应用的结果。国内, 田平和王惠初等^[68, 69]、章连洋和陈竹昌^[70]也进行了相关的试验研究, 给出了饱和黏性土和黏性土中 P - Y 曲

线统一表示法和计算方法。Novak^[7]利用小模型桩进行了桩基动力特性试验研究。Nabil^[114]、Okahara 等^[115]和 Rollins 等^[116]用试验方法研究了受横向荷载作用的砂土和黏土中桩基的力学特性。

近十几年来,国内外就结构-地基相互作用对结构地震反应的影响已进行了多方面的研究,尤其是大型离心机试验和模型振动台试验得到了较多的应用。在离心机模型试验研究方面,国内外学者对液化场地土-结构进行了大量离心机模型试验。Brandenberg 等^[117]、Funahara 等^[118]、Yao 等^[119]利用离心机及振动台模拟试验技术研究桩基工程特性、桩-土-结构动力相互作用等问题。Peter^[120]进行了动力离心机试验,结合 FLAC 软件考虑孔隙水压力的产生和消散,对其进行了有效应力数值分析。Kammerer 等^[121]对不同密度、不同竖向力的砂土进行了单向和双向剪切试验。也有学者对液化土和非液化土层的土-结构相互作用体系进行了离心机模型试验,考虑了土体对单桩和群桩、静力学和动力学等多种因素的影响,并取得了一些有意义的结论[参见第 13 届 WCEE (World Conference on Earthquake Engineering) 会议集中的相关文章]。2007 年,于玉贞和邓丽军^[122]利用土工离心机及振动台进行了砂土边坡的动力离心模型试验,研究抗滑桩加固边坡的地震响应和桩-土相互作用规律。

由于模型振动台试验不存在离心机试验中的科利奥利效应问题,可以在较短的时间内进行为数较多的模型试验,以消除一些随机因素的影响,所以它是研究液化场地土-结构动力相互作用的一种新方法,受到国内外学术界的极大关注,成为 20 世纪 90 年代桩-土-结构动力相互作用振动台试验研究的新阶段,其中砂土液化条件下桩-土动力相互作用振动台试验是一个研究热点。由于 Loma Prieta 地震和 Kobe 地震中桩基的大量破坏进一步促进了动力相互作用的试验研究,不仅注重对试验装置和模型相似比的研究,而且越来越多地将试验结果和理论分析结果进行比较检验理论分析中性参数选取的合理性。在液化场地土-结构动力相互作用模型振动台试验研究方面,美国和日本两国的研究发展迅速。Tamura 等^[123]在日本地震科学和防灾国家研究院进行了液化砂土-结构相互作用体系大比例模型试验研究。日本和美国自 1992 年起合作进行了 EDUS (Earth-quake Damage to Underground Structures)^[124]研究,并在第 12 届和 13 届的 WCEE 上都有较多涉及液化模型振动台试验的论文。虽然国内开展振动台试验研究的时间不长,但已经取得了诸多成果。陈文化^[125]通过小型振动台模拟试验研究了有建筑物存在的饱和砂土地基液化问题。陈跃庆等^[126]进行了上部结构-地基相互作用体系的振动台模型试验,以了解结构-地基动力相互作用的响应及规律。孟上九等^[127]