

Study and application on Bearing Mechanism of
Squeezed Branch pile

挤扩支盘桩承载机理与 应用研究

陈 飞 著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

Study and application on Bearing Mechanism of
Squeezed Branch pile

挤扩支盘桩承载机理与 应用研究

陈 飞 著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

挤扩支盘桩承载机理与应用研究/陈飞著. —长沙:
中南大学出版社, 2017.3

ISBN 978 - 7 - 5487 - 2746 - 0

I. 挤... II. 陈... III. 灌注桩 - 桩基础 - 研究 IV. TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 056805 号

挤扩支盘桩承载机理与应用研究

JIKUO ZHIPANZHUANG CHENGZAI JILI YU YINGYONG YANJIU

陈 飞 著

☐责任编辑 刘颖维

☐责任印制 易红卫

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙理工大印刷厂

☐开 本 720 × 1000 1/16 ☐印张 10.25 ☐字数 208 千字

☐版 次 2017 年 3 月第 1 版 ☐2017 年 3 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 2746 - 0

☐定 价 68.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内容简介

Introduction

挤扩支盘桩是一种变截面桩，借助专用挤扩设备使桩的几处截面直径扩大，增加桩-土接触面积，从而提高桩的承载力。挤扩支盘桩是对普通钻孔灌注桩的优化，其桩-土接触面积增大数倍，多支点端阻力也增加数倍，还具有对各类土层适应性好、工期短、经济效益显著、无环境污染等优势。

本书介绍挤扩支盘桩承载机理与应用研究，主要内容包括：挤扩支盘桩的荷载传递特性、桩侧摩阻力及桩端阻力特性的试验研究过程；挤扩支盘桩的成桩理论及破坏机理分析；适应支盘桩特点的荷载传递函数和极限承载力计算公式的建立；挤扩支盘桩的工程运用与经济效益分析。

本书可供岩土工程设计、施工、监测人员使用，也可供科研院所相关专业人员和相关专业大学师生学习参考。

前言

Foreword

随着国民经济的高速发展和岩土工程技术的不断进步,桩基的设计、施工技术也不断提高,桩基在房屋建筑工程、地下工程、桥梁工程、铁路工程等领域中的应用也越来越广泛,目前常用桩型包括钻孔灌注桩、扩底桩、静压管桩、人工挖孔桩、挤扩支盘桩等,其中钻孔灌注桩由于具有施工简单、适应各种地层等优点而成为各种基础工程中广泛应用的桩型之一。由于钻孔灌注桩桩周泥皮等因素将影响桩侧阻力的充分发挥,而在高层建筑广泛兴起、场地工程地质条件日趋复杂的背景条件下,市场对工程质量、建设速度和工程造价的要求越来越高,使桩基技术面临着新的挑战,挤扩支盘桩就是在这种情况下开发的一种全新桩型。

挤扩支盘桩是一种变截面桩。借助专用挤扩设备使桩的几处截面直径扩大,增加桩-土接触面积,从而提高桩的承载力。挤扩支盘桩是对普通钻孔灌注桩的优化,它不仅使桩-土接触面积增大数倍,多支点端阻力也随之增加数倍,而且还具有各类土层适应性好、工期短、无环境污染等优势,与普通钻孔灌注桩的对比表明,挤扩支盘桩经济效益和社会效益显著。

本书通过运用力学、数学、工程地质学、模拟实验学等理论与方法,结合工程实践,应用球形扩张理论和圆柱扩张理论,借助大量室内土工试验和挤扩桩承载特征的微观分析,进一步揭示了挤扩桩的成桩机理;通过支盘模型荷载破坏试验深入研究支盘应力的分布规律,明确了支盘高径比与支盘受荷破坏的关系,提出了挤压支盘的承载力计算公式,探讨了支盘的强度理论;通过大比例模型桩试验和现场抗压桩原位试验研究挤扩支盘桩桩身轴力、桩侧摩阻力、桩端阻力、支盘阻力的传递规律,定量分析了

支盘阻力的组成及属性,研究了支盘桩的荷载传递函数、抗压极限承载力公式,为确定支盘桩最佳盘距、桩间距等参数提供了依据;提出了适用于挤扩支盘抗压桩单桩 $Q-S$ 曲线和桩身轴力拟合的荷载传递法;用有限元方法分析了竖向荷载作用下桩周土层黏聚力、内摩擦角、桩土接触面摩擦系数、桩侧土层分布等因素对支盘桩的承载力、桩侧摩阻力分布、桩端土中应力分布规律,以及挤扩支盘桩在竖向荷载作用下的破坏性状。

本书得到了江西理工大学科技处、江西理工大学资源与环境工程学院的大力支持和帮助,在此致以诚挚的感谢!本书在撰写过程中,参考了有关书籍与文献,在此对文献的作者表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不足和错误之处,恳请专家和读者批评指正。

作者单位:江西理工大学资源与环境工程学院地质工程教研室;电子邮箱:180125110@qq.com。

陈 飞

2016年6月26日

目录

Contents

第1章 绪论	(1)
1.1 概述	(1)
1.1.1 挤扩支盘桩的原理	(1)
1.1.2 挤扩支盘桩的研究历程	(2)
1.1.3 挤扩支盘桩的国内外研究现状	(4)
1.1.4 挤扩支盘桩荷载传递理论的研究现状	(7)
1.1.5 挤扩支盘桩的发展趋势	(8)
1.2 挤扩支盘桩施工工艺及主要特点	(8)
1.2.1 挤扩支盘桩的施工工艺	(8)
1.2.2 挤扩支盘桩的主要优点	(11)
1.2.3 挤扩支盘桩的主要缺点及工法待改进的方向	(11)
1.2.4 挤扩支盘桩的适用范围	(13)
1.3 本书的研究内容、研究方法和技术路线	(14)
1.3.1 研究的关键问题和主要内容	(14)
1.3.2 研究方法	(14)
1.3.3 技术路线及研究步骤	(15)
第2章 挤扩支盘桩对桩周土的挤密效应分析与试验研究	(17)
2.1 支盘桩的挤扩作用及挤密效应	(17)
2.1.1 挤密效应	(17)
2.1.2 “拱”效应	(18)
2.2 圆孔扩张理论	(18)
2.2.1 基本方程	(19)

2.2.2	圆孔扩张问题弹性解	(20)
2.2.3	圆孔扩张问题塑性解	(21)
2.3	土工试验	(25)
2.3.1	试验目的	(25)
2.3.2	试验技术路线和试验方案	(25)
2.3.3	试验内容	(26)
2.4	土工试验结果及规律分析	(31)
2.4.1	原状土的物理性能试验	(31)
2.4.2	桩周土的物理、力学性能试验研究	(35)
2.5	本章小结	(41)
第3章	支盘受力与破坏的试验研究	(42)
3.1	支盘桩的破坏模式	(42)
3.1.1	单桩的破坏模式	(42)
3.1.2	支盘桩的破坏模式	(43)
3.2	试验方案	(47)
3.2.1	试验目的	(47)
3.2.2	试验技术路线	(47)
3.2.3	试验内容	(47)
3.3	试验结果与分析	(51)
3.3.1	支盘的破坏形态及承载力分析	(51)
3.3.2	支盘受力及破坏特性的影响因素分析	(60)
3.3.3	支盘的应力分布规律	(64)
3.4	本章小结	(68)
第4章	荷载传递机理的模型桩试验研究	(70)
4.1	模型桩试验方案	(70)
4.1.1	试验目的与技术路线	(70)
4.1.2	模型桩的设计、制作	(70)
4.1.3	工程地质条件与试验方法	(73)
4.2	单桩竖向静载试验与结果	(75)
4.2.1	单桩竖向静载试验	(75)
4.2.2	静载试验结果	(77)
4.3	桩身应力试验与结果	(81)

4.3.1 桩身应力测试基本假定及测试元件的选用和埋设	(81)
4.3.2 桩身轴力测试结果汇总	(83)
4.4 试验结果分析	(87)
4.4.1 荷载传递特征分析	(87)
4.4.2 挤扩支盘桩承载力影响因素分析	(90)
4.4.3 支盘桩承载力计算	(93)
4.5 本章小结	(93)
第5章 挤扩支盘桩原位试验研究	(95)
5.1 试验概况	(95)
5.1.1 工程概况	(95)
5.1.2 场地地质条件	(95)
5.1.3 试桩试验方案	(100)
5.2 静载试验与桩身轴力测试结果	(104)
5.2.1 计算分析的基本假定	(104)
5.2.2 静载试验结果	(104)
5.2.3 桩身轴力测试成果	(111)
5.2.4 试桩低应变动测结果	(111)
5.3 试验结果分析	(113)
5.3.1 $Q-S/\Delta S$ 曲线分析	(113)
5.3.2 桩身轴力分析	(114)
5.3.3 承力盘与桩端端承力的分析	(115)
5.3.4 桩侧摩阻力的分析	(116)
5.4 单桩荷载传递机理分析	(117)
5.4.1 双曲线法的基本原理	(117)
5.4.2 $Q-S$ 曲线的拟合	(118)
5.4.3 轴力图的拟合	(121)
5.5 工程应用与技术经济分析	(122)
5.5.1 工程桩设计与施工情况	(122)
5.5.2 挤扩支盘桩与普通灌注桩技术经济对比分析	(122)
5.6 本章小结	(124)

第6章 挤扩支盘桩的有限元分析	(125)
6.1 求解的力学方法	(125)
6.1.1 有限元法简述	(125)
6.1.2 ABAQUS 简介	(126)
6.2 有限元计算模型	(126)
6.2.1 桩和土的本构模型	(126)
6.2.2 所用单元类型	(128)
6.2.3 基本假定	(130)
6.2.4 计算参数的选定	(130)
6.3 挤扩桩数值模拟成果分析	(131)
6.3.1 位移场分析	(132)
6.3.2 应力场分析	(132)
6.3.3 破坏模式分析	(141)
6.4 本章小结	(141)
第7章 回顾与总结	(142)
主要符号及说明	(146)
参考文献	(147)

第1章 绪论

1.1 概述

1.1.1 挤扩支盘桩的原理

桩基础作为一种支承上部荷载的工具已有七千多年的历史,其形式也从单一型到多功能型、从固定截面型到变截面型不断地发展。随着国民经济的发展,高层建筑日益兴起,桩基工程理论和技术也不断发展,目前常用的桩型主要有钻孔灌注桩、扩底桩、静压管桩、人工挖孔桩、挤扩支盘桩等。

钻孔灌注桩由于具有施工简单、适应各种地层等优点而成为各种基础类型中应用最多的桩型之一。自20世纪90年代以来,我国灌注桩年使用量超过100万根,在大型建筑中基础的费用有时可达土建总造价的25%~35%。由于钻孔灌注桩桩周泥皮等因素会影响桩侧阻力的充分发挥,而在高层建筑广泛兴起、场地工程地质条件日趋复杂的背景条件下,市场对工程质量、建设速度和工程造价的要求越来越苛刻,使桩基技术面临着新的挑战^[1,2]。挤扩支盘桩就是在这种情况下开发的一种全新桩型。

挤扩支盘桩是一种变截面桩,是利用专用的挤扩设备在桩不同的截面处扩大直径,以增加桩与土的接触面积来提高承载力,是对普通钻孔灌注桩的优化。其主桩直径与支盘直径的大小在不同的工程中可分别达400~1000 mm、960~2500 mm,其支盘直径扩大后,与直杆桩相比,不仅桩-土接触面积增大数倍,而且多支点端阻力也增加数倍。挤扩支盘桩的构造如图1-1所示。

挤扩多支盘桩和普通钻孔桩相比,在桩长和主桩径不变的情况下,承载力提高了数倍,节约工程造价达30%以上。

挤扩支盘桩以其高承载力和低造价的特点在桩基工程中显示出了它的优势:无环境污染、竖向承载力成倍提高、工期短、经济效益明显、承载力具有可调性、能适应各类土层的性质、具有抗震及承受动荷载的功能、成桩工艺适用范围较广^[3]。

虽然支盘桩在工程应用中已经证实了它的优越性,但由于支盘桩使用的时间较短,工程实例少、实测资料缺乏,应用范围仅局限于建筑工程,其作为一种新型技术在理论研究上还不够成熟,尚无统一的设计及施工规范。目前,虽然支盘

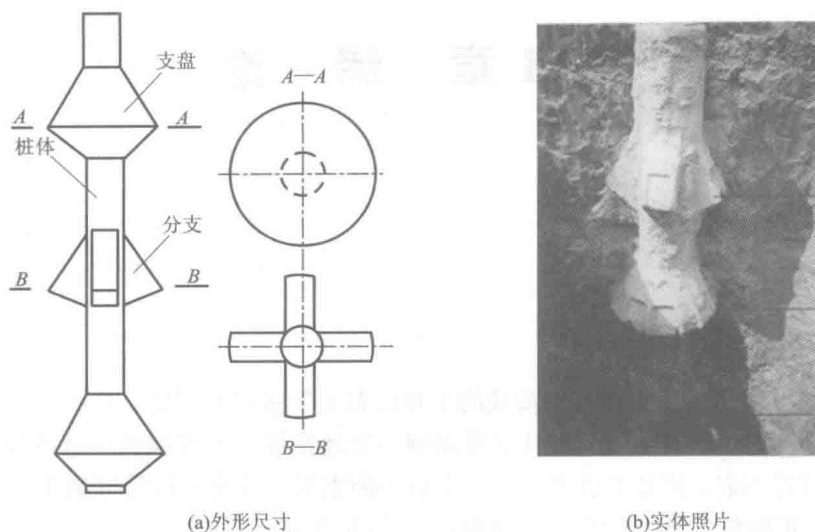


图 1-1 挤扩支盘桩构造图

桩已在十几个省市得到认证和广泛应用,但多数单位是按扩底桩设计的。支盘间距及桩间距任意确定,没有设计依据,只有少数单位制定了施工规程、操作方法及质量评定标准,因而应用范围受到限制,导致普及率或推广应用率不高。因此,对挤扩多支盘桩做进一步研究和完善理论分析是十分必要的。

本书运用力学、数学、工程地质学、模拟实验学等理论与方法,结合工程实践,研究了挤扩支盘桩的荷载传递特性、桩侧摩阻力及桩端阻力特性;研究了挤扩支盘桩的成桩理论及破坏机理;建立了适应支盘桩特点的荷载传递函数和极限承载力计算公式;在试验和理论研究的基础上,为最佳盘间距、桩间距、桩径的设计提供了依据,以指导工程施工。挤扩支盘桩与普通钻孔灌注桩的对比表明,挤扩支盘桩的经济效益和社会效益显著。

1.1.2 挤扩支盘桩的研究历程

早在 20 世纪 60 年代,印度的 Mohan 就提出了多级扩盘桩的概念并在小范围内进行试验和应用研究,且取得了一定的成果,但这一技术也没有得到进一步的推广。

20 世纪 90 年代初期,根据张俊生发明的挤扩支盘桩技术,北京俊华基础工程技术集团研制开发出该公司的第一代锤击式挤扩装置和第二代 YZJ 型挤扩支盘成型机及挤扩多分支承载力盘桩^[4]。1998 年 5 月,北京中阔地基基础技术有限公司研制开发出新型的多功能液压挤扩装置,实现了多级挤扩功能。该技术在北

京、天津、湖北、安徽等地的工程中得到应用,由于支盘桩的单桩承载力是相应直杆桩的两倍左右,因而取得了较显著的经济效益。

在桩型构造上,基于单桩承载力是由桩侧摩阻力和桩端阻力构成的原理,为了提高桩端阻力又不增加桩身横截面积,且能够充分利用地表以下中下部较好的土层,设计时在桩身不同位置处将直径扩大以增加桩-土接触面积而成为多支点摩擦端承桩,以此来提高单桩承载力,这就是新型挤扩支盘桩的创新之处。支盘桩造型新颖,具有先进的施工工艺,1990年在国内取得国家发明专利权以后,又分别在美国、欧洲、日本、加拿大和泰国取得了专利权。可见,支盘桩在国内外都属于一种新桩型。但由于其使用时间较短,研究程度较低,因而在推广和应用方面受到较大的限制。

挤扩支盘桩以其高承载力和低造价的特点在桩基工程中显示出了它的优势。自1992年起,支盘桩开始应用在建筑领域中,近十年来,已在北京、天津、河北、河南、安徽、山东、江苏、黑龙江、湖北、广东、海南等十几个省市的几百项工程中得到了应用。由于支盘桩适用范围广,特别适合于大吨位的建筑物,因此,在选择设计方案时,在考虑了承载力大小、沉降量大小、安全性、工程造价和施工工期等方面的因素后,就会显示出支盘桩的优越性和经济效益。鉴于支盘桩在工程中逐渐被广泛地采用,北京俊华地基基础工程技术集团于1997年向国家科学技术委员会火炬计划办公室申请了挤扩支盘桩的研究项目,并于1998年4月列入了国家级火炬计划重点项目。经专家论证后,认定此项技术达到了“国内领先水平和国际先进水平”。此后,一些省市(如天津市建委、北京市科委、河南省建委、广州市建委等)也相应地批准使用此项新技术,至此,挤扩支盘桩的技术成果才得到了工程界的认可。

支盘桩在使用时,都要进行大量的现场静力载荷试验。1992年北方交通大学(现北京交通大学)完成了“挤扩多分支盘混凝土灌注桩受力机理及承载力性状的试验研究”,并做了18组不同盘距、不同盘数支盘桩的数据测定,总结出不同盘距和盘数对承载力的影响并导出了承载力的计算公式,为挤扩支盘桩技术的应用提供了重要的理论依据。此后,天津大学和北京俊华基础工程技术开发公司合作,于1995年在顾晓鲁教授的指导下,在天津沿海软土地区进行挤扩支盘桩的荷载传递性状的试验研究,为挤扩支盘桩的设计提供了重要的理论依据。除此之外,中国科学院武汉岩土力学研究所曾受武汉劳业综合开发股份有限公司的委托,对挤扩支盘桩做过三组静力载荷试验,基本上了解了荷载沿深度变化的规律,并获取了支盘桩的动测检验结果。随着支盘桩在工程中被广泛采用,建设部和电力规划设计总院批准了推广应用支盘桩的技术,并在《建筑施工手册》和《地基基础施工手册》中介绍了挤扩支盘桩的特点及施工方法等。

1.1.3 挤扩支盘桩的国内外研究现状

大量工程实践表明,挤扩支盘灌注桩最显著的特点就是提高了桩的承载力。根据现场载荷试验对比结果来看,承载力提高的幅度因地质条件的不同而差异较大,一般为10%~70%。由于在桩周下部较好的土层中设立了承力盘,将荷载通过支盘传递到相对较硬的土层上去,即分层承受荷载^[5-8],同时承力盘的盘径较大,仅单个盘的受力面积就增加数倍之多,因此使端阻大幅度提高。其次,挤扩成型过程对盘腔周围的土体施以静压,使土体得到了压密,提高了土体内摩擦角和压缩模量,其物理、力学性能优于原状土。在承力时,由于支盘周边土体预先受到压密,类似于“预应力”作用,减少了土体承载后的压缩量,使土体的竖向承载力及抗拔力都成倍地提高^[9-13]。再次,在荷载传递上,由于承力盘承担主要的荷载,使端阻力减小,因而桩的总沉降量减小,而且由于承力盘或分支的设置也增加了桩的整体刚度。

1) 抗压特性研究

挤扩支盘桩自问世以来,主要应用于工业与民用建筑的抗压桩基础,目前对支盘桩的性能研究也主要集中在抗压承载力方面。

史鸿林通过17组试桩的原型荷载试验,对新型挤压分支桩的承载能力进行了计算分析和研究。结果表明,在相同土层条件下,支盘桩与相同桩径、桩长的普通混凝土灌注桩相比,混凝土用量增加10%~20%,承载力则可增加60%~100%。与相同单桩承载力的挤扩支盘桩与普通钻孔灌注桩相比,可节约原材料30%~50%,缩短工期30%左右,降低工程造价30%左右。

杨锦东^[14]通过对挤扩支盘混凝土灌注桩的现场试验,根据埋设压力盒和布置应变片的实测记录,分析讨论了新桩型荷载沿桩身的传递规律。

吴兴龙^[15]在挤扩支盘桩现场测试、有限元计算和理论分析的基础上,提出了挤扩多支盘桩的单桩极限承载力经验公式。认为挤扩支盘桩的承载力由桩端阻力、桩侧阻力及承力支盘的端阻力组成。同时承力支盘数量、支盘间距、成桩工艺及桩的尺寸效应等因素都直接影响到挤扩多支盘桩的极限承载力。

魏路先通过工程实例介绍了挤扩支盘灌注桩的设计、施工与检测,指出该种桩具有良好的抗压性能。

钱德玲的研究结果表明,影响挤扩支盘桩承载力的主要因素包括主桩直径、承力扩大盘的高度、间距、位置及数量等。通过对大量实际工程数据结果的统计分析,并结合混凝土灌注桩基础规范的有关规定,提出了支盘桩主桩身和承力盘直径的取值方法、支盘桩承力盘的竖向间距取值范围和群桩基础中基桩的横向合理间距^[16]。

苑辉通过现场试验及计算,对挤扩多支盘桩的承载能力、设置效应进行了计

算分析与研究^[17]。

彭建宇从建筑工程应用实际出发,利用原位剖面观测和试验的方法,分析了液压挤扩支盘桩的成型过程对周围介质土的影响规律,探讨了液压挤扩支盘桩的承载特征。结果表明,支盘桩成盘过程对周围介质具有挤密压实作用,将地基土加固处理,增大了地基强度^[18]。

钱永梅对影响挤扩支盘桩土体极限承载力的因素进行研究,结果表明,支盘桩承力盘的位置、承力盘的形式、承力盘的间距等是影响桩周土体承载力的主要因素。

高笑娟、李薇薇通过对支盘桩的现场静载荷试验,研究了支盘桩的荷载传递规律,指出承力盘位置与土层的性质密切相关,并对桩承载力进行了研究^[26]。

2) 抗拔特性研究

抗拔桩是一种广泛应用的基础形式,如高压输电线塔的基础、烟囱等高耸结构物的桩基础,索道桥、悬索桥和斜拉桥中的锚桩基础等。另外,在特定的环境条件下,原来的承压桩也可能会承受拉拔荷载。例如,港口工程中船坞和地下停车场、地下商场等地下建筑物承受浮托力而使桩顶产生上拔以及浅层土冬季冻结使桩身发生冻拔等。

钱德玲^[19]对支盘桩的抗拔性能进行研究:提出了支盘桩在盘间距大于 $4d$ 和小于 $4d$ (d 为桩身直径)时,抗拔承载力的计算公式,并结合工程实例对支盘桩的抗拔承载力进行预测,在考虑了支盘桩成桩时的挤扩效应的基础上研究了上拔过程中桩侧阻力达到极限值时所需要的桩顶位移量;通过对盘间土体在上拔荷载下的受力性质分析,得出了要充分发挥支盘桩的抗拔承载力,支盘桩的盘间距要大于 $4d$ 的结论。

陈轮^[20]通过大比例尺的现场模型 DX 桩静荷载试验,对 DX 桩的抗拔性能和荷载传递机理进行了研究。结果表明,DX 桩的抗拔承载力明显大于同等条件下的等截面桩,且 DX 桩的荷载-上拔位移关系呈缓变状态。DX 桩承力盘发挥的端承阻力在总抗拔承载力中占有较大比例,由于 DX 桩承力盘发挥了挤压效应,使 DX 桩桩身的平均单位抗拔侧阻力值也明显大于等截面桩,承载力约提高 30%。

巨玉文^[21]对挤扩支盘桩的抗拔性能进行了试验研究,结果表明,挤扩支盘桩在上拔荷载作用初期,支盘作用不显著,随着桩顶荷载的增加,支盘承担的荷载越来越大,当接近极限荷载时,支盘可承担总荷载的 40% 以上。他还提出了抗拔侧阻经验折减系数和挤扩支盘桩的抗拔极限承载力的计算公式。

越明华结合工程实际,对支盘桩的抗拔承载机理及设计计算方法进行了研究:探讨了支盘桩抗拔荷载的传递过程,各部分的承载力是从上向下逐步发挥的,不同位置的承力盘,抗拔承载力的发挥不是同步的,桩侧摩阻力的发挥先于

支盘;指出支盘桩抗拔破坏的过程——首先在承力盘或分支周围出现塑性区,随后随着上拔荷载的增加,塑性区加大,桩连同桩周一定范围内的土体产生滑动而破坏;提出了影响支盘桩抗拔承载力的诸多因素以及支盘桩承力盘的合适间距。

3) 挤扩支盘桩破坏模式的研究

支盘桩通过专用设备在桩身不同高度设置盘和分支,扩大端承面积,以此提高承载力。众多研究表明,挤扩支盘桩的荷载-沉降曲线呈缓变状态,沉降曲线表现出摩擦端承桩的特征。但是,由于桩身多个承力盘和分支的存在,使支盘桩的破坏模式与普通端承桩有所不同。

钱德玲^[22]基于静载试验结果,研究探讨了支盘桩的受力特性和破坏性状。研究结果表明,无论是荷载-沉降曲线还是动测检测结果,均说明了支盘下土体的局部剪切破坏是其破坏原因之一。成桩质量良好的支盘桩,即使达到极限荷载破坏后,仍保持完好的桩形,说明支盘桩的破坏不在于桩体本身或支盘的破损,而在于支盘下土体和桩端土体的破坏,即支盘桩的破坏是支盘下土体的剪切破坏和桩端土体的贯入破坏。

钱永梅^[23]通过对支盘桩的小比例尺模型试验,研究了支盘桩的破坏机理。结果表明:承力盘的形式影响桩周土的承载力;当多盘桩盘间距合理时,符合单盘桩的土体破坏规律;当多盘桩盘间距较小时,土体破坏基本上以盘端土体剪切破坏为主。

4) 支盘桩的理论研究现状

挤扩支盘桩已在基础工程中得到了较广泛的应用,多位学者对挤扩支盘桩的承载性状进行研究,得出了许多有益的结论。常规的研究工作一般通过工程实例、测桩试验、经验公式及简单的计算分析等手段来进行,扩径体的存在使桩周土受力状况变得复杂,仅通过现场试验或室内模型试验还难以清晰地揭示挤扩桩的承载力机理。运用有限元法可以快速、方便地进行应力、应变分析,对挤扩桩的承载机理进行研究,可为工程应用提供依据。

吴永红^[24]根据支盘桩的受力机理,应用分层总和法计算沉降的概念,提出了一种支盘桩沉降的理论与方法,包括单桩沉降和群桩沉降的计算公式,现已成功应用于天津市金宝大厦的沉降计算,且理论计算与实测结果吻合较好。

吴兴龙^[25]在挤扩支盘桩现场测试、有限元计算和理论分析的基础上,研究了挤扩支盘桩的变形破坏机理,提出了支盘桩单桩承载力的计算公式,分析了支盘数量对承载力的影响。

张玉敏^[26]用有限元方法对挤扩支盘桩在均质土中的荷载传递性状进行了研究,对其承载力提高的机理进行了计算分析,探讨了桩周土应力和位移开展的原因以及支盘附近塑性区开展情况。

余建民^[27]利用挤扩支盘桩承载特性的 FLAC3D 模拟,分析了支盘桩的荷载

传递特性和破坏机理。结果表明:支盘桩受力过程中,由于支盘上部与土体脱离,桩侧阻力会出现负的摩阻力;推断桩的破坏是上、下盘之间的土体发生剪切破坏所致。

周敏^[28]采用有限元分析软件 ANSYS 对竖向荷载作用下不同土体力学参数对支盘桩荷载传递机理的影响进行了研究。结果表明,支盘分担荷载的比例受桩周土模量的影响,桩周土塑性区的贯通从下向上发展,在竖向荷载达到一定数值时,支盘上部与土体之间脱离,影响到一部分桩侧摩阻力的发挥。

1.1.4 挤扩支盘桩荷载传递理论的研究现状

目前,对桩基荷载传递的理论研究方法大体可以分为四种方法,即荷载传递法、弹性理论法、剪切位移法、有限单元法。

1) 荷载传递法^[29, 30]

荷载传递法由 Seed 和 Reese 在 1955 年提出,此后,Kezdi(1957)、佐腾悟(1965)、Coyle、Rescse(1966)、Holloway(1975)以及 Vijayvergiya(1977)等相继在此基础上有所发展。这些方法的基本概念是把桩视作由许多弹性单元组成,每一单元与土体之间(包括桩尖)都用非线性弹簧联系,非线性弹簧表示桩侧摩阻力(或桩尖阻力)与其剪切位移(或桩尖位移)之间的关系(即桩侧荷载传递函数)。桩端土也用一弹簧代替,该弹簧的力与位移的关系表示桩端阻力与桩端沉降的关系(即桩端荷载传递函数)。该方法的关键在于确定荷载传递函数。Kezdi 假定荷载传递函数为指数函数,将其用来分析原位试桩结果,取得了比较满意的结果。荷载传递法的缺点是,桩身任意点的位移仅与该点的侧摩阻力有关,与桩身其他点的应力无关,没有考虑土体的连续性,当用于群桩分析时,必须借助于其他连续法的理论。

2) 弹性理论法^[31]

弹性理论法的基本假定是,桩被插入一个理想均质、各向同性的弹性半空间内,其弹性模量和泊松比不因桩的存在而变化,运用 Mindlin 公式导出土的柔度矩阵,满足桩土边界位移协调条件的平衡方程式,即可得到桩轴向位移和桩侧摩阻力。弹性理论法的优点是考虑了实际土体的连续性,它可考虑桩与桩之间相互影响的群桩分析,比传递函数法要合理些。弹性理论法的缺点:运用 Mindlin 公式时忽略桩的存在产生的影响,认为桩作用于未加桩时的理想均质、各向同性半无限体内,在考虑非均质土时,不得不采用一些近似的假设;由于假设土体的应力应变关系为线弹性,分析桩的非线性受力特征存在困难。

3) 剪切位移法^[32, 33]

R. W Cooke 于 1975 年提出了摩擦桩的桩身荷载传递的物理模型。假定桩身发生竖向位移时,桩侧摩阻力通过环形土体单元,由桩身侧面向四周逐层传递,