

螺旋桩基础破坏机理 与承载力设计方法

董天文 张亚军 梁 力 著



東北大學出版社
Northeastern University Press

螺旋桩基础破坏机理与承载力设计方法

董天文 张亚军 梁 力 著

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 董天文 张亚军 梁 力 2011

图书在版编目 (CIP) 数据

螺旋桩基础破坏机理与承载力设计方法 / 董天文, 张亚军, 梁力著. —沈阳:
东北大学出版社, 2011. 4

ISBN 978-7-81102-919-2

I. ①螺… II. ①董… ②张… ③梁… III. ①旋转喷射桩—破坏机理
②旋转喷射桩—桩承载力—设计 IV. ①TU753.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 055108 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024-83687331(市场部) 83680267(社务室)

传真: 024-83680180(市场部) 83680265(社务室)

E-mail: neuph@neupress.com

http: //www. neupress. com

印 刷 者: 沈阳市北陵印刷厂有限公司

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm × 228mm

印 张: 9.75

字 数: 175 千字

出版时间: 2011 年 4 月第 1 版

印刷时间: 2011 年 4 月第 1 次印刷

责任编辑: 孙 锋 潘佳宁

封面设计: 唐敏智

责任校对: 刘 璇

责任出版: 唐敏智

ISBN 978-7-81102-919-2

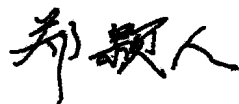
定 价: 36.00 元

序

桩及桩土复合体被广泛地应用于基础工程、地基处理工程、边坡工程，是岩土工程的重要组成部分，一直以来都是岩土科技工作者的重要研究方向。随着桩基施工方法和设备的发展，异型桩、超长桩、大直径桩已经在基本建设中得到越来越多的应用，但承载机理的研究工作往往只是从试验和实用角度出发，缺少系统性、理论性的研究，其潜在的危害是不言而喻的。

螺旋桩锚因存在三维空间叶片，桩土相互作用影响因素多，其承载机理远远复杂于直型桩。作者近年来开展了螺旋桩锚基础的理论、试验和有限元极限分析的研究工作，明确了叶片距宽比、首层叶片埋置深度和基桩应力重叠区等承载影响因素，对承受竖向压力、竖向抗拔力、斜向压力和斜向拉力的螺旋桩基础单桩、群桩进行了理论和试验研究，首次系统地解决了桩型设计、基桩与群桩的破坏模式、单桩与群桩极限承载力、群桩基础沉降等设计理论方面的问题。同时，创造性地建立了群桩基础的强度折减法有限元极限分析理论和极限荷载判定条件，并首次应用于群桩基础的极限荷载判定和分析，为桩基础的极限荷载确定提供了一种新方法。

本书作者根据螺旋桩锚基础承载机理的系统性研究工作，著就《螺旋桩基础破坏机理与承载力设计方法》一书，丰富了桩基础的设计理论，对其他异型桩基础的研究工作具有一定的借鉴意义。



中国工程院院士

2011年1月11日

前 言

螺旋桩是一种桩体表面附有螺旋形叶片的桩基，其中发挥抗拔功能的桩基也称为螺旋锚。其施工工法有预制拧入式、现浇式，桩的材料可以分为现浇混凝土、铁管混凝土、钢结构和玻璃钢四种形式。这种桩基础类型一般具有高承载、施工功效高、环保等特点，已经广泛地应用于输电工程、水利工程、建筑工程等领域的基础工程。因荷载施加不同、叶片分布特征的不同、桩周材料属性的差异导致螺旋桩基础的承载机理不同。

对于变截面、异形的螺旋桩而言，无论是竖向荷载，还是斜向荷载，桩体的力学性质、桩土系统的力学响应、外荷载的倾角以及荷载耦合作用等因素导致了螺旋桩基础的荷载传递机理和破坏模式更为复杂。当前，螺旋桩基础的竖向荷载、斜向荷载设计理论缺少系统性，荷载传递机理、破坏模式、极限承载力计算、群桩沉降计算等诸多方面尚不能满足工程应用要求。

作者在总结前人研究成果的基础上，根据桩侧叶片分布形式，将该种桩基定义为连续叶片式螺旋桩和分层叶片式螺旋桩，以桩型参数（叶片距宽比）为主线，研究了螺旋桩基础的桩土荷载传递规律，提出了竖向、斜向荷载螺旋桩基础的破坏模式。分别建立了竖向承压螺旋桩的桩土系统力学模型与荷载位移关系函数，推导了荷载位移函数解；提出了竖向荷载、斜向荷载的单桩和群桩极限承载力计算方法；建立了斜向荷载承压单桩、抗拔单桩以及抗拔群桩的极限荷载设计理论，建议了斜向荷载承压、抗拔螺旋桩基础极限荷载计算的判定条件；建立了地基内部双集中力的地基应力影响界限深度和螺旋桩基础沉降计算方法。在数值计算方面，建立了螺旋桩基础强度折减法极限分析理论，提出了极限荷载判定条件，开展了在竖向荷载、斜向荷载作用下，工程群桩基础的三维有限元弹塑性分析。这些研究成果与工程桩试验结果拟合较好，对工程桩设计有一定的指导意义。同时，这些方法对于异形桩基础研究工作也有借鉴作用。

诚然，本书所述方法或结论已经在工程桩试验和应用中得到验证，但是受到螺旋桩的桩土系统响应和荷载施加的复杂性影响，尚须在工程应用和研究中进一步完善，也希望同人对本书提出批评指正，共同完善螺旋桩基础的设计理论。

本书内容包括了作者近年来的研究成果，得到了东北大学、解放军重庆后勤工程学院、辽宁省电力勘测设计研究院、中冶沈阳勘察研究总院等单位的领导和同志们的大力支持和帮助。由衷感谢东北大学资源与土木工程学院梁力教授、王明恕教授，重庆后勤工程学院郑颖人院士对作者研究工作的指导和帮助。

著 者

2010年12月7日

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 桩基础的发展历史与桩基础分类	1
1.1.1 桩基础的发展历史	1
1.1.2 桩基础的分类	2
1.2 螺旋桩基础的发展与研究现状	3
1.2.1 螺旋桩基础的发展现状	3
1.2.2 螺旋桩基础的理论研究现状	5
第2章 竖向承压螺旋桩破坏机理与极限荷载计算	12
2.1 极限荷载作用下竖向承压螺旋桩破坏模式	12
2.2 螺距设计方法	13
2.3 螺旋桩基础竖向承压极限承载力计算	15
2.3.1 ds 微分周长的叶片端阻力计算	15
2.3.2 计算单级叶片端阻力	19
2.3.3 计算单桩极限承载力	20
2.3.4 施工扭矩判断承载力	21
2.3.5 螺旋群桩的极限承载力计算	21
第3章 竖向承压螺旋桩基础荷载位移函数解	23
3.1 连续叶片式螺旋桩的荷载位移函数解	23
3.1.1 连续叶片式螺旋桩的桩土体系的力学模型	23
3.1.2 连续叶片式螺旋桩轴向变形微分方程	24
3.1.3 连续叶片式螺旋桩基础的荷载位移解	25

3.2 分层叶片式螺旋桩的荷载位移函数解	29
3.2.1 分层叶片式螺旋桩的桩土体系的力学模型	29
3.2.2 分层叶片式螺旋桩轴向变形微分方程	31
3.2.3 分层叶片式螺旋桩基础荷载位移解	31
3.2.4 分层叶片式螺旋桩的桩顶荷载位移函数解	42
3.3 螺旋桩基础竖向承压荷载位移关系计算与分析	42
第4章 竖向抗拔螺旋桩破坏机理与极限荷载计算	46
4.1 深基础塑性滑裂区的界限埋深	46
4.2 竖向抗拔破坏模式与极限承载力计算方法	48
4.2.1 桩型参数问题	49
4.2.2 极限承载力计算	49
第5章 螺旋群桩基础的沉降计算	52
5.1 半无限弹性体内部两集中力相互影响深度解	52
5.2 等深双集中力作用地基相互影响极限深度讨论	56
5.3 螺旋群桩基础的沉降计算方法	59
第6章 水平荷载螺旋桩破坏机理与极限荷载计算	61
6.1 直型桩水平承载力介绍	61
6.1.1 极限地基反力法	61
6.1.2 弹性地基反力法	63
6.2 水平荷载作用螺旋桩破坏机理	64
6.3 水平荷载螺旋桩反弯点计算理论	65
6.3.1 水平荷载螺旋桩反弯点分析	65
6.3.2 螺旋桩反弯点试验分析	68
6.4 单桩水平承载力设计	70
6.5 群桩水平方向极限承载力计算方法	70
第7章 斜向荷载承压螺旋桩极限荷载计算	71
7.1 螺旋桩叶片几何和力学关系	71

7.1.1 螺旋叶片几何关系	71
7.1.2 螺旋叶片面积微元受力分析	74
7.2 斜向荷载作用下螺旋桩承载力统一解	75
7.2.1 单螺距叶片受力分析	75
7.2.2 桩体受力分析	78
7.2.3 斜向荷载作用下螺旋桩基础承载力统一解	79
7.3 斜向荷载作用下桩体受力分析与承载力计算	81
7.4 斜向荷载承压螺旋桩破坏模式与极限荷载计算	82
7.4.1 极限斜向荷载承压螺旋桩基础破坏模式	83
7.4.2 斜向荷载承压螺旋桩的极限荷载计算	84
第8章 斜向荷载抗拔螺旋桩极限荷载计算	87
8.1 斜向荷载抗拔螺旋桩破坏模式与极限荷载计算	87
8.2 斜向荷载作用下抗拔螺旋桩极限承载力计算	88
8.2.1 极限条件水平荷载分量计算方法	88
8.2.2 极限条件竖向荷载分量计算方法	89
8.2.3 斜向荷载抗拔螺旋单桩的极限承载力计算	89
8.2.4 斜向荷载抗拔螺旋群桩的极限承载力计算	89
第9章 螺旋桩基础的工程应用与分析	95
9.1 地质条件与桩型参数介绍	95
9.2 竖向荷载承压螺旋桩基础工程应用与分析	97
9.2.1 螺旋群桩承载性状分析	97
9.2.2 群桩基础的极限承载力计算	102
9.3 竖向荷载抗拔螺旋桩基础工程应用与分析	103
9.3.1 竖向抗拔螺旋桩基础试验分析	103
9.3.2 单桩抗拔极限承载力计算	109
9.4 螺旋桩基础竖向沉降量的计算与分析	110
9.4.1 螺旋桩基础的竖向沉降量计算	110
9.4.2 相互影响极限深度和地基应力解的讨论	111
9.5 斜向荷载抗拔螺旋桩基础工程应用与分析	111

9.5.1	抗拔螺旋群桩承载性状分析	111
9.5.2	斜向荷载抗拔原型群桩极限荷载计算	116
第10章	螺旋群桩弹塑性三维有限元极限分析	118
10.1	群桩弹塑性三维有限元强度折减法极限分析	118
10.1.1	群桩基础强度折减法	119
10.1.2	群桩基础非线性有限元极限分析	122
10.1.3	算例与分析	123
10.2	斜向荷载原型群桩有限元计算与分析	127
10.2.1	螺旋桩群桩的桩型参数和计算边界	128
10.2.2	螺旋桩和地基的材料参数	128
10.2.3	算例与分析	129
参考文献		137

第1章 绪 论

桩基础是一种比较古老的基础形式，因其承载力高、沉降速率慢、沉降量小等特点，工程应用比较广泛。目前，桩基础向大直径、超长、异形结构、复合和高强材料的方向发展。同时，工厂化生产、机械化施工水平较高的预制桩基础和对环境污染影响小的施工方法已成为一种发展趋势。

1.1 桩基础的发展历史与桩基础分类

1.1.1 桩基础的发展历史

作为基础工程的一员，桩基础发展过程反映了社会经济、科技发展水平以及人文、地理环境的特点。

我国是使用桩基础较早的国家之一，1973年在浙江余姚发掘的河姆渡遗址距今有6000~7000年，是国内现有最早木结构的干栏建筑，一期发掘出25排以上排列有规则的圆形或矩形木桩，木桩打入地下，高出地面80~100cm，其上布置梁和底板，形成架空建筑。

在汉朝木桩已用于桥梁架设，到唐朝和宋朝，技术已比较成熟。据《蒲州府志》《永济县志》记载，修建于春秋时期（公元前541年）的蒲津桥，在公元724年加固和修建，“两岸各铸铁牛四尊，以维河桥。牛下有柱连腹，入地丈余。牛旁各有一铁人，并有铁山四座，前后柱36根”。1991年考古发掘出铁牛四尊、铁人四尊、铁山两座、七星柱一组（共7根）、古河堤暴露地面约100m以及明朝正德年间碑一通等文物。上海市的龙华塔、山西太原市晋祠圣母殿都是现存的北宋年间修建的桩基建筑物。

近代，随着现代工业基础的建立，国外桩基础型式发展较快。1897年，A. A. Raymond开发了混凝土现浇桩；1903年，R. J. Beale开发了混凝土钢管桩；1939年，瑞典首次使用预应力钢筋混凝土长桩；1949年，英国使用预应力管桩；美国雷蒙德混凝土桩公司最早用离心机生产预应力混凝土管桩。钢桩方面，1900

年, Nebraska 高速公路桥使用工字形结构钢的桩基, 避免基础受浮冰冲击和水流冲刷。1908 年, 轧制钢材——H 型钢投入工程应用。20 世纪 60—70 年代, 我国也研制生产出大型的预应力钢筋混凝土管桩, 并将其应用于桥梁、港口工程中。

近年来, 随着高层、超高层建筑以及大型桥梁的建设, 出现了超长、大直径的桩基型式。南京长江二桥主塔桩基直径 3 m, 桩长 150 m。苏通长江公路大桥主塔桩基础最大直径 2.8 m, 桩长 116 m。杭州湾跨海大桥的桩基础最大直径 1.6 m, 桩长 88 m。上海金茂大厦建筑高度 420.5 m, 基坑深度 19.6 m, 其下为直径 0.914 m、长 84 m 的钢管混凝土桩。

与此同时, 桩基础也在向小直径、组合型桩的方向发展, 如起源于欧洲用于古建筑修复的微型桩 (Micropile), 一般桩直径在 0.1~0.25 m, 单节桩长达到 20 m, 总桩长可达到 60 m, 由其组成的群桩称为树根桩 (Root Pile) 或网状树根桩 (Reticulated Roots Pile)。上海某小区使用的树根方形桩截面边长 0.2 m (桩长 16 m)、截面边长 0.25 m (桩长 18 m)。

从环境保护的角度出发, 桩基础施工工艺向低公害的方向发展。较为明显的是打入式桩基础正逐步退出城镇建筑市场, 而静压桩和贝诺特灌注桩等施工噪声较低、少排放或零排放的桩型和施工方法取而代之。

在提高单桩承载力和桩身强度方面, 桩基础向几何异形、材料高强和复合材料方向发展, 如挤扩支盘桩、锥型桩、PC (PHC) 管桩、无砂混凝土桩、玻璃钢混凝土桩等。

1.1.2 桩基础的分类

桩基础分类一般按照桩的几何形式, 桩体材料, 应用领域, 施工方法, 桩的荷载传递机理等方面分类, 工程上也常采用组合方法命名新桩型。

(1) 按几何形式分类

一种按照桩体的几何形式分类, 如以方桩、螺旋桩、楔形桩、H 形桩等; 一种按照桩体几何尺寸——桩长和截面尺寸分类, 如长桩、短桩、微型桩 (超短桩) 和大直径桩、小直径桩等。

(2) 按桩体材料分类

根据桩体材料的不同, 将桩分为木桩、混凝土桩、钢桩、钢筋混凝土桩等。其中钢筋混凝土桩又分为非预应力钢筋混凝土桩 (RC 桩)、预应力钢筋混凝土桩 (PC 桩) 和预应力高强钢筋混凝土桩 (PHC 桩)。

(3) 按桩的应用领域分类

建筑工程、水利工程、交通工程中桩基础的应用非常广泛,如建筑工程的基础桩、深基坑的护坡桩等。

(4) 按桩的施工方法分类

桩的施工方法现已超过 300 种,主要可以根据植桩或成孔的工艺将桩分为非排土桩、部分排土桩和排土桩三大类。常见的排土桩如人工挖孔桩、机械钻孔桩,部分排土桩如夯扩桩,非排土桩如打入桩、静压桩等。

(5) 按照桩的荷载传递机理分类

竖向荷载作用下的桩基础可分为摩擦桩和端承桩两大类,又因为端阻力与摩阻力的比例不同细分为摩擦型、端承摩擦型、摩擦端承型和端承型。

抗水平荷载桩:桩基础承受水平荷载作用时,桩身要承受弯矩,其整体稳定性则靠桩侧土的被动土压力、水平支撑和拉锚来平衡。港口码头工程用的板桩,基坑的支护桩等都属于该类桩,主要承受作用施加于桩身的水平荷载。

1.2 螺旋桩基础的发展与研究现状

1.2.1 螺旋桩基础的发展现状

1833 年,英国建筑工人 Alexander Mitchell 用抗拔螺旋桩(亦称为螺旋锚)作为英格兰附近岛屿上灯塔的基础。

在过去的半个世纪里,螺旋锚基础被广泛地应用于输电杆塔基础、航空导向结构物基础、输送管道支承、建筑基础、基础加固、对环境敏感区域的街灯和人行道等方面。国外对于螺旋桩基础的研究开展的较早,前苏联 1979 年颁布的建筑法规,规定了螺旋桩基础的设计标准。欧洲标准则将螺旋桩列入特殊地基桩型选用范围。

日本的 Fukuei Kosan 公司在 1995 年发明了一种全预制钢纤维混凝土螺旋桩 S. P-300 (Spiral Concrete Pile Type),由于其施工占地面积小 ($3.6\text{ m} \times 2\text{ m}$),无噪声,施工速度快,微排土,无需处理废土,不污染环境和地下水等,在使用中取得了较好的环境效益。

日本 JFE 钢铁公司 1998 年 11 月获得交通运输部批准生产用于高层建筑基础工程的螺旋钢管桩。管径 (D) $0.3185 \sim 1.2\text{ m}$,叶片直径 $1.5D \sim 2D$,叶片厚度 $20 \sim 50\text{ mm}$,2003 年的年产量 10000 t,2008 年预计年产量为 50000 t。

美国生产的螺旋桩品种较多,如:A B Chance 公司生产的抗拔螺旋锚,其产品已形成系列化;钻孔混凝土灌注螺旋桩,桩径在 0.3 ~ 0.8 m,桩长达到 30 m;主要使用在丹佛市的钢结构方形杆螺旋桩(研制于 1986 年),叶片直径 0.152 ~ 0.356 m,桩长 2 ~ 46 m。

比利时及其他欧洲国家的钻孔混凝土灌注螺旋桩的使用均有相当的市场份额。比利时的高速铁路项目 CTRL (Channel Tunnel Rail Link) 使用了钻孔混凝土灌注螺旋桩,桩长 5.3 ~ 9.25 m,桩体直径(内径) 0.51 m,叶片直径(外径) 0.71 m。

澳大利亚 Instant Foundation 公司在 1992 年发明了一种用于基础工程的钢管螺旋灌注桩。

陈日宏等人于 1999 年 8 月 24 日申请了混凝土预制螺旋桩的专利。

孙鸣在 2001 年发表了《钢筋混凝土螺旋桩可行性分析》一文,分析了钢筋混凝土螺旋桩的可行性。

武汉大学城建学院开发了全螺纹灌注桩,通过实际工程论证了该种桩型在承载力和经济效益方面比传统桩型的优越性。螺纹桩混凝土用量只有同直径直线型灌注桩的 60% ~ 70%,而螺纹桩极限承载力是同直径直线型灌注桩的 2 倍多。

2007 年,武汉大学城建学院探索使用复合材料解决钢结构螺旋桩基础的防腐问题,开展了玻璃钢材料的螺旋锚试验研究工作。

2007 年,湖南省工业设备安装公司将抗拔螺旋锚应用于基坑支护结构,工程造价较灌注桩支护方案节约 50%。

南京水利科学研究院于 2007 年已经开发了一种适用于汛期堤防和公路边坡快速加固的特种抢险车辆——螺旋锚加固滑坡抢险工程车。

2003 年至今,海南卓典高科技开发有限公司的螺杆桩在海南阳光经典、新外滩复兴城、龙华雅苑、长信海岸水城、宝安江南城等一批示范工程中进行了具体应用。特别是 2006 年螺杆桩成功运用在海口市名门广场 29 层超高层建筑。目前,该种基础在广东省湛江市、湖南省长沙市、陕西省西安市、河南省郑州市、洛阳市等城市已经形成一定的市场份额,2010 年已成功进入北京市和山东省建筑市场。

2005—2008 年,东北大学、辽宁省交通高等专科学校、中冶沈阳勘察研究总院和辽宁电力勘察设计研究院开展了预制螺旋桩基础的研究和应用工作,产生了良好的社会效益与经济效益。

在螺旋锚应用研究方面, A. Hanna 和 A. M. Ghaly, S. P. Clemence, J. I. Adams 和 T. E. Rodgers 等人, 武汉水利电力学院、武汉冶金科技大学、南京水利科学研究院等单位做了大量工作。随着抗拉螺旋锚的发展, 出现了用于抵抗竖向压力荷载的承压螺旋桩基础。根据不同的应用功能选用桩截面型式, 从而得到不同的螺旋叶片尺寸和数量。

从以上的情况可以看出, 螺旋桩基础的使用地区多是经济相对发达、科技相对领先的地区, 这一分布规律从侧面上反映了螺旋桩基础的发展趋势。

1.2.2 螺旋桩基础的理论研究现状

螺旋桩基础的研究范围可以分为承压桩基础、抗拔桩基础和抗水平力桩基础的理论研究。

1.2.2.1 承压螺旋桩的理论研究

在螺旋桩基础竖向承载力理论研究方面, 有比利时的 W. F. van Impe, E. F. Ayfan, R. Imbo 等人, 美国的 Michael W. O' Neill, John S. Pack, Kevin M. McNeill, Willie M. NeSmith 等人, 日本的 Gen Mori, Mauricio Jun Arai, Mamoru Fujii, Yoshihiro Hashimoto, Masahiro Hayashi, Kazuomi Ichikawa, Toshio Shinohara, Takashi Okamoto, Fujii M., Tamural M. 等人, 使用的研究手段有静荷载试验、红外成像技术、有限元方法等。国内主要研究单位有东北大学、辽宁省交通高等专科学校、武汉大学、天津城市建设学院等。

下面列出承压桩承载力公式。

前苏联规范:

$$Q = m [(Ac_r + B\gamma_r h) F + fu (L - D)] \quad (1.1)$$

式中: m 为视作用在桩上的荷载类型及土质条件而定的工作条件系数; A 和 B 分别为按工作区 (指与叶片紧贴厚度为 D 的土层) 内土的计算内摩擦角值 ϕ_r 的无量纲系数; c_r 为工作区内黏土类土的计算单位黏聚力或砂土的线性系数; γ_r 为桩叶片标高以上土层的换算容重计算值 (考虑水的浮力); h 为桩叶片的埋置深度, 自天然地面算起, 当场地进行挖方平整时则自整平标高算起; F 为当螺旋桩支撑压缩荷载时叶片按外径计算的投影面积, 当螺旋桩抵抗上拔荷载时按叶片扣除桩身截面积的工作面投影计算; f 为螺旋桩侧表面处土的计算强度; u 为桩身周长; L 为桩身的入土长度; D 为桩叶片的直径。

日本的 Takashi Okamoto 等人:

$$R_u = \alpha \bar{N} A_w + \left(2\bar{N}_s L_s + \frac{\bar{Q}_u}{2} L_c \right) \psi \quad (1.2)$$

式中, R_u 为桩基承载力; α 分别为计算系数, 砂为 100, 砂砾为 150; A_w 为叶片面积; $\bar{N}_s$ 为地基标准贯入度; L_s 为砂质地基层厚; $\bar{Q}_u$ 为黏性土地基单轴压缩强度; L_c 为黏性土的层厚; ψ 为钢制螺旋桩桩体周长。

比利时的 W. F. Van Impe 等人:

$$R_u = R_{bu} + R_{su} = \alpha_b \varepsilon_b Q_{bu} + \pi D_s \left(\sum H_i \eta_{pi} q_{ci} \right) \quad (1.3)$$

式中, R_u 为桩基承载力; R_{bu} 为桩端承载力; R_{su} 为桩侧承载力; α_b 为桩头条件系数; ε_b 为超固结土硬化修正系数; Q_{bu} 为圆锥触探试验换算桩端阻力; D_s 为桩杆直径; H_i 为两层叶片间桩体高度; η_{pi} 为圆锥触探试验确定的第 i 层土桩侧阻力系数; q_{ci} 为圆锥触探试验确定的第 i 层土桩侧阻力。

美国的 Michael W. O'Neill 等人:

$$Q_u = Q_{bu} + Q_{su} = k A_b \alpha' + \sum_{i=1}^N q_{si} S_{li} \quad (1.4)$$

式中, Q_u 为桩基承载力; Q_{bu} 为桩基的端承载力 (包括叶片的地基反力); Q_{su} 为桩基的侧摩阻力; A_b 为叶片直径换算为 0.9 倍的桩截面面积; k , α' 分别为计算系数; q_{si} 为第 i 层土桩侧阻力; S_{li} 为叶片直径换算为 0.9 倍的第 i 层桩侧面积。

这些螺旋桩的承载力计算方法主要沿袭传统直型桩的承载力计算方法, 总承载力通过对端阻力、摩阻力乘上相应系数 (承载系数来自试验和工程应用的总结) 的代数和求得。目前对螺旋桩基础破坏模式、破坏过程中桩型参数 (尤其是叶片的几何尺寸) 对破坏模式的影响、群桩基础形式的承载力、群桩基础沉降计算以及螺旋群桩基础的承载性状影响因素等方面的研究较少。

1.2.2.2 抗拔螺旋桩的理论研究

抗拔螺旋桩一般亦称为螺旋锚, 国内外的研究一般集中在单层叶片的竖向或斜向抗拔方面, 对于多层、大直径、桩长较长的螺旋桩抗拔机理研究较少。

抗拔桩破坏模型有锥形或倒圆台模型, S. P. Clemence 等人提出的多层锚的圆柱——倒圆台模型; J. I. Adams, T. E. Rodgers 提出的叶片支撑模型和圆柱模型; A. M. Ghaly 和 A. Hanna 提出的单层叶片对数滑裂面模型, 并在 1994 年提出的单层叶片深埋和浅埋螺旋锚的破坏形式, 深埋锚的滑裂破坏面在深部形成似球体对数滑裂面, 浅埋锚的滑裂破坏面是对倒圆台法的破坏面的修正, 采用的是对数曲面, 此种方法的参数和判定条件是从砂土试验得来的, 公式比较繁琐, 一定程度

上限制了工程应用。J. K. McDonald、王钊、郭方胜、陈基成、汪滨等人也在螺旋锚抗拔斜向或垂直抗拔方面开展了大量的研究工作。

前苏联的螺旋桩抗拔承载力计算公式与公式 (1.1) 形式相同, 美国电力系统采用 J. I. Adams, T. E. Rodgers 的方法, 美国 A B Chance 公司使用由 S. P. Clemence 等人提出的扭矩系数法。其中, 主要应用的抗拔螺旋桩锚基础的承载力计算方法有承载量法、圆柱剪切法和倒圆台法。

(1) 倒圆台法

假设基础桩上拔中, 破坏面从桩端向上产生一曲面滑裂面, 上拔承载力由滑裂体的桩、土重量以及桩土界面滑移阻力组成。

倒圆台法的极限承载力计算公式 (1.5),

$$Q_u = \sum_{i=1}^n V_i \gamma_i + W + f_1 \quad (1.5)$$

式中, Q_u 为桩的抗拔力; γ_i 为第 i 层地基的天然重度; V_i 为倒圆台内第 i 层地基的土体积; W 为桩的重量; f_1 为桩土界面间的剪阻力; n 为地基的土层总数。

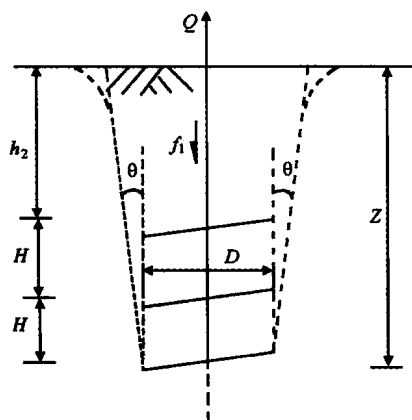


图 1.1 倒圆台法极限抗拔承载力计算简图

倒圆台体积的计算公式如下:

$$V_i = \frac{\pi Z_i}{4} \left(D^2 + 2DZ_i \tan \theta - \frac{4}{3} Z_i^2 \tan^2 \theta \right) \quad (1.6)$$

$$D = R \cos \beta \quad (1.7)$$

式中, D 为叶片投影直径; Z_i 为第 i 层土厚度; θ 为倒圆台破坏面与叶片边缘深