

挤扩支盘桩 承载特性及强度计算

巨玉文 著

Bearing Characteristics and Strength
Calculation of the Squeezed Branch Pile

筑工业出版社

山西省自然科学基金项目 (2011011024-1)

挤扩支盘桩承载特性及强度计算

巨玉文 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

挤扩支盘桩承载特性及强度计算/巨玉文著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2017. 10
ISBN 978-7-112-21395-5

I. ①挤… II. ①巨… III. ①灌注桩-桩基础研究 IV. ①TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 254201 号

挤扩支盘桩是在普通灌注桩基础上研制出来的一种新型桩基础, 它与普通钻孔灌注桩的主要区别在于支盘的设置和其特殊的挤扩工艺。由于这些支盘的设置, 大大地提高了桩的承载力, 减小了沉降量, 因此具有可观的经济效益和社会效益。本书基于现场静载荷试验和桩身应力测试, 系统地研究了挤扩支盘桩在压力荷载、上拔荷载作用下的荷载传递规律, 补充和完善了挤扩支盘桩的抗压、抗拔极限承载力的实用计算公式; 通过室内支盘模型试件的荷载试验, 测定了支盘的荷载-位移全程曲线, 揭示了试验条件下的支盘破坏形态为斜压破坏, 并建立了支盘强度承载力的计算模型; 运用二维轴对称及三维有限元法, 探讨了挤扩支盘桩单桩和群桩的承载变形性状, 对挤扩支盘桩的支盘竖向临界间距、水平桩距和布桩方式的设计, 提出了相应建议。最后还总结了挤扩支盘桩的强度计算与构造措施。

本书可为土建、交通等行业设计、施工与科研人员提供借鉴与参考。

责任编辑: 刘瑞霞 辛海丽

责任设计: 李志立

责任校对: 芦欣甜 焦 乐

挤扩支盘桩承载特性及强度计算

巨玉文 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京富生印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 7 字数: 164 千字

2017 年 10 月第一版 2017 年 10 月第一次印刷

定价: 30.00 元

ISBN 978-7-112-21395-5

(31110)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

钻孔挤扩支盘桩是在原有等截面钻孔灌注桩的基础上,在其桩身适当部位通过专用挤扩设备形成“分支”或“承力盘”,从而形成的一种新型桩基础。由于采用专用挤扩设备,可以适应水上、水下,各种孔径和各种地质条件。各种挤扩设备可在40~100cm孔径中成盘,除了在密实的中粗砂、卵石中成盘困难外,一般的砂土、粉土、黏性土中都可以顺利成盘。挤扩支盘桩与相同直径、相同桩长的直桩相比,混凝土用量增加10%~20%,承载力则可大幅度提高,具有十分可观的经济效益和社会效益,目前挤扩支盘桩在国内已经得到很好的应用和推广。因此,结合挤扩支盘桩的工程应用,对其承载特性进行深入的研究具有重要的理论价值和实际意义。

本书在研读国内外相关文献的基础上,结合工程实际对挤扩支盘桩做了大量的研究工作:通过现场抗压(抗拔)载荷试验、桩身应力测试及有限元分析比较全面系统地分析和研究挤扩支盘桩在受压和受拔时的荷载传递机理及实用可靠的承载力计算公式;通过大比例支盘模型试件的荷载试验研究支盘混凝土的强度破坏形态及支盘承载力计算模型。现将多年的研究成果编撰成书,以期对挤扩支盘桩的设计、施工及本领域的研究工作尽绵薄之力。

本书的主要内容集中于以下几点:

(1) 通过现场抗压静载荷试验,研究挤扩支盘抗压桩的桩身轴力、桩侧摩阻力、桩端阻力、支盘阻力的传递规律;总结出以显式表示的桩侧摩阻力、桩端阻力、支盘阻力的荷载传递函数;通过定量分析阐明支盘阻力的组成及属性;改进现有挤扩支盘桩的抗压极限承载力计算公式。

(2) 通过现场抗拔静载荷试验,研究挤扩支盘抗拔桩的桩身轴力、桩侧摩阻力、支盘阻力的传递规律;建立挤扩支盘桩单桩竖向抗拔极限承载力的实用计算公式;揭示挤扩支盘桩高抗拔性能的实质。

(3) 提出适用于挤扩支盘抗压桩的荷载传递法,用于拟合单桩 $Q-s$ 曲线和桩身轴力,以达到替代或部分替代现场试验的目的。

(4) 通过支盘模型试件的室内荷载试验,研究支盘本身的破坏形态、破坏机理以及应力分布规律,提出抗压支盘的承载力计算公式,完成支盘的强度理论。

(5) 通过轴对称有限元方法,分析竖向工作荷载下单桩桩身轴力、桩侧摩阻力、桩端阻力、支盘阻力的发挥性状和分布特征;研究单桩的沉降变形特性;在对桩周土体中应力分布研究的基础上,对挤扩支盘桩的支盘竖向间距的取值提出建议。

(6) 通过三维有限元法,系统研究工作荷载作用下不同桩距挤扩支盘桩群桩的变形和承载性状,提出合理的挤扩支盘桩水平间距取值及群桩布桩方式。

(7) 介绍了挤扩支盘桩的强度计算与构造措施。

本书依托典型工程,从多方面完善挤扩支盘桩的承载力理论,该研究成果可为今后支

盘桩的工程设计与施工提供可量化的科学指导及参考性建议。

本书的研究成果主要来自作者多年科研工作和攻读博士期间的科研积累，项目研究期间得到太原理工大学张善元教授、白晓红教授、梁仁旺教授的大力支持与悉心指导，值此本书正式出版之际，谨向他们表示衷心的感谢！

本书项目研究依托于“太原理工大学岩土工程学科”，该学科为山西省重点学科之一，学科课题组具有浓厚的学术气氛、团结友爱的人际关系。在本项目研究中，大量的试验与分析工作是作者与赵明伟、黄占芳、王晓峰等研究生团结合作、共同完成的，在此对他们表示感谢。

本书参考和引用了许多专家和学者的研究成果，在此向文献作者表示衷心的感谢。

限于作者的学识和经验，书中难免存在一些不妥之处，诚请读者批评指正。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 前言	1
1.2 挤扩支盘桩的施工工艺及主要特点	2
1.2.1 挤扩支盘桩的施工工艺	2
1.2.2 挤扩支盘桩的主要优点	3
1.2.3 挤扩支盘桩的主要缺点	3
1.2.4 挤扩支盘桩的适用范围	4
1.3 挤扩支盘桩的研究现状	5
1.3.1 挤扩支盘桩的研究历程	5
1.3.2 挤扩支盘桩的研究现状	6
1.3.3 桩基荷载传递理论的研究现状	12
1.4 主要研究内容	13
参考文献	14
第2章 挤扩支盘桩抗压特性的试验研究	18
2.1 荷载传递机理的试验研究	18
2.1.1 工程概况	18
2.1.2 试验设计	18
2.1.3 试验结果及分析	19
2.2 单桩抗压承载力计算	30
2.2.1 挤扩支盘桩的单桩承载力计算公式	30
2.2.2 单桩承载力计算公式在工程设计中的应用	31
2.3 荷载传递的数值模拟方法	32
2.3.1 荷载传递法基本原理	32
2.3.2 用荷载传递法模拟 $Q-s$ 曲线	33
2.3.3 用荷载传递法模拟轴力图	35
2.4 本章小结	36
参考文献	37
第3章 挤扩支盘桩抗拔性能的试验研究	39
3.1 抗拔支盘桩的荷载传递机理	39
3.1.1 工程概况	39

3.1.2	试验设计	40
3.1.3	试验结果及分析	40
3.2	单桩抗拔承载力计算	47
3.2.1	抗拔承载力的计算方法	47
3.2.2	单桩抗拔承载力计算公式的工程应用	48
3.3	本章小结	49
	参考文献	50
第4章	支盘试件的强度试验研究	51
4.1	关于支盘破坏形态的概述	51
4.2	试验方案概述	52
4.2.1	试验目的	52
4.2.2	试验技术线路	52
4.3	试验结果及分析	54
4.3.1	支盘的破坏形态及承载力分析	54
4.3.2	高宽比的变化对支盘受力及破坏特性的影响	63
4.3.3	支盘的应力分布规律	65
4.4	本章小结	68
	参考文献	68
第5章	挤扩支盘桩的有限元分析	69
5.1	单桩有限元分析	69
5.1.1	计算理论与基础	69
5.1.2	计算结果及分析	70
5.2	群桩三维有限元分析	77
5.2.1	计算方案	78
5.2.2	群桩的承载性状	79
5.2.3	群桩的变形性状	86
5.3	本章小结	87
	参考文献	88
第6章	挤扩支盘桩的强度计算与构造措施	90
6.1	挤扩支盘桩的强度计算	90
6.1.1	桩身强度计算	90
6.1.2	支盘的强度验算	90
6.2	挤扩支盘桩的构造措施	90
6.2.1	基本设计要求	91
6.2.2	有关桩的构造要求	91
6.2.3	有关桩基承台的构造要求	93

6.2.4 挤扩支盘桩的支盘有关尺寸..... 94

参考文献 94

第7章 结论及展望 95

7.1 主要研究结论..... 95

7.2 进一步研究展望..... 96

附图 97

第 1 章 绪 论

1.1 前言

桩是深入土层的柱型构件，其作用是将上部结构的荷载传到深部土（岩）层中。工程实际中，以主要承受竖向荷载的桩基为多。

随着我国工程建设的飞速发展，桩基础已成为工程建设中一种很重要的基础形式。据不完全统计，我国每年的用桩量已达 100 万根以上^[1]。尤其是近年来超高层和重工业厂房等建筑物、构筑物的兴建，更加促进了桩基础日新月异的发展，在我国已形成多种工艺、多种桩型^[2]。桩基础具有良好的工程效果，但其工程造价较高，通常占工程总造价的 10%~30%，有时甚至超过 30%^[3]。同一工程的不同桩基方案之间，工程造价可能相差很大。因此，桩基方案的选择，成为桩基设计中的重要内容。

钻孔灌注桩具有承载力高、施工深度容易控制以及噪声小等优点，近年来已成为应用最广泛的一种桩型。钻孔灌注桩是通过桩侧摩阻力和桩端阻力来传递荷载。由于钻孔过程中采用泥浆护壁而在孔壁形成泥皮、孔底形成沉渣，从而影响桩的承载力。为了提高灌注桩的承载力，人们大都围绕着提高桩侧摩阻力和桩底端承力这两个方面来研究，相对而言，提高桩底端承力更为经济，因此出现了扩底桩、夯扩桩等改良桩型。扩底桩是在不改变原地基土特性的情况下，将桩端承压面积扩大，承载力提高的幅度，不仅与扩大的桩底面积有关，而且与桩端地基土的特性有很大关系。这种桩对地基土有一定的要求，否则扩大头难以形成。从 20 世纪 90 年代初起，国内一些工程开始使用一种新桩型，这种桩是从普通混凝土灌注桩衍生出来的，是在传统灌注桩工艺中增加了一道挤扩工序，利用专用设备，沿桩身不同深度设置一些分支或承力盘（图 1-1），称之为挤扩支盘桩。由于这些支盘的设置，大大地提高了桩的承载力。挤扩支盘桩与相同直径、相同桩长的普通灌注桩相

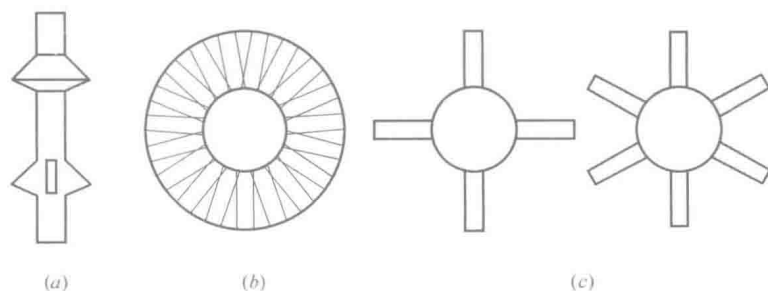


图 1-1 挤扩支盘桩示意图
(a) 支盘桩；(b) 承力盘；(c) 分支

比，混凝土用量增加 10%~20%，承载力则可增加 60%~100%^[4]，因此具有十分可观的经济效益和社会效益，已在国内百余项工程中得到应用。

目前，挤扩支盘桩这项新技术尽管工程实践效果明显，但整体上仍处于技术开发和推广应用阶段，对挤扩支盘桩的受力机理研究还很不充分，工程设计方法也不是很成熟。因此应结合工程应用对挤扩支盘桩基础的承载性状、变形特征和支盘破坏模式开展系统地试验研究，在此基础上建立更为合理的分析模型和实用计算方法。

1.2 挤扩支盘桩的施工工艺及主要特点

1.2.1 挤扩支盘桩的施工工艺

挤扩支盘桩比原有普通混凝土灌注桩（直桩）的施工工艺增加了一道工序，利用普通钻机（如冲击钻机、潜水钻机、正反循环回转钻机、旋挖钻机等水上水下钻孔机械）按设计要求成孔，成孔后用吊车将支盘设备吊入孔中各支盘位置进行挤扩。施工简单、设备易于操作。

挤扩设备由两部分组成，即地下主要工作系统挤扩支盘部分和地上供给能量及检测系统部分。在钻成孔后，将地下挤扩支盘设备吊入孔内设计盘位通过地上加压挤扩形成支盘，挤扩一次形成一对分支，旋转 90°形成十字分支，旋转五至八次形成盘体，在成盘过程中可由地上控制系统根据压力表显示来判断土层的软硬情况并控制盘体直径的大小，及时调整盘位，使盘体充分落在设计的持力层上。参见图 1-1 “挤扩支盘桩示意图”。

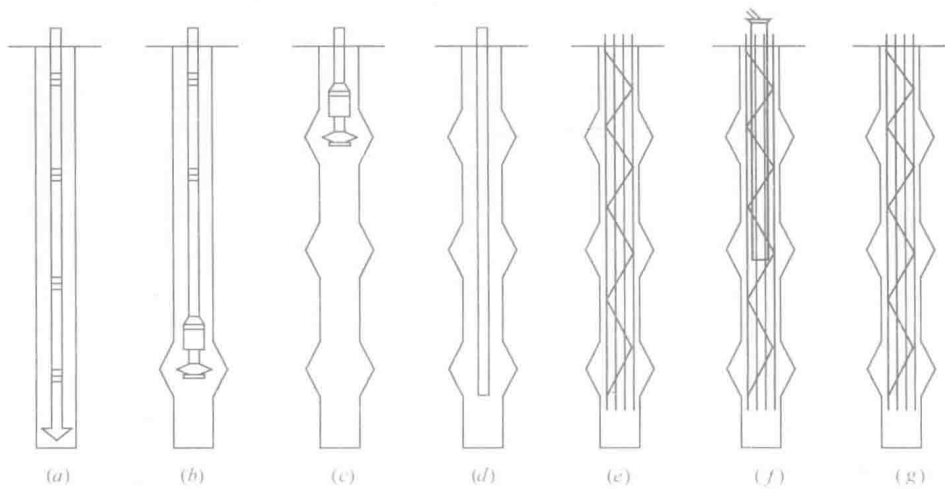


图 1-2 挤扩支盘桩施工工序示意图

(a) 成孔；(b) 下部成盘；(c) 上部成盘；(d) 清孔；(e) 下钢筋笼；(f) 灌注混凝土；(g) 成桩

挤扩支盘桩的施工工艺流程为：桩定位放线→挖桩坑→埋设护筒→钻机就位→钻孔至设计深度→钻机移位至下一桩位钻孔，将分支器吊入已钻孔内，按设计位置挤压分支和承力盘→清孔→下钢筋笼→下导管→灌注混凝土→清理桩头。施工工序示意图如图 1-2

所示。

1.2.2 挤扩支盘桩的主要优点

- (1) 单桩承载力高。在相同地层、相同桩长和桩径的情况下，挤扩支盘桩比普通灌注桩提高承载力 60%~100%，单方混凝土承载力提高 1 倍左右^[3,5]。
- (2) 节约原材料，缩短工期，降低工程造价。采用挤扩支盘桩可缩短桩长、减少桩数、减小桩径和承台面积。据测算，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^[5,6]。
- (3) 抗拔性能、稳定性好。由于桩身的支盘受土体的支撑作用，改善了桩身刚度，提高了桩的抗拔力，增加了桩的稳定性，提高了抵抗水平荷载的能力。
- (4) 工艺简便。和普通灌注桩比较，只需增加一套挤扩成型器和一道挤扩工序，不需要更换原有的钻孔设备。
- (5) 劳动强度低，工效高，泥浆排放量显著减少，有利于环保。与打入式预制桩相比，支盘桩施工噪声低，无振动；与泥浆护壁成孔的直孔钻孔灌注桩相比，在等值承载力的前提下，支盘柱泥浆排放量显著减少。
- (6) 成孔、成桩工艺适用范围广。支盘桩在工艺上除多了一道挤扩成形的工艺外，其余均与普通灌注桩工艺大致相同。可用于泥浆护壁的成孔工艺（反循环钻进、冲击钻进等），干作业的成桩工艺（螺旋钻进等），水泥浆成桩工艺或重锤捣扩成桩工艺等，适用范围广泛^[7]。
- (7) 对土层的适应性强：在内陆冲积和洪积平原及沿海河口部位的海陆交替层及三角洲平原下的硬塑黏性土、密实粉土、粉细砂层、中粗砂层等均适合做支盘桩的层。而且，支盘桩技术不受地下水位限制^[7]。

1.2.3 挤扩支盘桩的主要缺点

- (1) 施工场地狭小时，不利于成型器的摆放。
- (2) 设计参数及承载力计算公式尚需进一步完善。
- (3) 群桩效应机理还没有明确的理论成果，有待进一步研究^[7]。
- (4) 由于支或盘的存在，使得桩身检测复杂，用低应变检测其完整性技术要求高。
- (5) 挤扩力还需增大，以便在硬土层中挤扩。

挤扩支盘桩和几种典型桩的特点、性能对比参见表 1-1。

几种典型桩的特点、性能比较 ^[3]			表 1-1
桩型	特点、性能	缺点	
普通 预制桩	适用于上层较软弱、下层较好的土层；对桩土产生挤密作用，施工质量较稳定	锤击产生振动、噪声污染，配置钢筋较多，造价较高	
小型 灌注桩	施工方法较简单，多用于基础加固和复合桩基础，噪声小，狭窄场地即可施工	承载力较小	

续表

桩型	特点、性能	缺点
锥形桩	挤土效果好,利用锥面可增大桩的侧阻力,承载力比等截面桩(体积相同条件下)提高 1~2 倍,沉降较小	承载力较低,长度有限,施工产生噪声、振动等
螺旋桩	螺旋形侧面可提高桩侧阻力和端阻力,无振动、噪声污染	需要大功率施工扭矩装置,桩长有限
竹节桩	可防止地震时地基土的液化,可提高侧阻力,承载力比普通桩高 30%~40%	施工产生噪声、振动污染,入土深度较短,承载力有限
夯扩桩	桩端可夯扩成扩大头,能改善扩桩端持力层的密实度,比沉管灌注桩和预制桩承载力高,可分别提高 60%~100% 和 30%,施工速度较快,成本低	适用于上层较软弱、下层较好的土层,施工产生噪声,承载力有限
大直径桩(墩)	施工简便,造价低,承载力高,沉降小,质量易于保证,抗震性能好	对无黏性的砂土、碎石类土,施工时应力释放而出现孔壁土的松弛效应,导致侧阻力降低,要求大功率机具
挤扩支盘桩	施工简便,造价低,承载力高,根据需要可对不同土层进行加固挤密,能以桩径小、桩长短的桩,满足承载力较高的要求	施工场地狭小时,不利于成型器的摆放;设计参数及承载力计算公式尚需进一步完善;挤扩力还需增大,以便在硬土层中挤扩

1.2.4 挤扩支盘桩的适用范围

(1) 该工艺在软弱黏性土、淤泥质土中施工,成桩长度一般为 4~20m,桩径可达 300~800mm,采用沉管加填料挤密成型,达到防渗、防缩颈及加强地基、减少地基变形的作用^[8]。

(2) 该工艺在黏性土中、地下水位以上施工,成桩长度一般由成孔深度而定,桩径可达 300~800mm,采用长、短螺旋钻造孔,原位挤压成型,达到提高地基强度、节约原料、缩短工期、减少沉降的目的。

(3) 该工艺在砂土中施工,成桩长度小于 50m,桩径可达 300~800mm,采用反循环泥浆护壁成孔,原位挤压成型,达到缩短桩长、节约材料、缩短工期的目的。

(4) 该工艺在卵砾石层中施工,成桩长度一般由成孔深度而定,桩径可达 300~800mm,采用反循环泥浆护壁成孔,达到提高承载力、缩短桩长、节约材料、控制变形的作用。

(5) 该工艺在地下水位以下黏性土中施工,成桩长度一般由成孔深度而定,桩径可达 300~800mm,采用正、反循环机械成孔,挤压成型,达到缩短桩长、提高地基承载力、减少沉降的目的。

1.3 挤扩支盘桩的研究现状

1.3.1 挤扩支盘桩的研究历程

20 世纪 50 年代后期,印度开始在膨胀土中采用多节扩孔桩;20 世纪 60 年代和 70 年代,印度^[9~11]、英国及苏联在黑棉土、黄土、粉土、黏土和砂土中采用多节扩孔桩,当时有 20 余篇文献报道了直孔桩、扩底桩、两节和三节扩孔桩的对比试验(包括模型试验和现场静载试验)结果。国外经验表明,多节扩孔桩与直孔桩相比,承载力大大提高,沉降小,技术经济效果显著^[12]。

1978 年初,北京市建筑工程研究所等在团结湖小区进行干作业成孔的小直径(桩身直径 300mm,扩大头直径 480mm)两节和三节扩孔短桩(桩长不足 5m)的施工工艺和静载试验研究。结果表明,两节和三节扩孔桩的单位桩体积提供的极限承载力分别为直孔桩的 1.28~1.76 倍^[12]。

1979 年,建设部建筑机械研究所和北京市机械施工公司在国内首先研制开发出挤扩、钻孔和清虚土的三联机,简称 ZKY-100 型扩孔器。同年,北京市桩基研究小组首先在劲松小区对用该机的挤扩装置制作的四节挤扩分支桩(桩身直径 400mm,挤扩分支直径 560mm,每一节为 6 个分支,单支宽度 200mm,桩长 8.7m)和相应的直孔桩(桩径 400mm,桩长 8.85m)进行了竖向受压静载试验,结果表明,前者的极限承载力为后者的 138%^[13]。

20 世纪 80 年代末,北京俊华地基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 型液压挤扩支盘成型机及挤扩多分支承力盘混凝土灌注桩(曾被称为多枝桩、树枝桩、多次扩孔混凝土灌注桩及挤扩多支桩),该桩从 1992 年起在北京、天津、河南、安徽、湖北等地的工程中得到应用,取得较显著的技术经济效益^[14]。

1998 年,中国北方光电工业总公司地基基础工程部贺德新研制开发出新型的多功能液压挤扩装置,依此实施 DX 多节扩孔桩,成为挤扩支盘桩的第三代产品。DX 桩在挤扩多分支承力盘混凝土灌注桩的基础上进行了多方位的实质性改进,明显地改善了挤扩成型效果。DX 桩已在北京、济南、天津、武汉等地成功地应用,也取得了较显著的技术经济效益^[15]。

2000 年,山西金石基础支盘桩工程有限公司研制成功双油缸换臂式立板液压支盘成型机和可变式支盘扩底桩成桩工艺。该工艺可在同一钻孔内利用同一挤扩设备,根据土层的不同,挤扩完成不同直径的支盘,其施工工法被评为 1999~2000 年度国家级工法,已在山西省及外地多项工程中应用,效果显著^[16]。

近年来,挤扩支盘桩在各地均有较广泛的工程应用,例如在铜陵新亚星焦化有限公司二期扩建工程中就成功地应用旋挖成孔+独立的液压挤扩装置成盘,施工完毕后经检测,成桩质量良好,承载力提高明显^[17]。

本书所研究的挤扩支盘桩指用专用机械挤压土体后形成盘腔的可变式支盘桩,统称为“挤扩支盘桩”。

1.3.2 挤扩支盘桩的研究现状

目前在工程中，一般将挤扩支盘桩用作竖向抗压桩，因此人们大多研究挤扩支盘桩在轴向压力下的受荷性状和设计、施工方法。另外，近年来也有学者对挤扩支盘桩的抗拔特性、动力特性展开一些研究。

1.3.2.1 抗压承载力

就挤扩支盘桩的抗压承载力计算公式而言，已提出不下 10 种计算方法^{[9][15,16][18~25]}，研究者一般认为挤扩支盘桩的竖向承载力由桩侧摩阻力、支盘阻力、桩端阻力三部分组成。其中，支盘阻力又可分为支盘端阻力和支盘侧阻力，詹京^[18]、胡林忠^[19]、黄根生^[20]的计算方法不计支盘侧阻力；贺德新^[15]、卢凯其^[21]的计算方法则不计桩端阻力，黄根生^[20]对桩端阻力建议了修正系数，介于 0.84 和 1.0 之间。刘杰^[26]等（2011 年）介绍了挤扩支盘灌注桩单桩竖向承载力的不同经验公式，对各经验公式参数取值进行比较，结合对工程实例的计算结果分析，指出对支盘极限端阻力进行经验修正后的公式确定承载力的效果最好，并运用该公式对支盘桩承载特性作了简要分析，指出三种因素对支盘桩承载特性的影响，为实际工程提供参考。

范孟华^[27]（2011 年）通过对相邻两盘间破坏面形态的分析，总结了支盘桩整体破坏面形态的判断方法，推导出了基于最小抗力的支盘桩承载力和临界盘间距计算公式，并进行了验证。在相邻两盘间可能出现的破坏面有大圆柱形和小圆柱形两种，最可能出现的是抗力最小者。支盘桩的整体破坏面是各段抗力最小的破坏面的组合，各段的最小抗力之和即是整根支盘桩的总承载力；支盘桩所有可能出现的整体破坏面中抗力最小者即为支盘桩的承载力。

卢成原^[28]等（2004 年）根据挤扩支盘桩的实际工作性状，设计了一个室内模型试验装置来研究支盘桩的承载和变形性能以及影响因素，通过与等直径模型桩的对比试验表明支盘桩的承载力远远高于等直径桩，而沉降变形则要小得多。试验还证实盘底土体的侧阻对桩的承载力贡献很小，在紧邻盘底的位置甚至可能产生负摩擦作用，设计时应给予充分重视。最后，提出了一个支盘桩承载力的计算公式。

计算桩侧摩阻力时，由于支盘的设置影响了桩侧摩阻力的发挥，一般认为应对桩周土层厚度予以折减，文献^[29]建议采用表 1-2 所示的计算方法。

桩周土层有效厚度			表 1-2
黏性土、粉土	砂土	碎石、砾石	其他
$H-1.2h$	$H-(1.5\sim1.8)h$	$H-1.8h$	$H-(1.1\sim1.2)h$

注：H 为盘间净距（m）；h 为盘体高度（m）。

1.3.2.2 荷载传递规律

对挤扩支盘桩的荷载传递研究，学者们大都是针对单桩。崔江余^[3]（1996 年）做了 18 组不同盘距支盘桩（模型桩）的静载试验和轴力测定，总结出不同盘间距对挤扩支盘桩承载力的影响。杨志龙^[24]和吴兴龙^[25]（2000 年）通过工程试桩现场试验和有限元分

析,对挤扩支盘桩的受力机理进行研究,提出支盘的承载作用明显、挤扩支盘桩为摩擦多支点端承桩、支盘附近的桩侧摩阻力有所下降等结论。黄生根^[30](1998年)运用荷载传递法,结合工程实例对多级挤扩钻孔灌注桩的荷载传递特性进行了分析,认为DX桩承载力扩大盘的荷载传递特性与摩阻力相近,而与桩端阻力有显著区别;给出了承载力扩大盘的荷载传递函数,建议在进行设计时,挤扩支盘桩的承载力应由桩端阻力控制,并应有适量的沉降以充分发挥桩端阻力。张利鹏^[31]等(2016年)对同一场地的人工挖孔等直径灌注桩、人工挖孔扩底灌注桩和人工挖孔支盘灌注桩进行了现场静载荷试验,结合试验结果对比分析了上部荷载作用下3种不同桩型的桩身轴力、桩侧摩阻力、桩端阻力、极限承载力和桩身沉降的发挥性状,并研究分析其不同发挥性状产生的原因;结合双曲线拟合法分析了3种不同桩型桩基础的极限承载力。研究表明:扩底桩极限承载力最大,支盘桩次之,等直径桩最小;同级荷载下,扩底桩沉降最小,支盘桩次之,等直径桩最大;支盘桩的两个支盘承担荷载作用显著且表现出明显的时序性,桩身轴力和侧摩阻力在支盘处产生突变,其余桩段的桩身轴力和侧摩阻力发挥性状与等直径桩相似,上支盘分担荷载较下支盘多,支盘桩表现出多支点摩擦端承桩特性。

近年来,很多学者利用可视化模型试验对挤扩支盘单桩的荷载传递规律进行了一些研究。张敏霞^[32]等(2017年)采用基于透明土材料和粒子图像测速技术的桩基透明土模型试验系统,对轴向荷载作用下支盘桩和等截面桩桩周土体变形进行非介入式测量,得到桩周土体完整的变形位移场。试验结果表明,与等截面桩相比,支盘桩通过增大桩周土体变形位移场的范围,减小了土体变形位移场的强度,从而提高了桩基承载能力;支盘与桩端土体位移场均具有放射状的特征,表明支盘与桩端承载机制一致,支盘承担部分桩顶荷载,改变了荷载传递规律;支盘处土体位移场特征表明,支盘下界面土体位移变形对桩侧摩阻力的发挥产生了消极影响;试验还发现支盘位置、间距对桩周土体位移场的影响较大,支盘间距取值宜大于三倍支盘直径。王成武^[33]等(2015年)在自制的可视化模型箱内,进行了挤扩支盘桩静载模型试验,分析了等截面桩和不同承力盘数量的支盘桩在静载作用下的荷载—变形特性以及桩周土体位移场的分布规律,并利用有限元软件ABAQUS对支盘桩在静载下的受压过程进行了数值模拟。模型试验结果和数值模拟均表明:支盘桩比等截面桩的承载力大,承载力的提高随承力盘数量的增加而增加,而且支盘桩能有效减小沉降;支盘桩不同位置承力盘作用的发挥有明显的时序性。该试验得到的一些结论可以为支盘桩设计及其工程应用提供理论依据。

王晓阳^[34]等(2017年)针对宁波绕城高速公路东段桥梁基础的部分支盘桩,首先采用静载荷试验确定了3根挤扩支盘桩的承载力,并采用振弦式钢筋计对这3根支盘桩在不同施工阶段及运营状态进行了长达两年的内力监测。结果表明:支盘桩中的支盘承担了相当部分的荷载,不同阶段下支盘分担的总荷载占桩顶荷载的30%~48%;桩顶荷载低于30%极限荷载时,最下层支盘基本没有发挥作用;在长期作用下,随着荷载的增加,桩身下部的承载能力逐渐发挥,支盘承担的荷载比例也有所增加。

1.3.2.3 支盘的设置及盘周土体特性

研究表明,支盘的竖向间距是影响支盘阻力发挥的重要因素。当支盘间距大于某一数值时,各支盘独立工作,荷载沿桩身侧表面、各支盘下斜面和桩端传递;当支盘间距小于

某一数值时,各支盘附近的应力影响区互相叠加,荷载沿支盘盘径外包圆柱面和桩端传递,将这一间距称为支盘临界间距。吴兴龙^[22]认为,支盘直径 D 与桩径 d 之比为 $2:1$ 时,支盘临界间距 $l_{cr}=7d$ 或 $3.5D$;杨志龙^[22]认为,在密实土中盘间临界间距 $l_{cr}=5d$ 或 $2.5D$,分支间或分支与承力盘间临界间距 $l_{cr}=4d$ 或 $2D$;在稍松软土中,盘间临界间距 $l_{cr}=4d$ 或 $2D$,分支间或分支与承力盘间临界间距 $l_{cr}=3d$ 或 $1.5D$ 。杨志龙、顾晓鲁^[35]等建议在多支盘桩设计时,承力盘或分支间距宜不小于 $(4\sim 6)d$;对于粉土、粉质黏土,桩侧极限摩阻力为 $30\sim 70\text{kPa}$ 时所对应的极限位移为 $5\sim 20\text{mm}$;桩侧极限侧摩阻力和极限位移随土层埋深而增大。卢成原^[36]等(2015年)设计两组室内模型试验来研究不同土质中支盘桩单桩的合理盘间距。对试验结果分析得出:双盘单桩的承载力随盘距的增加有不同程度的增大,但并不呈线性增加;盘距的不同关系到盘体承载力的发挥,同时上下盘的发挥有较明显的时间效应;桩周不同土质性状影响着支盘桩单桩两盘体的合理间距取值。支盘桩群桩随桩距的增大,群桩效应逐渐减小,其承载力不断增大,当达到一定桩距时可以近视忽略群桩效应的影响,群桩的承载力可取单桩承载力的叠加值,但该合理桩距在不同土质中是不同的。马文援^[37]等(2012年)设计了3根不同盘距双盘抗拔支盘桩的室内模型试验,研究盘距对支盘桩抗拔承载性能的影响。结果表明,双盘桩的抗拔承载力随着盘距的增加有不同程度增大,但并不是呈比例的增加;当盘距较小时,荷载增大到一定值后下盘分担的荷载呈下降趋势,下盘承载力得不到充分发挥;盘距较大时,上下盘的承载力均能发挥,但存在明显的时间效应,当荷载增加到一定值后,上盘分担的荷载逐渐减小,下盘分担的荷载逐渐增大。还有研究表明,支盘的形状也是影响支盘阻力发挥的重要因素。卢成原^[38]等(2015年)设计了一组支盘桩室内模型试验,来研究不同盘体形状对支盘桩承载性能的影响,分别对盘底倾角为 20° 、 30° 、 45° 、 60° 的模型支盘桩进行加载试验。试验数据表明:支盘桩由于盘底倾角不同其承载力是不同的,随着该倾角由小变大,桩的承载力既不是越来越大,也不是越来越小,而是存在某一个最佳倾角,使支盘桩的承载力达到最佳状态。

挤扩支盘桩对支盘附近土体的挤密作用是挤扩支盘桩区别于一般扩底桩的重要特征。对于挤扩支盘桩的挤扩效应,也进行了理论及试验研究。吴兴龙^[22]运用轴对称的半无限体小孔扩张的弹塑性理论,推导了挤扩过程中桩周土体的应力应变解析。1994年,在中国水利水电科学研究院主持下,张晓玲对支盘成型带来的土质压密效果进行了72组试验,得出了不同土质下压密的效果和成型规律^[14]。崔江余^[3]对桩径 600mm 、盘径 1500mm 的支盘桩进行了挤密作用的试验研究,认为成型挤密的影响范围水平方向在距桩孔外 1.0m 以内,垂直方向在 0.5m 以内,干密度的提高幅度最大可达到 $15\%\sim 20\%$ 。卢成原^[39]等通过对试验支盘桩桩周土的开挖取样做室内土工试验,得出挤扩分支盘挤压应力对桩周土挤密效应所引起的土干密度的变化规律,提出了挤密效应综合影响系数 β 的概念,并指出局部土体挤压后的干密度增幅可达 20% 以上,是承载力所以比其他同类桩型高的原因之一;分支和承力盘挤密成型时对桩周土挤密效应的影响范围,在水平方向可达 $1.2\sim 1.5\text{m}$,尤其在 0.9m 内挤密效果显著;在竖直方向挤密效应的衰减与其离盘的距离有近似线形的关系,但这种衰减受土层变化的影响较大。

1.3.2.4 沉降变形

对于挤扩支盘桩的沉降计算,研究较少。按常规来说,桩顶沉降主要由四大部分构

成^[40],即桩身混凝土的弹性压缩量 S_1 、桩身混凝土的塑性压缩量 S_2 、桩身缺陷(如夹泥、堵管)引起的压缩量 S_3 、桩端压缩量 S_4 ,即 $S=S_1+S_2+S_3+S_4$ 。吴永红等^[41]认为,挤扩支盘桩属于摩擦多支点端承桩,从该桩型的受力机理出发,应用分层总和法计算沉降的概念,提出了一种多支盘钻孔灌注桩基础沉降计算理论与方法,编制了相应的计算软件,计算值与实测结果吻合较好。钱德玲^[42]采用桩端处的附加应力计算地基压缩量,在桩端平面处用一等价的扩展基础来代替支盘桩基础,再用分层总和法计算公式计算桩端以下压缩层范围内地基土的沉降。余倩雯^[43]等(2014年)利用基于数字图像相关技术的模型试验及三维数值模拟方法对单桩、单支盘桩及双支盘桩的承载特性、桩周土体位移场分布特征进行研究。研究结果表明:单桩及单支盘桩荷载-沉降曲线呈现陡降型,而双支盘桩呈缓降型,且随着支盘数量增加,支盘桩承载力近似线性增长;单支盘桩在极限荷载阶段支盘下及桩端土体位移较大,而双支盘桩桩周土体位移较大部位主要集中在支盘周围土体;单支盘桩基础破坏面由支盘下土体的剪切滑动破坏面及桩端刺入破坏面构成,而双支盘桩基础破坏面由双支盘构成的连续滑动面组成,桩端刺入破坏特征不明显。

1.3.2.5 经济效益分析

对于挤扩支盘桩的经济效益分析,一般结合具体工程进行。郭明锋、李光模^[44]对相同地质条件下等直径、等桩长钻孔灌注桩与钻孔挤压分支桩作了经济对比分析,认为钻孔挤压分支桩混凝土用量仅增加13%,而计算竖向承载力标准值却提高了近一倍,每立方米混凝土竖向承载力标准值提高74%;对相同场地、相同竖向承载力、钻孔灌注桩与挤压分支桩所作的经济对比表明:相同单桩承载力,钻孔灌注桩的混凝土用量是钻孔挤压分支桩的237%,每根钻孔挤压分支桩可节约投资6300元,该工程共用89根工程桩,仅桩基础就节约投资56万余元,经济效益显著。滕金领^[45]等(2013年)基于地质构造复杂的太行山东麓山前冲积平原区域的实际情况,从地质状况分析、桩基础优化设计、施工要点等几个方面结合工程实际介绍了支盘桩工艺在复杂岩土地层工程的实际应用。工程研究表明,在复杂岩土地层的工程中采用支盘桩工艺可以在很大程度上降低施工难度,提高施工效率,降低工程造价,具有显著的技术、经济和环境效益。

1.3.2.6 关于挤扩支盘抗拔桩的研究

近期的工程应用结果表明,挤扩支盘桩同样具有高抗拔性能,该桩型通过改变桩身截面,以较小的材料增加获得显著的抗拔承载力提高,已成为抗拔桩基础发展的有效途径之一。与挤扩支盘抗拔桩的工程应用潜力相比,理论研究却很不充分,有些方面尚属空白,远不能适应工程应用对基础理论的要求。事实上,挤扩支盘抗拔桩承受竖向上拔荷载时,一方面由于支盘的端阻作用大大地提高了单桩抗拔承载力,另一方面却由于支盘对其上部土体的“上抬作用”,导致支盘下部土体的竖向压力大大减小(甚至可能减小为零),进而产生显著的“减压软化”,影响了桩侧摩阻力的有效发挥。可见,挤扩支盘桩的抗拔机制比抗压桩变得更加复杂。对挤扩支盘抗拔桩的研究也是始于工程应用,钱德玲^[46](2003年)推导了不同盘间距情况下的支盘桩抗拔承载力的计算公式,并结合工程实例,指出了支盘桩的抗拔承载力主要取决于支盘阻力,为支盘桩的抗拔设计提供了必要的理论依据。赵明华^[47]等(2006年)对DX桩(挤扩支盘灌注桩)与普通桩的抗拔承载特性进行了对