

沿海滩涂地区大直径灌注桩 承载性状研究

Research on Bearing Capacity and Characters of
Large Diameter Cast-in-place Piles in Coastal Region

魏继红 吴继敏 董志高 刘 瑾 / 著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

沿海滩涂地区大直径灌注桩 承载性状研究

Research on Bearing Capacity and Characters of
Large Diameter Cast-in-place Piles in Coastal Region

魏继红 吴继敏 董志高 刘 瑾 / 著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书以大直径灌注桩承载性状为主题,采用理论分析、数值模拟、室内外试验及工程案例相结合的方法,重点研究了大直径灌注桩沉降变形的解析算法,负摩阻力、桩身粗糙度、桩底沉渣、桩侧泥皮对大直径灌注桩承载性状的影响以及周边环境变化对桩承载性质的影响;立足于桩身及周边环境变化对桩的影响,对大直径灌注桩在软土地基环境下的受力及变形性质进行研究。本书不仅浓缩了作者及所在团队多年的研究成果,而且对大直径灌注桩承载性状的研究进行了发展和提升。

本书可供土木、交通、地质、水利、矿山等行业从事岩土工程、地质工程专业人员使用,也可作为高等院校和科研院所相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

沿海滩涂地区大直径灌注桩承载性状研究 / 魏继红

等著. — 南京: 河海大学出版社, 2018. 10

ISBN 978-7-5630-5749-8

I. ①沿… II. ①魏… III. ①海涂—大直径桩—灌注
桩—桩承载力—研究 IV. ①TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 209258 号

书 名 沿海滩涂地区大直径灌注桩承载性状研究

书 号 ISBN 978-7-5630-5749-8

责任编辑 成 微

特约编辑 葛 华 杨万锐 余 波

封面设计 黄 煜

出 版 河海大学出版社

地 址 南京市西康路 1 号(邮编:210098)

网 址 <http://www.hhup.com>

电 话 (025)83737852(总编室) (025)83787769(编辑室) (025)83722833(营销部)

经 销 江苏省新华发行集团有限公司

排 版 南京布克文化发展有限公司

印 刷 虎彩印艺股份有限公司

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 15

千 字 285 千字

版 次 2018 年 10 月第 1 版 2018 年 10 月第 1 次印刷

定 价 68.00 元

前言

Preface

在沿海、沿江具有深厚软土层的地基中,大直径灌注桩已得到广泛应用。尽管对大直径灌注桩在不同地基土层中受力性状的研究正在不断地深化和完善,但不可否认的是,理论研究明显滞后于工程实践,尤其是近几年,随着沿海围垦工程建设规模的增大,灌注桩的桩径越来越大,长度也越来越长,地基环境由较好的内陆环境向沿海、沿江深厚的软弱欠固结土发展,大直径灌注桩在此类地基土中的受力变形成为桩基工程中的热点和难点问题之一,因此,加强深厚欠固结软土中的大直径灌注桩受力及变形问题的研究就显得尤为重要和迫切。在实际工程中,大直径灌注桩与中小直径灌注桩的受力特性明显不同,桩径改变的同时,也改变了灌注桩的受力特性和变形规律。桩侧土体在受力时的变形特性、不同桩端土条件下大直径灌注桩桩端阻力发挥形式、桩端土承载特性对灌注桩荷载-沉降曲线的影响等,这些问题都需要在理论和工程实践中得到解答。

在沿海欠固结土的环境中,土层不可避免地会经历重新固结过程,而且在沿海地区,欠固结土层比较厚,土层从初始的欠固结状态到最后完全或者接近完全固结往往需要比较长的时间,在未来很长的时间内,土层的固结始终在影响着大直径灌注桩的受力形式,尤其是对那些打设在浅海中的桩,还会面临以后围海促淤对其带来的负效应。因此,针对大直径灌注桩在此类地质环境中负摩阻力的产生条件及基本特点,以及桩侧和桩端土体的变形规律等问题还需要继续深入研究和探讨。

大直径灌注桩在特别软弱土层中施工往往会造成灌注桩桩侧表面粗糙不平,桩侧表面粗糙度的存在影响着固结过程中和固结完成后桩的受力和变形形式,若不考虑桩侧表面粗糙度问题,计算的结果往往会更加保守,造成不必要的浪费,因此,桩侧表面粗糙度对桩身荷载传递规律的影响不可忽视,尤其是在欠固结土中应引起重视,但桩侧表面粗糙度怎样表述、实际工程中桩侧表面粗糙度如何量化,确定了桩侧表面粗糙度后如何评价其对桩身荷载传递的影响,这些问题都应在理论和实践中得到揭示。

钻孔灌注桩受施工工艺和施工质量限制,桩底往往会形成具有一定厚度、性质较差的沉渣。过厚的沉渣将在桩底形成一层松软层,使桩的承载力降低,成为影响钻孔灌注桩成桩质量的一个重要因素。由于桩底沉渣不易控制,导致桩底沉渣过



厚,根据现有收集资料分析,出现质量问题的桩底沉渣厚度主要分布在 150~650 mm 之间,并且大部分桩的类型为钻孔端承灌注桩;过厚的桩底沉渣造成的直接后果是降低了桩的承载力,根据实测资料显示,由于沉渣的存在导致的桩的承载力损失可达 15%~30%。因此,对于桩底沉渣影响钻孔灌注桩承载力变化规律和桩的破坏模式研究,对工程分析以及指导工程应用具有重要意义。

桩侧泥皮是钻孔灌注桩设计中另一个影响桩基承载力的重要因素。在钻孔灌注桩施工过程中采用泥浆护壁工艺时,由于受泥浆材料、成孔时间、成孔方式等因素影响,桩的周围会形成一层薄层体——泥皮。过厚的泥皮对桩承载性状是非常有害的,某建筑桩基,按照摩擦桩设计,由于泥皮过厚(1.5~3.0 cm),使得单桩承载力降低达 18.75%;某钻孔灌注桩由于过厚的泥皮导致桩侧摩阻力降低了 50%。根据以上分析,泥皮性质和分布给桩基工程带来的危害是巨大的,因此对泥皮厚度、性质及分布的影响研究是非常重要的。

除以上几点外,沿海、沿江的工程建设中,灌注桩的施工往往先于周边建筑物施工,因此,后期的周边环境变化对灌注桩的影响就显得尤为重要,主要包括:促淤对灌注桩的影响;灌注桩周边堆填荷载对基础的影响;基础附近拟建建筑物对灌注桩安全性的影响。如何分析周边环境对大直径灌注桩的影响也是工程中亟待解决的问题。总之,处于软土土层中的大直径灌注桩的受力变形规律还没有得到正确的理解,加强理论研究和工程实践的结合对认识大直径灌注桩的受力机理具有重要的工程意义。

本书共分 8 章。第 1 章为绪论,第 2 章为大直径灌注桩的特点及现场试验分析,第 3 章为大直径灌注桩沉降计算的解析算法,第 4 章为负摩阻力对桩承载性状影响,第 5 章为桩身粗糙度对桩承载性状影响,第 6 章为桩底沉渣对桩承载性状影响,第 7 章为桩侧泥皮对桩承载性状影响,第 8 章为周边环境变化对桩承载性状影响。

需要指出的是,本书是基于作者和所在团队多年的研究成果著作而成,本书的出版倾注了作者和所在团队的大量心血,也包含了课题组部分研究生卓有成效的辛勤劳动。此外,特别感谢沿海开发与保护协同创新中心滩涂资源开发与保护平台的资助和支持,同时也感谢在课题研究过程中给予帮助的项目合作单位!

本书由魏继红、吴继敏、董志高、刘瑾负责写作并统稿。

由于著者水平有限,不当之处在所难免,恳切希望读者批评指正。另外,书中引用了参考文献中一些学者的研究成果或观点,在此表示感谢。

作者

2018 年 7 月 6 日

目 录

Contents

第 1 章 绪论	001
1.1 研究背景及意义	001
1.1.1 桩基础的工程问题	001
1.1.2 研究意义	002
1.2 大直径灌注桩承载性状研究进展	004
1.2.1 灌注桩试验研究现状	004
1.2.2 桩基沉降计算分析方法研究现状	006
1.2.3 桩基础负摩阻力问题研究现状	013
1.2.4 桩侧表面粗糙度问题研究现状	015
1.2.5 桩底沉渣问题的研究现状	017
1.2.6 桩侧泥皮问题的研究现状	018
1.3 问题的提出	019
1.4 主要研究内容	020
第 2 章 大直径灌注桩的工程特点及现场试验分析	023
2.1 大直径灌注桩的工程特性	023
2.1.1 大直径灌注桩的特点	024
2.1.2 大直径灌注桩的荷载传递特征	025
2.1.3 影响大直径灌注桩变形特征的因素	027
2.1.4 大直径灌注桩的变形特征及破坏形式	029
2.2 常用的荷载传递分析法基本模型	031
2.3 大直径灌注桩的现场试验曲线	035
2.4 大直径灌注桩的试验曲线分析	040
2.5 小结	043
第 3 章 大直径灌注桩沉降计算的解析算法研究	044
3.1 单桩沉降计算的改进方法	044
3.1.1 基本假设	045
3.1.2 荷载传递法的基本方程	045



3.2	桩侧土传递函数为线性方程时的解析解	046
3.2.1	桩侧土体完全处于单种状态时的解析解	046
3.2.2	桩侧土体处于组合状态时的解析解	055
3.3	桩侧土传递函数为非线性方程时的解析解	059
3.4	成层地基单桩承载力的解析解	062
3.5	算例分析	063
3.6	小结	067
第4章	负摩阻力对桩承载性状影响	068
4.1	负摩阻力的发生条件及产生机理	069
4.1.1	负摩阻力的影响因素	069
4.1.2	负摩阻力的发生机理	070
4.1.3	负摩阻力的发生条件	072
4.1.4	负摩阻力的基本特点	073
4.2	负摩阻力的解析计算方法	074
4.2.1	负摩阻力计算方法回顾	074
4.2.2	基于弹性理论的负摩阻力解析算法	076
4.2.3	桩周土的固结模型	078
4.2.4	单桩负摩阻力的解析解	080
4.2.5	考虑双中性点问题的单桩负摩阻力的解析解	087
4.3	算例分析	091
4.4	小结	093
第5章	桩侧表面粗糙度对桩承载力的影响	094
5.1	粗糙度对桩基受力性状的影响	094
5.1.1	桩侧表面粗糙度的表述方法	094
5.1.2	巴顿曲线描述	097
5.1.3	桩侧表面粗糙度的分形描述	099
5.1.4	考虑桩侧表面粗糙度的竖向承载力计算	103
5.2	桩侧表面粗糙度的量化分析	129
5.2.1	桩侧表面粗糙度的类型	129
5.2.2	桩侧表面粗糙度的量化理论分析	130
5.3	算例分析	133
5.4	小结	136



第6章 桩底沉渣对桩承载性状影响	137
6.1 概述	137
6.2 桩底沉渣对桩承载性状影响的有限元模型	139
6.2.1 几何模型与网格剖分	139
6.2.2 本构模型与接触面处理	140
6.2.3 边界条件与初始条件及参数取值	143
6.3 不同沉渣厚度对桩承载性状的影响	143
6.3.1 对极限承载力的影响	143
6.3.2 对轴力、桩端阻力及桩侧摩阻力影响	145
6.3.3 不同沉渣厚度对沉降的影响	150
6.4 沉渣物理力学参数对桩承载性状的影响	153
6.4.1 沉渣变形模量 E_d 和泊松比 ν_d 影响分析	154
6.4.2 沉渣强度(黏聚力 c_d 和内摩擦角 φ_d)影响分析	156
6.5 长径比变化时沉渣对桩承载性状的影响	158
6.5.1 荷载-沉降曲线	158
6.5.2 对桩端阻力、桩侧摩阻力影响	163
6.5.3 对桩身轴力影响	167
6.6 沉渣作用桩的破坏模式与简化计算分析	168
6.7 工程实例分析	170
6.7.1 工程概况	170
6.7.2 工程地质条件	171
6.7.3 有限元模型及物理力学参数	171
6.7.4 计算结果分析	172
6.8 小结	178
第7章 桩侧泥皮对桩承载性状影响研究	179
7.1 概述	179
7.2 桩侧泥皮对桩承载性状影响有限元模型	180
7.2.1 本构模型	180
7.2.2 边界条件与初始条件以及参数取值	184
7.3 泥皮性状对桩承载性状影响研究	184
7.3.1 荷载-沉降曲线	185
7.3.2 对桩侧摩阻力影响	187
7.3.3 对桩端阻力影响	191



7.4 泥皮分布对桩承载性状影响研究	192
7.4.1 荷载-沉降曲线	192
7.4.2 侧摩阻力分布	194
7.4.3 轴力与桩端阻力	197
7.5 小结	199
第8章 周边环境变化对灌注桩承载性状影响	200
8.1 岩土体的性质及物理力学参数	201
8.2 周边环境对桩承载性状影响研究内容	202
8.3 模型构建	203
8.4 促淤对灌注桩影响的历史恢复研究	203
8.4.1 有限元计算模型	203
8.4.2 促淤对灌注桩影响的历史恢复	204
8.5 堆填荷载对基础的影响研究	205
8.5.1 研究思路	205
8.5.2 基本假定	206
8.5.3 计算结果分析	206
8.6 基础附近拟建建筑物对灌注桩安全性的影响研究	210
8.6.1 单侧建筑物荷载对桩基础的影响研究	210
8.6.2 双侧建筑物荷载对桩基础的影响研究	214
8.7 小结	219
参考文献	220

绪 论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 桩基础的工程问题

桩基础简称桩基,是一种古老的基础形式,是由基桩和连接于基桩桩顶的承台共同组成的,承台与承台之间一般用承台梁相互连接。早在有文字记载之前,人们就已开始利用木桩作为基础形式支承房屋。在智利文化遗址发掘中所见到的桩距今大约有12 000~14 000年;我国浙江余姚县河姆渡原始社会遗址出土的桩距今大约有6 000~7 000年。我国许多著名的古建筑都采用了木桩基础,如上海龙华塔、杭州湾的石砌岸壁、北京御河桥及西安灞桥等。桩基础的材料由过去的木质变为现在的钢管、混凝土或其他一些高强度的材料;桩的截面形式也多种多样,如圆形、方形、多边形、三角形、“Y”形、“H”形等;桩身也出现等截面、变截面、锥形桩等;按施工方式出现灌注桩和预制桩等。桩基础之所以出现如此多的类型,主要是为适应不同工程的需要,可以说,桩基础几乎遍布整个建筑市场,在公路交通、工民建、水利电力等行业都得到广泛的应用^[1-7],据不完全统计,我国年用桩量达几百万根以上。

桩基础的作用是将上部结构的荷载穿过软弱可压缩土层传递到深部较坚硬的、低压缩性的土层或岩层上去,有时也用桩来承担上拔力和水平力。在进行建筑物设计时,基础形式应尽量选用浅基础,但在某些情况下,采用浅基础不能满足建筑物的沉降和变形要求时,必须采用桩基础。需考虑采用桩基础的情况主要有以下几种情形:

(1) 上部覆盖层较厚,土质软弱,压缩性高或含水量较高,地基土本身无法满足上部结构对地基承载力和沉降的要求,此时需要采用桩基础将上部荷载传递给深部较坚硬土层。

(2) 地基土在很深的土层深度内,没有较为理想的桩端持力层,此时可以考虑



用桩基础将上部荷载传递到桩周土和桩端土,这种情况大多数考虑摩擦桩。

(3) 高耸建筑物(烟囱、电视塔、风力条件较好的地区建高架桥等)的基础要承受倾斜力和上拔力,采用桩基础较为合适。

(4) 需承受较大水平荷载的建筑物(高桩码头、船柱等),可采用桩基础。

(5) 土层中存在较厚的膨胀土或湿陷性土,或者地基土中有可液化的土层,由于这种类型的土质随季节改变建筑物的变形形式,因此,需要用桩基础将荷载传递到稳定土层中。

(6) 对地基有特殊要求的建筑物,可采用桩基础。

按桩的施工方法可以将桩分为预制桩和灌注桩两类。预制桩的桩身是在工厂或现场预先制好的,沉桩方法一般采用锤击或静压法。灌注桩是直接在设计桩位地基上成孔,然后放置(或不放)钢筋笼,最后浇注混凝土而形成的桩。灌注桩一般在施工过程中噪声和振动不大;能穿过各种软、硬夹层,还可以扩底以充分发挥桩身强度和持力层的承载力;可根据土层分布情况任意设计桩长,配筋率远低于预制桩,对邻近建筑物影响小;但混凝土浇注质量不易检查,护壁泥浆会造成环境污染,孔底沉渣难以清除彻底。

根据竖向压力下荷载桩的承载性状,可将桩分为端承桩、摩擦桩和端承摩擦桩或摩擦端承桩。在竖向荷载作用下桩所发挥的承载力由端阻力提供时称为端承桩;在竖向荷载作用下桩所发挥的承载力由侧壁摩阻力提供时称为摩擦桩;在竖向荷载作用下桩所发挥的承载力由侧壁摩阻力和端阻力共同提供时,若以侧壁摩阻力为主称端承摩擦桩,若以端阻力为主称摩擦端承桩。

桩基础受力特征分析的实质就是桩土相互作用的分析过程,国外对大直径桩已开展了一定的探讨^[8-14],但对其桩土相互作用机理的分析尚待研究。

1.1.2 研究意义

随着我国交通事业迅速发展,江河及沿海需要建造多座桥梁。仅湖北省跨长江的大桥就有 13 座,其中已建的有 5 座(武汉 2 座,西陵、黄石、九江各 1 座),在建的有 6 座(宜昌、彝陵、荆江、军山、白沙洲、鄂黄)。江苏省跨长江大桥数量也较多,有公路和公路铁路两用桥梁 15 座。据统计资料,我国公路桥梁从 1965 年的 10.4 万座,发展至 1998 年的 22 万座,总长度增加了 4.5 倍。其中一部分大桥的建设在材料、规模、质量上均发生了明显变化。今后我国桥梁不仅要跨越长江、黄河、珠江等大的河流,还将在海湾、海峡处修建特大桥。桥梁规模的增大,首先应考虑基础规模的扩大,桩基础已经向大直径桩发展,这给桩基础的合理利用和研究带来新的课题,尤其是在沿海地区各类较软、深厚软土地基地区,桩基础的应用越来越广泛,



因此,大直径灌注桩在该类地区的推广应用将产生良好的社会价值。

随着我国沿海地区高等级公路的修建,大直径灌注桩将被广泛应用,但当前的问题是,大直径灌注桩的基础理论研究远落后于工程实践,特别是在深厚软土地基中大直径桩基础的基础理论研究。现行的桩基础理论大都是基于中小直径灌注桩提出的,把中小直径桩的沉降变形理论应用到大直径桩中显然是不合理的,常常造成设计值与实际监测值产生较大的误差。产生误差的主要原因是大直径桩由于桩直径的增大改变了桩的受力特性,使桩在荷载的作用下产生与中小直径桩不完全相同的变形特性;再者,大直径桩的桩长往往较长,也就是说,桩的长径比较大,众所周知,长径比是反映桩土相互作用的重要参数,因此大直径桩在受力和变形特性方面与中小直径桩存在差异。在工程实践方面,选用何种沉降与变形的计算理论来反映大直径桩的受力特性是工程界和学术界值得研究的一个内容,因此加强大直径灌注桩沉降与变形计算理论和方法的研究显得极其重要。

我国有较长的海岸线,且经济发展较快的城市大多数集中在沿海地区,交通建设要适应当地经济发展的要求,同时又要尽量少的占用十分紧张的土地资源,因而许多高速公路都选择在海岸线附近修建,甚至部分要在海里修建。由于该类地区有较厚的淤泥或淤泥质土,而且大部分处于流塑状态,属于欠固结土,工程建成之后,因围垦促淤或者堆载填土,往往使土层产生较大的固结沉降,引起灌注桩产生较大的负摩阻力,同时产生较大的下拉荷载,使桩基产生额外的沉降和变形。据试验资料分析,由于土体的固结沉降产生的负摩阻力在桩的总荷载中占有的比例不可忽略,在工程设计时应重点考虑。目前从国内外的相关研究看,对负摩阻力的研究主要集中在堆载产生负摩阻力的情况,对土体自身固结产生负摩阻力的研究较少。除此之外,由于不对称堆载使大直径桩产生侧向位移方面的研究也较少,尚未见到海水潮水位的上升和下降对桩承受的负摩阻力影响方面的研究。

从以往的研究得出,桩的承载能力主要由桩身侧壁摩阻力和桩端阻力组成,因此,桩侧表面粗糙程度是影响桩身阻力的一个重要因素,许多研究主要集中在土与混凝土交界面的剪切作用方面的研究,参数主要从土与混凝土接触面的直剪试验中获取。这样做的优点是能够取得土与混凝土相互作用的平均参数,而对某些不可忽略的较大的不平面,若仍然采用这样的方式将给计算结果带来很大的误差,造成不必要的浪费,若考虑桩土这种特殊的摩擦作用将给工程带来较大的经济效益。但是,并不是对所有土质环境中的桩都可这样考虑,对土质环境较好的地层,桩周的粗糙程度往往很小,但对沿海较软的土层,浇注大直径的灌注桩时,由于灌注桩本身较重,同时土的塑性较强,往往导致灌注桩侧面的粗糙程度较大,在计算时不可忽略,对一些存在较大凸起或凹进的部位应重点分析。



大直径灌注桩的分析不能离开数值分析方法,而数值分析主要基于不对称的边界条件、不同的堆载过程及堆载部位、基础附近的不对称建筑物荷载、桥梁桩基施工与已建建筑物的相互作用等方面,这些边界及荷载的考虑用常规的解析分析方法实现比较困难,因此只能考虑用数值分析方法进行研究。数值分析方法主要考虑非线性有限元法,到目前为止,对大变形固结条件下桩基础的受力特性的研究较少,尤其是对桩基负摩阻力及不对称荷载条件下桩受力特性的研究更少,因此基于这些因素,研究考虑以上边界条件及荷载变化条件下,欠固结土中大直径灌注桩的受力特性。

1.2 大直径灌注桩承载性状研究进展

1.2.1 灌注桩试验研究现状

灌注桩的现场试验和室内模型试验对认识灌注桩的受力性状有重要的作用,对灌注桩进行相关的试验分析可以直接反映出所研究的工程问题特性,测得的结果是建立在现场实际土层中的,因此结果准确可靠。目前广泛应用的试验包括室内模型试验、常规试验、现场原位观测以及离心机模型试验等。试验方法是开展数值方法研究的基础,在工程问题的分析中具有特别重要的地位。工程问题计算结果的准确性与参数的选择、建模的合理性、边界条件的准确性等因素相关,试验往往是其影响因素综合反映的结果,因此试验结果常常作为选择参数、建立模型和选取边界条件的主要依据。

到目前为止,国内外对灌注桩试验开展了大量的研究工作。在国外,O'Neill等在研究处于黏土中的钻孔灌注桩的桩-土临界位移时,对直径为0.61~2.29 m的灌注桩进行了现场荷载试验,并得出其临界位移值为5.1~10.2 mm;Masa在研究砂土中钻孔灌注桩的桩-土临界位移时,对直径为2.0 m的灌注桩也进行了荷载试验,并得出其临界位移值为45~200 mm;1997年,Paolo Carrubba^[15]对直径为1.2 m、桩长分别为18.5 m和19 m的两根嵌岩桩进行了现场荷载试验,试验取得了成功。除此之外,国外其他一些专家^[16-19]近几年对桩的受力性状也进行了大量的现场试验工作。

在国内,孔宪宾^[20]在砂土中进行了压桩试验,采用数字图像相关分析方法,研究桩-土之间的相互作用;杨爱文等^[21]以原位试验为基础,采用有限单元法对软土地区的混凝土灌注桩桩-土相互作用进行仿真模拟,提出一种新的单桩极限承载力计算公式;马时冬^[22]通过对2根直径1.5 m、长28 m的混凝土灌注桩进行桩身应



力、应变和桩周土分层沉降的测试,测出中性点深度和桩侧负摩阻力,同时介绍了日本的一种中性点深度计算公式,比我国现行规范估算接近实际情况;顾培英等^[23]依据静载试验,对大直径钻孔灌注摩擦桩荷载-沉降曲线、桩身轴心压力沿深度的分布规律、桩侧极限摩阻力以及桩端反力等进行了分析,给出了苏州地区桩侧摩阻力和极限摩阻力建议值,并讨论了桩底沉渣和试桩长径比对桩侧摩阻力的影响;赵顺波等^[24]依据4个工程钻孔灌注摩擦桩的静载试验,揭示了桩侧摩阻力与桩土相对位移之间存在良好的对应关系,给出了主要土层桩侧摩阻力与桩土相对位移关系曲线,提出了考虑桩土相对位移影响的大直径钻孔灌注摩擦桩极限承载力计算建议;张忠苗等^[25]以某广场静载荷试验的实际测试结果为基础,研究了软土中持力层为黏土、卵石层的非嵌岩超长桩的承载特性和荷载传递机理,得到了桩端阻力、桩侧摩阻力发挥规律和桩身压缩变形规律;李连虎等^[26]采用载荷试验及钢筋计测试联合确定一定深度上的桩基承载力;石名磊等^[27]根据江阴高架桥两个大型钻孔灌注桩试桩的静载荷试验及桩身应力测试结果,分析了黏土层中摩擦型灌注桩的承载力-变形特征,并讨论了桩端承载力和桩侧极限摩阻力的取值问题;池跃君等^[28]通过对大直径超长钻孔灌注桩的静荷载试验研究,分析了影响其极限承载力的因素,同时也揭示了天津地区大直径超长灌注桩的承载力特性及桩的荷载传递特征;朱向荣等^[29]通过静载荷试验和桩身轴力的测试结果,探讨了软土地基中超长钻孔灌注桩的承载力性状和荷载传递机理,得出了均质土中桩侧摩阻力的发挥度沿桩长增加逐渐减小,侧摩阻力的发挥度远大于端阻力发挥度的结论;张伟等^[30]通过分析西安地区旋挖钻孔灌注桩静载试验及桩身应力测试结果,论述了黄土地基中旋挖钻孔灌注桩的荷载传递性状,结果表明,旋挖钻孔灌注桩单桩竖向极限承载力比按规范中的方法计算的结果要高30%左右,单桩极限承载力并非随桩长的增加线性增大;黄强^[31]先后收集了41根桩(桩径为0.8~1.15 m)的静载试验资料,为我国开展对大直径桩试验的系统研究奠定了基础;吕福康等^[32]对武汉地区71根大直径嵌岩桩进行了现场静载试验,试桩直径最大达1.8 m,桩长为15~68 m,最大试桩荷载达18.5 MN,所得资料是非常有价值的;20世纪90年代末,陕西省建筑科学研究院等^[33]单位在陕西信息大厦进行了超长桩的试验研究,试桩直径1.0 m,桩长82.2 m,进行了单桩竖向承载力及桩身荷载传递机理的测试与研究,还做了压浆前后承载性状的对比试验研究,实测荷载传递资料表明,黄土地区的超长桩没有测到桩端阻力,在桩长60~70 m处桩身轴力已经趋于零,说明在这个深度以下的桩侧摩阻力也得不到发挥,在压浆以后,由于提高了浅层土的侧摩阻力,轴力为零的深度明显减小。福建省建筑科学研究院和建筑设计院^[34~36]在20世纪90年代发表了3份试验研究报告:1990年发表了10组实际桩径为0.8 m



左右的钻孔灌注桩的试验结果;1994年发表了5组钻孔灌注桩试桩的试验结果,实际桩径为1.1 m左右;1998年发表了11组人工挖孔桩的试验结果,桩径0.8~1.2 m,扩大头直径1.2~3.0 m,桩长7~15 m,这些试验得到桩侧摩阻力的分布及桩端阻力的比例,为软土地区大直径灌注桩的荷载传递规律研究提供了非常难得的资料,试验结果表明,不论是钻孔灌注桩或人工挖孔桩,不论长桩或短桩,极限摩阻力充分发挥时的桩-土相对位移都在几毫米的范围内,端阻力所占的比例与桩长有关,对30~50 m的钻孔灌注桩,端阻比在10%左右,不超过20%,但达到极限荷载时端阻比可达40%~45%。中国建筑科学研究院^[37]在黄土地区进行了4组大直径扩底钻孔灌注桩的浸水试验,以研究浸水对荷载传递的影响,试桩直径1.0~1.2 m,扩大头直径2.2~2.5 m,桩长32~40 m,试验结果表明,浸水前加荷至设计荷载的1.2倍时,端阻力仅占6%左右;浸水后桩身上部正摩阻力逐渐消失,荷载向下部传递,停水后桩身上部出现负摩阻力,下部正摩阻力和端阻力逐渐增大,端阻比为36%~51%,之后继续加荷,负摩阻力逐渐减小直至消失,恢复正摩阻力,端阻比降至30%~40%;试验还表明浸水主要引起桩的附加沉降,对单桩承载力的影响不大;在荆江长江公路大桥工程中,采用“2锚1”锚桩法,并用上梁加固后作为反力梁,对工程桩进行静载试验,降低了试桩费用和难度,成功加载到33 MN^[21]。除常规静载试验外,近年来,借助桩基动测和CT技术综合检测桩身质量和桩的完整性方面取得了长足的进展。东南大学和清华大学对自平衡静载试验方法已开展了研究和应用。例如,在润扬长江公路大桥南汉桥南塔桩基设计中,曾对直径为2.8 m、桩长为58.5 m的基桩进行了自平衡静载试验,试桩荷载达120 MN,这是常规静载试验方法无法进行的^[22],试验为该项工程中22根同直径桩的设计提供了非常可靠的依据。

1.2.2 桩基沉降计算分析方法研究现状

桩基沉降主要包括桩身在轴向压力作用下的压缩变形和桩端随土体压缩而产生的沉降变形两部分,计算方法一般有弹性理论法、荷载传递法、剪切位移法和数值方法。前三种分析方法从单桩的分析理论开始,对群桩的分析主要是在单桩的基础上进行叠加来实现的,当前工程中对群桩的分析主要基于数值计算方法。

(1) 弹性理论法

弹性理论法是对桩土系统用弹性理论方法来研究单桩在竖向荷载作用下桩土之间作用力与位移之间的关系,进而得到桩对桩、桩对土、土对桩以及土对土的共同作用模式。它的研究基础是Mindlin课题,Mindlin给出了在均匀各向同性的弹性半空间内任一点作用竖向荷载,在弹性半空间体内任意位置引起应力和弹性位



移积分形式的解析解。弹性理论是以 Poulos 为代表的, Poulos 和 Davis 等^[4-5, 38]从弹性理论中的 Mindlin 公式出发, 系统导出了单桩和群桩的计算理论及相应的计算表格。到目前为止, 已有很多种分析方法, 区别主要是各单元桩侧剪应力沿桩身的简化分布模式的不同。

弹性理论法是基于 Mindlin 课题的, 因此其存在基本假定:

- 1) 桩为线弹性体, 桩周土为理想均质的、连续的、各向同性的弹性半空间体, 土的弹性模量 E_s 及泊松比 μ_s 不因桩的存在而发生变化。
- 2) 假设桩与桩侧土之间位移协调, 桩土之间没有相对位移, 桩身某点的位移即为相邻土体的位移。
- 3) 假设沉桩结束后桩内不存在残余应力。
- 4) 假定桩的存在不影响 Mindlin 解, 并将桩身划分为若干桩段单元, 每段以荷载代替。

运用 Mindlin 公式推导出土的柔度矩阵, 求解满足桩土边界位移协调的平衡方程式, 即可得到桩轴向位移和侧摩阻力等。由于土体模拟为连续介质, 所以在一定程度上可以考虑桩与桩之间的相互作用。此外, Poulos 法也可以考虑桩-土之间相对滑移的影响。为了把均质土中已有的分析公式应用于非均质土的情况, Poulos 近似地假定土体内的应力与原均质土体中分布情况相同, 而计算土体位移时所用到的土的模量与该点的位置有关。对桩尖以上有若干土层的情况, Poulos 建议也可取加权平均模量来代替。对于有限厚度土体及端承桩情况, Poulos 通过采用近似位移影响系数及“镜像法”进行了计算。桩土共同作用分析的难度在于如何确定桩侧摩阻力与桩端阻力的大小和分布形式。Geddes^[39]从 Mindlin 的应力基本解出发, 假定桩端阻力为均布, 桩侧摩阻力为梯形分布, 给出了在半空间内任一点处的应力表达式, 根据应力解再求得沉降表达式, 沉降计算方法与分层总和法基本相同。

在国内, 黄绍铭等^[40-41]应用 Geddes 解, 考虑桩与桩周接触土体沉降相等, 确定桩侧摩阻力分布, 并考虑群桩应力叠加求得地基中竖向附加应力后, 再用分层总和法求得桩的沉降; 费勤发等^[42]运用弹性半空间无限体的 Mindlin 解答和浅基础中的分层总和法, 假定桩周摩阻力呈线性分布, 较详细地分析了桩端持力层加筋作用的特性; 杨敏等^[43]针对运用 Geddes 应力系数公式求解单桩沉降过程中的经验性问题进行了分析, 提出了“基点”的概念, 用“基点”取代桩端点, 对现有分配系数的求解方法进行了改进, 有效避免了桩端处应力无穷大带来的近似处理误差; 何德彦等(1999)对桩侧阻力及桩端阻力实际作用位置进行了分析, 就 Mindlin 法计算桩基沉降中的一些参数取值进行了探讨, 使得计算结果与实际试桩结果更为接近; 黄



挺(1997)从桩侧摩阻力的发挥入手,考虑桩土间的相对滑移,应用弹性理论法中的 Mindlin 课题的 Geddes 积分解计算土体中的应力分布,考虑地基土为弹性和非线性弹性,采用 Duncan-Chang 非线性模型,对桩-土-承台的共同作用性状进行了分析。

群桩基础的沉降计算是在单桩分析的基础上,运用弹性理论叠加原理,把介质中两根桩的分析结果,通过引入一个“共同作用系数”而推广到群桩中去。楼晓明^[44]根据 Mindlin 应力解答,提出了用迭代法分析带垫层刚性桩复合地基荷载传递特性计算方法,可用于计算地基中任意一点的竖向附加应力和变形,对桩土应力比随垫层厚度、垫层模量、桩间距和桩间土模量等因素的变化规律也进行了研究;刘金砺等^[45]对弹性理论法中的相互影响系数和沉降比的理论值提出了修正方案;汤永净等^[46]以弹性理论法为基础,计算地下连续墙和中间支承桩的沉降。

综上所述,弹性理论方法能考虑土的连续性,在一定程度上能考虑桩与桩的相互作用。缺点是应用 Mindlin 公式时忽视桩的存在,认为荷载作用于未加桩时的理想均质、各向同性弹性半空间体内;群桩计算中采用“共同作用系数”只能考虑两根桩的存在,不能得到桩荷载和位移沿桩长的传递规律;在考虑土非均质时,假设土体应力-应变关系为线弹性,难以分析桩、土的非线性受力特征。

(2) 荷载传递法

荷载传递法是由 Seed & Reese^[47]首先提出的,基本思想是把桩视为由许多弹性单元组成的,单元与土体之间用非线性弹簧联系,非线性弹簧表示侧摩阻力与剪切位移之间的关系,称为荷载传递函数。但无法考虑桩体单元之间的相互作用,即认为桩体中任一点的位移仅与该点侧摩阻力有关,而与同根桩上其他点的侧摩阻力等无关。荷载传递法能够很好地模拟桩侧的荷载传递,概念明确,计算简单,实用性强。但也有不足之处:利用桩身某点的荷载传递函数时,没有考虑桩身各单元间的相互影响,只是考虑了该点剪应力的影响;而且没有考虑土体连续性,导致无法考虑桩侧、桩端土的压缩,所以荷载传递法不适合于分析群桩的荷载-沉降特性。

传递函数是否合理直接决定了计算分析的正确性。传递函数通常根据经验公式或试验方法选取,国内外学者从不同角度提出了不同的传递函数,有双曲线、抛物线、折线等多种形式。常用的具代表性的传递函数模型有:Kezdi 的指数曲线模型、佐滕悟^[48](1965)的线弹性全塑性模型、Gardner 的双曲线模型和 Kraft(1981)提出的理想荷载传递曲线等。Rojas^[49]将桩身与桩周介质间模拟的弹簧特性由最初的简单线弹性单元,扩展到弹-黏性单元、塑-黏性单元三部分串联工作的模式;Coyle 和 Reese 等^[50]提出了位移协调法计算竖向受荷桩,位移协调法得到的传递函数一般比较复杂,要从其他途径获得,如根据平衡条件和位移协调原则,经反复