



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

扩底楔形桩技术开发与 承载特性

孔纲强 著



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

扩底楔形桩技术开发与承载特性

孔纲强 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书综合常规楔形桩和扩底桩的技术优点,自主研发了一种新型纵向异形截面桩基技术;该技术不仅可以提高桩基竖向抗压承载力,而且可以减少负摩阻力对基桩的影响。本书是一部反映著者近年来对扩底楔形桩的研究成果的专著,简要介绍了其技术开发过程,基于模型试验、数值模拟及理论分析等方法,对扩底楔形桩的抗压承载力、抗拔承载力、水平向承载力、负摩阻力特性以及沉桩挤土效应等问题进行了系统介绍。

本书可供土木、水利、交通、能源等部门的勘察、设计、施工及科研人员和高等院校有关专业教师和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

扩底楔形桩技术开发与承载特性 / 孔纲强著. —北京:科学出版社, 2016. 6

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-048849-7

I. ①扩… II. ①孔… III. ①桩基础—研究 IV. ①TU473

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 134165 号

责任编辑:杨向萍 张晓娟 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:左 讯

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>

北京数图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2016 年 6 月第一次印刷 印张:11 3/4

字数:232 000

定价:75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

傅伯杰 付小兵 郭坤宇 胡 滨

贾国柱 刘 伟 卢秉恒 毛大立

权良柱 任南琪 万国华 王光谦

吴硕贤 杨宝峰 印遇龙 喻树迅

张文栋 赵 路 赵晓哲 钟登华

周宪梁

《博士后文库》序言

博士后制度已有一百多年的历史。世界上普遍认为,博士后研究经历不仅是博士们在取得博士学位后找到理想工作前的过渡阶段,而且也被看成是未来科学家职业生涯中必要的准备阶段。中国的博士后制度虽然起步晚,但已形成独具特色和相对独立、完善的人才培养和使用机制,成为造就高水平人才的重要途径,它已经并将继续为推进中国的科技教育事业和经济发展发挥越来越重要的作用。

中国博士后制度实施之初,国家就设立了博士后科学基金,专门资助博士后研究人员开展创新探索。与其他基金主要资助“项目”不同,博士后科学基金的资助目标是“人”,也就是通过评价博士后研究人员的创新能力给予基金资助。博士后科学基金针对博士后研究人员处于科研创新“黄金时期”的成长特点,通过竞争申请、独立使用基金,使博士后研究人员树立科研自信心,塑造独立科研人格。经过30年的发展,截至2015年底,博士后科学基金资助总额约26.5亿元人民币,资助博士后研究人员5万3千余人,约占博士后招收人数的1/3。截至2014年底,在我国具有博士后经历的院士中,博士后科学基金资助获得者占72.5%。博士后科学基金已成为激发博士后研究人员成才的一颗“金种子”。

在博士后科学基金的资助下,博士后研究人员取得了众多前沿的科研成果。将这些科研成果出版成书,既是对博士后研究人员创新能力的肯定,也可以激发在站博士后研究人员开展创新研究的热情,同时也可以使博士后科研成果在更广范围内传播,更好地为社会所利用,进一步提高博士后科学基金的资助效益。

中国博士后科学基金会从2013年起实施博士后优秀学术专著出版资助工作。经专家评审,评选出博士后优秀学术著作,中国博士后科学基金会资助出版费用。专著由科学出版社出版,统一命名为《博士后文库》。

资助出版工作是中国博士后科学基金会“十二五”期间进行基金资助改革的一项重要举措,虽然刚刚起步,但是我们对它寄予厚望。希望通过这项工作,使博士

后研究人员的创新成果能够更好地服务于国家创新驱动发展战略,服务于创新型国家的建设,也希望更多的博士后研究人员借助这颗“金种子”迅速成长为国家需要的创新型、复合型、战略型人才。

A handwritten signature in black ink, consisting of three stylized Chinese characters: 陈彦彦.

中国博士后科学基金会理事长

序 1

桩基承载力是由桩侧摩阻力和桩端阻力两部分组成,增加桩长或者增大桩径可以提高桩基承载力,但是同时也会增大施工难度和建筑材料使用量,因而并非最经济有效的选择。通过改变常规桩基的横截面或者纵截面的形状可以得到截面异形桩,最大限度地发挥地基土(岩)和桩本身的潜在能力。目前 PCC 桩、X 形桩等横截面异形桩,扩底桩、挤扩支盘桩等纵截面异形桩在工程界得到了广泛的认可和应用,并取得了可观的经济效益。

扩底楔形桩是由著者等开发的一种具有独立自主知识产权的新型纵截面异形桩技术;该桩型兼顾考虑了楔形桩(楔形角提高桩侧摩阻力)和扩底桩(扩大头提高桩端阻力)的技术优点,而且基桩承载力学机理清晰、施工工艺成熟。相关研究结果表明,扩底楔形桩可以有效提高单位材料利用率,等混凝土材料用量情况下,其承载力特性较等截面桩有明显的提高;具有良好的推广应用价值。

作者是我国近年来在岩土工程研究领域取得良好成绩的青年学者,一直专注于地基加固新技术、基于透明土材料的可视化模型试验技术等方面的研究。主持 3 项国家自然科学基金项目,发表学术论文 80 多篇,获得了 3 项国际 PCT 专利、40 项国家发明专利以及 11 项软件著作权登记,相关研究成果曾获得省部级科技进步奖一等奖 1 项、二等奖 1 项。

该书汇集了著者等近年来关于扩底楔形桩技术方面的开发、试验、数值模拟和理论研究成果,这对于促进该项新技术的在工程实践中的应用发展和本学科领域进步将起到积极的作用。

该书作者孔纲强博士,系本人合作指导的博士后、也是本人所领衔的长江学者创新团队核心成员之一,靠得住、能干事、善合作。



教育部长江学者特聘教授
国家杰出青年基金获得者
国务院学科评议组成员

序 2

近几十年来,随着国家基础设施建设的大量投入,我国的公路、铁路以及市政道路等交通建设事业得到了前所未有的发展。高速公路、高速铁路等基础设施的工程等级也越来越高,公路、铁路、道路设计与施工中遇到的特殊地形、土性、地质和自然气候条件越来越多,越来越复杂(如京沪高速铁路穿越大量的软土地基区域),因此对道路工程质量和运营要求提出了近乎苛刻的要求。对岩土工程在特殊环境条件下的工程病害和问题,必须采取特殊的工程技术措施,甚至新材料、新工艺、新结构,才能满足土木工程质量要求和运营要求,这给岩土工程设计、施工、教学和科研等都提出了新的研究课题。

作者结合综合考虑楔形桩和扩底桩的技术优点,发明的一种新型扩底楔形桩技术;相关成果获得了授权国家发明专利 4 项,发表了近 20 篇学术论文,部分研究成果还获得了省部级奖励。相关研究表明,与常规等截面桩相比,扩底楔形桩可以有效提高竖向抗压承载力、水平向承载力,同时,减少桩侧负摩阻力对基桩承载力的影响。

该书著者孔纲强系本人指导毕业的博士生,科研严谨、工作踏实、勤奋努力,在桩-土相互作用及地基加固新技术方面取得了很好的成绩。因此,我乐为此序。



大连理工大学 建设工程学部

前 言

桩基础工程由于其施工速度快、加固深度大、适宜多种地质条件、可显著提高地基承载力和减小变形,被广泛应用于建筑、交通、输变电电塔以及海洋基础等工程实践中。增加桩径或桩长可以提高桩基整体承载特性,但是一味地靠增加材料以提高承载力的做法既不经济又增大施工难度;因此,寻求单位材料利用率高,实现高承载力、低造价,且地基的稳定性可以明显增加的新型桩基,成为岩土工程界广泛关注的热点和难点问题之一。

目前岩土工程界常用的方法主要有:通过改变桩基横截面形式来提高桩侧比表面积,从而提高桩侧摩阻力的横截面异形桩(如壁板桩、PCC桩、X形桩、Y形桩以及H形桩等);通过改变桩基纵向截面形式来提高桩侧摩阻力或桩端阻力的纵向截面异形桩(如扩底桩、楔形桩、钉形桩以及挤扩支盘桩等)。部分桩型在工程界得到了广泛应用并取得了良好的社会效益。此外,桩基后注浆技术也可以有效提高桩侧摩阻力和桩端阻力。

近年来,作者及其团队成员在桩基工程技术创新方面做了一些尝试和开拓,授权了3项国际发明专利、30多项国家发明专利。在技术创新过程中发现工程科学问题,在实践中总结理论,并用新的理论指导实践。扩底楔形桩是作者结合预应力管桩和桩端后注浆的技术优点,联合考虑楔形桩和扩底桩的受力机理而发明的一种新型桩基技术(相关施工工艺获授权国家发明专利4项,相关承载力计算方法获软件著作权登记2项)。与常规桩型相比,扩底楔形桩可以有效提高竖向抗压及水平向承载力,减少桩侧负摩阻力对基桩承载力的影响。为了进一步推广该技术,迫切需要有一本对该技术原理及承载力计算方法进行系统总结的专著。

全书共8章,第1章绪论;第2章扩底楔形桩的技术开发;第3章竖向抗压承载特性;第4章竖向抗拔承载特性;第5章水平向承载特性;第6章地面堆载作用下负摩阻力特性;第7章沉桩挤土效应特性;第8章结论与展望。

感谢周航博士、曹兆虎博士、顾红伟硕士、彭怀风博士以及周立朵硕士等的合作和辛勤工作;刘汉龙教授和杨庆教授认真审阅并给本书写序,作者在此表示衷心

感谢。本书研究成果获得高等学校学科创新引智计划(B13024)、教育部长江学者创新团队(IRT-15R17)和国家自然科学基金(51278170、51478165)资助,并得到中国博士后基金《博士后文库》资助出版,在此表示感谢。

限于作者水平,有些问题研究尚浅,本书存在某些不足在所难免,诚恳希望专家、读者批评指正,并敬请将宝贵意见及时反馈给作者,以便作者更正和继续研究。

孔纲强

2016年1月于南京

目 录

《博士后文库》序言

序 1

序 2

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 异形桩国内外研究现状	1
1.2.1 横截面异形桩研究现状	3
1.2.2 纵截面异形桩研究现状	8
1.3 扩底楔形桩主要关键技术问题	10
1.4 本书的主要研究内容及技术路线	12
第 2 章 扩底楔形桩的技术开发	14
2.1 开发思路	14
2.2 设计方法	14
2.3 施工工艺	15
2.3.1 人工挖孔及夯扩扩底楔形桩施工工艺	15
2.3.2 高聚物注浆扩底楔形桩施工工艺	16
2.4 质量检测与效果评价	18
2.4.1 扩大头钻芯取样检测	18
2.4.2 低应变反射波法检测	18
2.4.3 静载荷试验	19
2.5 应用范围	19
第 3 章 竖向抗压承载特性	20
3.1 引言	20
3.2 大比尺模型试验	20
3.2.1 模型试验概述	20
3.2.2 试验结果与分析	24
3.3 小比尺透明土模型试验	26

3.3.1	模型试验概述	26
3.3.2	试验结果与分析	29
3.4	数值模拟分析	33
3.4.1	数值模型建立	33
3.4.2	数值模型的验证与分析	35
3.4.3	数值模拟结果与分析	36
3.5	理论分析计算	42
3.5.1	理论模型建立	42
3.5.2	理论模型的验证与分析	47
3.5.3	理论计算结果与分析	48
3.6	本章小结	50
第4章	竖向抗拔承载特性	52
4.1	引言	52
4.2	大比尺模型试验	52
4.2.1	模型试验概述	52
4.2.2	试验结果与分析	53
4.3	拔桩过程小比尺透明土模型试验	54
4.3.1	模型试验概述	54
4.3.2	试验结果与分析	55
4.4	数值模拟分析	58
4.4.1	数值模型建立	58
4.4.2	数值模型的验证与分析	59
4.4.3	数值模拟结果与分析	61
4.5	理论分析计算	66
4.5.1	理论模型建立	66
4.5.2	理论模型的验证与分析	70
4.5.3	理论计算结果与分析	71
4.6	本章小结	73
第5章	水平向承载特性	74
5.1	引言	74
5.2	大比尺模型试验	74
5.2.1	模型试验概述	74
5.2.2	试验结果与分析	76

5.3 小比尺透明土模型试验	78
5.3.1 模型试验概述	78
5.3.2 试验结果与分析	79
5.4 数值模拟分析	84
5.4.1 数值模型建立	84
5.4.2 数值模型的验证与分析	84
5.4.3 数值模拟结果与分析	85
5.5 理论分析计算	88
5.5.1 弹性理论模型建立	88
5.5.2 弹塑性理论模型建立	92
5.5.3 理论模型的验证与分析	96
5.5.4 理论计算结果与分析	96
5.6 本章小结	100
第6章 地面堆载作用下负摩阻力特性	102
6.1 引言	102
6.2 大比尺模型试验	102
6.2.1 模型试验概述	102
6.2.2 试验结果与分析	103
6.3 中性点位置确定小比尺透明土模型试验	106
6.3.1 模型试验概述	106
6.3.2 试验结果与分析	106
6.4 数值模拟分析	111
6.4.1 数值模型建立	111
6.4.2 数值模型的验证与分析	111
6.4.3 数值模拟结果与分析	112
6.5 理论分析计算	115
6.5.1 理论模型建立	115
6.5.2 理论模型的验证与分析	120
6.5.3 理论计算结果与分析	121
6.6 本章小结	124
第7章 沉桩挤土效应特性	125
7.1 引言	125
7.2 小比尺透明土模型试验	125

7.2.1 模型试验概述	125
7.2.2 模型试验验证	126
7.2.3 试验结果与分析	127
7.3 数值模拟分析	129
7.3.1 数值模型建立	129
7.3.2 数值模型的验证与分析	131
7.3.3 数值模拟结果与分析	133
7.4 理论分析计算	141
7.4.1 理论模型建立	141
7.4.2 理论模型的验证与分析	150
7.4.3 理论计算结果与分析	151
7.5 本章小结	154
第8章 结论与展望	156
8.1 结论	156
8.2 展望	158
参考文献	159
编后记	168

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

国家基础设施工程建设中的房屋建筑、市政道路及高速公路/铁路、港口以及机场等构筑物不得不面对软弱土地基问题。通常情况下,软弱土整体工程特性差,天然地基本身无法满足地基承载力和沉降控制要求,若不进行有效治理,往往会造成地基侧向变形过大、整体或局部失稳等工程问题。按照构造形式来分,基础类型可分为桩基础、满堂基础、独立基础和条形基础等几种类型;且有其各自的传力机理、适用范围、局限性和优缺点^[1, 2]。

桩基础由于施工速度快、加固深度大、适宜多种地质条件、可显著提高地基承载力和减小沉降等技术特点,而被广泛应用于建筑、交通、输变电电塔以及海洋基础等工程中。桩基承载力由桩侧摩阻力和桩端阻力两部分组成;桩基的作用是将原本直接作用在地基浅层土体上的上部荷载传递给地基深层土体上,或分担到周围土体中。桩基在工程中,可能受到下压荷载、上浮荷载、水平向荷载、负摩阻力以及各种荷载的组合形式等情况^[3]。如何提高单位材料利用率,既经济合理又技术可行地解决地基承载力和沉降问题,成为广大工程技术人员需要面临的最主要难点问题之一。因此,分析桩基的受力机理,改进桩基截面形式,研发新型截面异形桩基技术,成为近些年广大工程技术人员关注的热点问题之一。

1.2 异形桩国内外研究现状

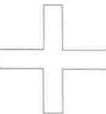
单桩竖向承载力是由桩侧摩阻力和桩端阻力两部分组成,增加桩长或增大

桩径可以提高桩侧摩阻力,但是单一地改变桩长或者桩径,会大大增加桩体材料用量和施工难度,因而并非最经济的选择。通过改变常规桩基的横截面或纵截面形状可以得到截面异形桩,根据桩型的特殊性,在某些特定的受力环境下,可以考虑截面形式“异形”来发挥并提高桩体或地基土本身的承载潜能^[4]。各类异形桩在国内外工程中得到了广泛的认可和应用,并取得了可观的经济效益。

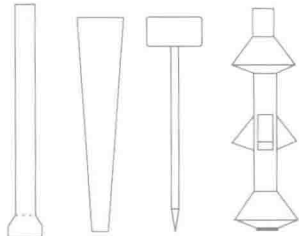
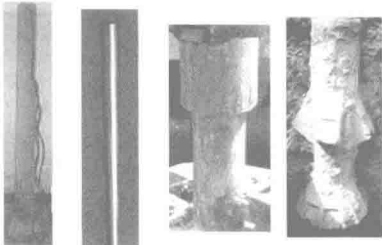
异形截面可分为横截面异形和纵截面异形两大类。改变桩身横截面的形状,可以提高单位桩身材料的侧表面积,进而提高桩侧摩阻力。常见横截面异形桩有壁板桩、十字形桩、PCC桩、T形桩、工字形桩、X形桩以及Y形桩等,其截面形式示意图和实物图如表1.1所示。改变桩身纵向截面的形状,可以增加桩-土接触面的形式以提高桩侧摩阻力,也可以增大桩端结构形式以提高桩端阻力;常见纵截面异形桩有扩底桩、楔形桩、钉形桩、挤扩支盘桩以及DX桩等,其截面形式示意图和实物图如表1.1所示。

此外,可以利用异形桩横截面形式的非轴对称性,布置桩抵抗弯曲能力最大的方向与横向荷载的方向一致,从而最大限度地发挥桩身材料的潜力,节约成本。目前对于异形桩承载性能的研究主要集中在单一形式上,如单一的横截面异形桩或是单一的纵截面异形桩,而对于横、纵截面异形组合形式的非常规异形桩研究相对较少。

表 1.1 常用异形桩截面形式示意图列表

类别	桩型	示意图	实物图
横截面异形	壁板桩		
	板桩		
	X形桩		
	PCC桩		
	十字形桩		
	Y形桩		

续表

类别	桩型	示意图	实物图
纵截面异形	扩底桩		
	楔形桩		
	钉形桩		
	挤扩支盘桩		

1.2.1 横截面异形桩研究现状

通过改变桩身横截面的几何特性,可以增加桩侧比表面积和桩基定向惯性矩,从而达到增大桩侧摩阻力与水平承载力的“异形”力学效果;与常规等截面桩相比,横截面异形桩具有更大的桩侧比表面积(表面积与质量比),即增加了桩-土接触面积,从而可以发挥更大的桩侧摩阻力,充分发挥单位混凝土材料的承载效率。

近年来,横截面异形桩技术及其应用得到了快速发展,目前常见的横截面异形桩主要有:壁板桩、PCC桩、X形桩、Y形桩、H形桩、T形桩、十字形桩、工字形桩、L形桩以及I形桩等。

1. 壁板桩技术及其研究现状

壁板桩是利用地下连续墙施工设备开挖成槽,然后灌注混凝土而形成类似矩形的现场灌注桩。壁板桩概念是由法国 Soletache 公司于 1963 年最早提出^[5]。针对壁板桩的承载特性,相关研究人员开展了大量的现场试验、数值模拟和理论分析研究,并取得了一系列研究成果。Ng 等^[6]和雷国辉等^[7~9]主要介绍了壁板桩在高层建筑物地基中的运用;通过开展现场试验,分析其承载性能特点,并与常规等截面桩的承载性能进行对比研究;针对壁板桩群桩的荷载沉降关系,采用变分分析方法,将分析结果与计算结果进行了对比验证,初步分析了群桩的布置方式和桩间距对壁板桩群桩效应和承载能力的影响。近几十