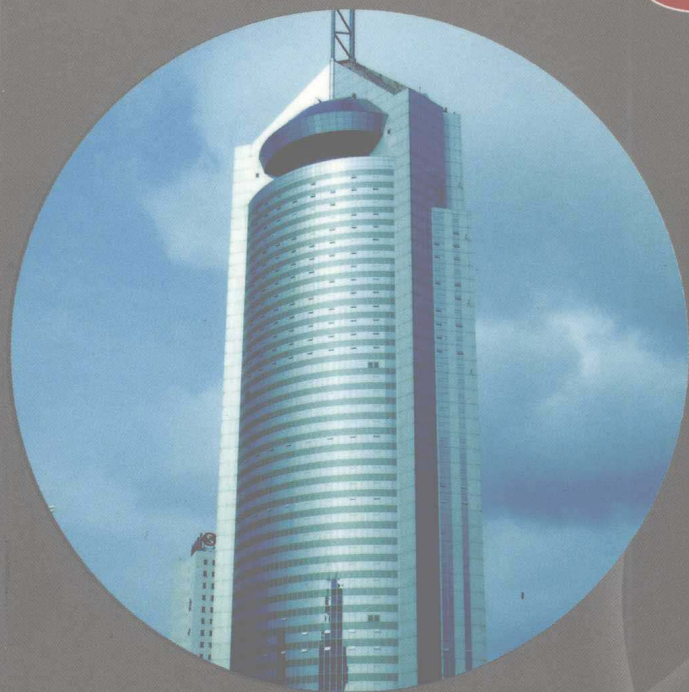




21世纪技术与工程著作系列·土木工程

变刚度群桩设计原理与 工程应用

陈祥福 徐至钧 著



科学出版社

21 世纪技术与工程著作系列·土木工程



变刚度群桩设计原理 与工程应用

陈祥福 徐至钧 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书根据我国新颁布的《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008),系统、全面地介绍变刚度群桩设计原理与工程应用。本书共八章,分别为导论、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、变刚度群桩调平设计、群桩沉降计算与实测分析、空间变刚度群桩等沉降设计方法、变刚度群桩工程应用实例和变刚度群桩设计的技术经济分析。

本书内容丰富,设计理念创新,可供土木工程领域的设计、施工人员以及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

变刚度群桩设计原理与工程应用/陈祥福,徐至钧著. —北京:科学出版社,2011

(21世纪技术与工程著作系列·土木工程)

ISBN 978-7-03-030436-0

I. ①变… II. ①陈… ②徐… III. ①群桩-设计 IV. ①TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 033828 号

责任编辑:童安齐 田新峰 / 责任校对:马英菊

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年3月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2011年3月第一次印刷 印张:17 1/4

印数:1—2 000 字数:338 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

近 30 年来,在国际桩基技术的带动和工程应用的影响下,我国桩基础发展迅速。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。经济全球化,城市建设高层建筑化。我国城市化建设加快,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。我国桩基础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。

我国新的《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)总结了十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、桩基耐久性规定、桩侧与桩底后注浆桩设计与施工、疏桩设计与沉降计算、桩身拉压承载力计算、钻孔压混凝土(浆)灌注桩和预应力混凝土空心管桩等。传统的桩基设计方法是:计算上部建筑总荷载,满足静力平衡原理,建(构)筑物全部荷载都由桩承担,按等刚度(即“等桩长、等桩径、等桩距”)、不等沉降进行布桩设计,验算建(构)筑物的沉降。若总沉降不满足要求,则重新调整桩长、桩径和桩距(“三等”情况下),使之满足要求。空间变刚度群桩等沉降设计方法基本思路是:根据弹性力学半无限体边界上作用各种荷载的应力-应变规律、群桩理论和桩基实测数据分析,长桩控制沉降,短桩承担荷载,长短桩优化组合,形成空间变刚度群桩,基础板-群桩-地基土共同工作、共同作用、共同承担建(构)筑物全部荷载,使整个建(构)筑物的沉降均匀(或相等),把沉降差控制在规范或设计者允许的范围内。所谓“等沉降”,实际上是把沉降差控制在预先确定的某个常数值内(如沉降差为 5mm)。这就打破了传统的桩基设计方法。沉降差不仅是结构要求,而且还要综合考虑电梯、管线和设备本身的严格要求。可见,在变刚度群桩等沉降设计中,沉降计算和沉降差确定是整个设计的关键和很复杂的工作。

在若干工程应用成功中表明:变刚度群桩等沉降设计的桩基受力合理,承台-桩和桩-土共同作用,控制沉降好,投资费用节约,具有广泛的发展空间和应用前景。工程设计要特别注意桩的类型和功能,弄清楚各种桩型功能、用途和成桩工艺。现在,在工程中应用的桩基类型繁多,选择桩型时要综合分析后确定。一般如按制桩材料可分为木桩、钢筋混凝土桩和钢桩;按制桩工艺可分为灌注桩、预制桩

和搅拌桩,灌注桩应用较多,又可细分为沉管灌注桩、钻孔和冲孔灌注桩、旋挖或挖掘成孔灌注桩、螺旋钻孔或人工挖孔桩等;按桩形可分为柱状桩、板桩、楔形桩、锥形桩,柱状桩包括直身、扩底、多节、竹节和螺纹桩;按桩截面形状可分为圆形、正方形、矩形、三角形、多角形、十字形、H形、箱形等;按桩截面直径尺寸可分为大、中、小直径桩;按桩端形状可分为平底桩和扩底桩;钢管桩有开口、闭口之分,按桩的承载性状,可分为摩擦桩(纯摩擦桩、摩擦端承桩、端承摩擦桩)、端承桩(纯端承桩、端承摩擦桩);按桩承担的竖向荷载方向可分为抗压桩和抗拔桩;按桩承担的水平荷载条件分为主动桩和被动桩;按桩基施工时对地基土影响程度分为排土和非排土桩;按桩的功能又可分为工程基础桩、围护桩(基坑支护桩)、锚桩、隔离桩等。再细分其种类就更多了。真正工程应用比较多的还是灌注桩和预应力管桩。

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,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总比实测值大很多;地基极限承载力很难确定,实际工程中也很难找到;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,既十分重要,又关系人的生命安全和工程质量安全,这就给我们提出了一个严峻的课题: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。

空间变刚度群桩等沉降设计是在1995年沙祥林的CM桩(素混凝土桩搅拌桩)基础启发下提出并相继在江苏、重庆、天津和卡塔尔外交部大楼工程基础中获得成功的。1997年,在同济大学博士生导师侯学渊教授指导下,又进一步深入研究和实践。本书从变刚度群桩设计原理、概念设计、设计方案和设计程序、变刚度群桩沉降计算等全面进行了研究,形成较完整的设计新方法。广义的变刚度群桩形式较多,如地基处理中的CM桩、大小直径桩、长短桩、不同材料组合桩等。对于较软弱地基中的高层建筑深基础、大跨度结构建筑的桩基础、桥梁墩基础、高塔基础、大型储罐基础等采用空间变刚度群桩设计较为合理。

根据最新颁布的中华人民共和国行业标准《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)的有关内容,本书全面介绍了变刚度群桩设计原理与工程应用,内容新颖、创新,可供设计、施工和科研单位的有关技术人员,以及高等院校师生参考。

本书由陈祥福、徐至钧撰写。参加本书部分工作的还有杨瑞清、陈月妮、国振喜、李景、付细泉、张勇、赵尧钟、陈静、易亚东、全科政、肖长生、林婷、陈冲、陈伟、申明亮、邵伟、唐欣等。

在撰写本书中引用了一些科研、教学和工程单位的研究成果和技术总结,在书中的参考文献中已尽量注明出处,但难免有遗漏,在此谨向所有作者表示深深的谢意。

由于作者水平所限,书中不妥之处尚祈读者不吝指正。

著 者

2010年11月9日

北京·中海雅园

目 录

前言

第一章 导论	1
1.1 桩基技术现状	2
1.2 桩基础沉降研究的进展和问题	9
1.3 高层建筑桩箱(筏)基础沉降研究的进展.....	10
1.4 高层建筑桩基础沉降计算中存在的主要问题.....	17
1.5 《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)新增内容	18
1.6 桩基概念设计.....	19
1.7 桩基础的受力特征与成桩工艺.....	22
第二章 桩的受力性状与单桩承载力计算	25
2.1 灌注桩的荷载传递性状.....	25
2.2 桩基竖向承载力计算.....	43
2.3 特殊条件下的桩基竖向承载力验算.....	50
2.4 群桩计算.....	58
2.5 群桩基础直接计算法.....	61
2.6 复合地基承载力的确定.....	68
2.7 桩基水平承载力与位移计算.....	71
第三章 群桩-承台和桩-土共同作用分析	79
3.1 桩基承台效应的试验实测.....	79
3.2 现场大比尺圆形桩基承台实测.....	83
3.3 桩基承台土反力实测.....	97
3.4 高层建筑的桩筏(箱)荷载分担的实测与计算	104
3.5 《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)对承台效应的分析	108
3.6 地基处理中的复合桩基设计与实例测试分析	109
3.7 减沉复合疏桩基础的计算	122
第四章 变刚度群桩调平设计	138
4.1 基本思路	138
4.2 变刚度布桩的概念设计	142
4.3 关于桩筏、桩箱基础传统设计理念与方法的思考.....	143
4.4 碟形沉降和马鞍形反力分布的负面效应	146

4.5	试验验证	147
4.6	变刚度布桩设计的原则	153
第五章	群桩沉降计算与实测分析	155
5.1	基础沉降计算的数值方法	155
5.2	高层建筑深基础沉降研究进展和问题	156
5.3	超高层建筑深基础沉降计算中实用模型和计算参数	157
5.4	土的泊松比和变形模量的确定	162
5.5	按《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)建筑桩基的沉降计算	166
5.6	高层建筑基础沉降计算与实测分析	180
第六章	空间变刚度群桩等沉降设计方法	189
6.1	群桩分析和实测数据中的一般规律和应用依据	189
6.2	变刚度群桩设计进展	196
6.3	空间变刚度群桩等沉降设计新方法及概念设计	199
6.4	空间变刚度群桩沉降计算	207
6.5	小结	212
第七章	变刚度群桩工程应用实例	213
实例 1:	德国法兰克福展览大楼	213
实例 2:	北京京广中心大厦	216
实例 3:	海康供销社综合楼	217
实例 4:	某营业部楼变刚度群桩设计	219
实例 5:	南京工业大学图书馆	222
实例 6:	某办公楼工程实践与实测	232
实例 7:	储油罐基础采用变刚度群桩设计	235
第八章	变刚度群桩设计的技术经济分析	241
实例 1:	上海郊县某 12 层宾馆主裙连体建筑变刚度群桩技术 经济分析	241
实例 2:	上海外高桥某 12 层办公楼技术经济分析	247
实例 3:	某高层综合楼技术经济分析	250
实例 4:	上海杨浦区某大厦主裙房连体结构	257
实例 5:	大型储罐基础桩基设计的技术经济分析	260
主要参考文献		267

第一章 导 论

桩基历史悠久、应用广泛,是人类历史文明和建筑科学技术发展的标志之一。木桩的历史就更长了,据考证,南美采用木桩的历史有 1.2 万年以上,中国采用木桩的历史有 7000 年以上。我国古代的高塔,建在较弱地基上时,往往采用木桩,如山西太原晋祠圣母殿采用的木桩基础,900 年来,沉降量小且均匀;北京天安门前御河桥、南京石砌城墙、西安灞桥等都采用木桩基础;上海龙华塔(软土地基)建于公元 247 年(公元 977 年重建),其基础也是采用木桩基础。直到 19 世纪后期,发明了水泥、钢和混凝土以后,木桩基础还并存应用了百余年。西方工业革命,也推动了桩基科学技术的迅速发展。钢筋混凝土桩和钢桩也仅有 100 余年的历史,但发展很快,几乎遍用于所有现代化大工程,如高层建筑、桥梁、码头、机场、车站、大跨度的工业与民用建筑等基础工程,也几乎都采用桩基础。据不完全统计,我国每年采用桩基的工程约占整个基础工程量的四分之一,每年用桩数量约 10 万根以上,从科研、设计、施工、检测和设备等,已形成一个完整的“打桩”产业。

桩基础工程一般由群桩、承台和桩间土组成,并共同作用、共同承担上部结构的荷载。群桩的工作状态、受力性质与单桩有所区别,而且更复杂、更难弄清楚。理论研究和实测表明:群桩的承载力并不等于单桩承载力之和,群桩中的单桩平均承载力也不等于单桩(一根)承载力。一般把群桩承载力与单桩承载力乘以桩数之比定义为“群桩效应”系数,此系数值的变化仅与土性、桩距、桩长、承台和桩型等有关,可能小于 1、大于 1 或等于 1,但不可能小很多或大很多。因此,可以由单桩承载力预估群桩承载力。在地基软弱地区,由单桩承载力有相当的安全储备,群桩承载力一般都满足工程要求。然而群桩的沉降往往比单桩沉降大很多,有的大几倍、几十倍甚至上百倍,如上海张华浜码头建成 13 年后的群桩基础沉降为单桩沉降的 25 倍;武汉江汉公路桥建成 21 年后某桥墩大群桩基础沉降量为 56.8cm,单桩沉降量仅为 5.3mm,其群桩沉降为单桩沉降的 10 倍。可见,群桩的沉降机理很复杂,对工程安全影响很大。目前,可以说群桩沉降从理论上是很难计算准确的。科学家一般从模型试验和工程实测数据分析入手来研究土的本构关系,采用数值计算使沉降的理论计算值更接近于实测值。因此,“半理论-半经验”沉降计算方法更为工程师们所接受。

对工程设计,在个别情况下也有“一柱一桩”的设计和实例。在群桩的工作状态中,主要是承载、沉降和群桩-承台-土的共同作用。群桩承载力除了理论计算以外,必须进行单桩载荷实验,取得可靠的数据进行设计,而设计的方法往往是按静

力平衡原理、按“等桩长、等桩径、等桩距”进行桩的数量计算。

沉降和“共同作用”既十分重要,又十分复杂,很难弄清楚,但从沉降理论研究和大量的工程实例数据分析,其促进了桩基理论的发展,按沉降控制、按变刚度群桩等沉降方法进行桩基设计是正确的。本书主要介绍空间变刚度群桩等沉降设计方法和工程实例,同时把有关问题和研究进展也作相应介绍,形成一个完整新设计方法体系,便于工程应用。在本章中,重点介绍沉降计算进展、桩的分类和概念设计中的有关问题。

1.1 桩基技术现状

我国改革开放 30 多年来,随着经济持续高速增长,城市化进程加快,高层建筑如雨后春笋,城市建设向高空和地下发展,市内交通多层立交,高速铁路和高速公路发展迅速,码头港口、机场不断扩建,从而使得从东海之滨至西部边疆,从黑龙江至三亚湾,全国城乡到处涌现建设工地,其中桩基工程很多。

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,以供同行业有关领导和技术人员参考。

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) 约 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 60 万~80 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。

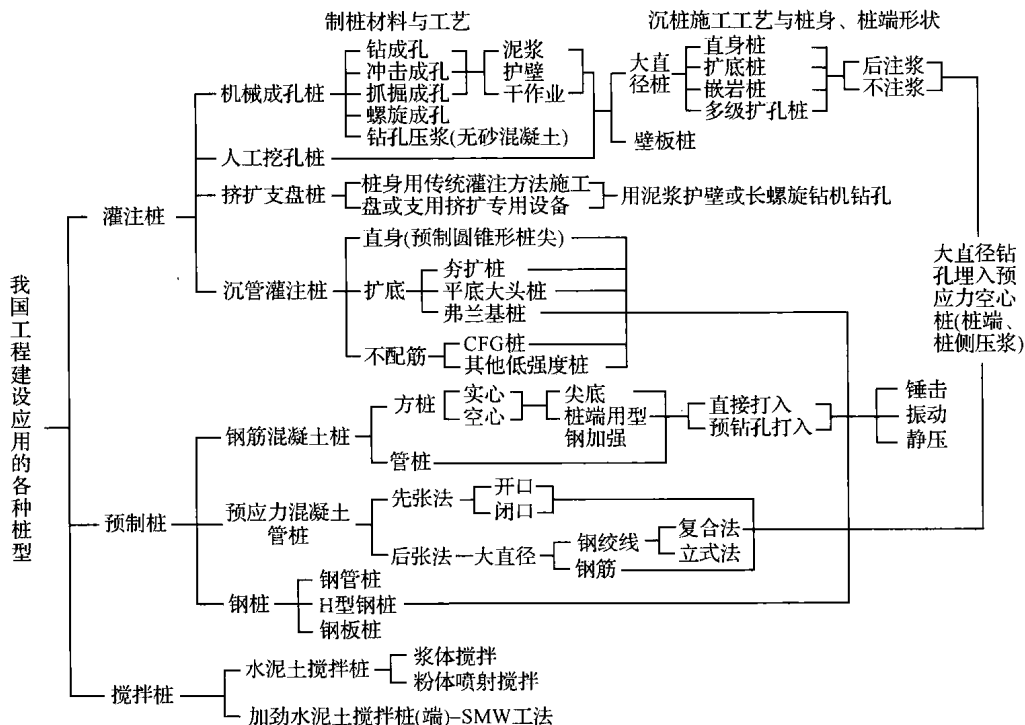


图 1-1 我国正在应用的桩型体系

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。

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 以内的桥梁时可不做承台,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(陶义发明)。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 型钢桩,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 万 m^2 ,地面以上总高 421m,桩深 83m,桩径 904mm,已于 2001 年建成),以及上海南浦、杨浦大桥等(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)。

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,年产量达 2000 多万米,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,并具有良好的抗砂土液化性能,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的 468m 高的亚洲第一电视塔——“东方明珠”塔(它采用 $500\text{mm} \times 500\text{mm} \times 35\text{m}$ 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 $500\text{mm} \times 500\text{mm}$ 。

为了减少打桩引起挤土、振动等危害,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 型钢焊接于桩底。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”,应用多项工程获得成功,2009 年,住宅和城乡建设部发布了《三岔双向挤扩桩设计规程》(JGJ 171—2009)。

3. 桩的应用及存在的问题

桩基础在工程中应用越来越广泛,数量逐年增加。在工程中也发现一些问题,归纳起来有如下几点。

(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，因为一般的海水比较温暖，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，均需充分考虑桩在其设计寿命内的防腐蚀措施。

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。

上述四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 型钢桩及开口钢管桩。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 型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 型钢桩有较多的规格,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 型钢(283kg/m),其容许荷载可达 3600kN。H 型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,往往不计入桩的侧摩阻力。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照规程施工,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 万 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”。

另外一个桩基施工大事故为: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。

除上述两起事故外,近年各地都常发生一些不容忽视的事故,应引起工程技术界的重视和关注。以上四种桩基施工时,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 万 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的办公、居住区噪声 $<50\text{dB}$ 。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 21 世纪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。

1.2 桩基础沉降研究的进展和问题

桩基沉降问题十分复杂,至今还没有完全解决。近几十年来,国内外专家对此十分重视和感兴趣,提出了若干计算方法,但这些方法都与实际情况有一定差距。这里归纳起来简介如下。

(1) 半理论-半经验桩基沉降计算方法(修正的分层总和法)

这个方法的最大特点是从若干实际工程中积累沉降实测数据,进行统计分析,确定理论计算值与实测值之间的经验系数。这个经验系数具有综合性、可靠性和实用性,进而具有地区性。因此,此方法更加符合各地区的实际,又可解决工程设计问题。我国的规范就是采用上述原则确定计算方法。

(2) 考虑应力历史的桩基地基沉降方法

天然地基土在地质历史上已有前期固结压力。1936 年,Casagrande 用室内试验得到的前期固结压力同现场有效压力相比较,把黏性土分为正常固结土、超固结土和次固结土三类,并对这三类地基土采用不同的沉降计算方法。

(3) 应力路径法计算桩基沉降

我国的黄文熙教授提出在一维计算结果基础上乘以大于 1 的系数(一向应力沉降计算)。1957 年,Skempton 和 Bjerrum 主张在一维计算结果基础上,当地基为欠固结土时乘以小于 1 的系数。1967 年,Lambe 提出应力路径法,该法的计算程序为:计算某点的自重应力,并根据弹性理论计算附加压力引起的竖向和水平应力;进行三轴试验,土样先在自重应力下固结,然后加上附加应力。量取在附加应力作用下固结前(即尚未排水)及固结后竖向应变;用量得的两种应变分别计算桩基的初始沉降及固结沉降。

(4) 由变形特征进行桩基沉降计算

在荷载作用下,地基土发生初始沉降、固结沉降和次固结沉降。在计算初始沉降时,一般采用弹性力学方法,计算参数采用不排水的初始切线弹性模量和不排水的泊松比。由于地基可以产生塑性变形区域,建议对初始沉降(弹性)除以大于 1 的系数。固结沉降计算方法较多,但其计算结果差别并不大。次固结沉降由于在主固结沉降时已开始,并有剪切蠕变和压缩蠕变,很难分开。