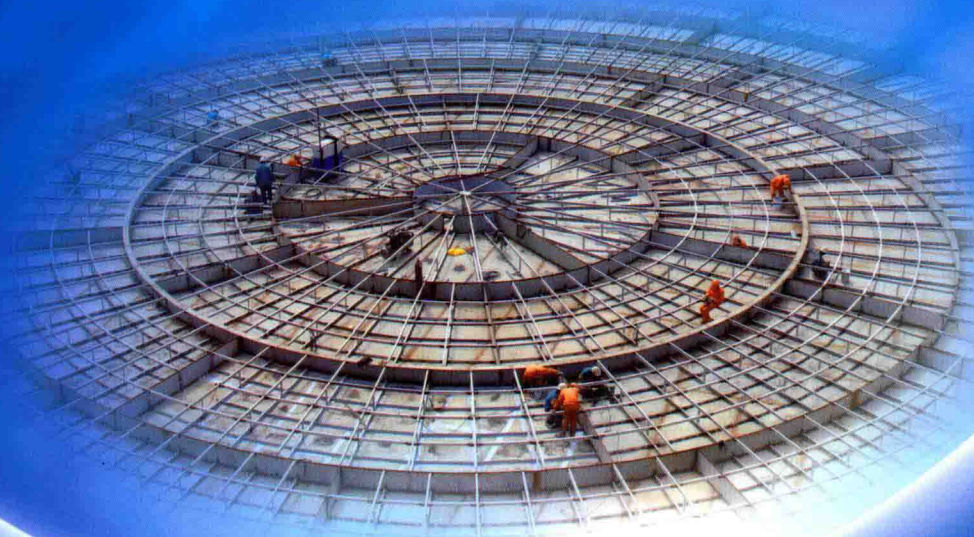


超大型 储罐设计与应用

CHAODAXING
CHUGUAN SHEJI YU YINGYONG



徐至钧 主 编
付细泉 徐 卓 杨瑞清 李 景 副主编



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

超大型 储罐设计与应用

CHAODAXING
CHUGUAN SHEJI YU YINGYONG

付细泉 徐卓

杨瑞清 李景 副主编

藏书

中国石化出版社

内 容 提 要

本书按《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)的规定,结合工程实例加以介绍和分析,主要内容包括桩基技术、桩的受力性状与单桩承载力计算、群桩—承台和桩—土共同作用分析、桩基变刚度调平设计、工程应用实例、超大型储罐的优化设计、超大型储罐的结构设计及施工安装、地基处理等。

可供超大型储罐、高层建筑等建(构)筑物的设计人员、施工技术人员等参考使用,也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

超大型储罐设计与应用/徐至钧主编. —北京:
中国石化出版社, 2015. 6
ISBN 978-7-5114-3367-1

I. ①超… II. ①徐… ②付… III. ①油罐—设计
IV. ①TE972

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 095332 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京柏力行彩印有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 15.25 印张 375 千字

2015 年 6 月第 1 版 2015 年 6 月第 1 次印刷

定价:48.00 元

前言



我国的石油储备建设相对滞后,与发达国家相比起步较晚。2010年1月17日,国家能源局首任局长在首届中国经济年会上表示,我国已经顺利完成石油战略储备一期工程。

首批4个储油基地镇海、舟山、黄岛、大连已投入使用,储备总量约1400万吨。这个储油量相当于我国10多天的原油进口量,加上国内21天进口量的商用石油储备能力,也就是说,我国的储油能力已经达到30天进口量。同时,二期战略石油储备基地建设进展顺利,到2013年已全面完工,我国总石油储备能力已达2.74亿桶(约合3753万吨)。此外,我国计划到2020年完成建立战略石油储备的全部工作,总共将建成约5亿桶储备,大致相当于90天的石油进口量,届时我国的石油储备规模将位居世界第二。

建设战略石油储备的储罐都是超大型储罐,建设在沿海各省,沿海各地土质较差,超大型储罐的基础都采用桩基,桩一般采用的是灌注桩、预应力管桩、预制方桩等,由于设计方法的原因,工程造价比上部超大型储罐还高,相当于“地上建一台储罐,地下埋进一台储罐的工程费用”,造成很大浪费。

近30年来,在国际桩基技术的带动和工程应用的影响下,我国桩基技术发展迅速。桩基广泛应用于工业与民用建筑、道路桥梁、港口码头、机场车站和近海工程等,已成为地基基础工程、岩土工程中最热点的重要学科和独立产业。随着城市化建设加快,高层建筑、高速铁路、高速公路、大跨度空间结构建筑的大量兴建和发展,大大促进了桩基设计、施工、检测和设备等的创新与发展。我国桩基技术总体上已达到国际先进水平,而变刚度群桩设计与施工、桩底桩侧压力灌浆设计与施工、高层建筑深基础沉降计算、疏桩设计、钻孔压浆(混凝土)灌注桩设计与施工、三岔双向挤扩灌注桩设计与施工等已达到国际领先水平,是桩基础施工技术的重大突破。

《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)总结了10多年来的桩基础设计施工经验和科研成果,把变刚度群桩设计首次写入规范。在规范中增加的主要内容为变刚度群桩调平设计,考虑上部结构形式、荷载和地层分布以及相互作用影响,通过调整桩径、桩长、桩距等改变桩基支承刚度分布,以使建筑物沉降趋于均匀,承台内力降低的设计新方法;以及考虑刚性桩的复合地基,由基桩和承台下地基土共同承担荷载的复合地基,这是桩基规范的新内容。

我国桩基础的设计与施工虽然取得了巨大成绩,应用于许多重大工程,但也出现了若干桩基事故和桩基设计失误,造成巨大损失和浪费,同时也反映出桩基设计、施工、检测中的若干理论技术和实际问题尚待解决,如桩沉降计算的理论值比实测值大很多;地基极限承载力很难确定,实际工程中也很难找准;武汉某几十层的大楼由于桩基持力层选择错误,出现不均匀沉降而倾斜,最后只有炸掉;上海某住宅楼由于施工深挖、堆土过高而造成高层住宅整幢断桩倒塌;由于打桩工艺错误,引起地面隆起断桩、桩上升和周围建(构)筑物裂缝破坏;人工挖孔桩的各种事故(甚至人身事故)也时有发生。总之,桩基应用面广,种类很多,应在桩基工程实践实验中不断创新与发展,并在解决和处理桩基问题或事故中不断改进与提高。

本书按《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)的规定,结合工程实例加以介绍和分析,主要内容包括桩基技术、桩的受力性状与单桩承载力计算、群桩—承台和桩—土共同作用分析、桩基变刚度调平设计、工程应用实例、超大型储罐的优化设计及施工安装等。

本书由徐至钧主编,付细泉、徐卓、杨瑞清、李景副主编,参加本书编写工作的还有张勇、赵尧钟、林婷、张亦农等同志。

当前,超大型储罐在战略石油储备中的应用才刚刚开始,也是下一步发展的重点。

本书在行文写作上力求做到有的放矢,行文简浅显,做事诚平衡,是作者们追求的目标。衷心希望本书介绍的内容能够推进桩基设计中能够应用复合桩基和变刚度调平,使桩基技术的发展并在降低建设工程的造价起到一定的作用。若此,便是我们最大的目的。书中不妥之处,尚祈各界读者朋友不吝指正。

目 录

地基处理篇

第一章 桩基技术	(3)
一、桩基础技术现状	(3)
二、桩型选择与桩的技术特点	(8)
三、桩基础的受力特征、分类和选型	(11)
四、桩型与成桩工艺选择与常见的误区	(17)
五、《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)新增内容	(19)
第二章 桩的受力性状与单桩承载力计算	(20)
一、灌注桩的荷载传递性状	(20)
二、桩基竖向承载力计算	(34)
三、特殊条件下的桩基竖向承载力验算	(41)
四、群桩计算	(46)
五、复合地基承载力的确定	(48)
第三章 群桩—承台和桩—土共同作用分析	(51)
一、桩基承台效应的试验实测	(51)
二、现场大比例尺圆形桩基承台实测	(54)
三、桩基承台土反力实测	(66)
四、高层建筑的桩筏(箱)荷载分担的实测与计算	(72)
五、《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)对承台效应的分析	(75)
六、地基处理中的复合桩基设计与实例测试分析	(76)
第四章 桩基变刚度调平设计	(87)
一、变刚度调平概念	(87)
二、桩基承台受力性状与变刚度调平设计	(89)
三、碟形沉降和马鞍形反力分布的负面效应	(94)
四、变刚度调平的理论与计算方法	(95)
第五章 变刚度调平设计的桩基工程应用	(106)
第六章 刚性桩的复合地基设计	(117)
一、复合地基的分类	(117)
二、作用机理	(118)
三、复合地基中桩体破坏模式	(119)

四、复合地基应力特征	(120)
五、复合地基承载力计算	(122)
六、试验检测	(124)
第七章 复合桩基工程应用实例	(127)

设计与应用篇

第八章 超大型储罐综述	(142)
一、超大型储罐设计技术的发展	(142)
二、我国超大型储罐的发展与结构设计	(145)
第九章 战略石油储备	(149)
一、战略石油储备的起源与发展	(149)
二、我国的国家战略石油储备——能源安全保障体系战略工程	(151)
三、我国战略石油储备基地的建设计划	(151)
四、油价涨跌背后的大国博弈	(153)
第十章 超大型储罐的优化设计	(155)
一、 $15 \times 10^4 \text{m}^3$ 原油储罐的优化设计	(155)
二、 $12.5 \times 10^4 \text{m}^3$ 外浮顶原油储罐主要结构设计	(160)
三、大庆南三油库 $15 \times 10^4 \text{m}^3$ 储罐设计	(162)
第十一章 超大型储罐的结构设计	(165)
一、钢制焊接常压储罐设计	(165)
二、超大型储罐结构设计	(176)
三、超大型储罐壁厚计算方法编程与比较	(181)
四、 $15 \times 10^4 \text{m}^3$ 超大型储罐设计与施工	(183)
第十二章 超大型储罐施工安装	(192)
一、超大型储罐施工安装文件的编制	(192)
二、超大型油罐底部边缘板的设计与焊接施工	(213)
第十三章 超大型储罐基础设计与地基处理	(217)
一、地基处理成效显著	(217)
二、超大型储罐基础采用桩筏基础工程造价昂贵	(217)
三、超大型储罐地基允许变形的有关规定	(221)
四、导致储罐地基变形和倾斜的主要因素	(223)
五、储罐地基变形的实测与分析	(225)
六、储罐基础的地基允许变形值	(230)
七、超大型储罐采用桩基础复合地基承载力计算	(230)
八、超大型储罐采用桩基础可以采用变刚度调平设计	(233)
九、储罐基础采用变刚度调平设计实例	(233)
参考文献	(238)



地基处理篇

历来设计桩基都是以桩的单桩承载力来平衡上部结构的荷载。

为了探究群桩工作的规律，在理论分析、试验研究和原体观测 3 个方面开展了工作。20 世纪 50 年代末在软土上进行了原型群桩的承载力试验；60 年代在亚黏土冲积层中做了野外大比例尺(1/15)打入桩群模型试验研究和在沙箱中的模型群桩试验研究；70 年代末至 80 年代初在黄河边的间有亚黏土夹层的粉土冲积层中进行了大比例尺(1/20 ~ 1/5)钻孔桩群的大规模试验研究，包括群桩 28 组、双桩 23 组、单桩 23 根和荷载板 3 组，总桩数达 300 余根，历时 3 年多，规模之大世所罕见；近年来又开展了对承台与桩共同工作的试验研究。原体观测历来受到重视，特别是对软土上大型筒仓桩基从施工到正常运转(3 年)的历时 5 年的系统观测尤为宝贵。这些研究加深了对群桩的认识，得出了一些可供设计参考的资料。

群桩工作实质上是承台 - 桩群 - 地基土的共同工作。不同的桩基类型具有不同的工作特点。端承桩由于持力层刚硬，不允许桩下沉，故摩阻力不能发挥，荷载直接由桩端传给持力层，土的应力状态与单桩相近，故可认为端承桩群中各桩的工作状态与单桩同，其承载力等于各桩承载力之和，而摩擦桩主要通过摩阻力把荷载传布到桩周及桩端土层中去，在常用桩距下将产生应力重叠，从而使桩群中各桩的工作状态与单桩迥然不同，故群桩承载力并不等于各单桩总和，沉降亦大于单桩。这就是群桩效应。

摩擦群桩的共同作用主要表现在以下几方面：

1. 承台下土的分担作用

它主要与下列因素有关：

(1) 桩与土的沉降；若持力层较硬，桩群沉降较小，则土的分担作用将减弱，若土在自重下固结下沉或饱和软土中因打桩而隆起的土体逐渐固结下沉，土将脱离承台，因此承台下的土逐渐将荷载卸给桩群，甚至对上部桩身产生负摩阻力。反之，若持力层土较软，或荷载较大(接近极限荷载)，使桩群沉降超过桩间土的压缩，则承台下的土将分担一部分荷载。

(2) 桩距越大，则土的分担作用越能发挥。钻孔群桩试验表明，在极限荷载下，当桩距 $s = (2 \sim 4)d$ 时，土分担的荷载只有 16% ~ 23%；而当 $s \approx 6d$ 时，土约分担 60% 荷载。与此同时，桩侧摩阻力所占比例由 70% 降为 30%，而桩端阻力变化不大，约占 11% ~ 16%，且平均值接近于单桩的端阻力。

(3) 桩群内、外的承台底面积之比。桩群以外的承台底面积越大,则承台下土所分担的荷载越多。

2. 承台底面土的反力

其分布大体呈双曲面型,四角最大,边中次之,内部最小,桩群内、外土反力的差值随桩距增大而减小。当桩距达 $6d$ 时,反力分布趋近于刚性平板基础。

土反力的数值,在极限荷载之前是随荷载而近似线性增加,在极限荷载之后迅速增加,但反力分布形式变化不大。

3. 总荷载的分配

总荷载分配于桩群中各桩的桩顶荷载和桩底荷载是不均等的。一般角桩最大、边桩次之、中心桩最小,这种差异随着桩距、荷载及承台类型而变化。桩距越大差异越大,荷载增加差异缩小,低承台与高承台的差异更大。因此,设计时应适当减少桩群中部的桩数而增加外围桩数。

4. 群桩的荷载传递

群桩的荷载传递过程与单桩不同。承台底面压力使上部桩间土压缩,从而减小了这部分桩土的相对位移,摩阻力因而减小,以至等于零,摩阻力主要发生于下部桩身;随着桩群沉降的发展,上部桩身摩阻力才得以逐步发挥。可见群桩荷载通过桩身向土中的传递是随着沉降而自下向上逐步发展的这恰与单桩相反。

5. 群桩的承载力

在加工硬化型土中,群桩承载力将有所增长。这是由于承台和桩壁传递的竖向荷载,使桩间土的竖向压力和侧向压力增大,从而提高了土的强度的缘故。这已为粉土中钻孔群桩和沙土中模型群桩试验所证实。

6. 群桩的破坏模式

群桩的破坏模式与桩距和承台型式有关。只要桩距不很大(如不大于 $6d$),低承台群桩总是呈整体破坏;而高承台群桩,仅当桩距较小(如小于 $3d$)时呈整体破坏,当桩距较大(大于 $4d$)时则呈冲剪破坏。这是亚黏土中打入式模型群桩和粉土中钻孔群桩试验表明的。

等刚度的桩基础即使在均匀分布荷载的作用下,基础板的变形也是不均匀的,出现蝶形的沉降盆,中点的沉降大而周边的沉降小。

桩顶的反力分布也是不均匀的,内部桩的反力小于边桩,边桩的反力小于角桩,桩顶反力呈马鞍形分布。

《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)总结了近 10 年来的桩基基础设计施工经验和科研成果,把刚性桩复合地基的设计和变刚度群桩列入了规范,可对一些设计部门有关人员的调查中,应用新规定还不到 1%,了解新规定还不到 3%。由此可见,刚性桩的复合地基和桩基的变刚度调平设计的工程应用需要集中相当大的力量进行分期分批的培训和讲课。在设计工程中加以推广和应用,改变桩基设计仅依靠“单桩承载力自古以来的老传统和老观念”。

第一章 桩基技术

一、桩基础技术现状

桩基础,简称桩基,是最古老的基础型式之一。桩基础的大规模应用与发展还是在全国解放以后。20世纪50年代首先在一些大型工程中采用钢筋混凝土预制桩,取得了桩基设计施工的初步经验,建立了自己的施工队伍和装备,为后来的发展打下了基础;60年代,钻孔灌注桩和爆扩桩迅速发展,为在广大地区应用桩基础提供了可能性,并推动了桩基的科学研究;70年代后期随着建设事业的发展,桩基础有了突飞猛进的发展,无论是桩型的创新还是施工技术的进步,还是应用的广度和研究的深度,都是前所未有的。许多中、小城市和内地各省区都建立了相当规模的施工力量和科研队伍。

本节主要介绍当前我国各地工业与民用建筑、铁路公路、市政桥梁、港口码头、海洋工程等各类桩基设计与施工技术的主要成就、总体特点、存在问题,以及同发达国家之间存在的差距。

1. 桩型体系

我国地域辽阔,工程地质和水文地质条件复杂,各类工程本身的性质、结构、荷载和沉降要求各不相同,施工环境或施工条件常有差异,因此全国各地各类工程所采用的桩的类型较多。近几年,随着各项工程的技术要求日新月异,而所遇地质、环境等条件也更复杂,大大促进了桩基技术的发展和桩基的改进和创新。

目前,我国各地各类工程所采用各种主要桩型,经加以归纳整理,得出我国正在应用的桩型体系(图1-1)。可以看出,凡世界各地所出现的各种基本桩型,包括早期的或已被国外认为“过时”的桩型,几乎都正在我国得到应用。诚然,有的桩型(如木桩、爆扩桩等)近年我国已很少采用,有的桩型(如锥形桩)虽曾出现而未获发展,因此图1-1未将其列入。

2. 近年桩基施工技术的主要成就

(1)20年前,仅有少数单位能施工的大直径钻孔、冲孔灌注桩,如今已为我国工程界所普遍掌握,成为我国各地高层和超高层建筑、铁路公路中的大桥及特大桥、城市立交桥以及港口码头船台等结构物的最常用的基础形式,而且不论在大中城市的闹市中心,还是江河湖海岸边,很多重点工程的施工都取得十分丰富的经验。据不完全统计,我国应用桩的数量每年达80~100万根,堪称世界之最。其桩直径一般为1~2m,最大已达4m,其深度最大已超过100m,如厦门昌林大厦、黄河北镇大桥、香港新机场和青马大桥等。在软土地区的超高层建筑桩基通常为50~80m,但也有超出的,如上海金茂大厦的钢桩达83m、天津117大厦钻孔灌注桩达80m以上。

大直径钻孔、冲孔桩,当桩端存在良好持力层时,往往采取扩底的方法,以充分发挥桩端土的作用。当桩端遇岩层时,则施工成嵌岩桩。以往把嵌岩桩仅视为单纯的端承桩,并且要求增加嵌岩深度。近年通过研究和大量施工实践,可适当减少嵌岩深度,从而大大降低了施工难度、缩短了工期、节约了造价,且并不降低桩的承载力。

此外,为充分发挥大直径桩的侧阻力,必要时还可施工成多节挤扩支盘桩或多分支桩,当采用桩端灌浆技术后反而大大提高了桩的承载力。

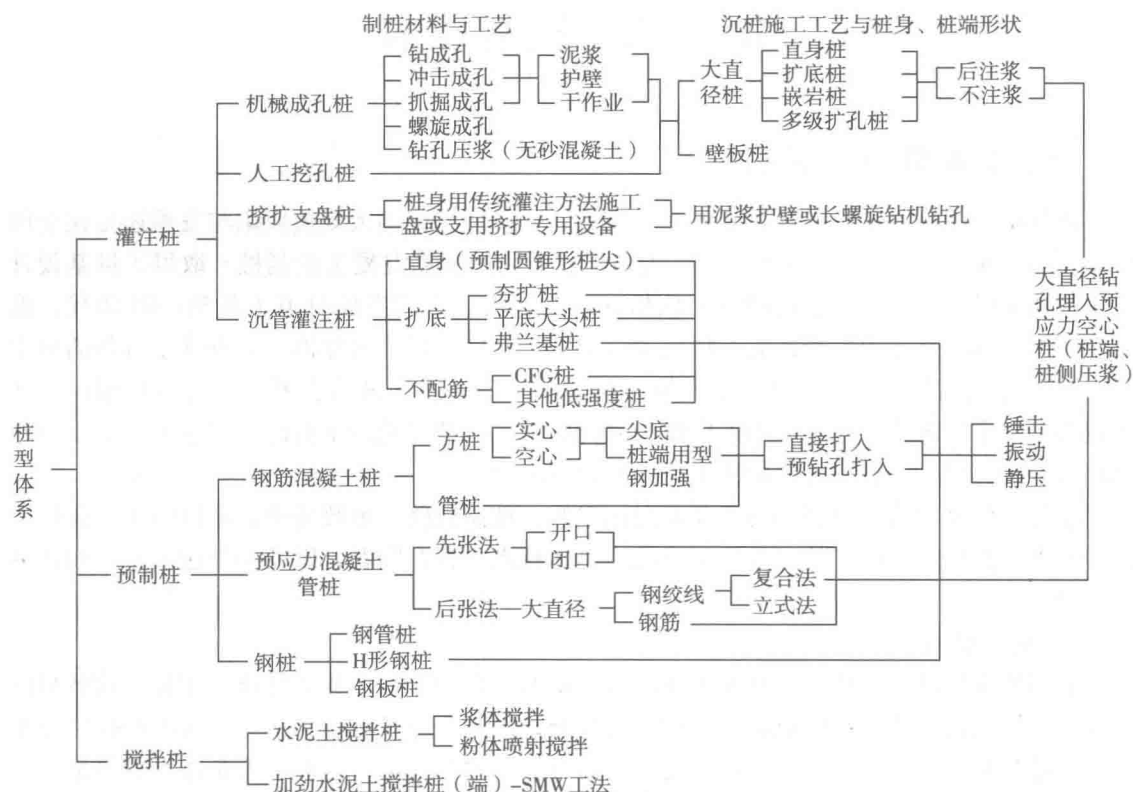


图 1-1 我国工程建设应用的桩型体系

(2)人工挖孔桩不仅被大量应用于北方地下水位低而且土质好的地区,也被大量应用于南方沿海地下水位甚高的软土地区。由于其造价低、有竞争力,经过论证能采用之处往往都优先予以采用,并采取相应措施,取得了安全、快速、优质的效果。有的城市(如广东惠州等)以挖孔桩作为当地高层建筑的主要桩型(占该地高层建筑用桩总量的75%左右)。目前,挖孔桩的建筑物层数已达50层以上(如北京京广大厦、深圳国贸中心大厦等),桩深已逾50m。

(3)为了从根本上消除大直径桩孔底沉渣不易清理和混凝土质量不稳定等缺陷,交通部系统成功地开发了具有20世纪90年代国际水平的“大直径钻孔埋入预应力混凝土空心桩”新技术。这种桩适合于各类土层,其直径可达5m或更大。应用于跨径在120m以内的桥梁时可不作承台,也可用于高层建筑等。这样大大提高了大直径桩施工的工业化水平,减少了水下作业,并可确保不塌孔。目前已在河南、湖南等地数座大桥中应用,降低造价20%~40%。如九江鄱阳湖口大桥应用后,与其他方案相比,仅桩基工程即节约人民币约1亿元,并缩短工期约1年。

(4)在钻孔、冲孔、挖孔桩中,成桩后实施的压力灌浆取得了消除桩底沉渣隐患、改善桩端和桩周土性能以及提高承载力和减少沉降量的综合效果。该技术由中国建筑科学研究院地基所发明以来,应用很广、效果显著。仅数年间已在京、津、沪等十余个地区相继应用。

其所采用的工艺与管路等均有我国自己的特色。

(5)利用压浆概念还开发了钻孔压浆无砂混凝土桩。它不需泥浆护壁,不致产生断桩缩颈,不致残留沉渣,施工方便,桩基承载力提高1.5~2.5倍。现已用于南北各地数百项工程中,效果很好。

(6)继上海宝钢一期工程打入3万余根钢管桩后,近年上海、浙江、江苏、广东等地一批电厂、码头、桥梁及高层建筑等又打入约3万余根钢管桩和H形钢桩,其中包括曾经是中国最高建筑的上海环球中心和上海金茂大厦(金茂大厦工程地上88层,地下3层,建筑面积 $28 \times 10^4 \text{ m}^2$,地面以上总高421m,桩深83m,桩径904mm,于2001年建成),以及上海南浦、杨浦大桥(杨浦大桥为当今世界跨径最大的双塔双索面斜拉桥,其跨径为602m,主塔高208m)等。

由于钢管桩造价高昂,我国通常只在其他桩型确实不能胜任或工期十分紧迫等特殊情况下应用。例如,上海地铁一号线有3个车站位于淮海路闹市中心,为了尽量减少施工对该地交通和工商业等的影响,乃采用钢管桩,以加快速度。

(7)预应力混凝土管桩早年开始应用于桥梁和码头等水工建筑,近年大量推向工业与民用建筑。广东、上海、浙江、海南等地有上百家工厂生产此类管桩,年产量超 $2000 \times 10^4 \text{ m}$,其桩径300~1300mm不等,强度等级有C60、C70和C80三种,前两者称为PC桩,后者称PHC桩。其所支承的高层建筑在武汉达25层,北京达30层,广东达40层。施工长度最长已达65m,用它代替钢管桩,降低造价约50%。广东省已率先编制了此类桩的专门规程。天津市制成了外壁呈竹节状的预应力混凝土管桩,其侧阻力大于直径相同的光面管桩,并具有良好的抗沙土液化性能,适合抗震地区应用。为了检测和确保管桩预应力的张拉质量与桩身耐冲击性能,浙江研制了一种“智能测力仪”,可查明每根钢筋的张拉内力和各根钢筋之间的离散率。

预应力混凝土管桩在施工时要特别注意打桩工艺、接头技术和预应力损失等问题。

(8)在高层建筑深基坑及工业设备、市政设施等地下开挖工程中,采用各种排桩支护结构,辅以深层搅拌桩等隔水措施,以代替泥浆槽壁式地下连续墙,具有良好的技术经济效益,已成为风行各地的一项常用技术。排桩可采用钻孔、冲孔、挖孔桩,或钻孔压浆桩,也可采用沉管桩或预制桩,因而可与基桩施工结合进行。其布置形式有疏排、密排、双排框架式及排桩加挡板等,可按计算要求灵活选用。工程实际最大支护深度已达18m。

(9)北京、上海两地已成功地应用在搅拌桩中插入型钢或钢筋笼,使其成为既能挡土又能隔水的SMW工法支护结构,从而使柔性桩转化为刚性桩。

(10)钢筋混凝土预制桩以其桩身质量相对稳定可靠而取胜,故在城市郊区或空旷之处、铁路公路沿线桥梁或港湾水域以及其他不宜采用其他桩型的场地使用。其中,近年的重大项目有:屹立在上海黄浦江畔、468m高的亚洲第一电视塔——“东方明珠”塔(采用500mm×500mm×35m的预制桩,送桩达12.5m),以及上海交通大学包兆龙图书馆、上海华亭宾馆、福州国际大厦、天津贸易中心、深圳爱华大厦等。

预制桩近年也朝着超长方向发展,其长度与截面尺寸之比已达140,如温州某大厦桩长70m,截面500mm×500mm。

为了减少打桩引起挤土、振动等对环境的危害,近年预制桩大多实施预钻孔打入法,也有采用预制平底开口空心桩的。为了提高其贯入硬土、砾石或岩层的能力,常采用H形钢

焊接于桩底。为了减少施工噪声,常以静压代替锤击或振动。通过上述措施扩大了预制桩的应用范围。

(11)在施工环境条件容许的场地,分别采用锤击、振动或静压沉管灌注桩,包括弗兰基桩、夯扩桩、平底大头桩等,建成了数亿平方米的多层民用建筑和工业厂房。此类桩由于造价特低,在许多地方特别受到青睐。近年,其桩径和入土深度有增大的趋势,分别达到了700mm和35m;并在某些地区直接支承高层建筑,或作为桩筏、桩箱基础的组成部分。此类桩的质量主要依赖于施工操作水平。它以短($<15\text{m}$)见长,长径比宜小不宜大。

(12)挤扩支盘桩是从灌注桩中发展出来的一种新型桩,它主要是应用桩身的多级挤扩支盘,大大提高了桩身的承载能力,克服了原桩身依靠摩阻力的局面,将灌注桩的应用推向了一个新的起点。目前应用挤扩桩最长达35m,挤扩支盘4~8个。最近,又开发出“三岔双向挤扩灌注桩”,应用于多项工程获得成功。2009年住房和城乡建设部发布了《三岔双向挤扩桩设计规程》(JGJ 171—2009)。

3. 桩基础的应用及存在的问题

1) 大量挤土桩及问题

大量挤土桩包括各种实心的打入式钢筋混凝土预制桩、预应力混凝土管桩、闭口钢管桩及沉管灌注桩。这类桩均挤出大量的“土”,由此造成各种影响。

(1)钢筋混凝土预制桩。此类桩的截面通常仍为传统的正方形,其尺寸为250~450mm,单节最大长度约20m。此外,还有圆形、六角形、三角形、H形等截面,但不常用。预制桩的最大容许轴向荷载受到限制。预制桩常用的接桩方法以桩端预埋钢板焊接为主,也有的采用插筋用环氧树脂胶泥连接。

(2)预应力混凝土管桩。常用的预应力混凝土管桩,其桩端为封闭式,管径为400~600mm,单节长度一般为12m,一般采用桩端钢板焊接接长,定制的最大单节长度可达20m。

预应力混凝土管桩均采用高强混凝土制作并应精心控制,对预制厂的养护条件也有严格要求。生产75MPa以上高强混凝土预应力管桩时,应采用离心法密实及高压蒸养。此类桩的渗透性较普通预制桩小,适宜应用于海洋工程。国内在许多港口水上项目的应用中均取得成功。

(3)闭口钢管桩。国内从宝钢开始采用钢管桩以来逐年用量越来越多,尤其在各种海洋结构物中,钢管桩具有较高的抗弯和抗压强度。受冲击荷载时,具有良好的吸收能量特性。

钢管桩在必要时尚需在管内灌入混凝土,例如在某些海洋工程中,混凝土常自桩顶标高灌至海底标高以下,因为一般的海水较温暖,常常含有各种污染物或厌氧的硫酸盐还原性细菌,大大增加了钢管的腐蚀或点蚀的危险性。对于海底以上的各类钢桩,不论其是否完全浸没于海水,或处于波浪潮汐涨落区之中或之上,均需充分考虑桩基础在其设计寿命内的防腐措施。

(4)沉管灌注桩。沉管灌注桩有两种沉管施工方法:一种是在管顶锤击、静压或振动;另一种是在管内用落锤打击管底干硬性混凝土(或砾石)形成的桩塞,并将桩塞击出管外而形成扩大头。桩塞混凝土的水灰比要严格控制,一般为0.20~0.25。同时,桩塞的密实高度不小于2.5倍桩身直径。

沉管桩的最大直径为600mm,实际施工最大长度约为30m。扩底沉管桩的桩管,由于不

直接承受冲击,常采用较薄管壁,同时打桩架的高度相应降低,这种设备(包括桩架、桩管及内击锤等配套)较国内的“夯扩桩”的设备更为合理。

上述4类桩的挤土效应非常显著,从而避免了由于大量打桩挤土的影响而造成周围地面隆起、建筑物倾斜甚至整个房屋升高等问题。

2) 少量挤土桩及问题

少量挤土桩主要指H形钢桩及开口钢管桩。通常此类桩的截面面积都比较小,一般采用冲击法沉桩。开口钢管桩常常形成土塞,需要不时钻孔清土,以减小沉桩阻力。由于土塞在桩管内壁有阻力,其所引起的沉桩阻力往往会大于闭口钢管桩。

H形钢桩由于搬运和沉桩均较方便,在国内用得较多。与混凝土预制桩相比,沉桩容易,因而可沉桩更深。但当遇孤石等障碍物或在坡地岩层施工时,可能打弯。这时,应详细分析地质条件、孤石分布情况,可将其截面加厚,端部加强,以承受强打穿过孤石或岩层。H形钢桩有较多的规格,并且有不同的钢材等级,其最大容许轴向荷载一般为3000kN。有的工程采用大型重级H形钢(283kg/m),其容许荷载可达3600kN。H形钢桩和开口钢管桩常用于海洋结构物及围海填土地区的建筑物中,施工最大长度在50m以上,目前国内最大的桩锤是Delonag 100柴油锤。

3) 置换土桩及问题

通常把CFG桩、水泥土搅拌桩以及人工挖孔桩统称为置换土桩。

当地基为软弱土层并有地下水时,采用泥浆钻孔有困难,可采用钢套或混凝土环圈支护。

(1)机械成孔桩的常用成孔方法有钻孔法和冲击法两类。根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)规定,直径300mm以下的称为小直径桩,大于300mm的称为中直径桩。实际工程应用中,小直径钻孔桩的直径有的达400mm。小直径钻孔桩中有一种专利桩型,其特点是采用一种特制的工具取土,并采用压缩空气使桩身混凝土致密。此类桩的直径一般为325~508mm,可用于施工净空高度受限制的场地,有时可不配钢筋。当采用不配钢筋的桩时,需考虑邻近打桩所产生的地层位移对其桩身的影响。

另有一种专利桩型为钻孔压浆桩。此桩采用长螺旋钻机钻孔,将水泥浆或流态混凝土通过空心钻杆泵入桩孔,其直径为400~800mm,长度最大可达30m。这种桩的优点是在含水的、不稳定的软土中,不需要泥浆护壁或采用套管,没有水下灌注混凝土问题;其施工噪声小,振动小,施工速度快。但它不适用于大孤石场地。这种桩型在基础支护中具有特殊作用。

在国内大直径机械成孔桩常应用于高层建筑和大桥基础工程,其直径一般为1.0~2.5m,最大深度达80m以上。它有各种专用的扩底工具,直径更大的桩也曾有施工,但其深度相对较小。

传统的大直径机械成孔桩常要求嵌入基岩上,往往不计入桩的侧阻力。当这种桩设置在软土或在风化土层中时,侧阻力是主要的。

(2)人工挖孔桩大量地用于建筑物基础,或作为挡土结构,其直径通常为1.2~2.5m,最近也有直径为7.0~10.0m的人工挖孔桩获得成功。对于山区坡地建构筑物挖孔桩,上段有的采用套管,使桩与山坡互相隔离,防止山坡位移而产生侧向荷载。人工挖孔桩要严格按规程施工,保证安全和质量,同时防止出现井涌、流砂、有害气体等问题。

北京、深圳早于1987年就颁发了关于人工挖孔桩的指导性文件,要求施工部门申报对人工挖孔桩的安全保证措施。

4) 桩基施工事故及技术措施

在桩基施工技术取得创新进步和巨大成就时,近年桩基施工事故时有发生,甚至出现一些大事故。例如,武汉市桥苑新村一幢18层商品住宅楼,建筑面积 $1.16 \times 10^4 \text{ m}^2$,采用夯扩桩基础。在结构封顶、外墙粉饰已完且正在进行内装修和楼地面施工时,大楼突然出现了不均匀沉降而倾斜,且倾斜度不断增加,很快楼顶水平位移就达2.884m,倾斜度达4.49%。专家们一致判断:此楼不可加固纠偏,只能爆破拆除,以免产生二次灾害,因此对大楼实施控制爆破,新楼顷刻成废墟。这是一起中外建筑史上罕见的事故,其事故原因,除了桩体施工质量存在一系列严重缺陷等外,还由于桩型和桩长选用不当,将夯扩桩打在淤泥质土层,可形象比喻为将“一把筷子插在稀饭里”。

南京市华荣大厦人工挖孔桩施工及基坑开挖期间,施工单位降水而未采取相应措施,造成了毗邻的新华日报社印刷厂厂房墙体严重开裂,地面下沉,印刷机严重受损。此案诉讼数年,后经最高人民法院终审判决,赔偿新华日报社印刷厂人民币1400余万元。这是我国桩基础施工对周围环境影响的典型案例。

以上4种桩基施工时,常出现的问题为:

(1)钢筋混凝土预制桩常发生接桩处焊接不可靠,打桩时造成断桩废桩,或桩锤能量不足,桩尖打不到预定标高等。预制桩的另一类事故是对构件蒸养时升温过快,以致其后期强度和抗冲击能力不能满足设计要求。此外,打桩挤土给邻近建筑物或工程设施带来危害,虽有各种措施可以预防,但却没有引起注意而造成事故。

(2)预应力混凝土管桩常因上、下节桩接完后停置时间过长,以致不能续打,于是强打而将桩顶打坏。有的工地此类坏桩率达40%以上。

(3)沉管灌注桩常因布桩过密,盲目追求打桩速度,打桩流水不合理或拔管速度过快等,造成缩颈、位移、断桩、废桩或土体隆起。有的断桩率高达70%,以致大面积补桩或不得不将全部桩报废。某油库 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 油罐,采用CFG桩分两期施工,由于施工时拔管速度太快,结果发现大量断桩和缩颈,第二期没有吸取教训,使老问题重现,结果补了2万多根桩。

(4)钻孔、冲孔、挖孔桩常见事故是塌孔、缩颈或膨胀、混凝土离析分层、孔底沉渣超标等。近年采取了调整泥浆比例、实施桩底、桩身压力灌浆等措施,情况有所改善。

(5)桩基施工对周围环境的影响。振动打桩引起的噪声一般为70~90dB,环境监测部门要求在密集办公、居住区噪声<50dB。因此,要求现场施工采取降低噪声的措施。

目前我国应用的桩具有大中小直径并存,灌注与预制并存,机械成孔与人工挖孔并存,锤击、振动与静压并存,以及接近国际水平的工艺与传统工艺并存等特点。从总体来看,桩基的设计与施工水平已达到国际先进水平,有的已达国际领先水平,但与发达国家的主要差距是施工事故较多,应加强质量控制与监测。

二、桩型选择与桩的技术特点

1. 桩型的选择

选择最适宜的桩型必须通盘考虑以下诸因素,即:地质条件、荷载性质、施工对于周围

结构物和环境的影响、现场的制约情况及施工设备的供给情况、安全、工期、造价，以及桩的设计寿命等。或简言之，必须考虑该桩型在技术、质量、安全、环境、工期、造价诸方面的综合效果。为此，设计与施工单位经按照图 1-2 所示的步骤，通过分析计算得出具体数据，提供给业主进行决策。

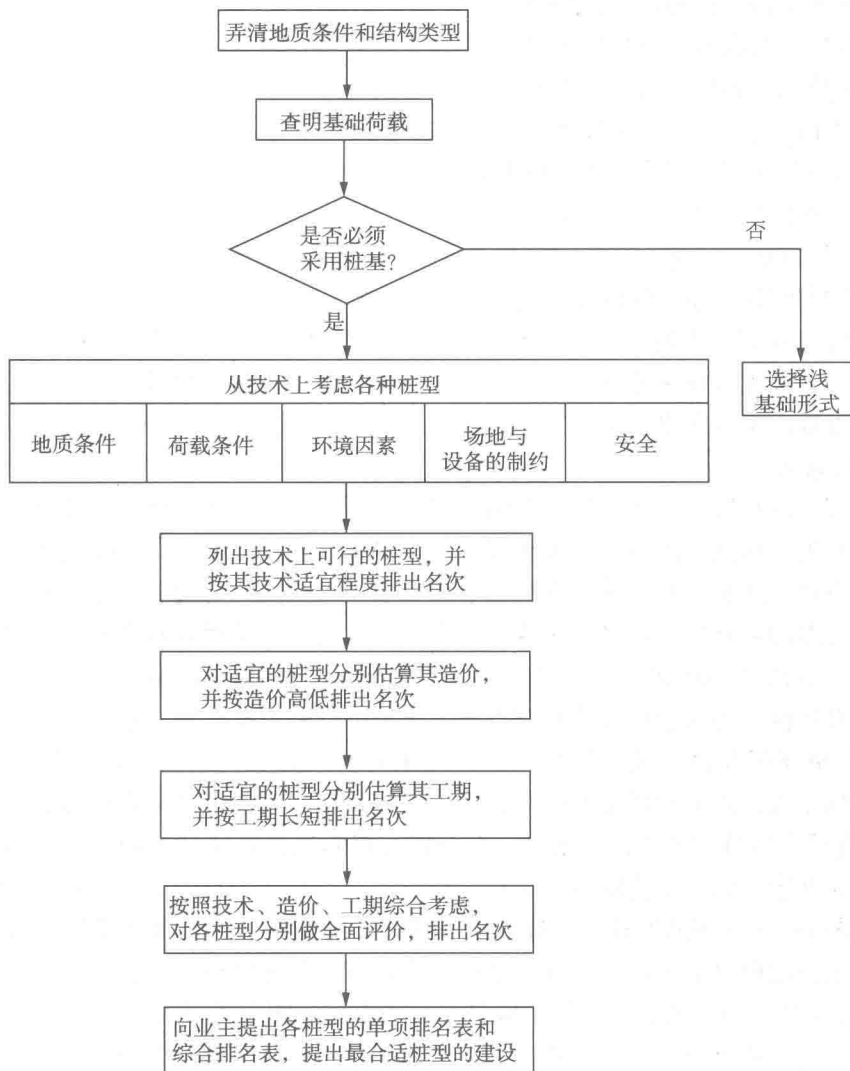


图 1-2 工程选择桩型的参考流程方框图

另一方面，选择桩型还必须遵守政府法令。例如：国内各大城市均有环境保护、控制噪声和泥浆污染的规定。如香港地区于 1994 年颁布的《噪声控制条例》，其中规定：冲击法打桩施工不得在工作日的晚上 7:00 以后至次晨 7:00 以前施工，以及星期日和公共假日全天施工；在人口稠密地区，即使在工作日亦只能施工 3~5h。必须申请《施工噪声许可证》。同时，鉴于柴油打桩锤施工噪声大，且散发浓烟，香港地区已决定从闹市区开始，逐渐予以淘汰。

对于靠近飞机场的场地以及场地上空存在各种公共设施之处，香港法律对施工空间有严

格限制。因此,凡由起重机装载的各种大型施工设备均不宜在此应用。此时小桩便成为选择对象。

鉴于人工挖孔桩在历史上曾发生过几起严重的事故,以及施工中对于人身安全的威胁,北京和香港等地都作了规定,在下列场合不得采用挖孔桩:

- (1) 地下水位高的沿海围垦区场地;
- (2) 下卧层为大孔性大理岩的场地;
- (3) 大深度(例如超过 30m)的基础工程;
- (4) 新填土或受化学污染的场地;
- (5) 深部地层曾有断层位移史的场地;
- (6) 紧靠输水或污水隧道的场地;
- (7) 紧靠浅基础的场地;
- (8) 存在厚度超过 10m 的松散填土的场地。

各地政府主管部门认为,人工挖孔桩只有当它属于唯一的、切实可行的、保证安全的技术措施方案,并且无其他更适当的方案时,才得以采用。同时必须采取各种切实的、合理的防范措施,以确保工人人身安全。

2. 技术特点

自从大直径挖孔桩和钻孔桩相继在国外问世以后,小直径灌注桩于 20 世纪 50 年代初在意大利脱颖而出。从此,灌注桩一方面向大直径发展,另一方面向小直径发展。而中等直径混凝土桩也由单一的预制打入式,发展出了沉管灌注的形式。混凝土桩乃以大、中、小各种直径及预制与灌注两种形式被灵活应用于各类工程。目前,工程界和学术界对桩按直径 d 分类的标准:大直径桩 $d \geq 800\text{mm}$,中等直径桩 $300\text{mm} \leq d < 800\text{mm}$,小直径桩 $d < 300\text{mm}$ 。

大直径灌注桩与传统的中等直径桩以及大直径钢管桩等相比较,它具有以下特点:

(1) 灌注桩属于非挤土或少量挤土桩,施工时基本无噪声、无振动、无地面隆起或侧移,也无浓烟排放,因而对环境的影响小,对周围建筑物、路面或地下设施等危害小。

(2) 大直径灌注桩直径大,入土深。迄今挖孔桩的最大直径已达 8m,钻孔桩达 9m;挖孔桩的入土深度逾 60m,钻孔桩逾 150m。

(3) 可采取扩大底部的形式,更好地发挥桩端土的作用,这是其他任何桩型所不能做到的。沉管灌注桩之所以能扩底,首先也是由于它采取了就地灌注的工艺。

(4) 单桩承载力高,视地质条件、桩身尺寸和混凝土强度等级不同,一般可达数千至数万千牛顿,因此,常可设计一柱一桩,不需桩顶承台,简化了基础结构。

(5) 其桩身刚度大,除能承受较大的竖向荷载外,还能承受较大的横向荷载,增强建筑物的抗震能力,并能有效地充当坡地抗滑桩、堤岸支护桩以及地铁或建筑物基坑开挖的支护桩,还可在基坑开挖后继续作为地下室的承重墙等永久性结构使用。

(6) 灌注桩通常布桩间距大,群桩效应小,设计中无需为此而进行繁琐的计算。对桩的沉降及其对邻桩和周围地面的影响,其估算也较常规中等直径桩更为简便。

(7) 不需要搬运吊装,不必承受打击,因而可采用较低的配筋率,并可视建筑物的重要性和荷载条件仅在桩身上段配筋或沿深度作变截面配筋。

(8) 灌注桩施工工艺种类多而且日新月异,这主要是由于各地工程技术人员为了保证这类桩的成桩质量、施工安全和提高工效,长期来针对不同的地质条件和环境条件,研制了各