

桩 基 工 程

(第二版)

段新胜 顾湘 编著

中国地质大学出版社

桩 基 工 程

(第二版)

段新胜 顾湘 编著

中国地质大学出版社

· (鄂)新登字第 12 号 ·

图书在版编目(CIP)数据

桩基工程/段新胜,顾湘编著. — 武汉:中国地质大学出版社,1995.6

ISBN 7-5625-0950-6

I. 桩…

I. ①段… ②顾…

Ⅱ. 工程-桩基

N. TU 473.1

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市·喻家山·邮编 430074)

责任编辑:许高燕

印 刷:武汉市皇冠彩印印刷厂

开本 787×1092 1/16 印张 15.875 字数 400 千字

1994 年 8 月第 1 版 1995 年 6 月第 2 版 1995 年 6 月第 2 次印刷 印数 5001—10000 册

定价:14.80 元

前 言

随着我国工程建设事业的蓬勃发展，在高层建筑、重型厂房、桥梁、港口码头、海上采油平台以及核电站等工程中大量采用桩基础，桩基已成为我国工程建设中最重要的一种基础型式，桩基工程造价通常占土建工程总造价的 1/4 以上，因而建设单位与施工单位不断地探索降低造价的措施，促进了桩基工程的设计理论、施工技术和质量检测方法的发展和完善。本书作者根据自己多年从事桩基工程教学、科研、生产成果，并广泛参阅了大量的文献资料，系统地介绍了桩基工程的基本理论、施工工艺和工程预算。全书主要包括四部分内容：一是桩基的设计，主要介绍桩基类型与选型，各种型式的单桩承载力及群桩承载力的计算；二是桩基施工，这是桩基工程的主要内容，介绍了预制桩、钻孔灌注桩、沉管灌注桩、夯扩灌注桩、爆扩灌注桩、地下连续墙、深层搅拌桩的施工方法，还系统地介绍了灌注桩混凝土的配制技术；三是桩基工程检测，主要介绍预留混凝土试件检验、抽芯验桩、超声波验桩和桩的动力测试等主要内容；四是桩基工程预算，这部分内容也是从事桩基工程施工与管理人员必须掌握的重要内容。

本书由段新胜同志和顾湘同志合编，具体分工如下：第一、二、四、五、六、八章由段新胜编写，第三、七、九章由顾湘编写。

由于作者的理论水平和实践经验有限，系统全面地介绍桩基工程的各个方面实属尝试，错误及不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

作者

于中国地质大学
汉口岩土工程研究所
一九九四年五月

目 录

第一章 桩基类型与选型	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 桩的分类	(2)
第三节 预制桩和灌注桩特点	(6)
第四节 桩型和成桩工艺选择原则	(7)
第二章 桩基承载力的确定	(9)
第一节 单桩竖向承载力	(9)
第二节 桩的负摩阻力及抗拔桩承载力	(20)
第三节 嵌岩灌注桩承载力	(23)
第四节 群桩承载力	(26)
第三章 钢筋混凝土预制桩施工	(29)
第一节 桩的预制、起吊、运输与堆放	(30)
第二节 沉桩前的准备工作	(31)
第三节 沉桩方法	(32)
第四章 灌注桩混凝土配合比设计	(45)
第一节 混凝土的原材料	(45)
第二节 对灌注桩混凝土的基本要求	(54)
第三节 灌注桩混凝土配合比设计	(56)
第五章 钻孔灌注桩成孔及清孔工艺	(63)
第一节 钻孔灌注桩施工前的准备工作	(63)
第二节 正循环回转成孔	(75)
第三节 反循环成孔技术	(82)
第四节 潜水钻机成孔	(103)
第五节 冲抓成孔	(107)
第六节 螺旋钻成孔	(112)
第七节 清孔工艺	(119)
第六章 钻孔灌注桩成桩工艺	(122)
第一节 钢筋笼的制作和吊放	(122)
第二节 灌注机具与灌注工艺	(125)
第三节 灌注事故的预防与处理	(135)
第七章 特种桩施工方法	(139)
第一节 沉管灌注桩	(139)
第二节 夯扩灌注桩	(147)

第三节 爆扩灌注桩(爆扩桩) (148)
 第四节 地下连续墙 (159)
 第五节 深层搅拌桩 (162)
 第六节 干冲碎石桩 (176)
 第七节 高压喷射注浆法(旋喷桩) (184)
 第八节 人工挖孔桩 (197)
 第八章 桩基工程检测 (204)
 第一节 预留混凝土试件检验与抽芯验桩 (204)
 第二节 超声波验桩 (208)
 第三节 桩的动力测试 (212)
 第四节 桩基工程验收 (227)
 第九章 桩基工程预算 (229)
 第一节 桩基工程费用组成 (229)
 第二节 桩基工程预算定额 (234)
 第三节 桩基工程预算方法 (242)
 参考文献 (248)

第一章 桩基类型与选型

第一节 概 述

承受竖向压荷载的桩是通过桩侧摩阻力和桩端阻力将上部荷载传递到深部土(岩)层,因而桩的竖向承载力同桩所穿过的整个土层和桩底持力层的性质、桩的外形和尺寸密切相关。承受横向荷载的桩是通过桩身将荷载传给侧向土体,其横向承载力同桩侧土的抗力系数、桩身的抗弯刚度与强度密切相关。工程实际中,以承受竖向荷载为主的桩基居多。

桩基可由单根桩构成,如一柱一桩的情况;多数情况是由多根桩组成的群桩,荷载通过承台传递给各桩桩顶。当承台与地面接触形成低承台群桩基础时,承台、桩、土将相互影响共同作用,使群桩的承载性状发生较大变化并趋于复杂。

影响桩基承载力的因素甚多,主要有以下几方面:

(1) 桩身所穿越土层的强度、变形性质和应力历史。桩基的竖向承载力受桩身所穿越的全部土层的影响,而横向承载力主要受靠近地面的上部土层的影响。桩侧土层若处于欠固结状态,在后期固结过程中所产生的压缩变形可能对桩身产生负摩阻力。

(2) 桩端持力土层的强度和变形性质。桩端持力土层对竖向承载力的影响程度,随桩的长径比(l/d)的增大而减小,随桩土刚度比(E_p/E_s)的增大而提高,随持力土层与桩侧土层的刚度比(E_s/E_c)的增大而增大。

(3) 桩身与桩底的几何特征。桩身的比表面积(侧表面积与体积之比, F_s/V_p)愈大,桩侧摩阻力所提供的承载力就愈高。因此,为提高桩的竖向承载力,可将桩身截面作成如图 1-1 所示的三角形、六边形、环形、十字形、H 形等异形断面桩,或作成楔形、螺旋形、“糖葫芦”形等变断面桩。为提高桩端总阻力,常将桩端做成扩大头。桩身的横向刚度愈大,对于减小横向荷载下桩的位移和桩身内力的效果愈明显,因而,受横向荷载桩的桩身可做成如图 1-2 中所示的矩形、T 形、工字形、8 字形(二圆桩相切)、十字形等异形桩,或将承受弯矩较大的上段做成如图 1-2 中所示的异形断面桩。

(4) 桩体材料强度。当桩端持力层的承载力很高时(如砂卵石、基岩等),桩体材料的强度可能制约桩的竖向承载力,因而合适的混凝土强度等级和配筋对于充分发挥桩端持力层的承载性能以及提高竖向承载力十分重要。对于承受横向荷载的桩,其承载力在很大程度上受桩体材料强度制约。因此,选择合适的混凝土强度等级和在受弯的桩段配置适量的钢筋,对提高其横向承载力同样十分重要。

(5) 群桩的几何参数。桩的排列、桩距、桩的长径比、桩长与承台宽度之比等几何参数对承台、桩、土的相互作用和群桩承载力影响较

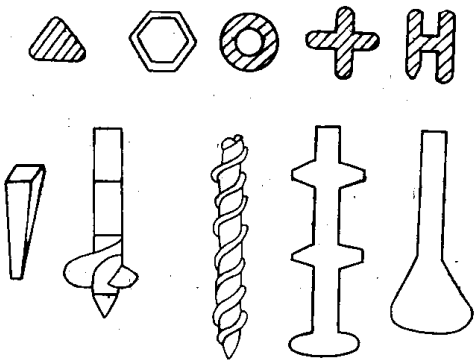


图 1-1 受竖向荷载的异形断面桩和变断面桩

大，设计时上述几何参数应根据荷载、土质与土层分布、上部结构特点等综合分析，优化确定。

(6) 成桩方法。成桩方法和工艺对桩侧摩阻力和桩端阻力都有一定影响。非饱和土特别是粉土、砂土中的打入式桩，其侧摩阻力和端阻力将因沉桩挤土效应而提高。采用泥浆护壁成孔的灌注桩，因泥浆稠度过大而形成桩侧表面的“泥膏”会大大降低摩阻力；泥浆在孔底沉淤过厚会导致端阻力明显降低。

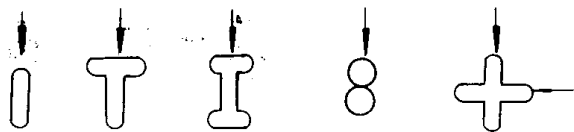


图 1-2 受横向荷载的异形桩断面

第二节 桩的分类

桩可按功能、荷载传递机理、截面形状、尺寸、材料、施工方法等进行分类。

一、按功能分类

1. 承受轴向压力的桩
各类建筑物、构筑物的桩基大都以承受竖向荷载为主，故基桩桩顶以轴向压力荷载为主，如图 1-3a。

2. 承受轴向拔力的桩
水下建筑抗浮力桩基、牵缆桩基、输电塔和微波发射塔桩基等，其主要功能以抵抗拔力为主，如图 1-3b。

3. 承受横向荷载的桩
外荷载以力或力矩形式作用于与桩身轴线相垂直的方向（横向）时，为横向荷载桩，如图 1-3c、d。

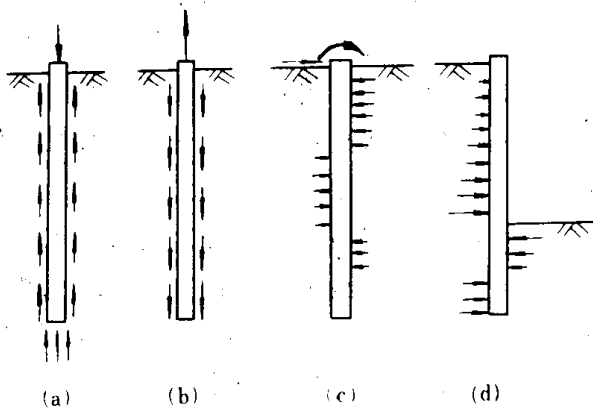


图 1-3 不同功能的桩

(a) 受压桩；(b) 抗拔桩；(c) 横向荷载主动桩；
(d) 横向荷载被动桩

二、按荷载传递机理分类

1. 竖向荷载桩
(1) 竖向荷载桩的分类。竖向荷载桩按荷载传递机理可分为摩擦桩、端承摩擦桩、摩擦端承桩和端承桩四种，但有的文献或规范仅把竖向荷载桩简单地分为摩擦桩和端承桩两种，即从设计角度考虑，只考虑桩端承载力的桩为端承桩；既考虑桩端承载力又考虑桩身摩阻力的桩为摩擦桩。我们认为从荷载传递机理分析，把竖向荷载桩分为上述四种类型比较合理。

桩顶作用的竖向荷载 Q 由桩侧摩阻力 Q_s 和桩端阻力 Q_{pu} 承担，如图 1-4 所示，即

$$Q_u = Q_{su} + Q_{pu}$$
 (1-1)

式中： Q_u ——桩的竖向极限荷载；
 Q_{su} ——桩侧极限摩阻力；
 Q_{pu} ——桩端极限阻力。

摩擦桩是指竖向荷载只由桩侧摩阻力承受，即 $Q_u \approx Q_{su}$ ， $Q_{pu} \approx 0$ ；端承桩是指竖向荷载只

由桩端阻力承受,即 $Q_u \approx Q_{pu}$, $Q_{su} \approx 0$; 端承摩擦桩和摩擦端承桩是介于摩擦桩和端承桩之间的中间桩型, 竖向荷载由桩侧摩阻力和桩端阻力共同承受, 只是对于端承摩擦桩而言, $Q_{su} > Q_{pu}$; 对于摩擦端承桩而言, $Q_{su} < Q_{pu}$ 。

(2) 竖向荷载作用下桩的破坏模式。桩的破坏模式主要取决于桩周围土的抗剪强度、桩端支承情况、桩的尺寸以及桩的类型等条件。在这里仅讨论土层对桩的破坏模式的影响。

魏西克 (A. S. Vesic) 根据土的相对密度 D_r 和基础的相对埋置深度 L/b (埋置深度与基底宽度或直径之比) 的不同条件, 把砂土中基础的破坏分为三种情况: ①整体剪切破坏——具有明显的剪切破坏面, 并有明确的破坏荷载; ②局部剪切破坏——为使塑性平衡状态扩展到滑动土体的外缘所需要的侧向压缩, 大于基础沉降时产生的侧向压缩; ③刺入剪切破坏——只出现侧向压缩, 而剪应力还不够大, 没有能够充分利用土的抗剪强度。图 1-5 给出了这三种破坏模式的示意图。

由图 1-5 可知, 整体剪切破坏时, 很容易确定极限荷载, 而在后两种情况下, 则常常不容易明确地定出极限荷载; 随基础埋深的加大, 整体剪切破坏将消失, 并转化为局部剪切破坏; 最终将都成为刺入破坏。在松砂地基情况下, 在任何埋深时都属于刺入破坏。对于桩来说, 在常规尺寸时将出现刺入破坏或局部剪切破坏, 即使是没有桩侧摩阻力时, 也是这样。下沉量曲线表明在刺入破坏下, 荷载随下沉量的增加而不断地增大。这解释了为什么一般不能明确地给出桩极限荷载值的原因。

图 1-6 说明了土的强度对桩的破坏模式的影响。图中给出了桩周土层及桩底持力层的抗剪强度 τ_f 的相对值, 以及常规的桩顶荷载——桩顶下沉量曲线。为了便于说明, 下列情况均假设桩周土层为均匀土层。

第一种情况——摩擦桩的情况如图 1-6a 所示。这说明桩底处的土层软弱, 桩顶荷载由桩侧摩阻力支承, 桩端阻力不起作用; $Q-s$ 曲线呈现出竖向的陡降段, 说明此时摩擦桩的桩侧摩阻力已完全被发挥出来。桩底有较厚的虚土 (包括沉淀土、扰动土和回落土) 的钻孔灌注桩便属此种情况。

第二种情况——端承摩擦桩的情况。为便于说明, 仅举桩地基土的抗剪强度相当均匀的情况为例。当 D_r 及 L/b 符合图 1-5 左下方的条件时, 出现刺入破坏, 在此情况下, $Q-s$ 曲线呈现出明显的破坏荷载, 如图 1-6b 所示, 这说明桩的极限荷载大部分将由桩侧摩阻力承受, 小部分则由桩端阻力承受。一般情况下的钻孔灌注桩及打入式预制桩属于此种情况。

第三种情况——摩擦端承桩的情况。桩穿过抗剪强度较低的土层, 达到高强度的土层。假如在桩底部没有较软弱土层, 并且桩的长度不长, 那末当桩顶荷载 Q 增大时将出现整体剪

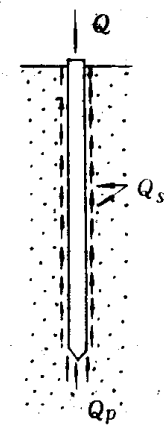


图 1-4 单桩的荷载传递

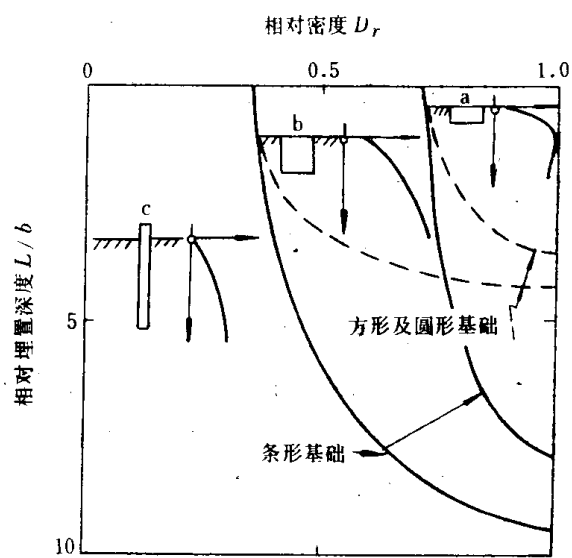


图 1-5 浅基础和深基础的不同破坏模式
(a) 整体剪切破坏; (b) 局部剪切破坏; (c) 刺入剪切破坏

切破坏或局部剪切破坏,因为桩底上部的软弱土层不能阻止滑动土楔的形成,桩侧摩阻力的作用是比较小的。这样,桩的极限荷载小部分由桩侧摩阻力承受,大部分则由桩端阻力承受。如图 1-6c 所示。打入式短桩、钻孔扩底短桩一般属于此种情况。

第四种情况——端承桩的情况。打入土中的桩(如木桩、钢筋混凝土桩等),桩底支承在很硬的地层(岩石)上,桩周土又太软弱,对于桩身没有约束力或侧向抵抗力。在这种情况下,桩的破坏是在经受了或多或少的弹性压缩后出现纵向压曲,这同材料的细长压杆的失稳现象类似。在图 1-6d 中可以看到一个明确的破坏荷载,该荷载的大小由桩身的材料强度决定。

2. 横向荷载桩

(1) 主动桩。桩顶受横向荷载或力矩作用桩身轴线偏离初始位置,桩身所受土压力是由于桩主动变位而产生的。风力、地震力、车辆制动力等作用下的建筑物桩基属于主动桩,如图 1-3c。

(2) 被动桩。沿桩身一定范围内承受侧向土压力,桩身轴线由于该土压力作用而偏离初始位置。深基坑支护桩、坡体抗滑桩、堤岸支护桩等均属于被动桩。如图 1-3d。

三、按桩身材料分类

1. 木桩

木桩适合于地下水位以下地层中工作,因在这种条件下木桩能抵抗真菌的腐蚀而保持耐久性。当地下水位离地面深度较大而桩必须支承于地下水位以下时,可在地下水位以上部分代之以钢筋混凝土桩身,将其与下段木桩相联接。对于地下水位变化幅度大的地区不宜使用木桩。我国木材资源不足,因此工程实践中早已趋向于不采用木桩。

2. 钢桩

钢桩可根据荷载特征制作成各种有利于提高承载力的断面,如图 1-1 所示。管形和箱形断面桩的桩端常做成敞口式,以减小沉桩过程中的挤土效应;当桩壁轴向抗压强度不够时,可将挤入管、箱中的土塞挖除后灌注混凝土。H 形钢桩沉桩过程的排土量较小,沉桩贯入性能好。此外,H 形桩的比表面积大,用于承受竖向荷载时能提供较大的摩阻力。为增大桩的摩阻力,还可在 H 形钢桩的翼缘或腹板上加焊钢板或型钢。对于承受侧向荷载的钢桩,可根据弯矩沿桩身的变化情况局部加强其断面刚度和强度。

钢桩除具有上述断面可变外,还具有抗冲击性能好、节头易于处理、运输方便、施工质量稳定等优点。钢桩的最大缺点是造价高,按我国价格,约相当于钢筋混凝土桩的 3~4 倍。按照当前国情,钢桩还只能在极少数深厚软土层上的高重建筑物或海洋平台基础中使用。

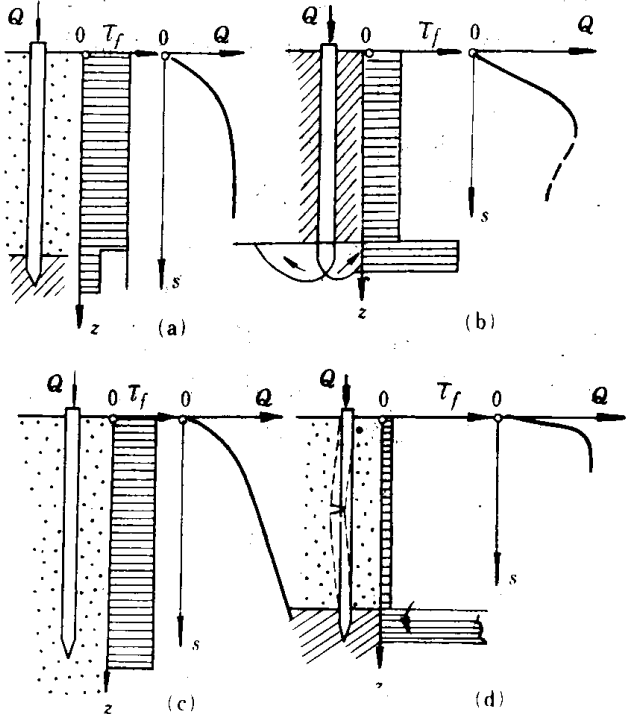


图 1-6 土的强度对桩破坏模式的影响
(a) 摩擦桩; (b) 端承摩擦桩; (c) 摩擦端承桩; (d) 端承桩

3. 钢筋混凝土桩

钢筋混凝土桩的配筋率较低，而混凝土取材方便、价格便宜、耐久性好。钢筋混凝土桩既可预制又可现浇（灌注桩），还可采用预制与现浇组合，适用于各种地层，成桩直径和长度可变范围大。因此，桩基工程的绝大部分是钢筋混凝土桩，桩基工程的主要研究对象和主要发展方向也是钢筋混凝土桩。

四、按成桩方法分类

按成桩方法可分为两大类：预制桩和灌注桩。

1. 预制桩

这里所指的预制桩是钢筋混凝土预制桩，主要有普通钢筋混凝土预制桩和预应力钢筋混凝土桩两大类。

(1) 普通钢筋混凝土预制桩。这是一种传统桩型，其截面多为方形（实心方形 $250 \times 250 \sim 550 \times 550 \text{mm}$ ）。这种桩宜在工厂预制，高温蒸气养护。蒸养可大大加速强度增长，但动强度的增长速度较慢，因此蒸养后达到了设计强度的桩，一般仍需放置一个月左右待混凝土碳化后再使用。

(2) 预应力钢筋混凝土桩。对桩身主筋施加预拉应力，混凝土受预压应力，从而提高起吊时桩身的抗弯能力和冲击沉桩时的抗拉能力，改善抗裂性能，节约钢材。

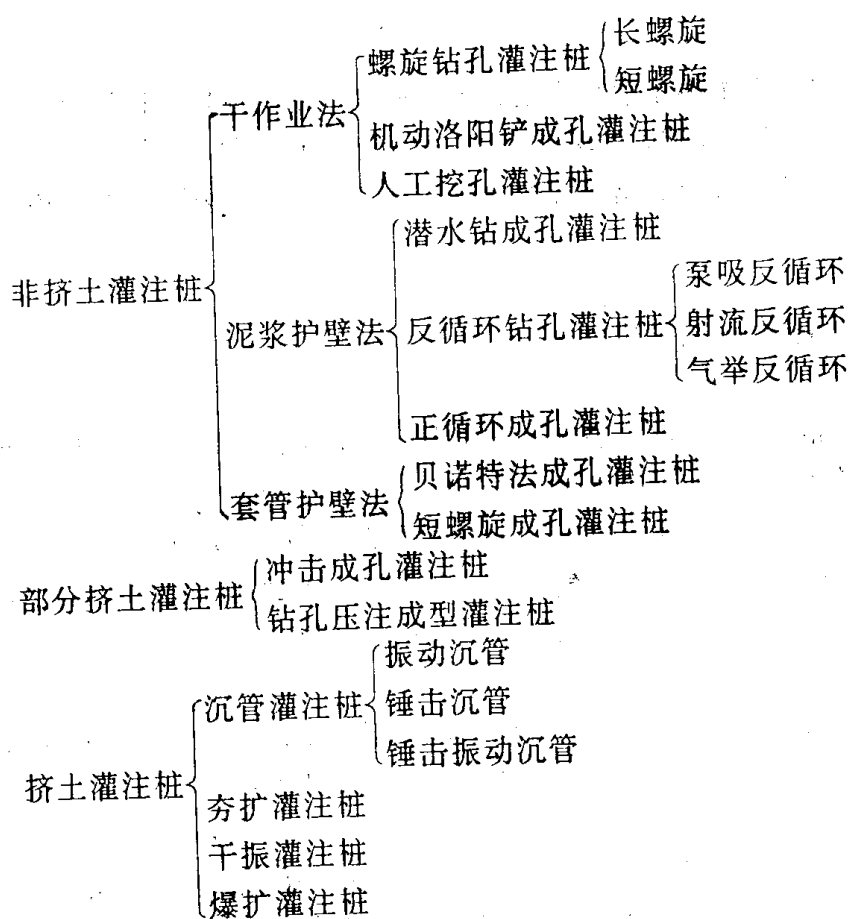
这种桩的制作方法有离心法和捣注法（可制成方形截面）两种。离心法一般制成环形断面。为了减少沉桩时的排土量和提高沉桩贯入能力，往往将空心预应力管桩桩端制成敞口式。

预应力管桩在我国多数采用室内离心成型、高压蒸养法生产。其混凝土强度等级可达 C60 以上。规格有 $\phi 400 \text{mm}$ 、 $\phi 500 \text{mm}$ 两种，管壁厚度分别为 90mm、100mm，每节标准长度有 8m、10m（丰台桥梁厂），也可按需要确定节长。

2. 灌注桩

当前灌注桩在我国已形成多种成桩工艺，多类桩型，使用范围已扩大到土木工程的各个领域。从国际上的情况看，灌注桩正朝两个方向迅速发展，即大直径巨型桩和小直径（ $d \leq 250 \text{mm}$ ）微型桩。前者桩身直径大至 4m，扩底直径达 9m，其设计承载力，桩端支承于硬粘土层者高达 40 000kN，并多采用一柱一桩。80 年代以来，随着高层建筑的迅速增多，大直径桩在我国建筑工程中已获得很大发展。微型桩则多用于地基的浅层处理，形成复合地基，或用于旧建筑基础的托换加固。微型桩在我国近年来也已开始发展起来。

灌注桩的成桩技术日新月异，就其沉桩过程、桩土的相互影响特点大体可分为三大基本类型：非挤土灌注桩、部分挤土灌注桩、挤土灌注桩。每一基本类型又包含多种成桩方法（工法），现粗略归纳如下：



第三节 预制桩和灌注桩特点

一、预制桩特点

(1) 预制桩不易穿透较厚的砂土及硬夹层（除非采用预钻孔、射水等辅助沉桩措施），只能进入砂、砾、硬粘土、强风化岩层等坚实持力层不大的深度。

(2) 沉桩方法一般采用锤击，由此产生振动、噪声污染。

(3) 沉桩过程产生挤土效应，特别是在饱和软粘土地区沉桩，可能导致周围建筑物、道路、管线等损坏。

(4) 一般说来预制桩的施工质量较稳定。

(5) 预制桩打入松散的粉土、砂、砾层中，由于桩周和桩端土受到挤密，其侧摩阻力因土被挤密和桩侧表面预加法向应力而提高，桩端阻力也相应提高。地基土的原始密度愈低，承载力的提高幅度愈大。当建筑场地有较厚砂、砾层时，一般宜将桩打入该持力层，以大幅度提高承载力。当预制桩打入饱和粘性土时，土结构受到破坏并出现超孔隙水压力。桩承载力存在显著的时间效应，即随休止时间的增长而提高。

(6) 桩的承载力受打桩设备能力的限制。建筑工程中预制桩的单桩设计承载力一般不超过 3000kN，而在海洋工程中，由于采用大功率打桩设备，桩的尺寸大，最大单桩设计承载力可达 10 000kN。

(7) 影响桩的贯入的因素较多，常常会出现因桩打不到设计标高而截桩，造成浪费。

(8) 预制桩由于承受运输、起吊、打击应力，要求配置较多钢筋，混凝土强度等级也要相应提高，因而会使造价提高。

二、灌注桩特点

- (1) 施工过程无大的噪声和振动（沉管灌注桩除外）。
- (2) 可根据土层分布情况任意变化桩长，容易适应持力层面高低不平的变化。
- (3) 可根据建筑物的荷载分布与土层情况采用不同桩径，对于承受横向荷载的桩，可设计成有利于提高承载力的异形桩（如图 1-1 所示），还可以设计成变断面桩，即在受弯矩较大的上部采用较大的断面。
- (4) 可穿过各种软、硬夹层，将桩端置于坚实土层或嵌入基岩，还可扩大桩底以充分发挥桩身强度和持力层的承载力。
- (5) 施工设备比较简单、轻便，可用简单设备施工出极大的单桩承载力的桩。
- (6) 桩身配筋可根据荷载大小与性质及荷载沿深度的传递特征以及土层的变化配置，无需像预制桩那样配置起吊、运输、打击应力筋，其配筋率远低于预制桩，其造价约为预制桩的 40%~70%。
- (7) 灌注桩施工的现场作业太多，影响桩的质量的人为因素较多，质量不够稳定，有时会发生缩径、断桩、桩身局部夹泥、桩身混凝土离析、桩顶段混凝土疏松等质量事故。成桩后不易进行可靠的质量检测。
- (8) 用泥浆循环法施工钻孔时，泥浆处理量太大。

第四节 桩型和成桩工艺选择原则

桩型和成桩工艺选择应考虑以下原则：

1. 考虑建筑物的性质与荷载

(1) 建筑物的重要性，对不均匀沉降的敏感程度。对于重要的建筑物和对不均匀沉降敏感的建筑物，要选择成桩质量稳定性好的桩型。

(2) 建筑物的荷载大小。对于荷载大的高重建筑物，首先要考虑选择单桩承载力足够大的桩型，在有限的平面范围内合理布置桩距、桩数。如有坚硬持力层的地区优先选用大直径桩；深厚软弱土层地区优先选用长摩擦桩等。

(3) 荷载的性质。对于地震设防区或受其他动荷载的桩基，要考虑选用既能满足竖向承载力又有利于提高横向承载力的桩型，还应考虑动荷载可能对桩基的影响。

2. 考虑工程地质、水文地质条件

(1) 持力层的埋置深度与性质。对坚实持力层：当埋深较浅时，应优先采用端承桩，包括扩底桩；当埋深较深时，则应根据单桩承载力的要求，选择恰当的长径比。持力层的土性也是桩型选择的重要依据，对于砂、砾层，采用挤土桩更为有利；当存在粉、细砂等夹层时，采用预制桩则应慎重。

(2) 土层中的空穴和障碍物。土层中是否有古墓、土洞、孤石，基岩中是否有岩溶、破碎带等，对于选择桩型和成桩方法是重要的参考因素。

(3) 土层是否具有湿陷性、膨胀性。若为湿陷性黄土，为消除湿陷性，可考虑采用小桩距挤土桩；若为膨胀土，一般情况下可采用短扩底桩。

(4) 地下水位、地下水补给条件。地下水位与地下水补给条件，是选择桩的施工方法的主要因素。土体在水的作用下，成孔过程（主要指人工挖孔）是否可能产生管涌、砂涌等现

象；对于低渗透性的饱和软土，采用挤土桩是否会引起挤土效应等都应予周密考虑。

(5) 土层是否具有可液化、震沉性质。地震区上部土层若有可液化或震沉特性，则应考虑桩承受因液化、震沉产生的负摩擦力使桩嵌入稳定土层中一定深度。

3. 考虑施工环境

(1) 与相邻建筑物、道路、地下管线、堤坝等的距离。挤土桩施工过程中引起的挤土、振动等次生效应，可能导致邻近建筑物的损坏，这是必须加以考虑的。如某大城市，在不采取设防措施条件下打预制桩，因损坏邻近建筑物所付的赔偿费比桩基础本身造价还高；还曾发生因挤土而折断煤气管道引起爆炸的事故。由于打桩振动和引起的超孔隙水压力，可能导致坝体、陡坡产生滑动失稳。

(2) 施工现场的泥浆处理条件。采用泥浆护壁成孔时，要具备设置泥浆沉淀池的足够大的现场，若现场面积小，泥浆无法沉淀处理，则不能采用泥浆护壁法施工，因为泥浆不经处理是不能直接排泄于下水道的。目前我国尚不具备泥浆分离的成熟技术，若具备这种技术，则不受上述条件限制。

(3) 现场设备进出场和运转条件。成桩设备进出场和成孔成桩过程所需空间尺寸、与建筑物的净距等各有不同要求，选择成桩方法时必须予以考虑。

4. 考虑材料供应与施工技术条件

(1) 灌注桩所需砂、石料相对于预制桩要多，对于砂、石供应困难的大城市，采用灌注桩时要考虑这一因素。

(2) 预制桩的制作特别是预应力桩的制作，要求有一定的场地和设备，选择预制桩时应予考虑。

(3) 各种类型桩要求相应的施工设备和技术，选择成桩方法时不要盲目追求先进，忽视现实可能性。

5. 考虑经济指标、施工工期

(1) 不同类型桩的材料、人力、设备、能源等的消耗各有不同，应综合核算各项经济指标，包括单方混凝土所提供的承载力、单方混凝土的造价、三材消耗等。

(2) 施工工期。某些条件下，施工工期是经济效益和社会效益的主导制约因素，此时选择桩型和成桩方法时要优先考虑工期。

第二章 桩基承载力的确定

第一节 单桩竖向承载力

一、桩土体系的荷载传递

1. 荷载传递机理

当竖向荷载逐步施加于单桩桩顶，桩身上部受到压缩而产生相对于土的向下位移，与此同时桩侧表面就会受到土的向上摩阻力。桩顶荷载通过所发挥出来的桩侧摩阻力传递到桩周土层中去，致使桩身轴力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，桩身下部的摩阻力随之逐步调动起来，桩底土层也因受到压缩而产生桩端阻力。桩端土层的压缩加大了桩土相对位移，从而使桩身摩阻力进一步发挥出来。当桩身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。由于桩端持力层的大量压缩和塑性挤出，位移增长速度显著加大，直至桩端阻力达到极限，位移迅速增大而破坏。此时桩所受的荷载就是桩的极限承载力。

在竖向荷载下，单桩的沉降 s 由以下三部分组成：

- (1) 桩身在轴向压力作用下的压缩变形 δ_p ， $\delta_p = \frac{1}{EA} \int_0^l N(l) dl$ ， E 为桩身材料弹性模量， A 为桩身横截面面积， l 为桩长， $N(l)$ 为桩身轴力。
- (2) 桩侧荷载传递到桩端平面以下引起桩端平面以下的土体压缩，桩端随土体压缩而沉降 s_b 。
- (3) 当桩端荷载较大时，桩端土产生剪切破坏或刺入破坏而引起的沉降 s_c 。

$$s = \delta_p + s_b + s_c \tag{2-1}$$

要计算以上三部分沉降都必须知道桩侧、桩端各自分担的荷载，以及桩侧阻力沿桩身的分布。

2. 影响荷载传递的因素

马特斯 (N. S. Mattes) 和波洛斯 (H. G. Poulos) 运用线弹性理论进行分析的结果表明，影响桩土体系 (图 2-1) 荷载传递的因素主要有：

- (1) 桩端土与桩周土的刚度比 E_b/E_s 。当 $E_b/E_s=0$ 时，荷载全部由桩侧摩阻力所承担，属纯摩擦桩。在均匀土层中的纯摩擦桩，摩阻力接近于均匀分布。

当 $E_b/E_s=1$ 时，属均匀土层中的摩擦桩，其荷载传递曲线和桩侧摩阻力分布与纯摩擦桩相近。当 $E_b/E_s=\infty$ 且为中长桩 ($l/d \approx 25$) 时，桩身荷载上段随深度减小，下段近乎沿深度不变，即桩侧摩阻力上段可得到发挥，下段由于桩土相对位移很小 (桩端无位移) 而没法发挥出来。桩端由于土的刚度大，可分担 60% 以上荷载，属端承桩。

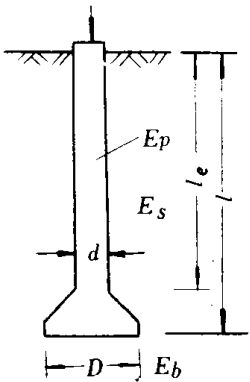


图 2-1 桩土体系图

(2) 桩与桩周土的刚度比 E_p/E_s 。 E_p/E_s 愈大，桩端阻力所分担的荷载比例愈大；反之，桩端阻力分担的荷载比例降低，桩侧阻力分担的荷载比例增大。对于 $E_p/E_s \leq 10$ 的中长桩 ($l/d \approx 25$)，其桩端阻力接近于零。这说明对于砂桩、碎石桩、灰土桩等低刚度桩组成的基础，应按复合地基工作原理进行设计。

(3) 桩底扩大头与桩身直径之比 D/d 。 D/d 愈大，桩端阻力分担的荷载比例愈大。

(4) 桩的长径比 l/d 。 l/d 对荷载传递的影响较大。在均匀土层中的钢筋混凝土桩，其荷载传递性状主要受 l/d 的影响， l/d 越大，桩身压缩变形量 δ_p 越大，允许桩端以下的地基上的压缩变形量就越小，受桩顶总沉降量的限制，桩端土所能发挥的端承力就越小。当 $l/d \geq 100$ 时，桩端土的性质对荷载传递不再有任何影响。可见，长径比很大的桩都属于摩擦桩或纯摩擦桩，在此情况下显然无需采用扩底桩。

二、单桩破坏模式与极限承载力

单桩在竖向荷载下的破坏由以下两种强度破坏之一而引起：地基土强度破坏或桩身材料强度破坏。通常桩的破坏是由于地基土强度破坏而引起。

与桩的承载力相联系的地基土强度包含桩侧阻力和桩端阻力。桩侧阻力 q_s 达到极限值 q_{su} 所需的桩土相对极限位移 s_u 与土的类别有关，而与桩径大小无关。对于粘性土 s_u 约为 5~7mm，对于砂类土 s_u 约为 10mm。但是对于加工软化型土 (图 2-2b)，所需 s_u 值较小，而且 q_s 达到最大值后又随位移的增大有所减小；对于加工硬化型土，所需 s_u 值比一般土大 (见图 2-2c)，而且极限荷载特征点不明显。

充分发挥桩端阻力所需的桩端位移要比侧阻力所需的大得多，根据小直径桩的试验结果，一般粘性土约为 $d/4$ ，硬粘土约为 $d/10$ ，砂土约为 $d/12 \sim d/10$ 。对于钻孔桩由于孔底虚土、沉渣压缩的影响，发挥端阻极限值所需位移更大。

由于桩侧阻力先于桩端阻力发挥出来 (支承于坚实基岩的短桩除外)，因此单桩承载力的极限状态一般由桩端阻力的破坏所制约 (纯摩擦桩除外)。

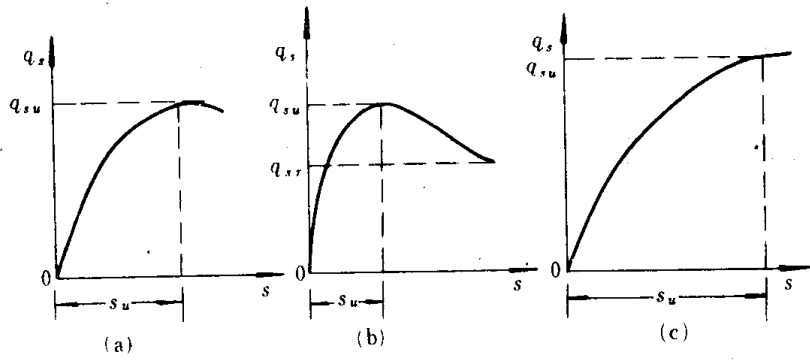


图 2-2 不同类型土的剪应力—位移关系
(a) 一般土；(b) 加工软化型土；(c) 加工硬化型土

单桩的荷载—沉降特性是同桩的破坏模式联系在一起的。以下介绍工程实践中常见的几种典型破坏模式的单桩的极限承载力取值准则。

(1) 桩端无坚硬持力层的摩擦桩。桩端一般呈刺入破坏，桩端阻力所占比例小， $Q-s$ 关系呈陡降型，出现 s 轴渐近线，极限承载力特征点明显，如图 2-3a 所示。

(2) 桩端持力层为砂土或粉土的打入桩。由于发挥极限端阻力所需位移大，桩端阻力所

占比例也较大， $Q-s$ 曲线后段呈缓变型，极限特征点不明显，如图 2-3b 所示。此时桩端阻力虽仍有潜力，但由于沉降过大，对于建筑物而言已失去利用价值，因此常以某一极限位移 s_u （一般取 $s_u=40\text{mm}$ ，对于细长桩 ($l/d>80$)，可取 $s_u=60\sim 80\text{mm}$ ）控制其极限承载力。

(3) 扩底桩（图 2-3c）。支承于砾、砂、粘性土上的扩底桩，端阻破坏所需位移量很大，桩端阻力占承载力的比例较大，属于端承桩，其 $Q-s$ 曲线呈缓变型，极限承载力一般以位移控制。

(4) 桩端有较厚沉淤的钻孔桩（图 2-3d）。由于桩底沉淤的强度低，压缩性高，桩端一般呈刺入破坏，接近于纯摩擦桩，其 $Q-s$ 曲线呈陡降型，极限承载力 Q_u 特征点明显，如图 2-3d 所示。

(5) 干法作业、桩端置于砂层中、孔底有一定厚度虚土的钻孔桩。由于桩端砂性虚土经压缩，承载力提高，导致 $Q-s$ 曲线出现台阶形，最终在较大沉降下桩端土呈局部剪切破坏如图 2-3e 所示。此时极限承载力多以位移控制取值。

(6) 嵌岩灌注桩。桩端嵌入坚硬基岩中的挖孔桩，由于清底好，桩不太长，桩身压缩和下沉量很小，在桩侧摩阻力尚未充分发挥的情况下，便由于桩身材料强度的破坏而破坏。其 $Q-s$ 曲线呈陡降型，极限特征点明显，如图 2-3f 所示。

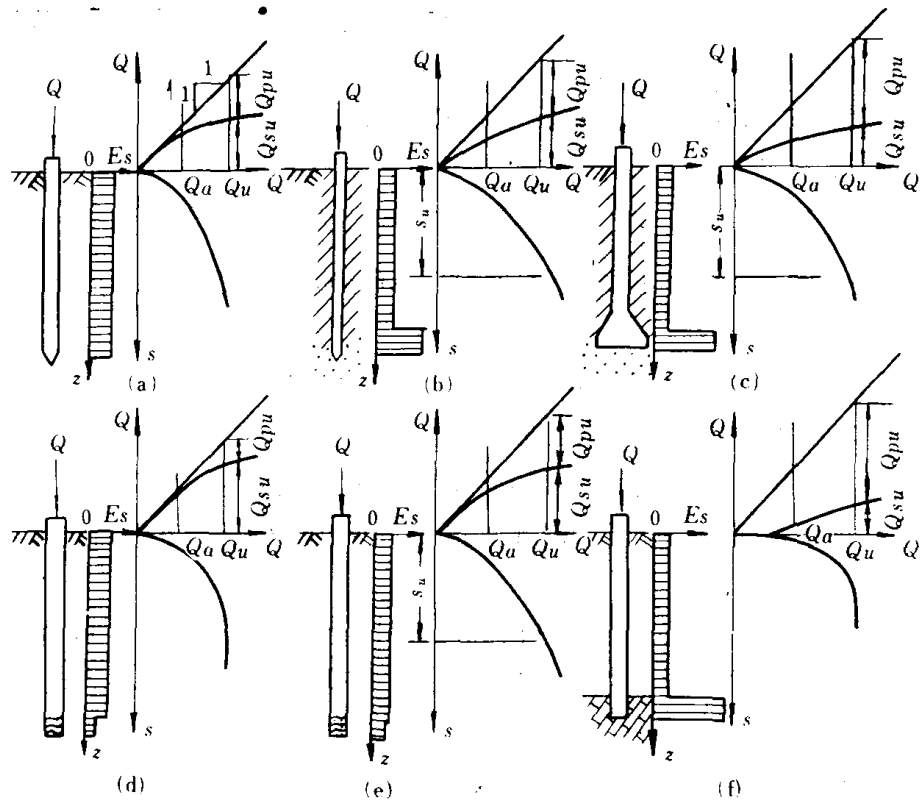


图 2-3 单桩 $Q-s$ 形态和极限荷载下侧阻、端阻的性状

(a) 均匀土中的摩擦桩；(b) 端承置于砂层中的摩擦桩；(c) 扩底端承桩；
(d) 孔底有沉淤的摩擦桩；(e) 孔底有虚土的摩擦桩；(f) 嵌入坚实基岩的端承桩

综上所述，从 $Q-s$ 曲线的形态来看，可分为突变陡降型和渐变缓降型两大类。实际上， $Q-s$ 线形是桩破坏机理和破坏模式的宏观反映。因此，为便于工程分析应用，称前者为急进型破坏，后者为渐进型破坏。一般情况下，极限承载力的确定，前者可根据 $Q-s$ 变化特征并结合 $s-\lg t$ 、 $\Delta s/\Delta Q-Q$ 等的分析确定，后者一般宜根据变形控制确定。根据变形确定的极限