

混凝土扩盘桩桩周土破坏机理及 单桩竖向承载力研究

钱永梅 著

中国建筑工业出版社

混凝土扩盘桩桩周土破坏机理及 单桩竖向承载力研究

钱永梅 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

混凝土扩盘桩桩周土破坏机理及单桩竖向承载力研究/

钱永梅著. —北京:中国建筑工程出版社, 2018. 12

ISBN 978-7-112-22906-2

I. ①混… II. ①钱… III. ①混凝土桩-桩基础-研究

IV. ①TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 254645 号

本书是作者十多年的桩基础研究成果总结, 书中内容原创性高、科学技术性强、可读性好, 全书共包括: 概述、混凝土扩盘桩桩周土体破坏机理的半截面桩研究方法、混凝土扩盘桩桩周土体破坏机理、混凝土扩盘桩参数对破坏机理的影响、混凝土扩盘桩桩周土参数对破坏机理的影响、单桩极限承载力的计算模式及设计原则、混凝土扩盘桩后续相关研究的探讨等内容。

本书适合广大土木工程专业师生及相关专业的工程技术人员阅读使用。

责任编辑: 张伯熙

责任校对: 芦欣甜

混凝土扩盘桩桩周土破坏机理及单桩竖向承载力研究

钱永梅 著

*

中国建筑工程出版社出版、发行(北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京佳捷真科技发展有限公司制版

天津翔远印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 26 字数: 506 千字

2018 年 11 月第一版 2018 年 11 月第一次印刷

定价: 96.00 元

ISBN 978-7-112-22906-2

(32995)

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)

作者简介

钱永梅，吉林建筑大学，教授，硕士生导师，兼职博士生导师。

长年从事土木工程学科领域的教学、科研工作，在土木工程学科领域中取得了骄人的成绩，获得多项荣誉称号，包括：全国三八红旗手、吉林省有突出贡献的青年人才、吉林省拔尖创新人才、吉林省首批学科领军教授、吉林省高校新世纪科学技术优秀人才等。取得国家一级注册结构工程师、国家注册咨询工程师、国家注册造价工程师及国家注册监理工程师等注册资格，被聘为国家自然科学基金委通讯评委、河北省科技奖励评审专家、北京荣创岩土工程股份有限公司专家顾问、AECI专家库专家、中国建筑科学和工业建筑杂志社编辑。

在科研工作领域，成绩斐然。近年来获得中华人民共和国教育部科技技术进步一等奖，吉林省科技进步奖、自然科学学术成果奖、发明创造大赛奖等6项，获授权国家发明专利3项，国家实用新型专利4项，国家软件著作权6项，申请并获得受理国家发明专利2项；承担国家自然科学基金项目5项，3项主持，2项第1主研人；主研省级科研项目7项，5项通过鉴定或验收。第1作者发表论文100余篇，SCI、EI检索30余篇，ISTP检索及国内核心期刊20余篇；参编国家设计规程1部。主编教材6部，1部获吉林省优秀教材三等奖。积极参与工程实践，获吉林省优秀设计二等奖、三等奖各2项。培养硕士30余人，有多人获国家奖学金及优秀硕士毕业生。



前 言

本专著是关于土木工程学科，桩基础研究的相关成果。本专著容纳了作者十几年的研究成果，包括作者主持完成的2项国家自然科学基金项目，以及培养的20余名博士、硕士论文的相关内容。

混凝土扩盘桩是一种新型的高效节能的变截面桩，专著主要介绍在竖向荷载作用下，混凝土扩盘桩桩周土体破坏机理及单桩承载力研究，创新性地提出了半截面桩研究方法，通过半截面桩小模型埋土试验、现场大比例试验、小模型原状土试验等不同的试验方法，突破了传统研究方法只能测试数据的局限性，实现了全过程观测土体破坏状态，真正确定了复杂截面桩的桩周土体破坏机理；并结合有限元模拟分析，提出了基于滑移线理论的单桩承载力计算方法，并全面探讨了影响混凝土扩盘桩破坏状态及单桩承载力的承力扩大盘参数和土层性状参数，包括盘悬挑径（盘径）、盘坡角（盘高度）、盘间距、盘数量、盘截面形式、土层厚度（盘位置）、土层性状、土层含水率等，定性并定量地提出了相关技术参数，为混凝土扩盘桩的设计应用提供了可靠的理论依据。

专著中介绍的研究理念和方法可以为其他复杂截面桩研究提供借鉴，关于混凝土扩盘桩的研究还在继续，由于水平荷载作用下的破坏机理以及群桩效应和沉降等方面的研究尚不完善，因此没有在本专著中介绍。由于作者水平有限，且时间仓促，故本专著的撰写中可能会存在一定的缺陷，望读者多多批评指正！

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 混凝土扩盘桩简介	1
1.1.1 混凝土扩盘桩的概念及特点	1
1.1.2 混凝土扩盘桩的分类	2
1.2 混凝土扩盘桩发展现状	4
1.2.1 混凝土扩盘桩的桩型及成桩工艺	4
1.2.2 混凝土扩盘桩的研究现状	8
1.3 本专著主要研究成果	11
第 2 章 混凝土扩盘桩桩周土体破坏机理的半截面桩研究方法	13
2.1 混凝土扩盘桩的半截面桩有限元分析方法	13
2.1.1 有限元分析模型建立	13
2.1.2 有限元模拟分析及数据提取	18
2.2 混凝土扩盘桩的半截面桩试验方法	19
2.2.1 传统试验方法的特点及缺陷	19
2.2.2 半截面桩试验方法的特点	21
2.2.3 半截面桩小模型埋土试验方法	23
2.2.4 半截面桩现场大比例试验方法	39
2.2.5 半截面桩小模型原状土试验方法	52
2.2.6 试验结果示例	63
2.2.7 总结	66
第 3 章 混凝土扩盘桩桩周土体破坏机理	67
3.1 抗压桩的破坏机理	67
3.1.1 抗压桩破坏机理的模拟分析	67
3.1.2 抗压桩破坏机理的试验研究	71
3.1.3 抗压桩的桩侧摩阻力变化区域	89

3.2 抗拔桩的破坏机理	101
3.2.1 抗拔桩破坏机理的模拟分析	101
3.2.2 抗拔桩破坏机理的试验研究	104
3.2.3 抗拔桩的桩侧摩阻力变化区域	115
第4章 混凝土扩盘桩盘参数对破坏机理的影响	126
4.1 盘悬挑径的影响	126
4.1.1 盘悬挑径对抗压桩破坏机理的影响	126
4.1.2 盘悬挑径对抗拔桩破坏机理的影响	143
4.2 盘坡角(盘高度)的影响	157
4.2.1 盘坡角对抗压桩破坏机理的影响	158
4.2.2 盘坡角对抗拔桩破坏机理的影响	173
4.3 盘间距的影响	185
4.3.1 盘间距对抗压桩破坏机理的影响	186
4.3.2 盘间距对抗拔桩破坏机理的影响	198
4.4 盘数量的影响	221
4.4.1 盘数量对抗压桩破坏机理的影响	221
4.4.2 盘数量对抗拔桩破坏机理的影响	232
4.5 盘截面形式的影响	253
4.5.1 盘截面形式对抗压桩破坏机理的影响	254
4.5.2 盘截面形式对抗拔桩破坏机理的影响	271
第5章 混凝土扩盘桩桩周土参数对破坏机理的影响	288
5.1 土层厚度的影响	288
5.1.1 土层厚度对抗压桩破坏机理的影响	288
5.1.2 土层厚度对抗拔桩破坏机理的影响	301
5.2 黏土含水率的影响	315
5.2.1 黏土含水率对抗压桩破坏机理的影响	315
5.2.2 黏土含水率对抗拔桩破坏机理的影响	329
5.3 细粉砂土含水率的影响	343
5.3.1 细粉砂土含水率对抗压桩破坏机理的影响	343
5.3.2 细粉砂土含水率对抗拔桩破坏机理的影响	360
5.3.3 相同含水率细粉砂土中抗压、抗拔结果对比分析	380

第 6 章 单桩极限承载力的计算模式及设计原则	382
6.1 抗压桩的计算模式	382
6.1.1 抗压单盘桩的计算模式	383
6.1.2 抗压双盘桩的计算模式	385
6.1.3 抗压多盘桩的计算模式	387
6.2 抗拔桩的计算模式	389
6.2.1 抗拔单盘桩的计算模式	389
6.2.2 抗拔双盘桩的计算模式	391
6.2.3 抗拔多盘桩的计算模式	393
6.2.4 抗拔冲切破坏计算模式	395
6.3 承力扩大盘高度的抗冲切验算	397
6.3.1 基本假定	397
6.3.2 冲切理论分析	397
6.4 混凝土扩盘桩的设计原则	399
第 7 章 混凝土扩盘桩后续相关研究的探讨	403
7.1 水平荷载作用下研究的探讨	403
7.2 关于沉降和群桩效应的说明	404
参考文献	405

第 1 章 概述

1.1 混凝土扩盘桩简介

1.1.1 混凝土扩盘桩的概念及特点

混凝土扩盘桩是近年来逐步应用于工程中的一种新型变截面灌注桩，开始于 20 世纪末。它是在普通混凝土直孔灌注桩的基础上，在桩身的适当位置通过专用设备形成承力扩大盘的新型桩，混凝土扩盘桩如图 1.1-1 所示。

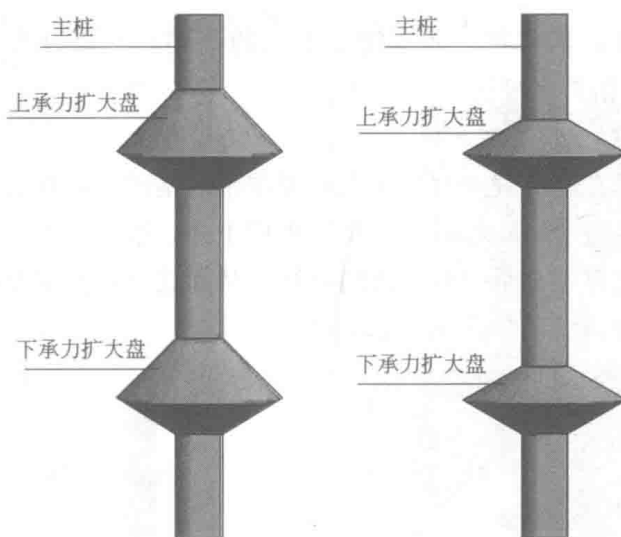


图 1.1-1 混凝土扩盘桩示意图

混凝土扩盘桩主要由主桩、承力扩大盘两个部分组成，而影响其承载力的主要因素有：主桩径的大小、承力扩大盘悬挑径的大小、承力扩大盘的坡角（盘高度）、承力扩大盘的间距、承力扩大盘的数量、承力扩大盘的截面形式、盘所在土层及相邻土层厚度（盘位置）、土层性状等因素。由于桩身构造的变化，使得该型桩的受力状态发生了较大的变化。作为一种新型变截面灌注桩，具有以下

特点:

1) 混凝土扩盘桩承载力高, 由于加设了承力扩大盘, 大大提高了单桩的承载能力, 尤其作为抗拔桩和抗倾覆桩, 承载效果更好。通过静载试验表明, 与普通混凝土直孔灌注桩相比, 混凝土扩盘桩的竖向承载力可以大大提高。

2) 设计灵活, 混凝土扩盘桩可以根据持力层的位置、土层情况、承载力需求等, 灵活设置承力扩大盘的位置及参数, 有效地利用地基的承载力。

3) 沉降量小且均匀, 由于实际工程现场性状相同的土层可能不在一个标高上, 而混凝土扩盘桩可以将承力扩大盘设置在性状相同的土层上, 可以保证桩具有相同的沉降量, 且承力扩大盘增加了桩的端承作用, 因此大大降低了沉降量, 尤其对于抗拔桩, 对位移的控制更加有效。

4) 经济社会效果好, 在荷载一定的情况下, 混凝土扩盘桩相比普通混凝土直孔灌注桩节省钢筋 30%, 缩短工期 30% 左右, 总体节省成本可达 20%。而且新型成桩机具改善了现场的作业环境状态, 达到了高效、节能、环保的效果。

1.1.2 混凝土扩盘桩的分类

混凝土扩盘桩根据成桩、成盘施工工艺的不同, 主要分为三类: 挤扩多盘桩、旋扩多盘桩、钻扩多盘桩。

1. 挤扩多盘桩

挤扩多盘桩是在原有普通混凝土直孔灌注桩的基础上, 在施工过程中通过专门的挤扩设备, 在桩身特定部位连续挤压桩周土体, 形成承力扩大盘空腔, 再灌注混凝土, 形成具有多个承力扩大盘的桩体, 从而达到提高单桩极限承载力的目的。挤扩多盘桩成盘设备如图 1.1-2 所示。

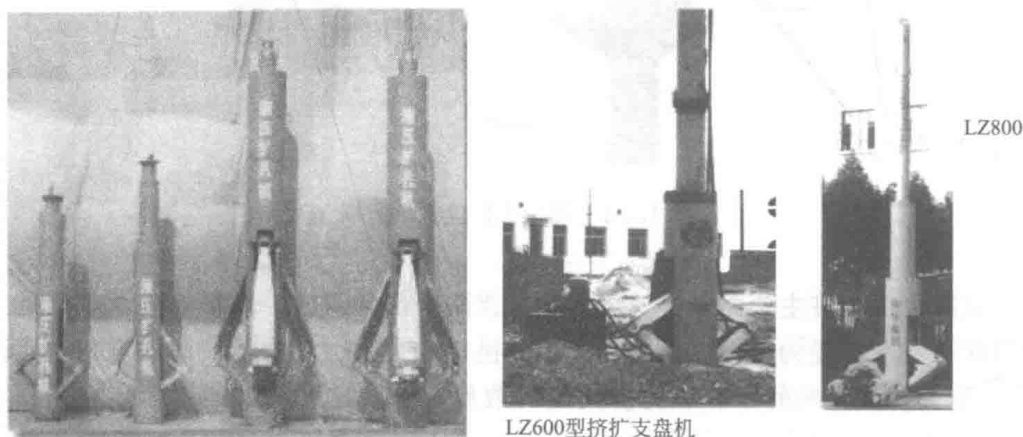


图 1.1-2 挤扩多盘桩成盘设备

挤扩多盘桩克服了以往普通混凝土直孔灌注桩只能由桩端和桩身侧摩阻力来抵抗竖向荷载和水平荷载的不足,通过增设挤扩而形成的承力扩大盘,提高了桩体的抗压、抗拔以及抗倾覆承载力。挤扩多盘桩可以充分地利用工程地质条件,将承力扩大盘设置在坚硬的土层当中,以达到较好的承力效果;同时,挤扩设备通过挤压的方式,提高了盘周土体的密实度,使桩周土的强度也得到了提升。

然而,随着挤扩多盘桩逐步应用于诸多工程当中,一些问题和缺陷也逐渐被人们发现。例如,由于挤扩设备的设计和实际施工操作等局限性,如果土层有硬物或孤石等存在时,设备会卡住,或造成最终形成的承力扩大盘左右不对称(见图 1.1-3),施工效率和成盘质量很难保证;另外,在混凝土扩盘桩的成桩过程中,由于成孔、成盘和清土是由不同的设备完成,施工中需反复更换设备,不利于施工现场管理和施工进度控制。

2. 旋扩多盘桩

旋扩多盘桩是在挤扩多盘桩的基础上,通过改进成盘设备,将原来的双支挤扩设备变成三支,增加施工设备的稳定性,而且在挤扩臂上增加了旋切装置,可以在挤扩的同时进行旋切,提高了形成盘腔的效率和质量,成盘效果比挤扩设备改进了许多。旋扩多盘桩成盘设备如图 1.1-4 所示。

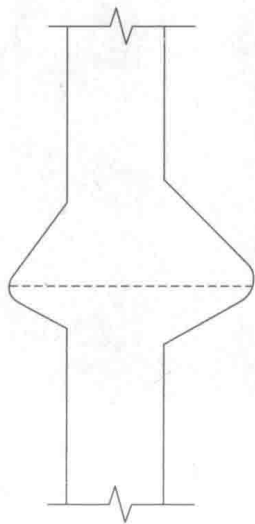


图 1.1-3 承力扩大盘左右不对称

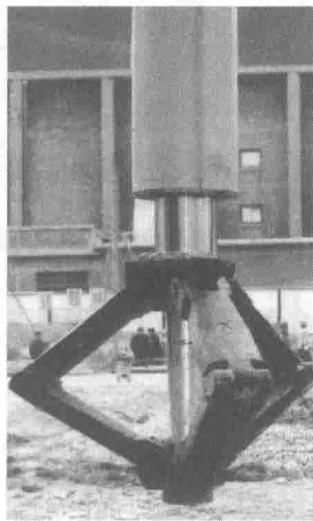


图 1.1-4 旋扩多盘桩成盘设备

这种新型的施工方法和设备与传统的挤扩成盘方式不同,是采用边旋切边挤扩的设计理念。在施工过程中,三个旋扩臂可以一边旋转一边向外张开,一次旋扩出圆锥形盘腔。这种旋扩方法克服了传统挤扩方法挤扩次数多、成孔效果差、

效率低等诸多缺陷，是目前应用较为广泛的成盘方式。但这种成盘方式仍然是先成孔，后成盘，多种机具共同工作，成盘时设备悬空作业，因此仍然存在承力扩大盘左右不对称，需要反复更换设备、施工过程复杂、硬质地层施工困难、施工工期长等缺点。

3. 钻扩多盘桩

钻扩多盘桩是在现有挤扩、旋扩成盘工艺的基础上，完全改变原有的工艺过程，采用正反循环结合的施工工艺，边成孔边成盘，通过专用的钻扩清一体机，将钻孔、扩盘、清孔这三个基本工序衔接在一起，形成钻、扩、清一体化，使三者既能独立运行，又能交替运行。钻机正循环作业成孔，反循环作业成盘，使成桩效率大幅提高。同时，配合专门设计的盘腔检测仪，保证成盘质量达到要求后，浇筑混凝土。这种方法改善了施工环境，缩短了施工工期，降低了施工成本，使成孔、成盘的质量得到显著地提高，是目前较为理想的混凝土扩盘桩施工工艺。钻扩多盘桩的成桩机具称为钻扩清一体机，其主要设备如图 1.1-5 所示，施工的钻扩多盘桩实桩如图 1.1-6 所示。

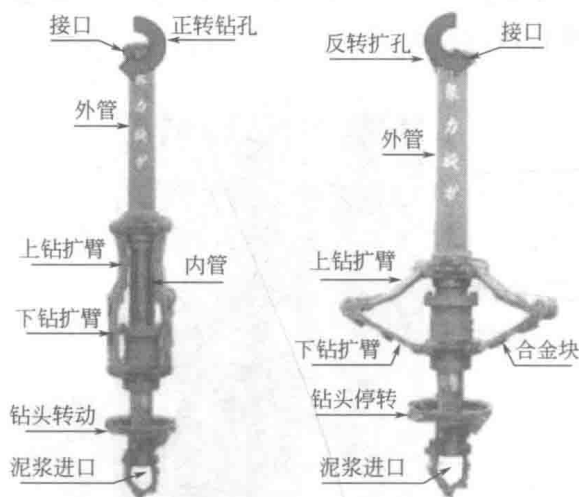


图 1.1-5 钻扩多盘桩成孔成盘设备示意图



图 1.1-6 钻扩多盘桩实桩图

1.2 混凝土扩盘桩发展现状

1.2.1 混凝土扩盘桩的桩型及成桩工艺

随着社会的进步和经济的发展，高层、超高层建筑层出不穷，人们努力寻找

各种方法以提高直孔灌注桩的承载力。最初,随着成桩设备的改进,可以通过制作更大桩长和桩径的灌注桩来提高桩侧摩阻力和端承力,但这些方法大大地增加了材料的消耗和施工成本,桩身过长也会使其长细比增大,削弱了桩体本身的承载能力。因此,人们在增大桩基端承力这一想法上提出了许多新型桩,比如扩底桩、夯扩桩和桩底注浆等改良桩型;为了进一步提高桩基端承力,创新性地提出了挤扩支盘桩,并逐渐演化发展出挤扩多盘桩、旋扩多盘桩和钻扩多盘桩等桩型。

扩底桩和普通直孔灌注桩的施工方法相似,只是在钻机成孔后增加了一道扩孔工序,具体施工控制步骤为:成孔→扩孔→清孔→成桩→成桩检验。当钻机成孔到达设计标高位置后,将钻头提起,更换扩孔钻头并放置于孔底位置,开始扩孔作业,随后进行清孔、浇筑混凝土等其他工序。扩底桩实桩如图 1.2-1 所示。扩底桩在一定程度上使桩的极限承载能力得到了改善。

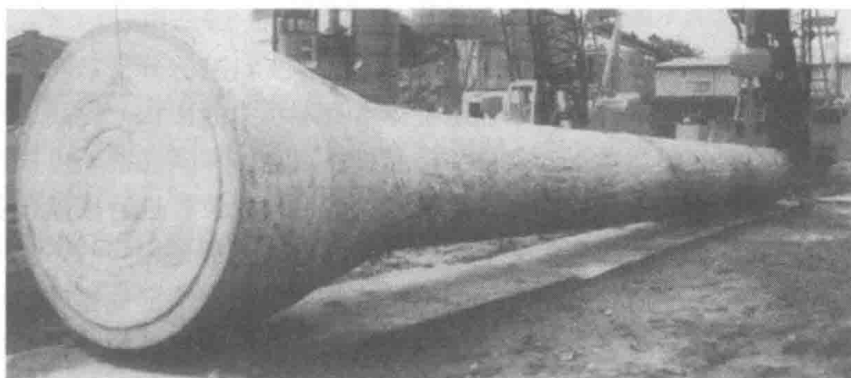


图 1.2-1 扩底桩实桩图

仅在桩端增加扩大部分,对承载力的提高毕竟有限,于是人们开始在桩身的变截面上开拓思路,因此有了挤扩支盘桩。挤扩支盘桩是变截面桩的一种形式,由主桩、若干对分支和若干承力扩大盘组成,其结构形式如图 1.2-2 所示。承力扩大盘和分支的设置增加了桩体的端承力,同时也增加了长桩的侧向支撑点。挤扩支盘桩主桩部分的施工工艺与普通直孔灌注桩完全相同,只是在形成承力扩大盘和分支时,是通过专门的挤扩机具在桩孔内不同位置挤扩出近似于圆锥盘的扩大腔和十字分支,然后进行浇筑混凝土等其他工序。分支、承力扩大盘周围的土体经过挤压后,土体的密实度可增加,达到了提高承载力的目的。挤扩支盘桩实桩如图 1.2-3 所示。

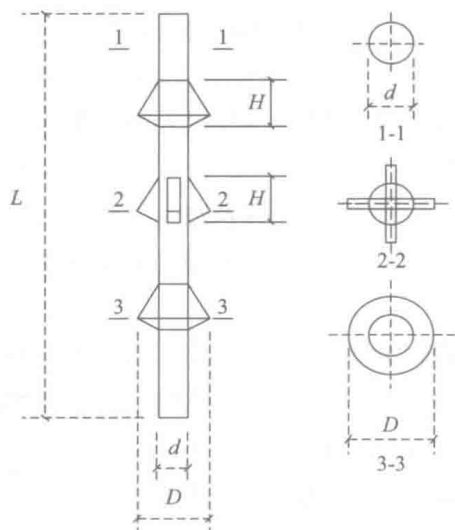


图 1.2-2 挤扩支盘桩桩身示意图



图 1.2-3 挤扩支盘桩实桩图

挤扩多盘桩和旋扩多盘桩在桩型上摒弃了挤扩支盘桩的分支,在分支位置处同样增设了承力扩大盘,进一步增加了桩体本身端承力的面积,提高了单桩承载能力。从承力扩大盘的数量上,又分为单盘桩、双盘桩和多盘桩,可根据设计的要求和不同工程地质条件,选择承力扩大盘的设置位置进行成盘作业。在施工工艺方面,挤扩多盘桩和旋扩多盘桩的成孔成盘工艺都是相同的,先进行主桩部分的钻孔,钻孔完毕后,应用专门的挤扩或旋扩设备在特定位置施作承力扩大盘腔,然后进行后续作业,具体施工工序为:测量放线确定桩位→挖桩坑设置钢板护筒→桩机就位→主桩钻孔至设计深度→检查孔深和泥浆密度→将挤扩装置或旋扩装置吊入已钻孔内→按设计位置挤扩或旋扩承力扩大盘腔→测孔深、清孔→安装并下放钢筋笼→下放导管并进行二次清孔→检查孔深→灌注混凝土→拆除护身并清理桩头。施工流程示意图如图 1.2-4 所示。

钻扩多盘桩在桩型上与挤扩多盘桩和旋扩多盘桩基本相似,但在施工工艺上是完全不同的。挤扩支盘桩、挤扩多盘桩和旋扩多盘桩的主桩部分施工和分支、承力扩大盘部分施工是独立且分开进行的,并增加清孔程序,而且成支或成盘时都是将扩径设备悬吊在半空中进行作业,成盘的稳定性和承力扩大盘的几何形状不易得到保证。而钻扩多盘桩在施工时,可以实现主桩钻孔、承力扩大盘扩径和清孔三者同时进行,由于成孔和成盘同时进行,因此,在承力扩大盘位置进行扩盘时,钻机的钻头能够顶在孔底,而不是处于悬空状态,这大大地提高了成桩的效果和稳定性。具体施工工艺流程为:测量放线确定桩位→挖桩坑设置钢板护筒→钻扩清一体机就位→正循环钻孔、清孔→反循环扩盘、清孔→正循环钻孔、清孔

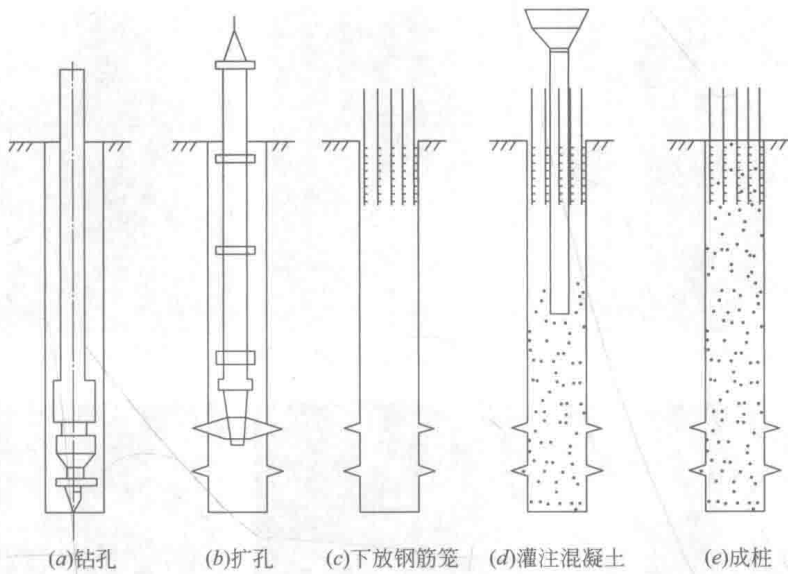


图 1.2-4 挤扩多盘桩和旋扩多盘桩施工流程示意图

→反循环进行第二次扩盘、清孔作业→测孔深、盘径→安装并下放钢筋笼→下放导管并进行二次清孔→检查孔深→灌注混凝土→拆除护身并清理桩头。施工流程示意图如图 1.2-5 所示，施工过程模拟图如图 1.2-6 所示（图片来自北京荣创岩土工程股份有限公司）。

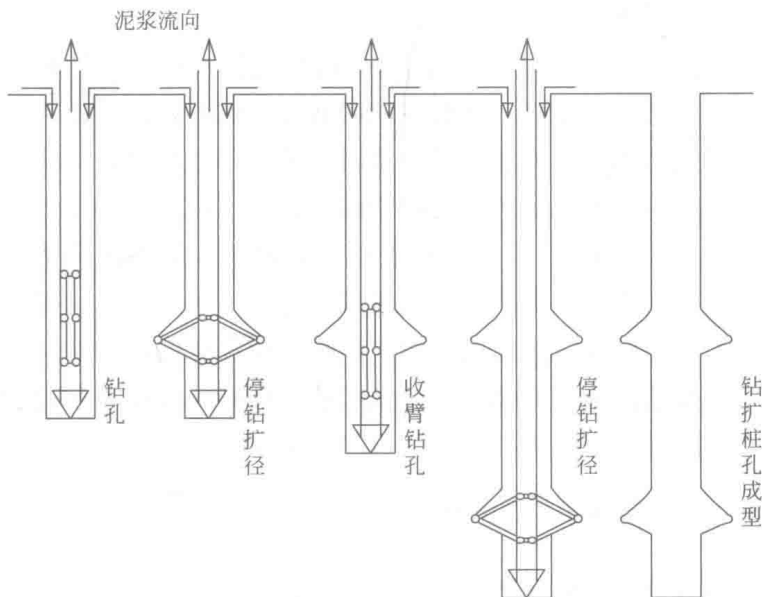


图 1.2-5 钻扩多盘桩施工流程示意图

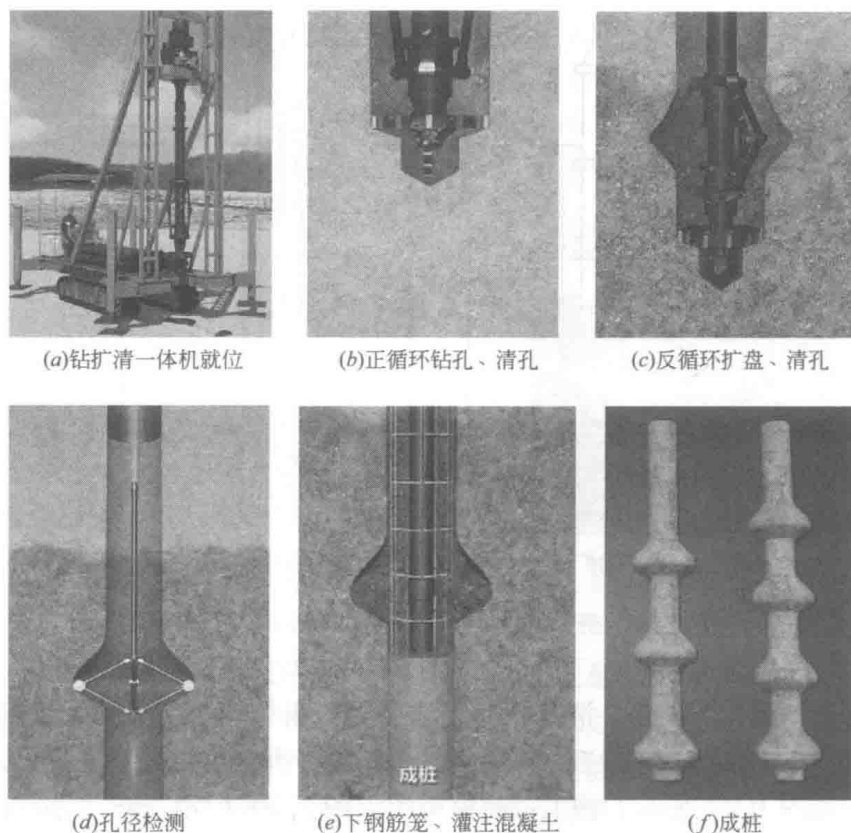


图 1.2-6 钻扩多盘桩施工过程模拟图

从图 1.2-5 和图 1.2-6 可以看出, 钻扩机具的扩径设备与钻机的钻杆是连接在一起的, 在正常钻孔作业时, 钻扩臂向内收拢, 此时钻扩臂能与钻头一起向下钻孔; 当钻扩臂到达承力扩大盘设计位置时, 钻头停止钻动, 钻头顶在孔底 (使钻头和钻杆上部两点形成稳定的旋转中轴线, 提高了成盘的稳定性, 克服了设备晃动及旋转易偏心的缺陷), 此时附着于钻杆上的钻扩臂伴随着钻杆反钻开始向外张开, 旋转切削土体, 形成承力扩大盘腔, 完成一个盘之后, 钻扩臂收回, 钻头继续向下钻孔。在钻孔、扩盘的过程中始终采用泥浆倒流的方式以实现清孔目的, 同时泥浆护壁还能防止塌孔。这种钻扩清一体的施工设备与方法具有操作简便、效率高、成孔质量好、废弃泥浆排放少、适用土层广泛等优点。

1.2.2 混凝土扩盘桩的研究现状

1. 混凝土扩盘桩理论研究现状

目前, 对桩基传力机理的理论研究方法大体可以归纳为三种, 即荷载传递

法、弹性理论法和有限单元法。

1) 荷载传递法

荷载传递法是由 Seed 和 Reese 在 20 世纪 50 年代首次提出计算单桩荷载传递的方法。其基本思想是将桩体沿长度方向离散成若干个弹性单元体, 各个单元体与土体之间的侧摩阻力通过弹簧来描述, 可为线性或非线性, 桩与土之间的侧摩阻力 q_s 与位移 s 的关系可以用弹簧力与位移的关系代替; 桩端阻力 q_p 与桩端沉降 s_p 的关系也可以等效为桩端弹性单元体与土间的弹簧力与位移的关系。经过一些学者的研究与拓展, 荷载传递法又可以分为位移协调法和解析法两种计算方法。

荷载传递法提出以来得到了广泛的应用, 但也有一定的缺点和局限性, 比如: (1) 土体反力的大小与桩身的挠度 y 没有直接关系, 故只适用于刚性短桩, 而不适用于深基础的长桩; (2) 没有考虑桩体材料和土体的连续性。沿桩身任意一点的位移只与该点的侧摩阻力有关, 而与桩身其他点的应力无关。在实际应用中特别是群桩分析时, 还需借助其他连续法的理论。

2) 弹性理论法

弹性理论法的基本思路是将桩体本身看作线弹性材料, 而把土体理想化为一个均质、各向同性的弹性半无限体, 土的弹性模量 E_0 和泊松比 μ 为定值, 或沿地基深度按某种规律变化, 通过 Mindlin 公式推导出土体的柔度矩阵后, 可以求解桩土边界位移的平衡方程, 最终可得出桩体位移、桩侧摩阻力等参数。

随后, 学者们在弹性理论法的基础上, 对非均质土、成层土等地基情况和端承桩、桩土间有相对滑移等情况进行了深入探讨。

弹性理论法的缺点是: (1) 实际工程中地质条件比较复杂, 很难精确定 E_0 、 μ 等参数, 当土体中存在淤泥等其他土质时, 淤泥下面的桩土位移、转角、应力等很难计算, 因此工程中主要运用此方法做初步计算。(2) 运用 Mindlin 公式时通常会认定荷载作用于一个理想的、均质的各向同性半无限体内, 这往往会忽略因桩体的存在而产生的影响。

3) 有限单元法

随着计算机技术的发展, 人们逐渐将计算方法的注意点转移到计算机上。有限单元法是目前工程领域里适用性最强的数值模拟方法, 在当今土木工程分析中应用也最为广泛。该方法起源于 20 世纪 50 年代, 从最开始的杆件问题扩展到弹性力学问题和弹塑性力学问题, 从二维平面问题扩展到三维空间问题, 从固体力学问题拓展到热力学、流体力学和电磁学问题等。有限单元法可以考虑到多种因素, 如土体的非线性、蠕变、固结效应和动力效应等。其基本思想是: 将连续的桩体和土体离散为有限个单元, 并在每一个单元中设置有限个节点, 各个单元仅