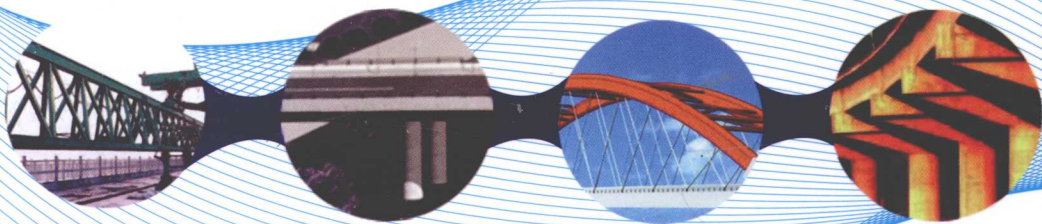


桩基工程 理论与实践

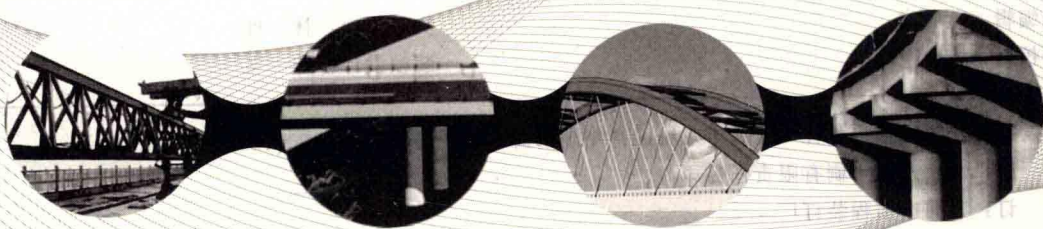
姜晨光 主编



化学工业出版社

桩基工程 理论与实践

姜晨光 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书从实用的角度,较系统、较全面地阐述了桩基工程的基本理论和技术(包括桩基工程的特点与基本要求、桩基工程岩土勘察、桩基工程设计、桩基工程施工、桩基工程检测等内容),给出了一些典型范例,对桩基工程建设活动和相关科学研究工作具有一定的指导意义和参考价值。

本书可供建设领域各级政府主管部门(比如建设、交通、铁路、水利、矿山、航运等)工作人员、工程勘察工作者、土木工程设计人员、土木工程施工人员、土木工程企业管理人员作为工作或学习中的参考,本书也可作为桩基工程的工具书使用,还可作为土木工程专业研究生或高年级学生的课外辅助教材或阅读材料。

图书在版编目(CIP)数据

桩基工程理论与实践/姜晨光主编. —北京:化学工业出版社, 2010.6

ISBN 978-7-122-08283-1

I. 桩… II. 姜… III. 桩基础 IV. TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 070426 号

责任编辑:董琳

文字编辑:林丹

责任校对:宋夏

装帧设计:韩飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张15¼ 字数397千字 2010年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:48.00 元

版权所有 违者必究

前言

桩基础可以说是土木工程学科中一个既古老又年轻的领域。我们的祖先在 6000 多年前就开始采用木桩作为干阑式建筑的支承构件,浙江河姆渡遗址考古发掘出的规则排列的圆形和矩形木桩就是一个很好的例证,20 世纪 30 年代建造的上海最高建筑——上海国际饭店采用的仍然是木桩基础。随着混凝土及钢铁材料的出现和制造业的进步,桩基技术的发展突飞猛进,从桩的几何尺寸到单桩承载力、从成桩工艺与设备到桩型与应用范围都发生了巨大的变化,显示出桩基技术蓬勃发展的生机和广阔的发展前景。由于桩-土-上部结构间相互作用的极其复杂性,直到现在,桩基工程仍面临许多需要研究探讨的问题。因此,桩基技术既古老又崭新。桩基础取代传统的基础形式,大大提升了各类基础设施建造的技术水平、经济水平和效率水平。以往跨越江、河、湖、海的桥基多采用沉箱、沉井、围堰施工,如今则基本被大直径灌注桩、预制桩、钢桩所取代,长达 36 公里的世界第一跨海大桥杭州湾大桥等大型桥梁工程以及海上采油平台、输油管支架、栈桥等不采用桩基其建造难度简直不可想象。桩基技术的衍生促进了相关领域的发展,形成了相互渗透、相互交融的格局(比如由圆形钻孔灌注桩到机挖矩形、异形桩,再进一步衍生为地下连续墙,其功能由竖向承载发展为侧向支挡与地下永久性墙体结合)。近十余年来各种新桩型、新工艺、新技术不断得到开发,桩基工程在各类工程建设领域中的作用也越来越大、越来越突出,桩基工程呈现出了蓬勃发展的繁荣之势。由于人们对桩-土-上部结构间的关系搞得不是很清楚,因此,桩基工程事故屡有发生,笔者通过多年的研究发现桩基工程事故的原因主要是设计失当和施工失控,其更深层次的原因则是对成桩的挤土效应缺乏深刻的认识;对土的剪切蠕变、流动特性和扰动效应缺乏深刻的认识;对成桩工艺的选择缺乏深刻的认识。桩基事故多种多样,要杜绝事故并非不可能,首先设计者要把握各类土层的特性及各种桩型与成桩工艺的适用条件,切实做到可行、可控、可靠,其次是施工管理者要从土性、土力学基本原理出发,制定切实可行的实施方案,作到规范化操作、严格管理。桩基础的设计不同于天然地基上其他各类基础的设计,天然地基土的强度和模量分布是基本确定的,而桩基工程中的单桩承载力、竖向刚度、桩的布置等则是可以调整的,这样,就给桩基的设计优化提供了广阔的空间。现代高层建筑有两个发展趋势,一是地下空间与地面建筑趋向一体化、主裙连体建筑大量涌现,二是为适应大空间和空间分割灵活的使用需求框筒、框剪结构越来越多,这两类建筑由于体量大、荷载与刚度分布极度不均,因此,其差异变形控制就成为一个关键性的焦点问题,因此,桩基设计、施工的优化问题就显得越来越重要。

笔者在多年的桩基工程实践中,深感桩基工程的风险与不易,只有不断地积累经验、不断地深入研究其科学规律才能把握住桩基工程的脉搏,才能确保桩基工程的顺利进行和承载结构的长治久安,鉴于此,不揣浅陋撰写了此书。

本书是笔者在江南大学从事教学、科研和工程实践活动的经验积累之一,本书的撰写借鉴了国内外大量的实际工程资料,吸收了许多前人及当代人的宝贵经验和认识,也包含了作者对桩基工程的些许感悟和认识,希望本书的出版有助于桩基工程技术的发展与提高,为我国城乡建设的健康可持续发展做出贡献。

全书由江南大学姜晨光主笔完成，烟台市规划局袁春桥、王国徽；无锡市建设局何跃平、朱烨昕、顾持真、孙清林、冯伟洲、姜科、宋艳萍、成美捷、夏正兴、范春雨、沈建；江南大学姜忠平、姜勇、张大林等同志（排名不分先后）参与了部分章节的撰写工作。

初稿完成后，李锦铭、王浩闻、苏文磬、徐至善、黄建文五位教授级高工提出了不少改进意见，为本书的最终定稿做出了重大的贡献，谨此致谢！

限于水平、学识和时间关系，书中内容难免粗陋，谬误与欠妥之处敬请读者多多提出批评与宝贵意见。

姜晨光

2010年3月于江南大学

目 录

第 1 章 桩基工程概述	1
1.1 桩基的构造与特点	1
1.2 桩基工程的分类与施工工艺	2
1.2.1 灌注桩	4
1.2.2 打入桩	7
1.2.3 植入式基桩	11
1.2.4 负摩擦桩	11
1.2.5 试桩	11
1.2.6 桩头处理	12
1.2.7 桩基础施工的质量要求	12
第 2 章 桩基工程岩土勘察	14
2.1 岩石和土的基本特征	14
2.1.1 土的分类及基本特征	14
2.1.2 岩石的分类与基本特征	28
2.2 岩石和土的承载力	35
2.2.1 普朗德尔和赖斯纳极限承载力	35
2.2.2 太沙基极限承载力	37
2.2.3 汉森和魏锡克极限承载力	38
2.2.4 地基容许承载力和地基承载力特征值	40
2.3 桩基工程岩土勘察的特点与要求	41
第 3 章 桩基工程设计	43
3.1 桩基设计的基本要求	43
3.2 桩的选型与布置	45
3.3 桩顶的作用效应	45
3.3.1 桩基竖向承载力确定的基本原则	48
3.3.2 基桩竖向承载力的取值规定	48
3.4 桩基的竖向承载力与竖向位移	49
3.4.1 桩基竖向承载力的基本设计要求	49
3.4.2 确定单桩竖向承载力的静载试验方法	50
3.4.3 确定单桩竖向承载力的经验算法	51
3.4.4 基桩竖向承载力特征值的计算过程	56
3.4.5 基于引力场的摩擦桩单桩竖向承载力计算方法	56
3.5 桩基的水平承载力与水平位移	59
3.5.1 水平荷载下桩的失效与变形机理	59
3.5.2 桩的水平静载试验方法	60
3.5.3 桩基水平承载力的理论计算方法	61

3.5.4	桩基 m 法的实用程式化计算	64
3.5.5	桩基水平承载力特征值实用计算方法的计算原则	75
3.6	桩身的承载力与抗裂性能	76
3.6.1	钢筋混凝土桩的构造要求	76
3.6.2	桩身承载力估算公式	76
3.6.3	轴心受压桩的桩身压曲的经验计算方法	77
3.6.4	偏心受压桩正截面受压承载力的经验计算	77
3.6.5	打入式钢管桩的桩身局部压曲经验验算	78
3.6.6	其他	78
3.7	群桩承载力与位移	78
3.7.1	群桩基础的竖向理论分析	78
3.7.2	群桩基础承载力的理论验算	80
3.8	大直径桩和嵌岩桩的承载力	81
3.8.1	大直径桩的承载力	81
3.8.2	嵌岩桩的承载力	82
3.9	桩与土的相互作用	84
3.9.1	桩土间荷载的传递机理	84
3.9.2	竖向荷载作用下单桩的内力、侧摩阻力和位移分布	85
3.9.3	单桩荷载传递的影响因素	85
3.9.4	桩端阻力和桩侧阻力的深度效应	86
3.10	抗拔桩的抗拔承载力	86
3.11	桩基的耐久性	88
3.11.1	桩基结构的环境类别	88
3.11.2	影响桩基结构混凝土耐久性的机理分析	88
3.11.3	设计使用年限 50 年的桩基结构混凝土耐久性要求	89
3.11.4	桩身裂缝控制	89
3.12	桩基抗震设计	89
3.13	承台设计	90
3.13.1	桩基承台的理论分析	90
3.13.2	桩基承台的实用设计计算方法	91
3.14	桩基沉降的实用计算方法	97
3.14.1	桩基沉降计算的基本规定	97
3.14.2	竖向荷载作用下的单桩沉降计算实用方法	98
3.14.3	群桩沉降计算的实用方法	99
3.14.4	软土地区减沉复合疏桩基础实用设计方法	106

第 4 章 灌注桩 108

4.1	灌注桩的类型和施工要求	108
4.2	灌注桩混凝土配合比设计	110
4.2.1	原料选择与下料	110
4.2.2	原材料的质量要求	110
4.2.3	混凝土的质量要求	110
4.3	钻孔压浆灌注桩	110

4.3.1	钻孔压浆灌筑桩的施工机具设备及对材料的要求	111
4.3.2	钻孔压浆灌筑桩的施工工艺	111
4.3.3	钻孔压浆灌筑桩施工注意事项	112
4.4	泥浆护壁成孔灌注桩	112
4.4.1	材料及主要机具	112
4.4.2	作业条件	113
4.4.3	工艺流程	113
4.4.4	质量保证措施	114
4.5	振动沉管灌注桩	114
4.5.1	振动沉管灌筑桩的施工原理	115
4.5.2	振动沉管灌筑桩对机具设备及材料要求	115
4.5.3	振动沉管灌筑桩的施工工艺	115
4.5.4	振动沉管灌筑桩施工常见问题及预防处理方法	116
4.6	锤击沉管灌筑桩	118
4.6.1	锤击沉管灌筑桩的施工机具设备及对材料的要求	118
4.6.2	锤击沉管灌筑桩的施工	119
4.7	套管夯扩灌筑桩	119
4.7.1	套管夯扩灌筑桩的施工机具设备	120
4.7.2	套管夯扩灌筑桩的施工工艺	120
4.8	人工挖孔和挖孔扩底灌筑桩	121
4.8.1	挖孔及挖孔扩底灌筑桩的构造要求	122
4.8.2	挖孔及挖孔扩底灌筑桩的施工机具设备及对材料的要求	122
4.8.3	挖孔及挖孔扩底灌筑桩的施工工艺	122
4.8.4	挖孔及挖孔扩底灌筑桩施工中地下水与流砂的处理方法	124
4.8.5	挖孔及挖孔扩底灌筑桩施工的护壁厚度计算	125
4.8.6	挖孔及挖孔扩底灌筑桩施工中的常见问题及预防处理方法	126
4.9	冲击钻成孔灌筑桩	126
4.9.1	冲击成孔灌筑桩施工的主要机具设备	127
4.9.2	冲击成孔灌筑桩施工工艺	128
4.9.3	冲击成孔灌筑桩施工中常见问题及预防处理方法	129
4.10	回转钻成孔灌筑桩	130
4.10.1	回转钻成孔灌筑桩的施工机具设备	130
4.10.2	回转钻成孔灌筑桩的施工工艺	130
4.10.3	回转钻成孔灌筑桩施工中的常见问题及防治处理方法	131
4.11	潜水电钻成孔灌筑桩	132
4.11.1	潜水电钻成孔灌筑桩施工的机具设备	132
4.11.2	潜水电钻成孔灌筑桩的施工工艺	133
4.12	挤扩多分支承载力盘灌筑桩与多支盘灌筑桩	134
4.12.1	挤扩多分支承载力盘（或多支盘）灌筑桩的构造与布置	135
4.12.2	挤扩多分支承载力盘（或多支盘）灌筑桩的单桩承载力计算	135
4.12.3	挤扩多分支承载力盘（或多支盘）灌筑桩的挤扩原理与施工机具设备	136
4.12.4	挤扩多分支承载力盘（或多支盘）灌筑桩的施工工艺	137
4.12.5	挤扩多分支承载力盘（或多支盘）灌筑桩施工注意事项	138

4.12.6 挤扩多分支承载力盘（或多支盘）灌筑桩施工质量控制	139
---------------------------------	-----

第5章 混凝土预制桩	140
-------------------	------------

5.1 混凝土预制桩的类型与制作	140
5.2 先张法预应力管桩	140
5.2.1 先张法预应力管桩的规格与特点	141
5.2.2 先张法预应力管桩的打（沉）桩工艺	141
5.2.3 先张法预应力管桩打（沉）桩常见问题及预防处理措施	143
5.2.4 先张法预应力管桩的施工质量控制	144
5.3 混凝土预制桩的起吊运输和堆存	145
5.4 混凝土预制桩的接桩与拔桩	146
5.5 混凝土预制桩的沉（打）桩	147
5.5.1 施工准备	147
5.5.2 打（沉）桩程序	147
5.5.3 吊桩定位	148
5.5.4 打（沉）桩	148
5.5.5 打（沉）桩质量控制	149
5.5.6 打（沉）桩控制贯入度的计算方法	149
5.5.7 打（沉）桩施工验收	149
5.5.8 几种特殊的打（沉）桩方法	151
5.5.9 混凝土预制桩打（沉）桩施工常见问题及预防处理办法	154
5.5.10 混凝土预制桩打（沉）桩施工对周围环境的影响与预防	156
5.6 静力压桩	156
5.6.1 机械静力压桩	156
5.6.2 锚杆静力压桩法	161
5.7 常用桩基施工机械设备的性能	164
5.7.1 桩基施工桩锤的类型与特点	164
5.7.2 桩基施工常用桩锤的主要技术性能	165
5.7.3 桩基施工桩架的类型与特点	169
5.7.4 桩基灌筑桩施工常用钻孔机械的类型与特点	172

第6章 钢桩	174
---------------	------------

6.1 钢桩的类型与制作	174
6.2 钢桩的焊接与切割	176
6.2.1 钢桩的接桩方法	176
6.2.2 钢管桩的切割	177
6.2.3 钢管桩桩盖的焊接	177
6.2.4 钢管桩桩端与承台的连接	177
6.3 钢桩的沉桩	178
6.3.1 打桩机械的选择	178
6.3.2 钢管桩的打桩工艺	179
6.3.3 钢管桩施工常见问题及预防处理方法	180
6.3.4 钢管桩施工验收与质量要求	181

6.4 H 型钢桩	182
6.4.1 打（沉）H 型钢桩施工机械的选用	183
6.4.2 打（沉）H 型钢桩的施工工艺与质量要求	183
6.4.3 H 型钢桩打（沉）桩施工常见问题及预防处理方法	184
第 7 章 承台施工	186
7.1 承台施工的基本要求	186
7.2 基坑的开挖与回填	187
7.2.1 基坑开挖易产生的环境问题	188
7.2.2 基坑的开挖与回填应遵循的原则	190
第 8 章 桩基检测	192
8.1 桩基检测的基本要求	192
8.2 桩基检测方法综述	195
8.3 检测报告的撰写	196
8.4 单桩竖向抗压静载试验	197
8.4.1 仪器设备及其安装	197
8.4.2 现场检测	198
8.4.3 检测数据分析与判定	199
8.5 单桩竖向抗拔静载试验	199
8.5.1 设备仪器及其安装	199
8.5.2 现场检测	200
8.5.3 检测数据的分析与判定	200
8.6 单桩水平静载试验	200
8.6.1 仪器设备及其安装	201
8.6.2 现场检测	201
8.6.3 检测数据分析与判定	201
8.7 高应变检测	202
8.7.1 仪器设备要求	203
8.7.2 现场检测	203
8.7.3 检测数据分析与判定	204
8.8 低应变检测	206
8.8.1 现场检测	206
8.8.2 检测数据分析与判定	207
8.9 钻芯法检测	208
8.9.1 钻芯法设备	208
8.9.2 现场操作	209
8.9.3 芯样试件截取与加工	209
8.9.4 芯样试件抗压强度试验	209
8.9.5 检测数据分析与判断	210
8.10 声波透射法检测	211
8.10.1 现场检测	211
8.10.2 检测数据分析与判断	212

8.11 桩基工程安全施工与验收规定..... 214

8.11.1 桩基工程施工的安全技术措施..... 214

8.11.2 桩基工程施工质量检查与验收规定..... 214

第9章 桩基工程范例 217

9.1 桩基工程设计范例 217

9.1.1 桩基设计过程 217

9.1.2 建（构）筑物桩基设计示例 221

9.2 桩基工程施工范例 226

9.2.1 工程概况 226

9.2.2 地基处理方案的确定 227

9.2.3 螺杆型长短桩复合地基原理 227

9.2.4 螺杆型长短桩复合地基的设计 228

9.2.5 螺杆桩施工工艺 228

9.2.6 成桩质量与加固效果分析 229

参考文献 231

1.1 桩基的构造与特点

桩基础是一种既古老又现代,在高层建(构)筑物和重要土木工程结构中被大量、广泛应用的基础形式。

随着人类和恶劣自然环境的抗争,远古的治水活动得以大规模开展,为了堵水人们先将圆木打入水中的泥里,竖立的圆木之间再搭设横木和填筑土石,使木质的桩基有了工程意义。为了躲避猛兽的袭击,人们将多根木头铅直打入土中,在打入土中的木头上绑上新的木头接高,接高的木头高度合适后,人们将木头的顶端用横木密集地连接起来建成了原始房屋的底板,继续斜向搭接木头建成了原始房屋的屋盖,屋盖上铺上草建成了原始房屋的防雨的屋面层,这时真正意义上的桩基就形成了。有史记载,我们的祖先在 6000 多年前就开始使用木桩作为桥梁和建(构)筑物的基础(木桩成为干阑式建筑的支承构件),浙江河姆渡遗址考古发掘出的规则排列的圆形和矩形木桩就是一个典型的例证。另外,还有秦代的渭桥、隋朝郑州的昭化寺、五代时的杭州湾大海堤、南京的石头城、上海的龙华塔等。20 世纪 30 年代建造的当时上海的最高建筑上海国际饭店采用的仍然是木桩基础。

随着近代科学技术的进步,混凝土和钢铁材料的出现以及制造业的进步使桩基技术的发展突飞猛进,从桩的几何尺寸到单桩承载力,从成桩工艺与设备到桩型与应用范围,都发生了巨大的发展变化,显示出桩基技术蓬勃发展的生机和广阔的发展前景。桩基础取代传统的基础形式,大大提升了各类基础设施建造的技术、经济和效率水平(比如以往跨越江、河、湖、海的桥基多采用沉箱、沉井、围堰施工,现在则多采用大直径灌注桩、预制桩和钢桩,长 36km 的世界第一跨海大桥杭州湾大桥等大型桥梁工程、海上采油平台、输油管支架、栈桥等不采用桩基其建造难度简直不可想象)。桩基技术的进步也促进了相关领域的发展,形成了不同领域相互渗透、相互交融的格局(比如由圆形钻孔灌注桩到机挖矩形、异形桩,再进一步发展成为地下连续墙,其功能也由竖向承载发展为侧向支挡与地下永久性墙体结合。又如复合地基领域,将各种柔性桩增强体引入刚性桩增强体,形成刚性桩复合地基,进而发展为刚性、柔性桩结合;长短桩结合的复合地基,拓宽了复合地基的适用范围和设计优化思路)。目前,桩的种类、桩基的形式、桩基的施工工艺和设备以及桩基的理论与设计方法都有了极大的进步与发展,应用最为广泛的钢筋混凝土桩基础(预制桩、钻孔灌注桩)在工业与民用建筑、桥梁、铁路、水利、机场、港工等各工程领域随处可见,上海浦东 88 层、高 420.5m 的金贸大厦的桩基础的人土深度已超过 80m,桩基础事实上已经成为松软深厚地基上高层建筑的主要基础形式。尽管如此,桩基工程仍面临许多未弄清的、需要进一步研究与探讨的问题。

桩基础常被归类为深基础。当上部建(构)筑物荷载较大、适合于作持力层的土层埋藏较深、用天然浅基础或仅作简单的地基加固仍无法满足要求时,人们就不得不采用深基础方案。深基础主要包括桩基础、沉井和地下连续墙等,深基础中桩基础的应用最为广泛。竖向承载的桩基础的功能是通过桩身侧壁摩阻力和桩端阻力将上部结构的荷载传递到深处的地基上,以解决浅基础承载力不足和变形较大的地基问题。桩基础又称桩基,是指由设置于岩土中的桩和与桩顶联结的承台共同组成的群桩基础或由柱与桩直接联结的单桩基础。常见的群

桩基础形式见图 1-1-1。桩基是指群桩基础中的单桩。复合桩基是指单桩及其对应面积的承台底地基土组成的复合承载桩基。工程中的桩基础，往往由数根桩组成，桩顶设置承台，把各桩连成整体，并将上部结构的荷载均匀传递给桩。作为典型深基础的桩基具有承载力高、稳定性好、沉降量小而均匀、沉降速率低且收敛快等特性，几乎可用于各种工程地质条件和各种类型的土木工程结构，尤其适用于建造在软弱地基上的高层、重型建（构）筑物。桩基础主要缺点是工程造价相对较高、施工过程比一般浅基础复杂（但比沉井、沉箱等深基础简单）以打入等方式沉桩时存在振动及噪声等环境问题、泥浆护壁钻孔灌注桩常对场地环境卫生带来不良影响。桩基础主要用于高层建筑基础；道路、铁路、轨道交通等的桥梁工程基础；工业厂房基础；精密机械设备基础；油罐、烟囱、塔楼等特殊建（构）筑物基础；抗震工程；滑坡治理工程；基础托换工程等领域。在下述 5 种情况下可优先考虑选用桩基础方案。

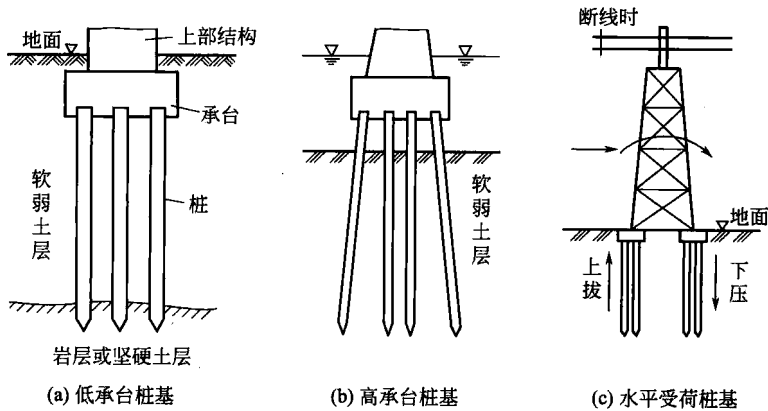


图 1-1-1 桩基础示意图

- ① 高层或高耸建（构）筑物及重型厂房等结构荷载很大，对基础的沉降和不均匀沉降要求严格，一般天然地基难以满足设计要求时。
- ② 受施工方法、经济条件及工期等因素限制不适于进行软土地基处理，也不适于采用沉井、沉箱、地下连续墙等深基础时。
- ③ 地基存在震陷性、湿陷性、膨胀性、冻胀性或侵蚀性等不良土层或上履土层为强度低、压缩性高的软弱土层，不能满足建（构）筑物对地基的要求，而软土层下面存在较好的或坚硬的土层时。
- ④ 在地震活动区域建造建（构）筑物的持力层范围内有可液化土层而需将建（构）筑物支持在不液化土层上，或当结构物考虑可能的爆炸、强风暴等其他随机性强的动荷载时。
- ⑤ 当建（构）筑物承受较大偏心荷载、水平荷载、动力荷载或周期性荷载作用需减少建（构）筑物的水平位移和倾斜时，或建在斜坡上的建（构）筑物需采取抗滑失稳措施时。

1.2 桩基工程的分类与施工工艺

桩基工程可按照不同的目的、性质和特点进行分类。按受力情形桩基可分为支承桩（端承桩）摩擦桩和压实桩，见图 1-2-1～图 1-2-3。端承桩是指穿过软弱土层并将建（构）筑物的荷载通过桩传递到桩端坚硬土层或岩层上，桩侧较软弱，土对桩身的摩擦作用很小，其摩擦力可忽略不计。摩擦桩是指沉入软弱土层一定深度通过桩侧土的摩擦作用，将上部荷载传递扩散于桩周围土中，桩端土也起一定的支承作用，桩尖支承的土不甚密实，桩相对于土有一定的相对位移时，即具有摩擦桩的作用。另外，由于作用在铅直桩顶的竖向外荷载通常由

桩侧摩阻力和桩端阻力共同承担，摩阻力和端阻力的大小及占外荷载的比例主要由桩侧和桩端地基土的物理力学性质、桩的几何尺寸、桩与土的刚度比及施工工艺等决定，因此，我国习惯根据摩阻力和端阻力占外荷载的比例大小将桩基分为摩擦型桩（纯摩擦桩、端承摩擦桩）和端承型桩（纯端承桩、摩擦端承桩）两大类，见图 1-2-4。

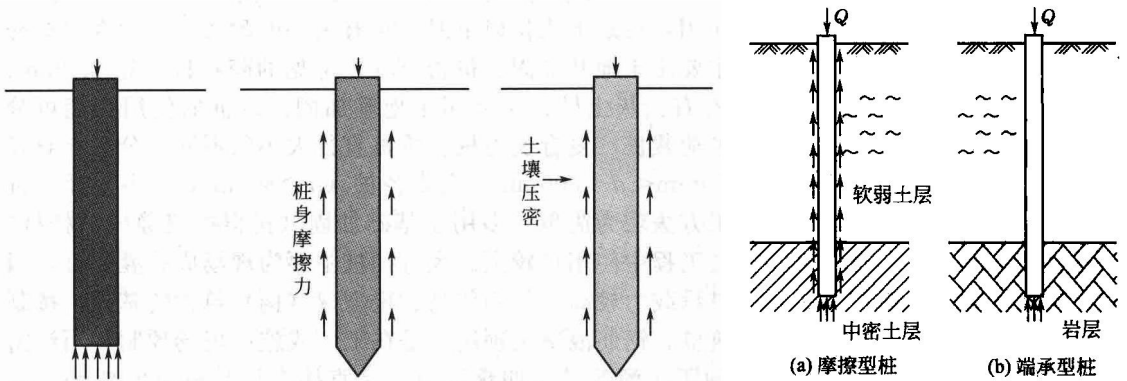


图 1-2-1 支承桩

图 1-2-2 摩擦桩

图 1-2-3 压实桩

图 1-2-4 桩的承载性状

(1) 纯摩擦桩 在极限承载力状态下，桩顶荷载由桩侧阻力承受，桩端阻力忽略不计。桩长径比很大时桩顶荷载只通过桩身压缩产生的桩侧阻力传递给桩周土、桩端土层，分担荷载很小，纯摩擦桩适用于桩端下无较坚实的持力层的情况，桩底残留虚土或沉渣的灌注桩、桩端出现脱空的打入桩等均可看作是纯摩擦桩。

(2) 端承摩擦桩 在极限承载力状态下，桩顶荷载主要由桩侧阻力承受，桩端阻力占少量比例。置于软塑状态黏性土中的长桩，桩端土为可塑状态黏性土，端阻力承受小部分荷载，可看作是端承摩擦桩。

(3) 端承桩 在极限承载力状态下，桩顶荷载由桩端阻力承受。桩的长径比较小（一般小于 10），桩端设置在密实砂类、碎石类土层中或位于中、微风化及新鲜基岩中，桩侧阻力可忽略不计时，可看作是端承桩。

(4) 摩擦端承桩 在极限承载力状态下，桩顶荷载主要由桩端阻力承受。桩端进入中密以上的砂类、碎石类土层中或位于中、微风化及新鲜基岩顶面，侧阻力虽属次要但不可忽略，可看作是摩擦端承桩。

按承台位置的高低分为高承台桩基础和低承台桩基础。高承台桩基础的承台底面高于地面，它的受力和变形不同于低承台桩基础，一般应用在桥梁和码头工程中。低承台桩基础的承台底面低于地面，一般用于房屋建筑工程中。按受力方向的不同可分为竖向承载桩、横向承载桩（挡土桩、横力桩）斜向承载桩（竖向、横向都受力），见图 1-2-5～图 1-2-7。

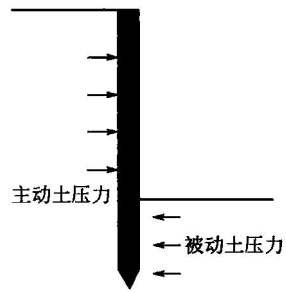


图 1-2-5 挡土桩图

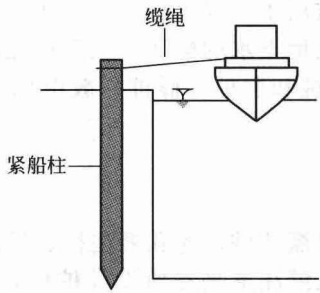


图 1-2-6 横力桩

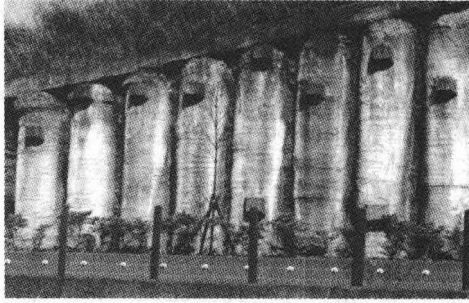


图 1-2-7 高速公路的挡土桩

按桩身材料的不同可分为木桩、混凝土桩、钢桩、砂石桩、灰土桩、合成桩。钢筋混凝土桩可以预制也可以现浇,桩的长度和截面尺寸可根据设计要求任意选择。钢桩常用的有直径 250~1200mm 的钢管桩和宽翼工字形钢桩,钢桩承载力较大,起吊、运输、沉桩、接桩都较方便,但消耗钢材多、造价高,我国在重点工程中(重要的和高速运转的设备基础及柱基础)习惯使用直径 914.4mm 和 600mm 的钢管桩。木桩目前已很少使用,只在某些加固工程或能就地取材的临时工程中使用,在地下水位以下时木材有很好的耐久性,而在干湿交替的环境下则极易腐蚀。砂石桩主要用于地基加固、挤密土壤,常见的碎石桩直径 533mm、平面布成三角形、间距 1100mm 左右。灰土桩也主要用于地基加固。按桩的使用功能可分为竖向抗压桩、竖向抗拔桩、水平荷载桩、复合受力桩。按桩直径大小的不同可分为小直径桩($d \leq 250\text{mm}$)中等直径桩($250\text{mm} < d < 800\text{mm}$)大直径桩($d \geq 800\text{mm}$)。小直径桩桩径小,施工机械、施工场地及施工方法较为简单,多用于基础加固(树根桩或静压锚杆桩)及复合桩基础。中等直径桩在各类工程中使用量较大。大直径桩主要为现场成孔灌注桩,因桩径大且桩端可做成扩大头,单桩承载力较高,常用作高、重型建(构)筑物的基础。按制作工艺的不同可分为预制桩、灌注桩。钢筋混凝土预制桩是在工厂或施工现场预制,用锤击打入、振动沉入等方法使桩沉入地下。灌注桩又叫现浇桩,是直接在设计桩位的地基上成孔,在孔内放置钢筋笼或不放钢筋,后在孔内灌注混凝土而成桩,灌注桩与预制桩相比可节省钢材,在持力层起伏不平时桩长可根据实际情况灵活设计。按截面形式的不同可分为方形截面桩、圆形空心桩。方形截面桩制作、运输和堆放比较方便,截面边长一般为 250~550mm。圆形空心桩是用离心旋转法在工厂中预制,具有用料省、自重轻、表面积大等特点,常见圆形空心桩的管壁厚 80mm、每节长度 2~12m 不等、直径为 300mm 或 450mm 或 550mm。按成孔方式的不同可分为非挤土桩、部分挤土桩、挤土桩。非挤土桩包括干作业挖孔桩、泥浆护壁钻(冲)孔灌注桩、人工挖孔灌注桩、套管护壁灌注桩,这类在成桩过程中基本上对桩相邻土不产生挤土效应的桩称为非挤土桩,其特点是设备噪声较挤土桩小,废泥浆、弃土运输等可能会对周围环境造成不良影响。部分挤土桩采用先钻孔后打入的方式,当挤土桩无法施工时,可采用预钻小孔后打较大直径预制或灌注桩的施工方法,或打入部分敞口桩(比如部分挤土沉管灌注桩、预钻孔打入式预制桩、打入式敞口桩等)。挤土桩也称打入桩,采用打入式形式,打入式的预制桩或沉管灌注桩在成桩过程中,桩周围的土被压密或挤开,使周围土层受到严重扰动,土的原始结构会遭到破坏,特点是除施工噪声外不存在泥浆及弃土污染问题,施工质量好、方法得当时,其单方混凝土材料所提供的承载力较非挤土桩及部分挤土桩高。

按施工方式的不同可分为灌注桩、打入桩、植入式基桩。灌注桩包括反循环基桩(无套管)雷蒙桩(有套管)预垒桩、合成桩(木桩与灌注桩之组合、木桩与预制桩之组合,见图 1-2-8)微型桩等。打入桩包括预制桩(离心式 R.C 桩、离心式预应力桩、十字桩)钢桩[钢管桩(圆管、方管)型钢桩(H 型钢)]、木桩等。植入式基桩包括预应力 PC 桩、钢管桩等。灌注桩的成孔方法包括钻孔法(适用于一般土层)沉管法(适用于土质差、水位高的情况)爆扩法(适用于土质好、黏性、无地下水的情况)人工挖孔法(适用于桩径大、土较好的情况)。按工作形式的不同可分为单桩和群桩。群桩一般由承台(承台梁)和若干根桩构成,见图 1-2-9 和图 1-2-10。

1.2.1 灌注桩

目前国内常见的灌注桩是钻(冲)孔灌注桩、挖孔灌注桩、后注浆法灌注桩等。

(1) 钻(冲)孔灌注桩 钻(冲)孔灌注桩是在所设计桩位处用专用机械和设备成孔,然后在孔内下放钢筋笼(也有直接插筋或省去钢筋的)再浇灌混凝土而成。其横截面呈圆

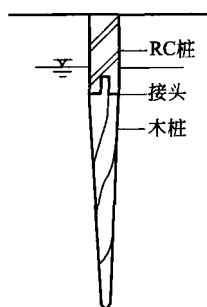


图 1-2-8 合成桩

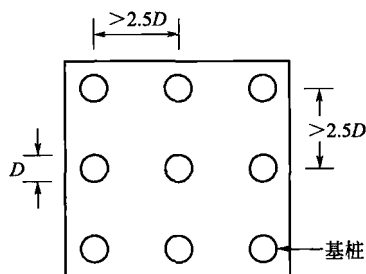


图 1-2-9 群桩平面图

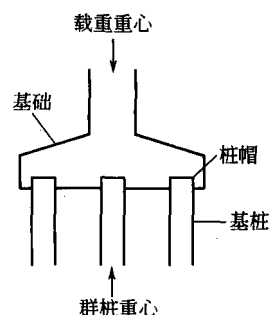


图 1-2-10 群桩立面图

形，可做成大直径桩和扩底桩。钻（冲）孔灌注桩用钻机（比如螺旋钻、振动钻、冲抓锥钻、旋挖钻等）钻土成孔，然后清除孔底残渣、安放钢筋笼、浇灌混凝土，若需提高单桩承载力可采用扩底桩（即在钻机成孔后，撑开钻头的扩孔刀刃使之旋转切土扩大桩孔，浇灌混凝土后在底端形成扩大桩端，但扩底直径不宜大于3倍桩身直径）。钻孔灌注桩的特点是入土深、桩长可达上百米、伸入基岩、桩径选择范围大，可穿过任何地层、噪声较小、刚度大、承载力高、桩身变形小、可方便地进行水下施工，施工过程中无挤土、无（少）振动、无（低）噪声、环境影响小，适用于各种工程地质条件和各类工程，是一种广泛采用的桩基形式。

（2）挖孔灌注桩 挖孔桩可采用人工或机械挖掘成孔，逐段边开挖边支护，达所需深度后再进行扩孔、安装钢筋笼及浇灌混凝土。挖孔桩内径 $\geq 800\text{mm}$ 、开挖直径 $\geq 1000\text{mm}$ 、护壁厚度 $\geq 100\text{mm}$ 、分节支护（每节高500~1000mm），可用混凝土浇注或砖砌筑，桩身长度宜限制在30m以内。挖孔桩桩底常做成扩大头型（见图1-2-11），扩底端直径不宜大于3倍桩身直径（即 $D \leq 3d$ ）。挖孔桩可直接观察地层情况，孔底易清理干净，设备简单、噪声小，场区内各桩可同时施工且桩径大、适应性强、比较经济。但由于挖孔时可能存在塌方、缺氧、有害气体、触电等危险，极易造成安全事故。因此，这种桩仅适用于地下水位低的黏性土层和桩径大、桩长不很大的端承型桩。挖孔桩的护壁方法及适用土质条件可概括为：混凝土捣制井圈法适用于比较坚硬或松散的土层；喷射混凝土护壁法适用于比较硬的黏性土、粉土；钢套管法适用于淤泥质土层；砖砌法适用于比较硬的土层；钢筋笼骨架法适用于比较硬的土层。

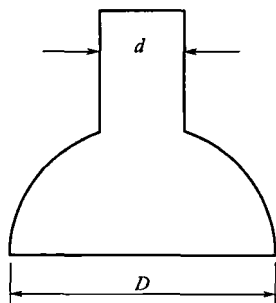


图 1-2-11 挖孔桩的扩底

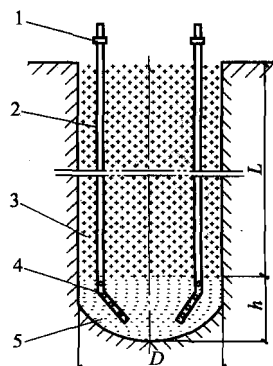


图 1-2-12 桩端注浆管的布置

（3）后注浆法灌注桩 后注浆法灌注桩是指在成孔（螺旋钻、旋挖钻、冲击、振动沉管等）下入钢筋笼及高压注浆系统、灌注混凝土成桩后，再向桩体（桩端、桩侧）进行高压注

浆作业,使浆液对桩端(或桩侧)土体实现渗透、填充、压密和固结作用,从而显著提高单桩的承载能力并有效控制桩基的沉降幅度。实践证明,细粒土地基后注浆桩与常规灌注桩相比其单桩竖向极限承载力可提高约20%~50%,粗粒土的提高幅度约可达40%~70%。经过桩侧后注浆的桩侧摩阻力值可提高2~3倍,在中粗砂、粉细砂及黏性土较厚的地区的桩侧摩阻力值增加幅度较大。桩侧后注浆可有效消除泥皮对桩周侧阻力的影响,通过高压注浆的二次压密作用可形成强度较高、半径较大的水泥土固结体(相当于增加了灌注桩的横截面尺寸),通过渗透、劈裂、挤密、填充、固结等综合作用可扩大桩身与桩周土体间的相互作用界限,从而较大幅度地提高桩侧摩阻力值。采用桩端后注浆的灌注桩,其桩端承载力极限值约可提高2~3倍。高压水泥浆液进入桩端后,将桩底业已疏松的沉渣土体和桩体被离析的部分混凝土残渣充分置换、充填、密实和固结,形成强度较高的水泥土复合体。桩端土体受压产生较大的压缩变形,形成水泥土结石体-扩大头,增大了桩端受力面积(或水泥浆液渗入地层中网状固结形成了类似“树根桩”的作用)。桩身混凝土会在注浆过程中得到进一步的密实,并会消除混凝土内部在灌注时已经形成的一些气泡,从而提高桩身混凝土的抗压强度和弹性模量。后注浆法注浆时的浆液流量不宜超过75L/min。后注浆法的浆液水灰比是:泥浆护壁灌注桩为0.45~0.65(具体可根据土的密实度、强度确定,密实度和强度较高者取较大值)干作业灌注桩为0.69~0.89、松散砂砾为0.51~0.61。后注浆法注浆量的计算公式为

$$G_c = \alpha_p d + \alpha_s n d \quad (1-2-1)$$

式(1-2-1)中, α_p 、 α_s 为浆液注入系数, $\alpha_p = 1.5 \sim 1.8$, $\alpha_s = 0.5 \sim 0.7$; n 为桩侧注浆断面数; d 为桩身直径。对于独立单桩和桩距大于 $6d$ 的疏桩,应在式(1-2-1)估算的注浆量基础上再乘以1.2的系数。后注浆法桩端注浆终止压力应根据土性、注浆点深度确定,对风化岩和非饱和黏土、粉土宜为3~10MPa、饱和土为1.2~4MPa(软土取低值),桩侧注浆终止压力为桩端注浆的1/2左右。后注浆法注浆管应采用 $\phi 25 \sim 50$ mm、壁厚3mm以上的黑铁管或钢管,一般情况下桩端注浆管不得小于2根并对称设置,见图1-2-12(其中,1为浆液逆止阀、2为注浆管、3为桩身混凝土、4为喷浆孔、5为桩底碎石)。注浆管应随钢筋笼一起下入孔底,注浆管底端100~400mm范围内可开设10个左右 $\phi 6 \sim 15$ mm的喷浆孔(呈梅花状布置),喷浆孔及管端入、出口在下入孔内之前应用铁片(或图钉)和不干胶带密封好,根据需要注浆管底端可向桩孔中心方向弯曲 $15^\circ \sim 25^\circ$,以和钻进时形成的孔底形状相吻合并有利于高压灌浆作业。注浆时两根注浆管可交替使用,桩端注浆管入口处应安装浆液逆止阀。桩侧注浆管可随钢筋笼下入,也可通过小径钻具引孔下入,注浆管下入距桩底5m左右,注浆管下端可开设一些喷浆孔,下入前应密封完好。桩侧后压浆时,注浆管应自下而上移动,注浆深度应为设计桩长得2/3以上。当桩侧、桩端均设计为后注浆桩时,其注浆顺序是先进行桩侧后注浆,再进行桩端后注浆,二者的合理时间间隔应根据具体情况确定,一般为8~48h。先进行桩侧后注浆作业可增大桩身的密封作用、提高桩端的后注浆效果。后注浆法施工的灌注桩工艺流程是:钻机就位→钻成孔及清除孔底→下入钢筋笼及注浆管路→二次清孔→下入混凝土导管→投放碎石(厚度30~50cm)→灌注混凝土成桩→桩身混凝土养护(2~10天)→泵送高压水疏通注浆管→桩侧后注浆→桩身养护(1~2天)→桩端后注浆→清洗机具→检测验收。

(4) 反循环基桩 反循环基桩的施工步骤(见图1-2-13)可概括为以下9步,即整地、放样、测定桩位,设置沉淀池→埋设适当长度的保护套管→安置钻掘机钻掘→测定钻孔内稳定液的高程→清除孔内杂物→吊放钢筋笼→吊放特密管,浇注混凝土→拔除特密管→拔除保护套管。