

中国现代公路桥梁技术丛书

中国钻孔灌注桩新发展

王伯惠 上官兴 著

(基础类)

人民交通出版社

中国现代公路桥梁技术丛书
(基础类)

中国钻孔灌注桩新发展

王伯惠 上官兴 著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书介绍了近年来新发展起来的无承台、变截面、大直径桩基的成孔工艺,提出了考虑沉降、按变形协调原则计算桩基垂直承载力的新方法;系统地介绍了弹性单桩水平力、刚性桩(基础)水平力计算方法;介绍了不同土层内变截面桩水平力作用的计算公式及各种桩基承台的计算方法。

图书在版编目(CIP)数据

中国钻孔灌注桩 新发展/王伯惠,上官兴主编. - 北京
: 人民交通出版社, 1999
ISBN 7-114-03318-4

I. 中… II. ①王… ②上… III. 灌注桩-技术-研究 IV
.TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 09990 号

中国现代公路桥梁技术丛书
(基础类)

Zhong guo Zuan kong Guan

zhu zhuang Xin fa zhan

中国钻孔灌注桩新发展

王伯惠 上官兴 著

版式设计:周 园 责任校对:王秋红 责任印制:孙树田

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京京华印刷制版厂印刷

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ 印张: 20 字数: 475 千

1999 年 8 月 第 1 版

1999 年 8 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 0001 - 4100 册 定价: 45.00 元

ISBN 7-114-03318-4
TU·00057

《中国钻孔灌注桩新发展》序

桩基础是建筑于深地表覆盖层上的承重结构常用的基础形式。世界上采用打入桩基础的历史已经很久远了,打桩设备及设计施工技术经验均较丰富,论著亦多。发达国家采用钻孔灌注桩也已多年,所采用的机具多为较大型可移动的钻孔机,随钻孔下沉套筒,再灌注水下混凝土。非专业化的打桩队伍很难采用这种笨重而价昂的装备。中国还是个发展中的国家,公路交通建设的面很宽,而交通状况还不够好,且许多桥梁与道路的建设常需齐头并进,这些工程由于国家投资少,大多靠地方与民众的力量来完成,所以技术上必须采取土洋结合的方式以便于群众掌握和运用,以期群策群力来从事建设,才能多快好省地把公路交通基础建设搞上去。中国钻孔灌注桩是引自民间使用的大锅锥打井技术而发展起来的,随着建设规模的发展和各方面国力的加强而逐步走向现代化。现在的钻孔设备机械化程度已经提高。钻孔灌注桩的设计、施工、科研已达到可以保证质量的要求。应用面已遍及交通、铁路、水工、建筑等各类土建工程,取得良好效果,积累了很多基础资料,具备了可以从实践的基础加以总结提高的条件。本书的作者结合自己的经验做了大量升华的工作,是值得赞许的。本书的出版对于促进钻孔灌注桩的进一步推广和提高是有好处的,相信读者会共同使其更加完善。

曾 威

1998年3月

前 言

我国桥梁钻孔灌注桩是从 1963 年河南省首先进行的简易锥具钻孔灌注桩开始的。1965 年交通部组织了鉴定,建议全国推广。由于它具有的许多突出优点,数年间风靡全国,几乎成了各种桥位情况下、各种桥型桥梁基础的首选方案。60 年代末,70 年代初,交通部公路科研所又组织了全国性的试验研究,提出了其垂直承载力和水平承载力的计算方法,并纳入了 1975 年交通部颁布的《公路桥涵设计规范》(试行)和 1985 年颁布的《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ024—85)。

1975 年至今又已 20 余年,在此期间,全国转移到以经济建设为中心的轨道上来,国民经济蓬勃发展,道路桥梁建设突飞猛进,钻孔灌注桩技术在理论和工艺上也获得了长足的进展。本书就是全面、系统地来介绍这些新的进展成果,其中:

第一章,叙述我国钻孔灌注桩的发生和发展,包括在工艺、机具、计算理论各方面进步的概貌。

第二章,介绍近年来新发展起来的无承台、变截面、大直径桩基的成孔工艺,包括钻孔工艺和挖孔工艺,并介绍了若干实例。桩的孔径已由以前的 2.0m 以下发展到 2.5~5.0m。我们特别将直径 2.5m 以上者称为大直径桩。

第三章,介绍大直径桩的成桩工艺,重点是大直径空心桩预应力桩壳、桩侧和桩尖填石压浆工艺,并介绍了若干实例。

第四章,提出了考虑沉降、按变形协调原则计算桩基垂直承载力的新方法,这个方法克服了原来规范方法垂直承载力与垂直沉降互不相关、互不协调的原则性缺陷,使其在理论上更趋完善,而且可以利用原来的各种参数。

第五章,系统地介绍了弹性单桩水平力计算的方法,这些方法是建立于文克尔理论的基本微分方程式的通解公式上的,因而适应于所有各种现行的桩基水平力计算方法,包括 m 法、C 法,以及将来可能出现的同类的其他方法。

第六章,系统地介绍了刚性桩(基础)水平力计算方法,直接从弹性桩计算公式中使 $EI \rightarrow \infty$,就得到刚性桩的各种计算公式,使桩基水平力计算方法达到统一和完善。

第七章,介绍不同土层内变截面桩水平力作用的计算公式,该公式是基于上述基本微分方程通解公式的精确解,这个精确解由若干 2×2 阶矩阵的连乘组成,不但易于电算(已编成电算程序),而且也可以手算。

第八章,介绍各种桩基承台的计算方法,包括低桩承台和高桩承台。所有计算公式都是基于第五章微分方程的通解公式之上的。

上述第五章至第八章给出了单桩和群桩承台在文克尔理论上全面、系统而又完善的解答。

第九章,一些钻孔灌注桩新式墩台的计算方法,包括近年来新出现而且各地多有使用的柔性墩台的柔(刚)度,锚碇板式桥台,组合桥台,排架式中墩冰压力核算,桩式轻型桥台等。

各章计算皆附有实例。

应当指出,近年来国内钻孔桩施工工艺和计算理论的进展还不只这些,上述仅是主要的方面,挂一漏万,尚希读者指正。应当特别指出的是,在桩身的临界承载力理论研究方面,湖南大学赵明华教授的两篇论文:“桥梁桩基的屈曲分析及试验”(中国公路学报 1990 年 4 期)和“基桩计入摩阻力的屈曲分析”(岩土工程学报 1996 年 3 期)已作了全面、系统和完善的分析,得出了实用的公式,谨此介绍,为节省篇幅,本书未引载。

本书第一章至第三章由上官兴执笔,王伯惠校,第四章至第九章由王伯惠执笔,上官兴校,全书由王伯惠整理。在编写过程中得到范磊、张书挺、雷岳、蔡长贵、吴同鳌等同志的帮助指导,特此表示感谢。

著 者

· 1997.11 月

目 录

1 中国钻孔灌注桩发展概述	1
1.1 施工工艺和桩墩结构的新发展	1
1.2 计算理论的一些新成就	3
1.3 国产桥梁钻孔机的发展简况	5
2 大直径桩成孔技术	9
2.1 大直径钻孔桩	9
2.1.1 大直径钻孔实心桩工程实例	9
2.1.2 钻孔机的选择	15
2.1.3 成孔护壁液的选择	16
2.1.4 一些新的其他成孔方法	19
2.2 大直径挖孔桩	20
2.2.1 概述	20
2.2.2 旱地挖孔桩施工方法	21
2.2.3 水中挖孔桩施工方法	24
2.2.4 挖孔桩排水和止水方法	28
2.2.5 挖孔桩安全措施	29
2.2.6 用挖孔桩处理钻孔桩事故	29
3 大直径空心桩成桩技术	31
3.1 钻埋空心桩的产生	31
3.2 河南省钻埋空心桩的试验研究	33
3.2.1 试验简况	33
3.2.2 钻埋空心桩工艺	34
3.2.3 空心桩桩长的确定	36
3.2.4 鉴定意见	37
3.3 湖南省大直径空心桩工程实例	37
3.3.1 南县哑吧渡大桥	37
3.3.2 南县南华渡大桥	40
3.3.3 常德石龟山澧水大桥	41
3.4 钻埋空心桩的成桩工艺	44
3.4.1 桩壳的节段预制	45
3.4.2 运输存放	46
3.4.3 成桩工艺	47
3.4.4 桩侧压浆	49
3.4.5 桩底压浆	50

3.4.6 湖南空心桩的特点	51
3.5 用空心桩技术处理桩基事故	54
第一至第三章主要参考文献	55
4 按变形协调原则计算钻孔灌注桩的垂直承载力	56
4.1 现行规范计算垂直承载力方法存在的问题	56
4.2 现行规范计算垂直沉降变形的的方法	57
4.3 桩—土体系的力和变形机理	59
4.4 按变形协调原则计算摩擦桩的垂直承载力	61
4.4.1 桩尖支承力	62
4.4.2 桩周摩阻力	62
4.4.3 桩的垂直承载力	66
4.5 特殊条件下桩承载力公式的校核	66
4.6 算例	67
4.7 两种计算方法的结果和比较	70
4.8 有关参数及其它	71
4.9 支承桩的计算	72
第四章主要参考文献	72
5 弹性单桩水平力作用计算	74
5.1 水平力作用下单桩计算方法的统一	74
5.1.1 文克尔理论的基本微分方程式	74
5.1.2 基本微分方程式的通解	76
5.1.3 弹性桩各种情况下的计算系数	83
5.1.4 通解的利用	87
5.2 水平力作用下单桩计算公式的简化	87
5.2.1 书写符号的简化	87
5.2.2 按桩尖边界条件得出的简化计算公式	89
5.2.3 算例 5.2.1	93
5.3 桩身最大弯矩	96
5.3.1 求算方法	96
5.3.2 算例 5.3.1	97
5.4 地面处抗力不为零的情况($Y_0 \neq 0$)	98
5.4.1 间接法	98
5.4.2 直接法	99
5.4.3 算例 5.4.1	100
6 刚性桩(刚性基础)水平力作用计算	103
6.1 刚性桩(基础)的通解	103
6.2 刚性桩各种情况下的计算系数	106
6.3 刚性桩的简化计算公式	106
6.4 刚性桩各种情况下的简化计算系数	111
6.4.1 $n = 1$ 的情况(m 法)	111

6.4.2 $n=0.5$ 的情况(C 法) 112

6.4.3 $n=0$ 的情况(K_0 法) 113

6.4.4 算例 6.4.1 114

6.5 地面处抗力不为零的情况($Y_0 \neq 0$) 116

6.5.1 m 法计算公式 117

6.5.2 算例 6.5.1 121

7 不同土层内变截面桩的水平力作用计算 124

7.1 分段的基本微分方程式及其普遍解 124

7.2 各段的计算土抗力图式 126

7.3 第一段桩身的矩阵方程式 129

7.4 中间段桩身的矩阵方程式 129

7.5 最下段桩身的矩阵方程式 130

7.6 桩段底面土壤反弯矩的修正 131

7.7 最后的求解方程 132

7.8 计算示例 133

算例 7.8.1 133

算例 7.8.2 133

算例 7.8.3 135

算例 7.8.4 138

8 桩基承台 143

8.1 概述 143

8.2 高桩承台的计算 144

8.2.1 单桩桩顶的力和桩顶位移的关系 144

8.2.2 桩顶的力和承台位移的关系 146

8.2.3 承台的力平衡方程式及求解 147

8.2.4 各位移值的求法 148

8.2.5 基桩左右对称情况下的简化计算 151

8.2.6 竖直桩基的简化计算 151

8.2.7 结语 153

8.2.8 算例 8.2.1 154

8.2.9 算例 8.2.2 155

8.3 低桩承台的计算 157

8.3.1 承台的力平衡方程式及求解 157

8.3.2 基桩左右对称情况下的简化计算 160

8.3.3 竖直桩基的简化计算 160

8.3.4 算例 8.3.1 161

9 钻孔灌注桩新式墩台 164

9.1 柔性桩式墩台的刚(柔)度系数 164

9.1.1 基本概念 164

9.1.2 高桩承台桥墩的刚度系数 167

9.1.3	算例 9.1.1	169
9.1.4	低桩承台桥墩的刚度系数	170
9.1.5	算例 9.1.2	171
9.1.6	桥台的刚度系数	172
9.1.7	桩式墩台的电算处理	173
9.1.8	算例 9.1.3	177
9.2	锚碇板式桥台	178
9.2.1	概述	178
9.2.2	两层锚碇板式桥台计算	180
9.2.3	算例 9.2.1	187
9.2.4	单层锚碇板式桥台计算	195
9.2.5	算例 9.2.2	196
9.3	组合桥台	196
9.3.1	概述	196
9.3.2	前台基础对台身基底的抗力	199
9.3.3	解算一般方程式	204
9.3.4	各阶段内力的计算	209
9.3.5	算例 9.3.1	211
9.4	排架式中墩冰压力核算	220
9.4.1	计算图式和解算的基本方程式	220
9.4.2	算例 9.4.1	222
9.5	桩式轻型桥台	225
9.5.1	概述	225
9.5.2	单孔实墙式轻型桥台桥	227
9.5.3	组合排架桩式轻型桥台	235
9.5.4	算例 9.5.1	241
第五至第九章	主要参考文献	246
附录		248
1	$n=0$ (K_0 法) 计算用表	248
附表 1-1	A, B, C, D 值表	249
附表 1-2-1	A_x	249
附表 1-2-2	B_x	251
附表 1-2-3	A_ϕ	253
附表 1-2-4	B_ϕ	255
附表 1-2-5	A_M	257
附表 1-2-6	B_M	259
附表 1-2-7	A_Q	261
附表 1-2-8	B_Q	263
附表 1-3-1	$\alpha^3 EI \delta_{QQ}$ 值	265
附表 1-3-2	$-\alpha EI \delta_{MM}$ 值 ($= -B\phi_0 + \alpha h_1$)	267

附表 1-3-3	$\alpha^2 EI\delta_{QM}$ 值($= -\alpha^2 EI\delta_{MQ}$)	269
2	$n=0, Y_0=0$ (m 法)计算用表	271
附表 2-1	$A_1、B_1、\cdots、C_4、D_4$ 值	272
附表 2-2-1	A_x	274
附表 2-2-2	B_x	276
附表 2-2-3	A_φ	278
附表 2-2-4	B_φ	280
附表 2-2-5	A_M	282
附表 2-2-6	B_M	284
附表 2-2-7	A_Q	286
附表 2-2-8	B_Q	288
附表 2-3-1	$\alpha^3 EI\delta_{QQ}$ 值	290
附表 2-3-2	$-\alpha EI\delta_{MM}$ ($= -B_{\varphi 0} + \alpha h_1$)	292
附表 2-3-3	$\alpha^2 EI\delta_{QM}$ 值($= -\alpha^2 EI\delta_{MQ}$)	294
3	$n=1, Y_0 \neq 0$ (m 法)计算用表(地面处抗力不为零)	296
附表 3-1	地面处抗力不为零的桩基求虚桩顶的剪力和弯矩 $\nu_{QQ}、\nu_{QM}、\nu_{MQ}、\nu_{MM}$ 值	298
附表 3-2	地面处抗力不为零的桩基求地面处位移 $A'_{xy0}、B'_{xy0} = -A'_{\varphi y0}、B'_{\varphi y0}$ 值($\alpha h \geq 4$)	299
附表 3-3	地面处抗力不为零的桩基求桩顶单位位移 $\alpha^2 EI\delta'_{QQ}, \alpha EI\delta'_{MM}, \alpha^2 EI\delta'_{QM} = -\alpha^2 EI\delta_{MQ}$ 之值($\gamma_0 = h_1, \lambda = 1, \alpha h \geq 4.0$)	299
4	湖南空心桩预算定额编制说明	302
附表 4-1	预制空心桩	304
附表 4-2	安装空心桩及空心墩	304
附表 4-3	抛石压浆混凝土	305
附表 4-4	空心桩、墩预应力张拉	306

1 中国钻孔灌注桩发展概述

1.1 施工工艺和桩墩结构的新发展

中国钻孔灌注桩是1963年在河南省诞生的。这年冬在河南安阳冯宿桥的两座桥台中首先采用了钻孔灌注桩基础。当时还是国家经济初步发展时期,钻孔使用的是水利部门打井用的大锅锥,孔径一般60~70cm,用人力推磨方式钻孔。方法虽然比较原始,但钻孔质量仍可得到保证,使用效果很好。接着在河南省竹竿河和白河两座大桥扩大应用,国内一些其他省、市也相继推广。1965年4月交通部在河南召开钻孔桩技术鉴定会,认为它是一项重大技术革新,是在当时我国客观条件下一种多快好省的桥梁基础施工方法,决定在全国推广。接着,全国各省、市、自治区在公路桥梁上就普遍推广了这种基础形式。这种简易机具的钻孔桩,解决了桥梁水下深基础的施工问题,而且把水下工作改为在水上进行,和原来的沉井基础等形式对比,其技术经济优越性十分突出,因而很快被全国公路科技人员所认识和接受,成为公路桥梁下部基础的首选形式,风靡全国,城建、铁路、水利等系统的桥梁工程也相继采用。

简易机具钻孔灌注桩不但解决了常规条件下桥梁的基础问题,而且也为一些特殊困难条件下的桥梁基础提供了解决的途径。例如辽宁省彰武县柳河,地邻内蒙,河床全为风积极细沙沉积层,行人和大车(东北地区的马车)经行其上都要陷没,无法自拔,甚至危及生命,极难修桥,只能在冬天整个河面冰冻以后能维持三、四个月的冰上运输,春天解冻以后即停止通行,人、车皆须绕道数十公里到别处过河。灌注桩出现以后,使在这样的桥位条件下建桥成为可能。1964年省里研究决定采用22×20m装配式上部构造、2× ϕ 100cm灌注桩式墩下部构造的桥型,冬季施工。这年11月开始,施工单位在冰面上布置6部卷扬机进行冰上冲孔灌注桩施工,墩柱和盖梁都是预制的,从冰面拖运至墩位,当桩基灌注完成后及时安装墩桩和盖梁。这样,一个冬季顺利完成了24个墩台下部工程,次年3月解冻后即进行上部结构安装,9月通车,全长440m的大桥在一个原来认为无法建桥的地方不到一年时间就胜利完成,这是钻孔灌注桩推广初期一个突出的实例。由于人力推钻大锅锥的钻进力量有限,桩径很难超过80cm,而且用人工很多(每盘钻多时需16人三班倒),因而各地在推广过程中皆根据自的条件尽量采用一些力所能及的小型机具。最简单的机具就是冲击钻,只用一台5t卷扬机吊3~4t十字形或一字形钻头就可冲 ϕ 100~ ϕ 120cm的孔,例如前述辽宁柳河桥就是这样做的。当时湖南、四川、河南等省都在机械化钻孔方面做了很多工作,钻孔直径也逐步扩大到150cm。国内钻孔机械方面的发展情况详见1.3节。

1965年交通部在河南举行鉴定会之后,随即以交通部公路科学研究所为首,河南、吉林、湖南、陕西、四川等省参加,组成专题研究组,并动员全国公路桥梁系统大协作,对钻孔桩的施工工艺、设计方法进行全面系统的研究。专题研究组收集了全国105根桩径最大达140cm,桩长最大达47m的试桩资料进行分析整理,除了施工工艺外,最重要的是提出了钻孔灌注桩的设计方法,主要为:

1. 单桩垂直承载力公式,包括计算所需要桩壁极限摩阻力 τ 值,各种地基的基本容许承压力 σ_0 值,以及有关的修正系数和工作条件系数值等。

2. 单桩水平承载力公式,主要提出了一个新的计算方法,即“C”法。原来在灌注桩出现之初,国内在计算桩基水平力时援引了前苏联的 K 法,这个方法假定地基水平抗力系数在地面处为零,以后向下一直增大至弹性第一零点深度处为 K,再向下即保持 K 值不变。1972 年,我国铁路部门又引进了前苏联的 m 法,这个方法假定地基水平力计算基本微分方程式(见第 5 章)中深度 Y 的指数 $n=1$ 。我国此次经分析多根钻孔桩实验结果提出了 C 法,取桩深 $ah \leq 4.0$ (α 为桩土变形系数,见第 5 章)范围内 $n=1/2$,再向下抗力系数即保持为常数。

这项研究工作相当艰巨而又十分细致,具有很高的学术水平,所得成果已纳入 1975 年我国交通部颁布的《公路桥涵设计技术规范》(试行)和 1985 年新颁《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ024-85)中,此后,钻孔灌注桩就有了符合我国具体条件和成桩方法的规范化设计方法,对指导生产和促进灌注桩的发展都起到积极的作用。

这样,简易机具钻孔灌注桩以其工艺简便、承载力大、适应性强的特点迅速在全国基础工程中得到广泛的推广应用。在工程界的努力下,通过不断的研究、试验、使用、改进,30 年来它已逐步发展成一种完善的先进的基础形式,为我国公路、铁路、水利、港口、建筑、环保、煤炭、电力和国防建设的基础工程都作出了重要的贡献,并产生了不可估量的经济效益。

70 年代末期,全国转向经济建设,尤其改革开放以来,全国公路交通建设普遍发展,许多大江大河上的大跨径桥梁都纷纷上马。大桥要求更大直径的桩基。为了满足这一客观形势发展的需要,公路、铁路、建设、机械系统的专业工厂都开始研制新的大直径钻机(详见 1.3 节)。1985 年,河南省郑州黄河大桥,摩擦桩深 70m,成桩直径达 220cm;广东省肇庆西江大桥,嵌岩桩直径达 250cm。这使钻孔桩的直径上了一个新的台阶。为了便于讨论,我们把直径大于 250cm 的桩定义为大直径桩,它一般需要较复杂的成孔工艺或机具,而做成空心桩(见后)时将会有较大的经济效益。

大家知道,钻孔灌注桩的护筒直径总是要比设计桩径大出 30~50cm,以保证钻头进出钻口不会伤及护筒和允许护筒下沉过程可能产生的微量偏斜。例如, $\phi 250\text{cm}$ 的设计桩径,其护筒直径一般为 $\phi 300\text{cm}$ 。护筒有时长达 10~20m,实际上形成的桩是一根上粗下细的变截面桩,但设计上一直都按 $\phi 250\text{cm}$ 等截面桩计算,不考虑这一段加大的直径,其原因之一是还没有适当的计算水平力作用的方法。后来辽宁省开发了通过不同土层的变截面桩计算方法和电算程序。1986 年湖南省在设计施工广东九江大桥独塔 $2 \times 160\text{m}$ 跨径的斜拉桥时,将原设计的 $\phi 250\text{cm}$ 嵌岩桩,上端考虑护筒的加粗,下端根据受力的需要将嵌入在花岗岩段的直径减为 $\phi 200\text{cm}$,形成了 $\phi 300\text{cm}/\phi 250\text{cm}/\phi 200\text{cm}$ 的变截面桩。这样,挖掘了桩身潜力,使桩身截面更符合实际的受力情况,便利了施工,节约了投资,尤其是开通了在大跨径桥梁上采用变截面桩的设计思路。按照这个构思,1992 年在湖南省湘潭二桥(90m 桥跨 20m 桥宽)中一举实现了单排无承台 $\phi 500\text{cm}/\phi 350\text{cm}$ 大直径钻孔桩。以后在实际中,在一些特殊条件或适宜的地质情况下,又实现了大直径挖孔桩基。如江西省南昌新八一大桥,系两座独塔 $2 \times 160\text{m}$ 斜张桥,覆盖层 2m 以下为风化泥质红砂岩,主塔基础采用 4 根 $\phi 400\text{cm}$ 大直径桩深入风化岩 8m,一座采用钻孔,一座采用挖孔,都顺利成功(1996 年)。

为了解决钻孔桩身混凝土质量难以保证和桩尖淤泥不易清除的两大难题,交通部研究院公路所和河南省于 80 年代进行了钻埋空心桩的试验研究。工艺步骤:先施钻成 $\phi 180\text{cm}$ 孔后在孔内埋入 $\phi 150\text{cm}$ 预制预应力混凝土桩壳(壁厚 14cm),再在孔壁与桩壳之间的 15cm 空隙插

埋压浆管,抛填碎石,然后压浆成桩。桩尖亦于沉埋桩壳之前抛填 100cm 厚碎石,最后进行桩尖压浆。这种做法除了能节省大量混凝土外,还能减少灌注水混凝土过程中出现事故的风险,提高桩尖支承力和桩壁摩阻力,从而可缩减桩长,节约投资。这个新工艺在 1992 年 5 月经交通部技术鉴定通过,建议推广。这种钻埋空心桩新工艺后来在湖南省得到积极推广,湖南省公路设计公司从 1994 年起接连设计的 5 座大桥,都采用变截面空心桩基础。其中钻埋空心桩最小 $\phi 200\text{cm}/\phi 150\text{cm}$ (南华渡大桥连续梁孔),最大 $\phi 500\text{cm}/\phi 400\text{cm}$ (石龟山大桥连续刚构孔)。在大庸观音大桥石砌板肋拱和桃源沅水大桥箱肋拱中采用 $\phi 400\text{cm}/\phi 250\text{cm}$ 沉挖空心桩,在桃源沅水大桥跨径 $2 \times 200\text{cm}$ 中承拱的墩基采用 $\phi 700\text{cm}/\phi 400\text{cm}$ 沉挖空心桩,浏阳天马大桥实施 $\phi 800\text{cm}/\phi 600\text{cm}$ 沉挖空心桩为目前最大桩径。

在某些桥位和河床地质条件下,在一些地方不用钻孔而用直接挖孔法做大直径桩也取得了很好的效果,例如湖南张家界市鹭鹭湾大桥挖孔桩径已达 $\phi 5\text{m}$ 。

桩基直径增大以后还有一个很大的效益就是即使对大跨径桥梁也可以取消承台。小直径群桩,必须承台。当桩径增大,只要三、两根桩甚至单根桩就可满足受力需要之后就可取消承

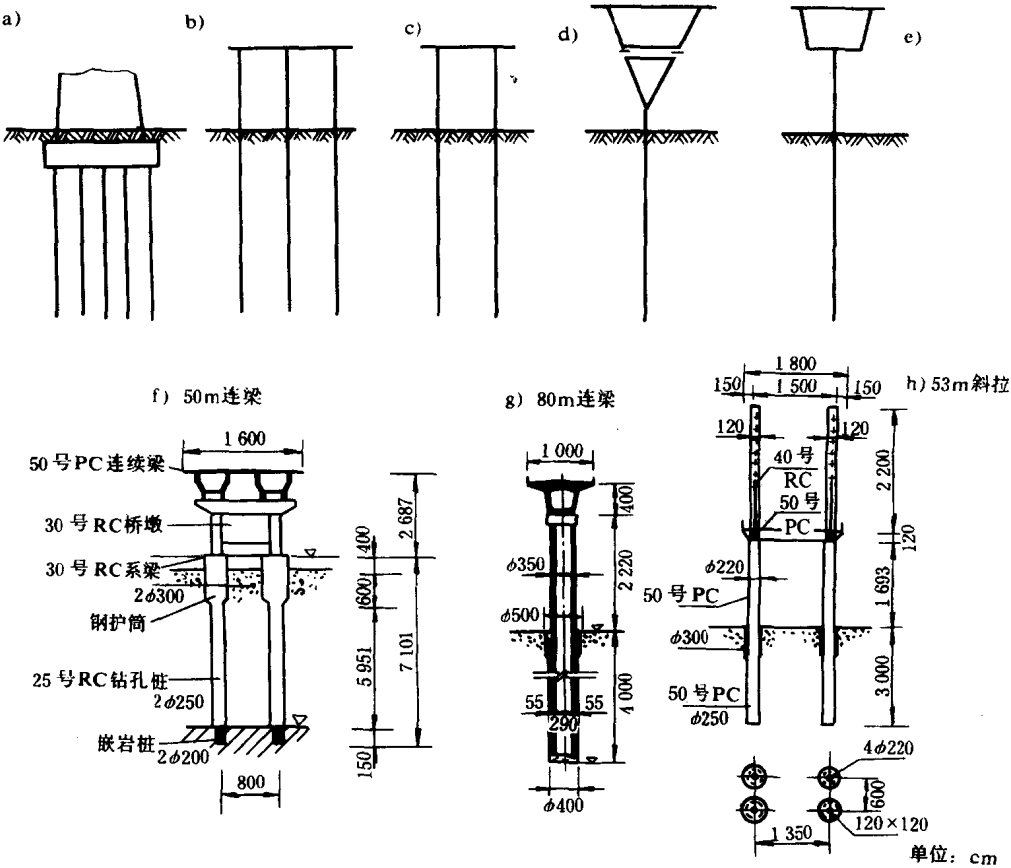


图 1-1-1 灌注桩基墩台型式的发展

a) 常规多直径群桩承台桥墩; b) 常规中、小直径三柱式排架墩; c) 常规中、小直径双柱式排架墩; d) 常规单柱式墩(1)辽宁阜新桥; e) 常规单柱式墩(2)沈阳泰山路立交桥; f) 无承台变截面双柱式墩(广东九江大桥,跨径 50m 顶推,桩径 $\phi 300\text{cm}/\phi 250\text{cm}/\phi 200\text{cm}$); g) 无承台变截面大直径空心桩单柱式墩(有盖梁,湖南石龟山大桥,跨径 80m 连续梁,桩径 $\phi 500\text{cm}/\phi 400\text{cm}$); h) 变截面大直径空心桩四柱式索塔(湖南南华渡大桥,跨径 $2 \times 50\text{m}$ 独塔斜拉桥,桩径 $4\phi 350\text{cm}/\phi 250\text{cm}$)

台。河南和湖南的大直径空心桩就特别强调取消承台的效益,因此特意取名为“无承台、大直径、钻(孔)埋(预制桩壳)空心桩”。这个过程可以用图 1-1-1 示意。图中,a)示以前的小直径群桩承台墩,b)、c)示桩径适当加大后的三柱和二柱式排架墩。对于 30m 以内的跨径 $\phi 150\text{cm}$ 左右的桩即可满足需要,这时已经取消了承台,这是早期经常用的形式。d)为独柱式,桩径 $\phi 180\text{cm}$ (辽宁阜新桥,跨径 30m)。e)示单柱直接支承在箱梁底板上(该处箱梁内设横隔板),墩顶盖梁也取消(沈阳市泰山路立交桥,跨径 24m)。近年来各地广泛修建大跨径桥梁,也已开始采用大直径桩技术来力求取消承台,以减少施工困难和节约大量投资。f)示广东九江大桥跨径 50m 的双柱式墩,g)示湖南石龟山大桥跨径 80m 的单柱式墩,h)示湖南南华渡桥 $2 \times 50\text{m}$ 双索面独塔斜拉桥,索塔由 4 根 $\phi 300\text{cm}/\phi 220\text{cm}$ 桩上接 $\phi 220\text{cm}$ 塔柱组成,取消了承台,是一个创新的设计构思(详见第 3 章 3.3 节)。

这样,我国灌注桩在改革开放以后获得了全面快速的发展,达到了一个崭新的阶段,主要成就为:

在桩径上,由小直径到 400cm 的大直径;

在截面上,由实心到空心;

在材料上,由水下混凝土到填石压浆混凝土;

在墩台结构上,由有承台到无承台;

在桩数上,由多根到三、两根甚至单根;

在成孔方法上,有钻孔,也可挖孔,以及在沉井内挖孔。

真可说是丰富多彩,可以适应各种桥位条件下各种类型桥梁的需要。

以上各方面的成就将在本书第 2 章和第 3 章中详细叙述。

1.2 计算理论的一些新成就

在桩基理论和计算方法方面,自 70 年代对灌注桩的设计方法进行大规模的专题研究并将所得成果纳入桥梁设计规范以来,至今已有 20 年。这期间一些桥梁工作者也做了大量改进和提高的工作,其中主要有:

1. 在灌注桩的垂直支承力方面

1975 年的研究成果是在 105 根试桩的基础上得来的,结果是可靠的,但当时这些试桩绝大部分直径在 0.5~0.8m 之间,超过 1.0m 者不到 10%,长度一般也都在 20m 以内,个别最深者 47m。当前桩身直径已达 2.5m 以上,空心桩还采用桩尖和桩壁压浆的工艺,其承载力显然应有所提高。另外,规范对垂直承载力的计算与沉降变形的计算互不协调,在基本理论上存在很大缺憾。

国内、外许多研究者都认为桩的垂直支承力应按桩身沉陷量进行计算,德国规范 DIN4104 已经给出了按荷载沉降线计算桩的允许荷载的方法。我国在这方面也有一些探索,例如湖南省公路设计公司在石龟山大桥和南华渡大桥设计中,提出了按允许沉降量 $\Delta = 4\text{cm}$ 的桩承载力计算方法,并在施工中得到验证。

但在目前国内尚无大量的、新的试桩资料之前,先利用规范原有数据,考虑沉降,按变形协调原则,我们提出了对灌注桩垂直承载力的新计算方法,这部分内容详见本书第 4 章。

2. 在灌注桩的水平支承力方面

辽宁省自 1978 年开始就对桩基水平力计算问题开展了系统的研究,主要为:

(1)规范规定 m 法、 C 法都可使用。但是,根据国内外对嵌岩桩的试验,岩层的水平抗力系数为常数,称此常数为 K_0 ,计算方法为 K_0 法(以与最早的 K 法相区别),建议应由规范明确规定。

(2)所有的 m 法、 C 法、 K_0 法都是在文克尔(E. Winkler)弹性地基理论的基础上得来的。在 1978 年即已求得了弹性微分方程的普遍解,因此以上各法的计算公式都可完全统一起来,而且更便于今后根据实验分析结果采用任意的指数 n 值而不必拘泥于为了便于解算只采用 1 (m 法)、 $1/2$ (C 法)、 0 (K_0 法)之类的整齐数值,此部分详见本书第 5 章。

(3)在上述基础上系统地推导了刚性桩、变截面桩、高桩承台、低桩承台计算的全部公式,使桩基水平力计算达到了高度的统一化、系统化和完善化,此部分详见本书第 6 章至第 8 章。

(4)这些年来国内桥梁普遍运用灌注桩基础,并发展了一些新的墩台形式,这里提供了运用上述严格的桩基理论计算这些新形式的方法和算例,包括:

- ①桩基承台的刚(柔)度系数;
- ②锚碇板式桥台;
- ③组合桥台;
- ④排架式中墩冰压力核算;
- ⑤桩式轻型桥台;

这部分成果详见本书第 9 章。

1.3 国产桥梁钻孔机的发展简况

我国桥梁钻孔桩基所用的钻孔机,其发展大体可分为三个阶段:

1. 初期

1964 年河南省在公路桥梁工程中成功地采用“人工推磨”实现了 $\phi 60\text{cm} \sim \phi 100\text{cm}$ 钻孔灌注桩的施工,1965 年即迅速在全国公路桥梁建设中开始推广。1966 年起一些单位开始进行机械钻孔的研究,如湖南、四川、河南、公路一局、铁道部大桥局、云南等省进行了直径 $\phi 60\text{cm} \sim 100\text{cm}$ 冲击钻孔灌注桩和直径 $\phi 60\text{cm} \sim \phi 100\text{cm}$ 冲抓锥钻孔灌注桩的施工。1968 年上海、江苏、湖南开始进行旋转钻 $\phi 60\text{cm} \sim \phi 150\text{cm}$ 的钻孔灌注桩试验,辽宁、吉林、黑龙江研制泵吸式反循环钻机进行直径 $\phi 60\text{cm} \sim \phi 150\text{cm}$ 的钻孔灌注桩试验……,这些探索是钻孔机的初级发展阶段。

2. 发展期

1972 年山东、安徽、河南、铁道部大桥局利用 SPJ-300 型和红星-400 型水文钻机完成了 $80 \sim 100\text{m}$ 深孔(直径为 150cm)灌注桩的施工,在桩长上有所突破。1977 年四川重庆长江大桥和泸州长江大桥在钢围堰中冲孔嵌岩直径达 $\phi 250\text{cm}$,在桩径上又取得了突破。1976 年二航局和长办开始进行水上大直径牙轮钻工艺的研究;1978 年建科院、天津建工局、新河钻机厂研制出 GZQ-1 型潜水钻机;1981 年天津探矿机械厂研制出 QJC-40HF 黄河牌汽车钻机;1980 年铁道部大桥局武汉桥机厂研制的 BDM-1、BDM-2 型正反循环钻机,先后在湖北枝城、天津大虹大桥、长东黄河大桥、广西茅岭江大桥等工程中完成了直径 $120 \sim 150\text{cm}$,孔深 $20 \sim 50\text{m}$ 钻孔桩的施工;1987 年张家口探矿机械厂制造出 GJD-15 型钻机,洛阳矿山机械厂制造了 KP-18 型钻机,郑州探矿机械厂生产了 ZJ-15-1 型钻机;1990 年张家口探矿机械厂和西北探矿机械厂制造了 GPF-20 型和 GJD-20 型钻机。这些钻机都能完成直径 200cm 以内孔深 $50 \sim 60\text{m}$ 的钻孔灌注桩施工。

型号众多钻机的生产和运用,标志着我国钻机的进步和成熟,这一时期可称为发展期。

3. 大口径钻孔

1983年铁道部大桥局武汉桥机厂制造的BDM-4型气举反循环钻机在郑州黄河公路大桥完成直径220cm、孔深70m摩擦桩施工,接着在广东肇庆大桥完成 $\phi 250\text{cm}$ 的嵌岩桩施工,使桩径终于突破了2m大关。BDM-4型钻机是国产钻机向大口径发展中的重要里程碑。1986年广东省九江大桥 $2 \times 160\text{m}$ 独塔斜拉桥工程中又使用了BDM-4型反循环钻机以楔齿和球齿滚刀牙轮钻头及p.H.p.不分散低固相油田泥浆完成 $\phi 300/\phi 250/\phi 200\text{cm}$ 嵌岩桩施工,桩长达72m。施工表明BDM-4在强度140MPa坚硬岩石中钻进性能超过了日本利根TPC-20,而价格仅为其四分之一。在广东九江大桥50m桥跨中首次提出变截面无承台大直径桩新概念。并且还用上海探矿机械厂生产的GPS-15型钻机在淤泥粉沙地基完成 $\phi 250\text{cm}$ 、长60m的摩擦桩(嵌岩改用冲击钻)施工,开创了小钻机钻大孔的先例。1992年湘潭二桥又用BDM-4型钻机采用分级扩孔的方法,完成了国内最大直径 $\phi 500/\phi 350\text{cm}$ 大直径桩施工,在90m大跨径桥梁中首例实现了无承台单排桩新结构。

90年代起,在长江中下游相继修建重庆、武汉、黄石、铜陵等数座特大跨径桥梁,设计桩径均突破2.5m,达到2.8~4.0m,这标志着我国桥梁桩基础工程水平发展到一个新阶段。此时郑州勘察机械厂、洛阳矿山机器厂、武汉桥机厂和武汉内河港机厂等厂家,先后研制和开发了QZ-350型、QZY-300型钻机、KP-300型钻机、KOP-400型以及KPY-600型钻机,都圆满地完成了各工程的大口径钻孔任务。这些国产大口径钻机的性能均可与进口德国和日本的钻机相比,但价格仅为进口的 $1/4 \sim 1/6$ 。通过长江上数座大桥的修建,我国已填补了 $\phi 2.5\text{m}$ 以上大口径钻机的空白,为桥梁基础工程向大直径无承台现代化的方向发展奠定了设备基础。

为了便于参考和采用,表1-3-1列出了铁道部大桥局桥机厂生产的BDM系列钻机,可钻直径0.8~2.5m的钻孔,表1-3-2则列出了这种钻机的一些使用情况。由表可见,额定钻孔直径2.5m的BDM-4钻机,已用于湘潭二桥钻 $\phi 3.5 \times 20\text{m}$ 的孔。在更大直径钻孔的旋转钻机方面,有洛阳矿山机械厂的QZY3000型,郑州勘察机械厂的KP3500、大桥局桥机厂的KPG-3000型,其性能指标可参见表1-3-3。QZY3000型全液压钻机在黄石长江公路大桥 $\phi 3\text{m}$ 钻孔桩施工中充分发挥了扭矩大、钻压大的优点。

1996年12月,通过部级鉴定的KPG3000钻机是目前国内同类型钻机中性能、规格最好的一种。它采用了世界名牌液压产品,其工作寿命是国产液压产品的4倍,且性能稳定,深受用户欢迎。1996年该机在香港新界新机场工地使用,完成了岩石强度200MPa、桩径 $\phi 2.5\text{m}$ 、深度100m的嵌岩桩32根,钻孔速度达0.8~1.6m/台班。1997年在福州三县州闽江大桥,创造了5天钻完49m长桩的新记录。

国内目前这些大扭矩转机与发达国家产品相比,仍有一定的差距。将转盘式钻机改为动力头式钻机已经势在必行。目前已设计的KD3000型动力头式钻机性能如表1-3-4。由于将转盘和水龙头合二为一,质量减轻10t,全部采用被动钻杆,简化了钻杆加工工艺,去掉卷扬机,提升改为液压,方便了施工,降低了成本,每台钻机价300万元左右,为德国PBA21/3000型钻机价格的 $1/5$ 。可以看到,随国产大扭矩钻机的不断改进,为大直径钻孔桩基提供了雄厚的设备基础,将促进大直径桩的推广和发展。

顺便提到,1975年我国还曾设计制造过BZ-1型钻机,用以完成直径为6.5m,深度115m污水井筒的施工任务。利用这种钻机进行直径5m、深度40~50m桥梁钻孔桩钻孔任务是在充分把握的,直径6~7m也是可行的。当代机械技术的进步对于 $\phi 7\text{m}$ 以内的大口径钻孔施工都