

Qiaoliang Zhuangji Jisuan Yu Jiance

# 桥梁桩基计算与检测

赵明华 编著

人民交通出版社

## 内 容 提 要

本书结合我国现行规范规程和作者近 20 年对桩基设计理论的研究成果,以及目前我国桩基工程发展动态,系统地阐述了各种复杂条件下基桩的受力性能以及桩基工程的设计计算方法和桩身质量的检测方法。尤其是诸如多层地基中横向荷载桩的分析,倾斜荷载或轴、横向荷载同时作用下基桩的受力分析,以及基桩的屈曲分析等,对工程应用具有一定的参考价值。

全书由浅入深、内容丰富,不仅可作为土木工程专业(包括建筑工程、桥梁工程、岩土工程等)和海洋工程专业的本科生和研究生的教材或教学参考书,也可供工程技术人员和科研人员阅读参考。

### 桥梁桩基计算与检测

赵明华 编著

正文设计:周 园 责任校对:刘素燕 责任印制:杨铂力

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

北京鑫正大印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:12.5 字数:306 千

1999 年 12 月 第 1 版

2000 年 6 月 第 1 版 第 2 次印刷

印数:4001—9000 册 定价:24.00 元

ISBN 7-114-03499-7

U · 02509

# 前 言

桩基础是最古老的基础型式之一。随着现代科学技术的进步,桩基分析和设计理论不断完善和发展。目前已成为我国桥梁基础中最主要的基础类型之一。为了适应我国桥梁基础工程的应用,本书将根据我国目前各规范规程规定,结合我国桩基工程发展动态以及最新研究成果,系统地阐述了各种特殊受力条件下桩基工程的分析和设计计算方法以及桩身质量的常用检测方法。

全书共分九章,其主要内容为: 竖向荷载下桩的承载力分析,其包括竖向荷载下桩的工作状况,桩的各种承载力确定方法,群桩效应以及桩侧负摩阻力的分析。 单桩和群桩的各种沉降分析方法。 横向荷载下基桩的内力和位移分析。包括线弹性地基反力法的幂级数通解以及各种常用数值方法解。 多层地基横向受荷桩的分析方法。 倾斜荷载或轴、横向荷载同时作用下基桩的内力和位移分析。 基桩屈曲分析的各种方法及其简化计算方法。 桩的各种静载试验结果分析方法。 常用的桩身质量检测方法以及基桩承载力的动测方法。

全书在编著过程中力求由浅入深,通俗易懂,并尽量做到系统、简洁、明了,便于工程技术人员学习提高和应用。其内容几乎包括了目前桥梁桩基研究的各个领域,部分内容具有一定的深度和难度。本书可作为土木工程专业(包括建筑工程、桥梁工程、岩土工程等)和海洋工程专业的本科生和研究生的教材或教学参考书,也可供工程技术人员及科研人员参考。

本书第一、五、六、七、八、九章及附录由赵明华编著,第二、三、四章由吴鸣执笔,赵明华修改定稿。全书承蒙湖南大学朱之基教授阅读,并提出了不少宝贵意见和提供了有益的参考资料,湖南大学周光龙教授、王贻荪教授也为本书提出了一些建设性的意见和无私地提供了资料,在此一并表示感谢。还非常感谢湖南大学袁玲红老师为书稿的整理所付出的艰辛劳动,尤其是全书插图的绘制。

桩基工程领域内容丰富,发展迅速,有些新的技术尚未吸收和消化,此外,限于篇幅及作者水平,缺点、错误及不当之处实属难免,尚望读者批评指正。

赵明华

1999年6月于长沙岳麓山

# 目 录

第一章 概述.....	1
第一节 我国桥梁桩基应用简介.....	1
第二节 桩和桩基础的分类.....	1
第三节 桩基计算与检测工作简介.....	3
第二章 竖向荷载下桩的承载力.....	5
第一节 竖向荷载下桩的受力特性.....	5
第二节 单桩竖向承载力的计算.....	10
第三节 竖向荷载下群桩的受力分析.....	21
第四节 承受负摩阻力的桩.....	24
第三章 单桩和群桩的沉降计算.....	32
第一节 概述.....	32
第二节 单桩的沉降计算.....	33
第三节 群桩的沉降计算.....	40
第四章 横向荷载下桩的内力和位移分析.....	45
第一节 横向荷载下桩的受力特性.....	45
第二节 横向荷载桩的计算方法分类.....	47
第三节 线弹性地基反力法— $m$ 法解答.....	53
第四节 线弹性地基反力法的幂级数通解.....	68
第五节 弹性地基反力法的数值分析解.....	71
第六节 提高基桩水平承载力的措施.....	82
第五章 多层地基横向受荷桩的分析.....	84
第一节 多层地基横向受荷桩的性状.....	84
第二节 多层地基横向受荷桩的幂级数解.....	85
第三节 多层地基横向受荷桩的简化计算方法.....	88
第六章 倾斜荷载作用下桩的分析.....	92
第一节 概述.....	92
第二节 地基系数为常数的解答.....	94
第三节 地基系数随深度呈线性增加的解答.....	96
第四节 有限单元解.....	100
第五节 倾斜极限荷载确定.....	103
第六节 计算实例分析.....	104
第七章 桩的屈曲分析.....	107
第一节 概述.....	107

第二节	基桩屈曲分析的常用方法.....	108
第三节	基桩屈曲分析的能量法解答.....	111
第四节	基桩屈曲分析的幂级数解.....	114
第五节	计算单桩屈曲临界荷载的有限单元.....	116
第六节	计算实例分析.....	119
第八章	桩的静载试验结果分析.....	122
第一节	静载加荷方式简介.....	122
第二节	单桩竖向极限荷载及屈服荷载的确定方法.....	123
第三节	试桩未达破坏时单桩竖向极限承载力的估算.....	127
第四节	单桩竖向容许承载力的确定.....	130
第五节	单桩水平承载力的确定.....	132
第六节	试桩实例分析.....	134
第九章	桩的质量检测与竖向承载力动测.....	137
第一节	概述.....	137
第二节	桩的成孔质量检测.....	138
第三节	超声脉冲法.....	141
第四节	动力参数法.....	145
第五节	机械阻抗法.....	149
第六节	水电效应法.....	155
附录 I	New mark 法计算基桩内力和位移源程序清单.....	158
附录 II	桩基内力与位移计算幂级数通解源程序清单.....	161
附录 III	轴、横向荷载作用下基桩内力和位移计算源程序清单.....	172
附表 1~8	.....	177
参考文献	.....	186

# 第一章 概 述

## 第一节 我国桥梁桩基应用简介

桩基础是最古老的基础型式之一。早在有文字记载之前,人类就懂得在地基条件不良的河谷和洪积地带采用木桩来支承房屋。1982年在智利发掘的文化遗址所见到的桩大约距今一万二千至一万四千年。桩基用于桥梁,历史亦极为悠久。据《水经注》记载,公元前532年在今山西汾水上建成的三十墩柱木柱梁桥,即为桩柱式桥墩。《三辅黄图》记载的秦代所建渭桥(公元前221年~公元前206年),经分析亦为木桩基础。因此,中国汉代木桩在桥梁中的应用,如古灞桥等只是对此以前桩基础技术的推广。

桩基不仅历史悠久,而且经久耐用。我国古代许多建造于软弱地基上的重型、高耸建筑以及历史名桥都是成功地运用了桩基础,才抵御住无数次地震灾害和海浪冲击而仍不失当年雄姿。如饱经风霜的上海龙华塔(977年重建)至今仅略有倾斜,山西太原晋祠圣母殿(建于1023~1031年)仍无明显不均匀沉降;而名闻中外的北京市郊芦沟桥(重建于1189年~1192年),虽已局部损坏,但尚能承受四百多吨的大型平板车正常运行。这些建筑都是我国古代木桩基础的典范。

桩基础在我国桥梁工程中的应用有如下几个阶段。

1950年以前,我国桥梁工程多采用木桩基础,虽然钢筋混凝土桩和钢桩也有应用,但数量较少,桩的制造工艺和施工质量均不高。如30年代建于浙赣铁路上的钱塘江大桥就曾采用过木桩和钢筋混凝土桩基础,本世纪初建造的郑州黄河大桥(老桥)采用过铸钢管桩基础。

桩基础在我国桥梁工程中的大规模应用和发展还是在1950年以后,木桩逐渐被钢筋混凝土桩和预应力混凝土桩所取代,工程中开始普遍采用普通钢筋混凝土预制管桩和方桩基础,如武汉长江大桥、余姚江大桥、奉化江大桥、南京长江大桥、潼关黄河大桥等等。由于普通钢筋混凝土管桩的抗裂能力不高,尤其在沉桩过程中,桩身防止横向裂缝的能力较差,1966年丰台桥梁厂开始研制先张法预应力离心混凝土管桩,并于1970年正式投入成批生产。

1963年,我国河南首次在安阳冯宿桥成功使用了钻孔灌注桩基础,1965年4月交通部在河南省南阳市召开了钻孔桩技术鉴定会。自此,在我国桥梁工程中开始广泛采用钻、挖孔灌注桩基础。如松花江大桥、山东北镇黄河大桥、长沙湘江大桥、郑州黄河大桥等等。随着桩基施工技术的提高,桩径、桩长均得到大大提高。目前,我国桥梁工程中最大桩径已逾5m,基桩入土深度最深已达107m。

## 第二节 桩和桩基础的分类

随着科学技术的发展,为了满足各种结构物的要求,适应各种不同地质条件和施工方法,在工程实践中可采用各种不同类型的桩和桩基础。

根据桩基承台底面位置的不同可将桩基础分为高桩承台基础和低桩承台基础(简称高桩承台和低桩承台)。

高桩承台的承台底面位于地面(或局部冲刷线)以上,基桩部分桩身沉入土中,可避免或减少水下作业,减少墩台的圯工数量,施工较为方便,在桥梁工程中应用较广。

低桩承台的承台底面位于地面(或局部冲刷线)以下,基桩全部沉入土中,其受力性能好,能承受较大的水平外力,多用于高层建筑及桥台基础。

桩的分类,根据不同的目的可以有不同的分类方法。

根据桩的受力条件可分为柱桩(或端承桩)与摩擦桩。柱桩主要依靠桩底土层抵抗力支承垂直荷载,如图 1-1a)所示。桩穿过较软弱土层,桩底支承在岩层或硬土层(如密实的大块卵石层)等实际非压缩性土层上,沉降量甚微,故桩侧摩阻力可忽略不计,全部垂直荷载由桩底岩层抵抗力承受。摩擦桩主要依靠桩侧土的摩阻力支承垂直荷载(图 1-1b))。桩穿过并支承在各种压缩性土层中,一般情况下,桩基沉降量较大,桩底土层也支承部分垂直荷载。

通常,柱桩承载力较大,基础沉降小,较安全可靠。但若岩层埋置很深,沉桩困难时,则可采用摩擦桩。

此外,根据桩基所承受水平外力的大小不同,还可设置成竖直桩(水平外力小)和斜桩(水平外力大)。斜桩的特点是能承受较大的水平荷载,但需要有相应的施工设备和工艺,其倾斜坡度一般可取  $1/8 \sim 1/3$ 。

根据桩的施工方法通常可分为预制桩、灌注桩和管柱基础三类。

图 1-1 柱桩和摩擦桩  
1-软弱土层;2-岩层或硬土层;  
3-中等土层

预制桩是将各种预先制好的桩(多为钢筋混凝土或预应力混凝土实心方桩或管桩,也有钢桩或木桩)以不同的沉桩方式(如锤击打入,振动下沉,静力压桩等)沉入地基内达到所需要的深度。预制桩桩体质量高,可工厂化大量生产,施工速度快,适用于一般土地基。但含筋量大,成本高,较难沉入坚实地层,接桩截桩困难,并有明显的挤土作用,应考虑对邻近结构的影响。

灌注桩是在现场地基中采用钻、挖孔机械或人工成孔,然后浇注钢筋混凝土或混凝土而成的桩。灌注桩桩径大,承载力高,用钢量小,成本低,在施工过程中可避免挤土及噪声等对周围环境的影响,但在成孔成桩过程应采取相应的措施和方法,以保证孔壁的稳定和提高桩体的质量。

管柱基础是将预制的大直径(直径  $1\text{m} \sim 5\text{m}$  左右)钢筋混凝土或预应力混凝土或钢管柱(实质上是一种巨型分节装配的管桩,每节长度根据施工条件决定,一般采用  $4\text{m}$ 、 $8\text{m}$  和  $10\text{m}$ ,接头用法兰盘和螺栓联接),用大型的振动桩锤沿导向结构振动下沉到基岩(一般辅以高压射水和吸泥机),然后在管内钻岩成孔,下放钢筋笼骨架,灌注混凝土,将管柱嵌固于岩层,如图 1-2 所示。管柱基础可以在深水及各种覆盖层条件下进行,无水下作

图 1-2 管柱基础  
1-管柱;2-承台;3-墩身;4-嵌固于岩层;5-钢筋骨架;6-低水位;7-岩层;8-覆盖层;9-钢管靴

业不受季节限制,但施工需要有振动沉桩锤、凿岩机、起重设备等大型机具,动力要求也高,因此在一般公路桥梁中较少采用。

此外,根据桩的功能还可将桩划分为:受压桩、横向受荷桩、锚桩、抗拔桩、护坡桩等几种类型。根据桩径的大小亦可分为小桩( $d \leq 250 \text{ mm}$ )、中等直径桩( $250 \text{ mm} < d < 800 \text{ mm}$ )和大直径桩( $d \geq 800 \text{ mm}$ )三种。

### 第三节 桩基计算与检测工作简介

桩穿过不同性质的土层将上部结构荷载传递给桩周和桩底土层,形成复杂的桩土共同作用系统。目前,研究荷载传递的方法有弹性理论法、有限元法和传递函数法等。一般认为,传递函数法较能反映桩土共同作用,较为实用。

桩的侧阻和端阻与它们所在位置处桩土间的相对位移密切相关,并随位移的增长而逐渐发挥。60年代以来,在桩基的研究和分析中曾采用过常值模式、线性模式、弹塑性模式和非线性三阶段模式。试验资料和分析表明,后一模式比较符合桩土作用性状。

单桩承载力的深度效应也已引起工程界的十分重视,并已反映在某些设计规范中。桩端阻力随进入持力层深度的变化特征值—临界深度与土的种类、桩径及土本身的极限压力值等有关。已积累了的经验数据表明,桩端阻力的影响范围,一般为桩径的3~10倍。同时,对于考虑上覆土层影响、软下卧层影响等不同条件下的桩端阻力计算方法也已得到不断地完善。

地基系数法仍然是目前国内外横向受荷桩分析计算中流行的方法。我国桥梁桩基设计计算推荐使用m法或c法,其分析理论及计算图表等已极为成熟和完善。然而,由于分析时假定地基系数随深度而变,没有考虑到其随位移增大而逐渐减小的特点。80年代以来,国内已做了不少试验研究和分析工作,指出了抗力的非线性发挥特性,目前尚需进一步提高和完善以达到工程应用的水平。

群桩的工作性状是同桩群、土、承台相互作用联系在一起,承载力计算已形成了一些传统模式,但是否考虑或如何考虑承台分担荷载仍是我国桩基工程研究工作的“热点”。充分利用承台底地基土体的承载能力,减少桩数,无疑将有利于提高经济效益,加速桩基工程的发展,但也必须重视试验、工程试点和实测,以及考虑共同作用机理、基桩性状变化等进行综合分析计算,以确保桩基工程的安全可靠。

群桩基础的沉降计算大体可分为三大类,一类是基于布辛奈斯克(Boussinesq)课题的“等代墩基分层总和”法,其实质是浅基沉降计算的延伸;第二类是基于明特林(Mindlin)课题的弹性理论法,包括叠加法、相互影响系数法、沉降比法等;第三类是以原位测试确定土性参数的经验估算法,适于难以采取原状土样的粉土、砂土。我国工程界常用的是等代墩基分层总和法,其计算值往往大于实测值。

60年代以来,许多国家已逐步建立起以可靠性方法为理论基础的规范体系。桩基础是结构体和岩土体相结合的共同作用体系,同时具有结构体和岩土体的特点。因此,利用可靠度理论研究桩基问题,既对利用结构体的已有成果有利,又能较好地体现上下部结构之间的连续性。关于桩基的可靠性分析,国际上报导不多,国内自80年代中期以来,研究十分活跃,从定值设计法向可靠度方法转轨已成目前桩基工程设计的发展趋势。

此外,桥梁工程中的桩基往往在承受较大的垂直荷载的同时,尚受有汽车制动力、风力、船舶撞击力等水平外力的作用。目前,此类桩的计算尚采用简化的轴向和横向荷载分别计算然

后叠加的方法,而在截面检算时再将弯矩乘一扩大系数来修正。显然,由于计算时没有考虑抗力的发挥特性,以及轴向和横向荷载(或倾斜荷载)共同作用对桩位移和内力所产生的影响,只适用于小变形的情况,具有一定的局限性。尤其是高桩承台,当水平荷载较大且土质较软弱时,上述矛盾尤为突出。有关该类问题的研究,国内外已有不少报导,但尚需进一步试验和工程实践的验证。

随着桩的使用数量增多,特别是灌注桩的增多,桩的承载力和桩身完整性的检测愈显重要。桩的静载试验、钻孔取芯、超声检测等方法由于费用高、时间长往往难以大量进行,因此,发展快速动力检测势在必行。近 20 年来,有关桩检技术的学术活动相当活跃,在我国无论是高应变法还是低应变法都积累了大量的资料与经验,取得了可观的发展和进步,某些高、低应变法的软、硬件已达到或接近国际先进水平。

高应变法由 70 年代的锤击法到 80 年代引进的 PDA 和 PID 法,近年来又自行研制成各种试桩分析仪,软件和硬件的功能都有很大的提高。今后宜有步骤地发展这种动力测试仪器,加强动力模型和机理的研究工作,提高软硬件的质量、适用性和可靠性。目前,国际上普遍采用高应变法测定桩的极限承载力,而用低应变法检测桩的质量和完整性。

低应变法在我国应用极为广泛,约有 90% 的检测单位采用低应变法,每年检测的桩数在 4 万根以上。由于低应变法具有软硬件价格便宜,设备轻巧,测试过程简单等优点,在目前高应变设备还比较少,不能满足用户要求的情况下,低应变法作为评价桩承载力的一种补充手段,似可继续加以利用。

## 第二章 竖向荷载下桩的承载力

作用在桩顶的竖向荷载通常由桩侧摩阻力和桩端阻力共同承受。桩侧摩阻力将荷载以剪应力形式传递给桩周土体,最终扩散分布于桩端持力层。桩端持力层受桩端荷载和桩侧荷载共同作用而产生压缩变形(含部分剪切变形),导致基桩产生沉降。

桩的竖向承载力是桩与土共同作用的结果,随桩的几何尺寸与外形、桩侧与桩端土的性质、成桩工艺等而变化。要正确评价单桩的竖向承载力,必须了解单桩在竖向荷载作用下的工作性能,掌握确定单桩竖向承载力的各种具体方法。

### 第一节 竖向荷载下桩的受力特性

#### 一、竖向荷载下基桩的工作性能

单桩工作性能的研究是单桩竖向承载力分析的理论基础,因此,从桩、土相互作用的观点出发,了解桩土间的传力途径和单桩竖向承载力的构成及其发展过程等基本概念,将对正确评价单桩竖向承载力具有一定的指导意义。

##### 1. 摩擦桩的受力特性

对于竖向荷载下摩擦桩的工作性能问题,已有大量的研究,尤其是现场试验。研究和试验表明:在竖向荷载下,由于摩擦桩桩身和桩底土的弹性压缩,桩与桩侧土体之间将产生相对位移,从而导致桩侧土体对桩身产生向上的摩阻力。桩顶荷载在沿桩身向下传递的过程中,必须不断地克服这种摩阻力,因此桩身截面轴向力将随深度逐渐减小,当传至桩底时,桩端轴向力就等于桩顶竖向荷载减去全部桩侧摩阻力,并与桩端支承反力大小相等,方向相反。可见,桩顶竖向荷载是通过桩侧摩阻力和桩端阻力逐渐传递给土体的,因此,土对桩的支承能力应由桩侧摩阻力和桩端阻力两部分组成,也就是说,桩的极限荷载应等于桩侧摩阻力极限值与桩端阻力极限值之和。但是尚需注意,桩侧摩阻力和桩端阻力的极限值并不在同一时间发生,它们的发挥程度与桩土间的变形性状有关,且各自达到极限值时所需的位移量也不尽相同。众多试验表明,只要桩与土体之间出现微小的相对位移,沿桩身就有荷载传递发生,产生桩侧摩阻力,且在不太大的相对位移(粘性土约为 $4\text{ mm} \sim 6\text{ mm}$ ,砂土约为 $6\text{ mm} \sim 10\text{ mm}$ )情况下,桩侧摩阻力即可充分发挥,达到极限值。然而,桩端阻力的发挥所需的位移值与桩底土层性质极为相关,其达到极限值所需要的位移要比发生桩侧极限摩阻力大得多。因此总是桩侧摩阻力先充分发挥,然后桩端阻力才逐渐发挥,直至达到极限状态。通常在评价桩的竖向承载力时必须充分考虑这一因素,并应注意到长桩因桩身弹性压缩而产生的较大影响。

按照建立于刚塑体模型基础上的经典单桩桩端阻力极限平衡理论计算模式以及计算桩侧阻力的有效应力法均指出:在匀质砂土中桩的端阻力和平均侧摩阻力都将随着桩入土深度呈线性增加。然而通过室内模型试验和现场原型试验研究表明:这个理论关系只有当桩端在某一临界深度以上时才适用。在临界深度以下时,在匀质砂土中桩的端阻力及平均侧摩阻力实

实际上保持为常量,这是由于土的压缩性,土粒被压碎、土拱作用以及其他因素的影响。目前对于临界深度以下的桩的性状还没有满意的分析方法,一般都采用经验方法。

关于在粘性土中的临界深度问题,由于试验研究尚少,其机理和变化规律还有待进一步探讨。

桩侧摩阻力的大小及其分布情况决定了桩身截面轴力沿深度的变化,因此了解桩侧摩阻力的分布规律,对研究和分析桩的工作性状有着十分重要的作用。当桩顶作用的竖向荷载较小时,桩与其侧面土体之间的相对位移较小,此时桩顶荷载几乎完全由桩侧摩阻力所承担,桩底土的竖向阻力来不及发挥;随着桩顶荷载的逐渐增加,桩与侧面土体之间的相对位移亦逐渐增大,从而桩侧摩阻力也逐渐增大。当桩侧摩阻力达一定值后,摩阻力分布图中的最大值逐渐下移(如图 2-1 所示),桩端土的竖向阻力逐渐开始发挥。

图 2-1

a) 打入桩; b) 钻孔灌注桩

研究表明,粘性土中的打入桩,其桩侧摩阻力沿深度分布的形状,通常近似于抛物线,在桩顶处摩阻力等于零,桩身中段处的摩阻力比桩的下段大;而钻孔灌注桩由于施工方法与打入桩不同,其摩阻力的分布也不相同,通常沿桩长的分布比较均匀。为简化起见,在工程中常近似假设打入桩桩侧摩阻力在地面处为零,沿桩入土深度成线性分布;而对钻孔灌注桩则近似假设桩侧摩阻力沿桩身均匀分布,即取其平均值。

还有一个问题是挤土桩的挤土效应和非挤土桩的松弛效应。打入桩或振动沉桩法在成桩过程中产生的挤土作用,会导致桩侧摩阻力发生变化,例如,在饱和粘性土中打桩,成桩过程使桩侧土受到挤压、扰动、重塑,产生超孔隙水压力,土的抗剪强度降低,桩侧摩阻力变小。待打桩完成并经过一段时间后,超孔隙水压力逐渐消散,再加上粘土的再固结和触变恢复,导致桩侧摩阻力产生显著的时间效应。在砂性土中打桩时,桩侧摩阻力的变化与砂土的初始密度有关,如密实砂性土有剪胀性会使摩阻力出现峰值后有所下降。而对于钻孔灌注桩等非挤土桩,在成孔过程由于孔壁侧向应力解除,出现侧向松弛变形。孔壁土的松弛效应导致土体强度削弱,桩侧摩阻力随之降低。

目前,由于桩的现场静载试验结果所求得的桩的竖向极限承载力为桩侧摩阻力与桩端阻力之和,因此很难根据试验结果满意地区分桩侧和桩端所分担的荷载。在工程实践中,桩端阻力应视桩的入土深度( $h$ )与桩径( $d$ )之比值以及桩底土的好坏而定。当  $h/d$  较大时,桩端阻

力发挥得少一些,反之,则发挥得多一些。自然,当桩底土较好(密实或坚硬)时,桩端阻力可考虑得大一些,反之,当桩底土较坏(松散或软弱)时,则可考虑得小一些。

## 2. 柱桩的受力特性

对于支承在硬土层及岩层上的柱桩,由于其持力层强度大、变形小,在荷载作用下,桩端沉降量很小,桩侧摩阻力难以发挥,通常可忽略不计,因此,桩顶荷载主要由桩端竖向阻力支承。研究表明,在荷载作用下,桩侧土或多或少起着一定的作用,即使是嵌岩桩,当桩的长径比达到一定数值后(约 13),桩侧摩阻力将起着一定的作用。但目前对此问题尚有一定的争议,为偏于安全,在《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ024 - 85)(以下简称《地基规范》)中暂不考虑柱桩桩侧摩阻力的作用。

## 二、单桩的破坏模式

单桩的破坏模式与其受力性能密切相关,由前可知,单桩所能承受的竖向荷载取决于桩周及桩端土对桩的支承能力和桩本身的材料强度,且桩的破坏模式不同,其承载力控制指标亦不同。一般说来,单桩在竖向荷载作用下,其破坏模式大致可分为如下三种:

1. 屈曲破坏,如图 2-2a)所示。当桩穿过极软弱土层支承于基岩或坚硬的土层上时,在竖向荷载作用下,桩本身象细长杆件一样产生纵向弯曲,当达一定程度后桩身材料屈服而破坏。这种破坏在荷载—沉降( $P-S$ )曲线上将呈现明显的破坏荷载,此时桩的竖向承载力取决于桩身的材料强度。一般细长的嵌岩桩容易发生此类破坏。

图 2-2 桩破坏的典型模式

2. 整体剪切破坏,如图 2-2b)所示。当具有足够强度的桩穿过抗剪强度较低的土层而达到或沉入强度较高的土层时,侧摩阻力发挥有限,大部分竖向荷载由桩底土支承,使桩端土体逐步形成连续的滑动面,出现整体剪切破坏,导致桩顶急剧下沉。同时桩底持力层以上的软弱土层不能阻止滑动土楔的形成也是原因之一。此时  $P-S$  曲线将出现明显的拐点和明确的破坏荷载。桩的竖向承载力主要取决于桩端土的支承能力,桩侧摩阻力也起一部分作用。通常

的摩擦桩(特别细长者优先)及灌注桩往往出现此类破坏。

3. 刺入破坏,如图 2-2c)所示。当具有足够强度的桩入土深度较大或桩周土层抗剪强度较均匀时(比如匀质砂土中的摩擦桩),随着桩顶竖向荷载不断增加,桩端土的不断变形,桩身贯入土中,出现类似浅基础下地基土的冲切剪切破坏,且土体的破坏先于桩身材料。其 P—S 曲线上一般无明显的拐点,作用在桩顶的竖向荷载主要由桩侧摩阻力承担。由于此类破坏桩顶沉降量较大,故设计时一般由桩顶沉降量控制。

### 三、桩土体系的荷载传递

#### 1. 荷载传递机理

桩侧摩阻力与桩端阻力的发挥过程就是桩土体系荷载的传递过程。当竖向荷载逐步施加于单桩桩顶时,桩身压缩而产生向下位移,与此同时桩侧表面受到土的向上摩阻力,桩身荷载通过所发挥出来的桩侧摩阻力传到桩周土层中去,致使桩身荷载和桩身压缩变形随深度递减。在桩土相对位移等于零处,其摩阻力尚未开始发挥作用而等于零。随着荷载增加,桩身压缩量和位移量增大,桩身下部的摩阻力亦随之调动起来,桩端也因出现竖向位移而产生桩端阻力。桩端位移加大了桩土相对位移,从而使桩侧摩阻力进一步发挥出来。当桩侧摩阻力全部发挥出来达到极限后,若继续增加荷载,其荷载增量将全部由桩端阻力承担。一般说来,靠近桩身上部土层的侧阻力先于下部土层发挥,而侧阻力先与端阻力发挥出来。

根据前面所述,竖向荷载下桩土体系荷载传递的过程可简单描述为:桩身位移  $S(z)$ 和桩身荷载  $P(z)$ 随深度递减,桩侧摩阻力  $f(z)$ 自上而下逐步发挥。 $P(z)$ 、 $S(z)$ 、 $f(z)$ 三者间的关系可通过数学表达式加以描述。取深度  $z$  处的微小桩段  $dz$ ,由力的平衡条件如图 2-3a)所

图 2-3 桩土体系的荷载传递

示。可得:

$$f(z) U dz + P(z) + dp(z) = P(z)$$

即

$$f(z) = - \frac{1}{U} \frac{dP(z)}{dz} \quad (2-1)$$

任一深度  $z$  桩身截面的荷载为:

$$P(z) = P_0 - U \int_0^z f(z) dz$$

竖向位移为:

$$S(z) = S_0 - \frac{1}{E_p A} \int_0^z P(z) dz$$

微分段  $dz$  的压缩量为:

$$ds(z) = - \frac{P(z)}{E_p A} dz$$

故

$$P(z) = - A E_p \frac{ds(z)}{dz} \quad (2-2)$$

将式(2-2)代入式(2-1)可得:

$$U s(z) = \frac{A E_p}{U} \frac{d^2 s(z)}{dz^2} \quad (2-3)$$

式中:  $A$ ——桩身横截面面积;

$E_p$ ——桩身弹性模量;

$U$ ——桩身周长。

式(2-3)就是进行桩土体系荷载传递分析计算的基本微分方程。

## 2. 影响荷载传递的因素

图 2-4 异常 P-S 曲线

实线—异常; 虚线—正常

- a) 打入桩接头被拉断或灌注桩断桩; b) 桩身混凝土强度不足被压碎; c) 干作业钻孔桩孔底虚土过厚; d) 泥浆护壁作业孔底沉淤过厚

马特斯 (N. S. Mattes) 和波勒斯 (H. G. Poulos) 通过理论分析得到桩土体系荷载传递性状与桩端、桩周土的刚度比, 桩、土的刚度比, 桩的长径比等因素有关。为有效地发挥桩的承载性能和取得最佳经济效果, 设计中运用桩土体系荷载传递特性, 根据土层的分布与性质, 合理确定桩径、桩长、桩端持力层等是十分必要的。

#### 四、单桩的荷载、沉降特性

单桩竖向静载荷试验的荷载—沉降 (P—S) 曲线是桩土体系的荷载传递、侧阻和端阻发挥的综合反映, 并随桩侧土层的分布与性质、桩径、桩长、成桩工艺等诸多因素而变化。由于桩侧摩阻力一般先于桩端阻力发挥出来 (支承于坚实基岩的短桩除外), 因此除下列三种情况外, P—S 曲线前段主要受侧阻力制约, 而后段则主要受端阻力制约, 单桩承载力的极限状态也一般由桩端阻力的破坏所制约 (纯摩擦桩除外)。

(1) 支承于基岩上的短桩, P—S 曲线全程受端阻制约;

(2) 短桩 ( $L/d < 10$ ) 和支承于较硬持力层上的中长扩底桩 ( $L/d \geq 25$ ), P—S 曲线前段同时受侧阻和端阻性状的制约;

(3) 超长桩 ( $L/d \geq 100$ ), 桩端土的性质对荷载传递不再有任何影响, P—S 曲线全程受侧阻性状制约。

根据 P—S 曲线还可以判断桩的施工是否存在质量缺陷, 图 2-4 列举了四类缺陷形成的异常 P—S 曲线。

## 第二节 单桩竖向承载力的计算

如前所述, 单桩竖向承载力应由土对桩的支承能力、桩身材料强度以及上部结构所容许的桩顶沉降三方面所控制。桩顶沉降分析将在下一章作较详细的介绍, 故本节仅限于土对桩的支承能力及桩本身材料强度要求来探讨单桩竖向承载力的确定方法。

### 一、按材料强度确定桩的竖向承载力

一般说来, 桩的竖向承载力往往由土对桩的支承能力控制。但当桩穿过极软弱土层, 支承 (或嵌固) 于岩层或坚硬的土层上时, 单桩竖向承载力往往由桩身材料强度控制。此时, 基桩将象一根受压杆件, 在竖向荷载作用下, 将发生纵向挠曲破坏而丧失稳定性, 而且这种破坏往往发生于截面承压强度破坏以前, 因此验算时尚需考虑纵向挠曲影响, 即截面强度应乘上纵向挠曲系数  $\eta$ 。根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ023 - 85) (以下简称《公路桥规》), 对于钢筋混凝土桩, 当配有普通箍筋时, 可按下式确定基桩的竖向承载力:

$$P = \eta \left( \frac{1}{\gamma_c} R_a A + \frac{1}{\gamma_s} R_g A_g \right) \quad (2-4)$$

式中: P——计算的竖向承载力;

$\eta$ ——纵向弯曲系数, 对低承台桩基可取  $\eta = 1$ ; 高承台桩基可由表 2-1 查取;

$R_a$ ——混凝土抗压设计强度;

A——验算截面处桩的截面面积;

$R_g$ ——纵向钢筋抗压设计强度;

$A_g$ ——纵向钢筋截面面积;

$b$ ——桩的工作条件系数,取  $b = 0.95$ ;

$c$ ——混凝土安全系数,取  $c = 1.25$ ;

$s$ ——钢筋安全系数,取  $s = 1.25$ ;

当纵向钢筋配筋率大于 3% 时,桩的截面积应采用桩身截面混凝土面积  $A_h$ ,即扣除纵向钢筋面积  $A_g$ ,故  $A_h = A - A_g$ 。

钢筋混凝土桩的纵向挠曲系数

表 2-1

$l_0/b$	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50
$l_0/d$	7	8.5	10.5	12	14	15.5	17	19	21	22.5	24	26	28	29.5	31	33	34.5	36.5	38	40	41.5	43
$l_0/r$	28	35	42	48	55	62	69	76	83	90	97	104	111	118	125	132	139	146	153	160	167	174
	1.000	0.980	0.950	0.920	0.870	0.810	0.750	0.700	0.650	0.600	0.560	0.520	0.480	0.440	0.400	0.360	0.320	0.290	0.260	0.230	0.210	0.19

注： $l_0$ ——考虑纵向挠曲时桩的稳定计算长度,应结合桩在土中支承情况,根据桩两端支承条件确定;

$r$ ——截面的回转半径,  $r = \sqrt{I/A}$ ,  $I$  为截面的惯性矩,  $A$  为截面积;

$d$ ——桩的直径;

$b$ ——矩形截面桩的短边长。

影响基桩稳定计算长度  $l_0$  的因素很多,如桩的两端支承情况、桩周土体强度等等,具体计算方法可详见本书第七章。

## 二、按土阻力确定单桩竖向承载力

按土层对桩的支承能力确定单桩竖向承载力,即要求单桩在竖向荷载作用下,地基土体的强度和稳定性均能得到保证,变形也应控制在容许的范围之内。确定单桩竖向承载力的方法有多种,如静载试验法、动静力触探法、经验公式法、动测试桩法等。考虑到地基土的多变性、复杂性和地域性等特点,在工程应用中宜选用多种方法综合考虑和分析,以合理确定单桩竖向承载力。有关各种测试方法的详细讨论可参见有关章节,本节仅着重讨论设计规范中的经验公式计算方法及静力分析算法。

### (一) 《地基规范》单桩竖向承载力的确定

根据多年来静载试验和设计实践所积累的大量资料,现行《地基规范》建立了一套计算单桩竖向承载力的经验公式。这些公式充分考虑到了桩的类型、施工方法、土层性质及埋深等影响因素,其计算方法如下:

#### 1. 摩擦桩

如前所述,打入桩与钻(挖)孔灌注桩的桩侧摩阻力和桩端阻力数值不同,《地基规范》建议按如下公式计算:

#### (1) 钻(挖)孔灌注桩

$$[P] = \frac{1}{2} U \sum_{i=1}^n q_{si} + m_0 A \{ [q_0] + K_2 \cdot z_2 (h - 3) \} \quad (2-5)$$

式中： $[P]$ ——单桩竖向容许承载力(kN),当荷载组合 II 或组合 III 或组合 IV 或组合 V 作用时,容许承载力可提高 25% (荷载组合 I 中如含有收缩、徐变或水浮力的荷载效应,也应同样提高);

$U$ ——桩的周长(m),按成孔直径计算,当无试验资料时,成孔直径可按下列规定采

用:

旋转钻:按钻头直径增大 3cm ~ 5cm ;

冲击钻:按钻头直径增大 5cm ~ 10cm ;

冲抓钻:按钻头直径增大 10cm ~ 20cm ;

$l_i$ ——桩在承台底面或最大冲刷线以下的第  $i$  层土层中的长度(m);

$i$ ——与  $l_i$  相对应的各土层与桩侧的极限摩阻力(kPa),可按表 2-2 采用;

钻孔桩桩侧土的极限摩阻力  $i$  值

表 2-2

土 类	极限摩阻力 $i$ (kPa)	土 类	极限摩阻力 $i$ (kPa)
回填的中密炉渣、粉煤灰	40 ~ 60	硬塑亚粘土、亚砂土	35 ~ 85
流塑粘土、亚粘土、亚砂土	20 ~ 30	粉砂、细砂	35 ~ 55
软塑粘土	30 ~ 50	中 砂	40 ~ 60
硬塑粘土	50 ~ 80	粗砂、砾砂	60 ~ 140
硬粘土	80 ~ 120	砾石(圆砾、角砾)	120 ~ 180
软塑亚粘土、亚砂土	35 ~ 55	碎石、卵石	160 ~ 400

注: 漂石、块石(含量占 40% ~ 50%),粒径一般为 300mm ~ 400mm)可按 600kPa 采用;

砂类土、砾石、碎(卵)石可根据其密实度和填充料选用大值或小值;

挖孔桩的极限摩阻力可参照本表采用。

$A$ ——桩底横截面面积( $m^2$ ),用设计直径(钻头直径)计算,但当采用换浆法施工(即成孔后,钻头在孔底继续旋转换浆)时,则按成孔直径计算;

$[ \sigma ]$ ——桩端处土的容许承载力(kPa),可参照规范或表 2-3 和表 2-4 取用;

一般粘性土地基容许承载力 $[ \sigma ]$ (kPa)

表 2-3

$[ \sigma ]$ $e_0$ \ $l_L$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
0.5	450	440	430	420	400	380	350	310	270	240	220	-	-
0.6	420	410	400	380	360	340	310	280	250	220	200	180	-
0.7	400	370	350	330	310	290	270	240	220	190	170	160	150
0.8	380	330	300	280	260	240	230	210	180	160	150	140	130
0.9	320	280	260	240	220	210	190	180	160	140	130	120	100
1.0	250	230	220	210	190	170	160	150	140	120	110	-	-
1.1	-	-	160	150	140	130	120	110	100	90	-	-	-