

中华人民共和国交通部资助出版  
交通类学科(专业)学术著作

Jisuan T uilizhuang de Zonghe  
G angdu Y uanli he Shuangcanshu Fa

计算推力桩的综合刚度原理和  
双参数法

(第二版)

吴恒立 著

人民交通出版社

## 内 容 提 要

本书系统地阐述了作者提出的计算推力桩的综合刚度原理和双参数法。全书共分八章:绪论、计算推力桩的综合刚度原理和双参数法、长桩试验资料分析、推力桩的非线性分析、短桩的计算、中长桩的计算、推力桩性状的进一步研究、推力桩动力响应的计算。附录中提供了有关计算用表和虎门大桥压桩试验研究报告。

本书可供从事桩基础设计、施工的工程技术人员及该领域的科研人员学习参考。

中华人民共和国交通部资助出版  
交通类学科(专业)学术著作  
计算推力桩的综合刚度原理和双参数法  
(第二版)

吴恒立 著

正文设计:王秋红 责任校对:尹 静

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号)

各地新华书店经销

印刷厂印刷

开本: 印张: 字数: 千

1990 年 3 月 第 1 版

2000 年 6 月 第 2 版

2000 年 6 月 第 2 版 第 1 次印刷

印数:0001- 3000 册 定价:20.00 元

ISBN 7-114- -

## 第二版前言

本书系统地阐述了作者提出的计算推力桩的综合刚度原理和双参数法。

本书的第一版于 1990 年 3 月由人民交通出版社出版发行。此后,作者又做了深入的研究工作,取得了较多的科研成果,在此基础上总结出版第二版。第二版与第一版的区别主要是增加了中长桩的计算、推力桩性状的进一步研究、推力桩动力响应的计算等新内容,并对第一版原有的内容作了相应的修改。下面对本书各章内容作简要的介绍。

第一章较系统地介绍了各种桩及桩基础在工程建设中的应用和地位,推力桩计算方法的历史和现状以及现行计算方法存在的问题和可能解决的途径。

第二章推导了土抗力模数  $K = m x^{\frac{1}{n}}$  中取指数  $1/n > 0$  的任意值时,推力桩微分方程式的通解及其收敛性证明。在研究推力桩桩—土共同作用机理的基础上,阐述了桩—土综合刚度是待定参量的新概念,即综合刚度原理。给出了推力桩按无量纲长度进行分类的原则和标准的建议,推导了结合具体桩底条件的各种计算公式,以及应用到桩基础计算的有关公式。

第三章是通过受推力作用的长桩实测资料的分析,标定桩—土参数,即指数  $1/n$ 、桩—土相对柔度系数  $\beta$  和桩—土综合刚度  $EI$ 。分析了三例,均说明综合刚度原理和双参数法用于分析长桩,能使桩在地面处的挠度、转角、桩身最大弯矩及其所在位置等三个主要工程指标的计算值同时与实测值很好符合。本章还讨论了当前尚未统一而又十分重要的两个实际问题,即推力桩容许极限点的确定和桩身实测弯矩的标定问题。

第四章先用一定篇幅较详细地介绍了用于推力桩非线性分析的著名的  $p-y$  曲线法, 然后从桩—土非线性工作过程的机理说明这正是综合刚度原理和双参数法最适宜解决的问题。通过三例长推力桩的非线性分析, 得到了一条看来是符合长推力桩的桩—土共同作用机理的规律, 即  $1/n$  和  $\alpha$  随载荷的增加非线性地增加, 而  $EI$  却随载荷的增加非线性地减小。

第五章给出了通过受推力作用的短试桩资料及标定短桩土壤参数的方法, 然后, 阐述计算短桩的无量纲系数法, 它有计算较为简便, 并且系数可以制表的优点。

第六章阐述了中长桩的计算, 其特点是桩底边界条件对中长桩的计算有影响, 而前者往往事先是不知道的。用综合刚度原理和双参数法分析中长桩, 不仅结果准确可靠, 而且可以判断桩底处的支承条件。

第七章是推力桩性状的进一步研究, 包括非线性地基反力系数的系列化模型及其应用和求解, 确定推力桩允许极限点的新观念, 在中小工程中不做试桩时圆截面钻孔灌注混凝土桩参数的取值范围, 桩—土关系的模型率和金属管桩的性能等内容。本章内容主要取自 1991 年至 1993 年作者承担的交通部原公路管理司项目“推力桩计算方法的研究”, 该项目由交通部原科技司组织鉴定并获得 1994 年交通部科学技术进步三等奖。鉴定结论为: 对推力桩本质认识有新的突破, 充分揭示了推力桩桩—土共同作用的性状和机理, 成果达到了国际先进水平。1995 年, 其主要内容以同名发表在《土木工程学报》第二十八卷第二期。

第八章讨论推力桩的动力响应问题, 通过实例分析证明用综合刚度原理和双参数法解决此问题能取得满意的效果, 较之其它方法有明显的优越性。

本书附录提供了有代表性的  $1/n=0$ 、 $1/n=0.7$  和  $1/n=1.5$  三个  $1/n$  值的计算用表, 以及作者在虎门大桥做的嵌岩压桩试验的研究报告。

本书的主要内容虽是计算推力桩的综合刚度原理和双参数

法,同时也介绍了一些国内外计算推力桩的各种主要方法,特别是介绍了  $p-y$  曲线法。对于介绍到的方法,都根据其特点作了一定程度的分析和评论。

参考文献列在每章的末尾,与该章内容有关。

本书反映了作者在推力桩—土共同作用的机理研究方面所做的一些工作。囿于水平,其内容恐有不妥之处,恳请读者批评指正。

吴恒立

1998年9月12日

# 第一版前言

本书系统地阐述了计算推力桩的综合刚度原理和双参数法。

第一章较系统地介绍了各种桩及桩基础在工程建设中的应用和地位,推力桩计算方法的历史和现状,以及现行计算方法存在的问题和可能解决的途径。

第二章推导了土抗力模数  $K = m x^{\frac{1}{n}}$  中取指数  $1/n > 0$  的任意值时,推力桩微分方程式的通解及其收敛性证明。在研究推力桩桩—土共同作用机理的基础上,阐述了桩—土综合刚度是待定参量的新概念,即综合刚度原理。建议了推力桩按无量纲长度分类的原则和标准。还推导了结合具体桩底条件的各种计算公式,以及应用到桩基础计算的有关公式。

第三章是通过受推力作用的长桩实测资料的分析,标定桩—土参数,即指数  $1/n$ 、桩—土相对柔度系数  $\beta$  和桩—土综合刚度  $EI$ 。分析了三例,均说明综合刚度原理和双参数法用于分析长桩,能使桩在地面处的挠度、转角、桩身最大弯矩及其所在位置等三个主要工程指标的计算值同时与实测值很好符合。本章还讨论了当前尚未统一而又十分重要的两个实际问题,即推力桩容许极限点的确定和桩身实测弯矩的标定问题。

第四章先用一定篇幅较详细地介绍了用于推力桩非线性分析的著名的  $p-y$  曲线法,然后,从桩—土非线性工作过程的机理说明这正是综合刚度原理和双参数法最适宜解决的问题。通过三例长推力桩的非线性分析,得到了一条看来是符合长推力桩桩—土共同作用机理的规律,即  $1/n$  和  $\beta$  随载荷的增加非线性地增加,而  $EI$  却随载荷的增加非线性地减小。

第五章给出了通过受推力作用的短试桩资料标定短桩土壤参

数的方法,然后,阐述了作者在 1975 年推导的计算短桩的无量纲系数法,它有计算较为简便,并且系数可以制表的优点。书末附录部分提供了有关计算用表和计算机程序,可供具体计算时使用。

本书的主要内容虽是计算推力桩的综合刚度原理和双参数法,同时也介绍了一些国内外计算推力桩的各种主要方法,特别是介绍了  $p-y$  曲线法。对于介绍到的方法,都根据其特点作了一定程度的分析。

参考文献列在每章的末尾,直接或间接地与该章内容有关。

当桩的刚度系数还算不准时,任何先进的计算手段都不可能对桩和桩基础的计算得到有价值的结果。因此,对各种受力情况下桩—土共同作用机理的研究是很重要的。

本书反映了作者在推力桩桩—土共同作用的机理研究方面所做的一些工作。囿于水平,其内容恐有不妥之处,恳请读者批评指正。

吴恒立

1986 年 8 月 15 日

# 目 录

第一章 绪论.....	1
§ 1-1 桩和桩基础在工程建设中的应用和地位 .....	1
§ 1-2 推力桩的计算方法及其历史和现状 .....	6
§ 1-3 推力桩现行计算方法存在的问题 .....	16
参考文献 .....	17
第二章 计算推力桩的综合刚度原理和双参数法 .....	22
§ 2-1 双参数法的概念和参数的选择 .....	22
§ 2-2 双参数法微分方程的通解 .....	23
§ 2-3 解的收敛性证明和讨论 .....	36
§ 2-4 桩地面处的位移和桩底条件 .....	39
§ 2-5 推力桩的分类和特点 .....	50
§ 2-6 考虑桩—土共同作用的综合刚度原理 .....	53
§ 2-7 桩顶位移的计算 .....	57
§ 2-8 桩基础的计算 .....	61
参考文献 .....	65
第三章 长桩试验资料分析 .....	67
§ 3-1 推力桩容许极限点的确定 .....	67
§ 3-2 桩身实测弯矩的标定 .....	72
§ 3-3 长桩试验资料分析(一) .....	80
§ 3-4 长桩试验资料分析(二) .....	85
§ 3-5 长桩试验资料分析(三) .....	88
§ 3-6 讨论和建议 .....	89
参考文献 .....	91
第四章 推力桩的非线性分析 .....	92

§ 4-1	p - y 曲线法 .....	92
§ 4-2	综合刚度原理和双参数法 .....	103
	参考文献.....	121
第五章	短桩的计算.....	124
§ 5-1	短桩的特点和参数标定 .....	124
§ 5-2	计算短桩的无量纲系数法 .....	126
§ 5-3	无量纲系数法公式的证明 .....	132
§ 5-4	短桩桩身弯矩和桩顶位移 .....	137
§ 5-5	讨论和表格化 .....	142
	参考文献.....	145
第六章	中长桩的计算.....	146
§ 6-1	中长桩参数的确定 .....	146
§ 6-2	中长桩试验资料分析 .....	149
§ 6-3	结论 .....	151
	参考文献.....	152
第七章	推力桩性状的进一步研究.....	153
§ 7-1	非线性地基反力系数的系列化模型及其在 不同载荷阶段的应用和求解 .....	154
§ 7-2	用综合刚度原理和双参数法确定推力桩的 容许极限点 .....	166
§ 7-3	圆截面钻孔灌注混凝土推力桩双参数 $m$ 和 $1/n$ 在各类土质条件下的取值范围 .....	170
§ 7-4	推力桩桩—土关系的模型律(变态) .....	174
§ 7-5	金属管推力桩的试验研究与特点 .....	177
§ 7-6	结论 .....	181
	参考文献.....	183
第八章	推力桩动力响应的计算.....	186
§ 8-1	推力桩固有频率的估算 .....	186
§ 8-2	推力桩运动微分方程式的建立 .....	191
§ 8-3	无量纲差分方程式的推导 .....	193

§ 8-4 利用边界条件求桩身位移 .....	197
§ 8-5 双参数和综合刚度的确定 .....	205
§ 8-6 实例 .....	206
§ 8-7 结论 .....	208
参考文献.....	209
附录一 虎门大桥压桩桩岩共同作用及桩壁阻力的试验与研究.....	211
一、虎门大桥东岸山洞嵌岩压桩试验研究报告 .....	211
二、虎门大桥东塔嵌岩压桩试验研究报告 .....	221
附录二 有代表性的计算用表.....	233

# 第一章 绪 论

## § 1-1 桩和桩基础在工程建设中的应用和地位

桩是基础中的柱形构件,亦即是插入土或岩石中的“杆件”,其作用是承受上部结构的载荷,并将载荷传递到土或岩石的深层中去。

在古代就有利用承载桩支承结构物的记载和实例。罗马人在英国修建的桥梁和河滨住宅用过木桩。中世纪东安格利亚(East Anglia)沼泽地区修建的大修道院也用过橡木桩和赤杨木桩。我国则可以追溯到更早的年代:秦朝的栈桥为支承桥面系统而水平嵌入悬岩的木、石构件,可以看作是受横向力作用的桩;汉朝的桥梁建设者用过木桩;古代人用水平嵌入悬岩的木桩或石桩支承悬棺。生活中挂物的钉子,也可以看作是桩。

桩基础是指位于上部结构和地基之间的由桩组成的基础部分。

事物的发展,一般都是先有实践,后有理论,再反复循环,不断提高。例如大孔径钻孔灌注桩,1960年在我国河南省公路部门采用后,现已发展成为一种桥梁基础新形式。实践证明它有很多优点,如设备简单,操作方便,变水下作业为水上作业,大大简化了施工,能较显著地缩短工期并降低造价。大孔径钻孔灌注桩的问世,还极大地促进了我国对桩和桩基础计算理论的研究工作。

桩基础是公路和铁路桥梁基础的重要类型之一,并且有日益

推广使用的趋势。桥梁桩基础有时采用单桩,但通常由承台和桩群组成。承台的作用是联结桩顶,将外载荷传给桩群,并可校正桩群施工位置和设计位置的偏差,以保证上部结构的准确位置。由于承台底面标高设置的位置不同,可将桩基础分为低桩承台和高桩承台两种。低桩承台是指承台底面标高位于最低冲刷线以下的桩基础(图 1-1a)),而高桩承台则是指承台底面标高位于最低冲刷线以上的桩基础(图 1-1b))。

图 1-1 低桩承台和高桩承台

我国《公路桥涵地基与基础设计规范》(JT J 024—85)中取消了高桩承台和低桩承台的名称,统称基桩承台,同时也取消了关于低桩承台的判别和计算规定,采用与高桩承台一样的算法。其依据是认为两者在力学分析上不应有原则性区别,在桥梁桩基础中选用何者则应按受载大小、水文、地质、施工条件等因素综合考虑。一种观点认为,低桩承台考虑桩与桩间土共同承担承台传来的载荷,不仅可以减少桩数,有明显的经济效益,还可以减小基础沉降,对防渗和减小土的液化危害也都有利。但要使低桩承台下桩间土起支承作用,是有许多条件限制的,我国 1983 年在修订船坞规范时,曾做过这方面的试验研究工作。

在滑坡防治工程中,国内外曾采用抗滑桩取得了良好的效果。例如四川省渡口铁路支线 103 站大滑坡,先后采用排水和挡土墙工程整治未能见效,后抢修了 65 根抗滑桩并设置了若干盲沟、支撑渗沟、排水沟等,才遏止住滑坡,使路基得以稳定,见图 1-2。国外采用抗滑桩的例子见图 1-3 和图 1-4。甚至有在隧道顶上开挖

图 1-2 103 站滑坡横断面示意图

1-人工填筑土;2-砂粘土;3-粘土;4-碎石土;5-卵石层(二冰期);6-昔格达层(间冰期湖积层);7-卵石层(一冰期)

公路,引起山体滑动,用抗滑桩成功地保护了隧道的例子。抗滑桩的计算原理即是受横向力作用的桩的计算原理。

树根桩(Root Piles)又称微型桩(Micropiles),20世纪30年代首创于意大利,即是使用许多小型的钻孔灌注桩或钢管桩,使它们起

图 1-3 英国某铁路滑坡横断面示意图

到类似于树根那样的作用。它最初主要用于加固抢救古建筑,其突出的优点是施工空间小,可以在不破坏地基对原有建筑物的支承作用的条件下加固地基。现已扩大应用于许多场合,例如用网状树根桩体系加固路基、破碎的岩石边坡、拱桥地基等。我国1981年曾用树根桩加固国家重点保护文物苏州虎丘塔的地基。1983年又曾结合上海一座新建厂房地基加固的需要,做过软土中树根桩的试验研究工作。

在软弱地基上修建房屋,有时需要采用桩基础。图1-5所示为建于桩基础上的水电站厂房,该处地质条件很差,采用桩基础可以防止因上、下游水位差引起渗流而可能带来的危害。上海宝山钢铁总厂建于软土地带(吴淞口),普遍采用了桩基础。曾遇到过因附近

图 1-4 奥地利某公路滑坡横断面示意图

继续打桩特别是开挖土方引起土体变形,使已打好的桩出现了可观的水平位移的情况(软土地基水平位移,可达开挖深度的 1% ~ 2%,甚至更大),并就此情况对桩的承载能力的影响,做过一些分析研究工作。

图 1-5 修建在桩基础上的水电站厂房

港口工程中常采用高桩承台码头和单点系泊建造。图 1-6 是一种高桩承台码头的示意图。图 1-7a)所示为单点系泊建造。图 1-7b)所示是货船栈桥码头所用的防护板和防冲桩,在船舶停靠时主要承受横向力的作用。

为开发海洋资源,近海工程已成为当今世界各先进技术中的一个重要方面。我国海域广阔,近海有极丰富的石油资源,它的开发对我国经济建设意义重大。海上石油开采平台,因其技术的复杂性,国外甚至有人把海上开发石油与人类登月相比,其中适用于水深300m 处的,是用钢管焊成的空间刚架作为平台支撑,底部用桩打入海底土中的“钢质导管架桩基平

图 1-6 高桩承台码头

台”(图 1-8)。适用于其它水深的尚有:全部用钢筋混凝土浇注,依靠自重力座落在海底上的“重力式平台”,可用于水深等于 200m 的近海海域;用顶张力钢弦将平台固定于海底的“张力腿式平台”,可用于水深小于 1 000m 处;以及驳船用缆索锚固于海底的“锚泊式平台”,可用于水深 1 000m 处。

图 1-7 单点系泊建造和货船栈桥码头

海工结构中,当前我国设计部门最关心的是桩基础问题和基础稳定问题。因为海工结构造价的 40% ~ 50% 集中在基础上,并且结构设计所需参数中,最棘手的是地基参数。

图 1-8 钢质导管架桩基平台

1982 年 2 月在厦门召开的“海上固定平台建造与入级规范”审查会上,大连工学院、天津大学、中国科学院力学所等 10 个单位提出今后几年的科研规划,其中与桩和桩基础有关的课题就有:

(1) 桩在水平静、动载荷作用下的性能研究及其承载力的计算,确定  $p-y$  曲线。

(2) 桩系相互作用,确定有关系数。

(3) 群桩的受力分析及遮蔽效应。

(4) 桩的深度对桩的侧摩擦阻力和端摩擦阻力的影响。

(5) 桩的承载力分析程序,桩与导管架整体的静、动分析程序等。

我国在 1986 年至 1990 年的交通科技发展规划中,要求干线公路、海港和内河建设技术都提高到新水平。其中深水高墩大跨桥梁上下部结构、海港大管桩结构、内河高水位差码头结构等项目的要求,均与桩和桩基础有关。

由以上可见,桩和桩基础的适用范围很广。在桥梁、房建、码头、堤坝、山坡抗滑处治、地基加固、海上开采石油支架等方面,都有重要而广泛的用处。并且随着我国公路、铁路、港口和近海工程的发展,桩和桩基础的应用和地位,更会日趋重要。

## § 1-2 推力桩的计算方法 及其历史和现状

桩按受载特点主要分为:受轴向压力作用的桩,受上托力或轴

向拉力作用的桩,受扭矩作用的桩,以及受横向载荷作用的桩。

受轴向压力作用的桩简称承压桩,它对下压载荷的总抗力等于桩侧摩阻力和底端抗力两个分量之和。以桩侧摩阻力起主导作用的桩,称摩阻桩(图 1-9a)。支承在岩石或坚硬土壤上,以底端抗力为主的桩,称端承桩(图 1-9b)。填方地段,穿过填土进入天然土的桩,会受负摩阻力作用,称负摩阻桩,负摩阻力是指填土下沉在桩侧表面产生的下拖力(图 1-9c)。

图 1-9 摩阻桩、端承桩、负摩阻桩

承压桩有许多值得研究的问题。例如对它的承载力和沉桩能力(桩的可打入性)的分析,采用波动方程解法,国内外都做过大量的工作。又如负摩阻桩,如何确定负摩阻力的大小、分布以及摩阻力为零的零点位置,都有值得研究的问题。也有用压桩和拔桩两组试验预估填土负摩阻力的尝试。试验表明,非饱和粘性土填土下沉对桩所产生的负摩阻力数值,不等于桩顶受压使桩下沉时填土对桩所产生的正摩阻力数值。而且从定性上看,负摩阻力小于正摩阻力。桩头扩大的承压桩和完全嵌岩的承压桩的承载能力,也都需要深入研究。

对诸如干船坞、地下室及泵站等上浮结构物下的桩,就需要抵抗上托载荷的作用。又如当桩基础需要抵抗倾覆力时,其中一部分桩将会受到拉力作用(图 1-10)。最典型的受拉桩的例子是锚桩,即在岩石中钻孔,插入高强钢丝束,再用高压灌浆,使其周围与岩石固结。锚桩受轴向拉力作用的破坏,通常如图 1-11 所示。因