

Bearing Performance and
Design Method of Step Tapered Pile

倒阶梯形变截面桩承载性状 与设计方法研究

耿大新 方 焘 著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

铁道部重点科技基金项目(2009G010-D)资助

江西省高等学校科技落地计划项目(KJLD14036)资助

地区科学基金项目(51568021)资助

倒阶梯形变截面桩承载 性状与设计方法研究

耿大新 方 焘 著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

倒阶梯形变截面桩承载性状与设计方法研究/耿大新,方焘著.
—长沙:中南大学出版社,2016.12

ISBN 978-7-5487-2650-0

I. 倒... II. ①耿... ②方... III. 群桩-桩基础-桩承载力-研究
IV. TU473.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第296219号

倒阶梯形变截面桩承载性状与设计方法研究
DAOJITIXING BIANJIEMIANZHUANG CHENGZAI XINGZHUANG YU
SHEJI FANGFA YANJIU

耿大新 方 焘 著

☐责任编辑 刘颖维

☐责任印制 易红卫

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 湖南金太阳印刷有限公司

☐开 本 720×1000 1/16 ☐印张 11.75 ☐字数 231千字

☐版 次 2016年12月第1版 ☐印次 2016年12月第1次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-2650-0

☐定 价 68.00元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内容简介

Introduction

本书主要为铁道部科技研究开发计划课题“铁路工程设计施工关键技术研究——软土地区变截面桩承载性状及设计方法研究(2009G010 - D)”的研究成果。本书在自行研制模型试验装置的基础上,开展了竖向荷载作用下不同变径比和横向荷载作用下不同变截面位置的变截面桩模型试验研究;借助 FLAC^{3D} 数值模拟平台对竖向荷载作用下不同变径比和横向荷载作用下不同变截面位置的变截面桩的位移场进行了研究,同时进一步补充、验证了模型试验的结论的正确性;推导了竖向荷载作用下和横向荷载作用下的变截面桩的理论计算方法,并选择 Microsoft VC++2008 为软件开发工具,开发了变截面桩的辅助设计软件;结合现行规范及课题组研究成果,对变截面群桩基础基桩内力和位移计算公式进行了推导,提出了变截面桩基础的设计方法。

本书可作为土木工程技术人员参考用书。

前言

Foreword

自 20 世纪 80 年代以来,随着城市超高层建筑以及交通干线上大跨度桥梁等建(构)筑物的修建,为满足上述结构的大跨、高层、重荷载及不同复杂地质条件的要求,桩基础得到了广泛的应用。桩基础的承载能力高,稳定性好,沉降及不均匀沉降小,抗地震、液化、滑坡等地质灾害能力强,抗爆性能好,灵活性强,对结构体系、范围及荷载变化具有较强的适应能力,在深水中施工,可避免或减少水下工程,简化施工设备和技术要求,施工进度快。然而桩基础造价颇高,高速铁路桥梁的自重及荷载远超过普通公路桥梁的自重及荷载,为提高桥梁基础的承载力,相应地要求增大桩基的桩径与桩长,基础工程的费用将有可能超过总投资的 30% 以上。因此,在保证安全的基础上,桩基础的优化选型对节约工程投资至关重要。

1985 年,在上官兴教授的倡议下,结合桩基施工中的钢护筒,将护筒有目的地做大,并参与承载,率先在广东九江大桥通航孔边墩中施工。基桩自然形成倒阶梯形,在竖向承载过程中有一定的挤土效应,且可充分发挥浅层土体的承载力;同时可充分利用桩基在水平荷载作用下弯矩、剪力上大下小的特性,既不减少水平承载能力,又节约了材料,降低了工程造价。然而,倒阶梯形变截面桩与等截面桩相差较大,传统的桩基理论体系已经不能恰当地分析其工作机理和受力性状。在竖向荷载的作用下,上部变截面处土体首先被压塑,并向侧向挤出,周围土体的孔隙率降低,以适应桩身截面积的变化;随着荷载进一步增加,桩底以下土体产生体积压缩和向下辐射剪切。而在水平荷载作用下,由于桩身横向刚度的不同,桩体内力、位移与传统等截面桩更是相去甚远。

本书为铁道部重点科技基金(2009G010-D)项目“软土地区变截面桩承载性状及设计方法研究”的研究成果,主要论述了倒

阶梯形变截面桩的承载性状与设计方法。全书共分为9章,通过模型试验、数值模拟详细研究了竖向荷载及水平荷载作用下倒阶梯形变截面桩的承载特性;通过理论分析,结合现行规范给出了单桩和群桩的设计方法,编制了设计程序;结合常用施工设备,给出了基桩施工工艺。

本书主要由耿大新、方焘、吴泽军、罗照等人完成。项目研究得到了铁道部相关部门的大力支持,并得到教研室同仁及重庆大学刘新荣教授、浙江大学徐长节教授等专家的指导,在论著撰写过程中,参考了国内外有关文献,在此一并表示真诚的谢意。本书出版同时得到了江西省高等学校科技落地计划项目(KJLD14036)、地区科学基金项目(51568021)的资助,深表感谢!

由于作者水平有限,书中难免有些许错误和不足,恳请专家和读者批评指正,联系邮箱:gendaxin@ecjtu.jx.cn。

耿大新
2016年11月

目 录

1 绪 论	(1)
1.1 倒阶梯形变截面桩起源	(1)
1.2 倒阶梯形变截面桩的应用与发展	(2)
1.2.1 湖南湘潭湘江二桥	(2)
1.2.2 湖南益阳资江二桥	(4)
1.2.3 安徽铜陵长江公路大桥	(6)
1.2.4 苏通长江大桥	(6)
1.2.5 京沪高铁南京大胜关长江大桥	(9)
1.2.6 国内部分倒阶梯形变截面桩基简况	(11)
1.3 倒阶梯形变截面桩的特点及存在的问题	(12)
2 倒阶梯形变截面桩竖向承载特性模型试验研究	(14)
2.1 模型试验设计	(14)
2.1.1 模型桩的选取	(14)
2.1.2 模型箱及加载装置	(15)
2.1.3 数据采集设备	(19)
2.1.4 模型加载方案	(22)
2.1.5 模型介质材料的选取与填筑参数	(23)
2.2 桩的埋置方法对试验结果的影响分析	(23)
2.3 模型试验	(24)
2.3.1 电阻应变片的粘贴	(24)
2.3.2 模型桩的布置及埋设	(27)
2.3.3 介质材料的填筑与特性测试	(28)
2.3.4 加载设备与测试系统调试	(32)
2.4 模型试验结果整理与分析	(33)
2.4.1 荷载-沉降的关系	(33)
2.4.2 桩身变形及其轴力变化规律分析	(38)

2 / 倒阶梯形变截面桩承载性状与设计方法研究

2.4.3	桩身侧摩阻力数据整理及其分布规律分析	(41)
2.4.4	桩身变截面处及桩端处土体阻力数据整理及其分析	(45)
2.5	小结	(47)
3	倒阶梯形变截面单桩横向承载特性模型试验研究	(48)
3.1	模型试验设计	(48)
3.1.1	试验目的	(48)
3.1.2	模型桩设计	(48)
3.1.3	模型填筑	(49)
3.1.4	模型加载	(52)
3.2	试验数据结果分析	(55)
3.3	小结	(66)
4	倒阶梯形变截面单桩承载特性数值模拟研究	(67)
4.1	数值模拟三维网格模型和相关参数的确定	(67)
4.1.1	三维网格模型	(67)
4.1.2	计算参数的选取	(69)
4.2	竖向荷载作用下应力场与位移场的特征	(74)
4.2.1	位移场	(74)
4.2.2	应力场	(76)
4.3	横向荷载作用下变截面桩应力场与应变场分析	(82)
4.3.1	位移场	(82)
4.3.2	应力场	(85)
4.3.3	桩身水平位移曲线	(87)
4.3.4	桩顶荷载-位移曲线	(90)
4.4	小结	(91)
5	倒阶梯形变截面单桩设计方法	(92)
5.1	倒阶梯形变截面单桩竖向承载性状分析方法	(92)
5.1.1	桩体受力状态划分	(92)
5.1.2	计算公式推导	(93)
5.1.3	变径参数对承载性能的影响	(98)
5.2	倒阶梯形变截面单桩横向承载性状分析方法	(101)
5.2.1	平衡微分方程	(101)

5.2.2	力法正则方程	(103)
5.2.3	δ_{11} 、 δ_{12} 、 δ_{21} 和 δ_{22} 的求解	(106)
5.2.4	Δ_{1Q} 、 Δ_{2Q} 、 Δ_{1M} 和 Δ_{2M} 的求解	(111)
5.2.5	X_1 、 X_2 、 X'_1 和 X'_2 的求解	(111)
5.2.6	倒阶梯形变截面单桩内力计算	(111)
5.3	小结	(114)
6	倒阶梯形变截面群桩承载性状及设计方法	(115)
6.1	墩台基础变位及刚度限值的规定	(115)
6.1.1	《铁路桥涵设计基本规范》(TB 10002.1—2005)规定	(115)
6.1.2	《京沪高速铁路设计暂行规定》规定	(116)
6.1.3	《高速铁路设计规范》(TB 10621—2014)规定	(116)
6.2	作用分类及组合	(117)
6.3	倒阶梯形变截面群桩基础沉降变形特性及验算	(118)
6.4	倒阶梯形变截面群桩基础基桩内力与位移计算	(120)
6.4.1	计算假设	(120)
6.4.2	计算步骤	(121)
6.4.3	桩侧土体比例系数 m	(121)
6.4.4	基桩的计算宽度	(122)
6.4.5	基桩的变形系数	(123)
6.4.6	多排桩内力分布计算	(125)
6.5	倒阶梯形变截面桩基础设计	(131)
6.6	小结	(133)
7	倒阶梯形变截面单桩变形和承载特性分析方法程序设计	(134)
7.1	变截面单桩承载力与变形性状分析方法程序设计	(134)
7.1.1	设计原则	(134)
7.1.2	软件开发平台	(135)
7.1.3	界面设计	(135)
7.1.4	功能设计和菜单分析及其实现	(138)
7.1.5	主要功能模块分析	(138)
7.2	竖向承载与变形特性工程实例分析与验证	(139)
7.3	变截面单桩横向力学行为程序计算分析与验证	(140)
7.4	小结	(146)

8	倒阶梯形变截面桩施工技术	(147)
8.1	钢护筒参与作用的变截面钻孔灌注桩	(147)
8.1.1	钢护筒的设计与埋设工艺	(147)
8.1.2	钻孔设备的选择	(149)
8.1.3	护壁泥浆的选择	(150)
8.1.4	其他成孔方法	(153)
8.2	沉井-钻孔(冲孔/挖孔)组合桩	(154)
8.3	钻埋预应力空心桩(墩)	(156)
8.4	小结	(157)
9	结论与展望	(158)
9.1	主要结论	(158)
9.2	后续研究工作的展望	(159)
附 录		(161)
参考文献		(168)
后 记		(174)

1 绪 论

1.1 倒阶梯形变截面桩起源

广东九江大桥是 325 国道上的一座桥梁,位于广东省佛山市南海区九江镇与鹤山市杰洲之间,跨越珠江水系西江主干流,是广湛公路上一座特大型公路桥梁。大桥采用设计、施工联合招标模式,粤湘九江大桥承包公司的斜拉桥方案为最后实施方案,其桥型总体布置为:(从北至南) $13 \times 16 \text{ m}$ (预应力空心板) + $40 \text{ m} + 6 \times 50 \text{ m}$ (顶推法施工的连续梁) + $2 \times 160 \text{ m}$ (预应力混凝土斜拉桥) + $13 \times 50 \text{ m} + 40 \text{ m}$ (顶推法施工的连续梁) + $7 \times 16 \text{ m}$ (预应力空心板),全长 1682.41 m。

大桥通航主孔在以 3000 t 船舶碰撞力为控制的情况下,主墩设计为 $24\phi 2.5 \text{ m}$ 钻孔灌注桩,桩长 55 ~ 72 m。众所周知,在深水中进行灌注桩施工,首先要在施工平台上施打钢护筒。钢护筒以震动锤震入覆盖层时,一般控制钢护筒倾斜度为 $H/100$ (H 为钢护筒的长度, cm)。钻孔时由于前后左右都可能发生偏离,这样钻孔的钢护筒实际直径 $D = d_0 + 2H/100$ (d_0 为钻头直径, cm)。该墩设计钢护筒长 25 m,护筒直径 300 cm,入土 14 m,考虑局部冲刷后仍有 8 m 的细砂覆盖层。若考虑钢护筒的共同作用,则 $18\phi 3.0 \text{ m}/2.5 \text{ m}$ 桩与 $24\phi 2.5 \text{ m}$ 桩抗水平力的效果相等;由于桩尖嵌岩段没有弯矩只有垂直支承力,在充分利用桩尖的花岗岩高强度 (140 MPa) 的情况下,又将 $\phi 2.5 \text{ m}$ 嵌岩桩径减小到 $\phi 2.0 \text{ m}$ 。这样就形成了一根直径为 $\phi 3.0 \text{ m}/\phi 2.5 \text{ m}/\phi 2.0 \text{ m}$ 的倒阶梯形变截面、大直径钻孔灌注桩,如图 1-1 所示。这种新构思为主墩基础工程减少了 6 根长桩,节省费用高达 120 万元 (1985 年的价格)。需要指出的是,2007 年 6 月 15 日九江大桥被一艘运输船撞击桥墩,造成桥面 200 多米坍塌的事故,坍塌段为非通航孔段,对采用变截面桩基的主墩基础影响甚微。

北岸 $6 \times 50 \text{ m} + 40 \text{ m} = 340 \text{ m}$ 顶推连续梁施工期间,由于工期紧迫,1997 年初,在上官兴总工的倡议下,广东省公路勘察规划设计院郭范围高工将有承台的

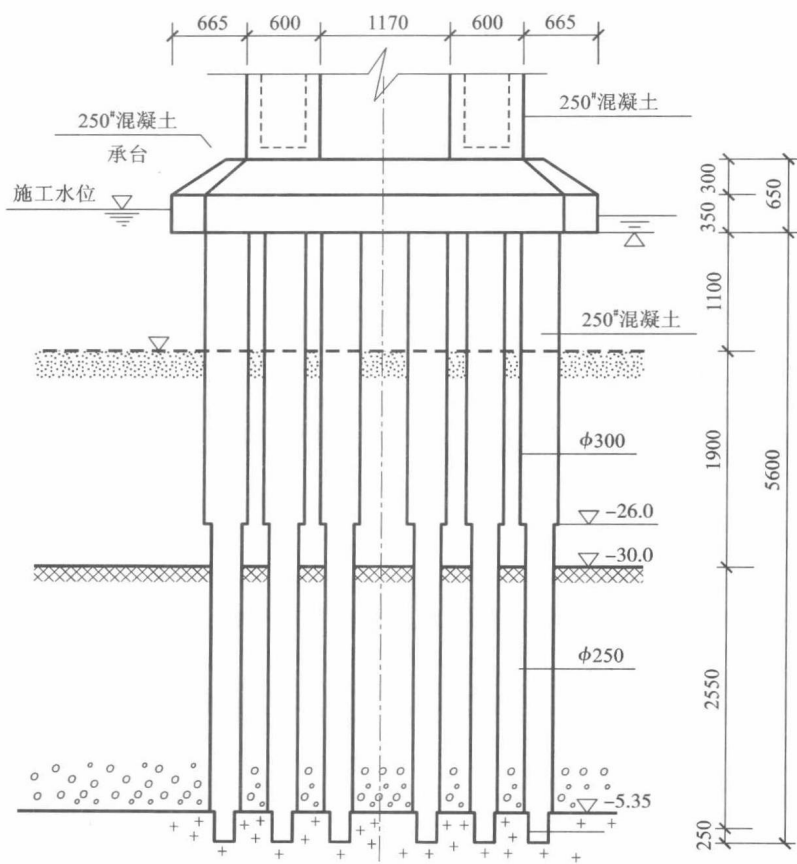


图 1-1 广东九江大桥主墩基础示意图

(单位: 除标高为 m 外, 其余为 cm)

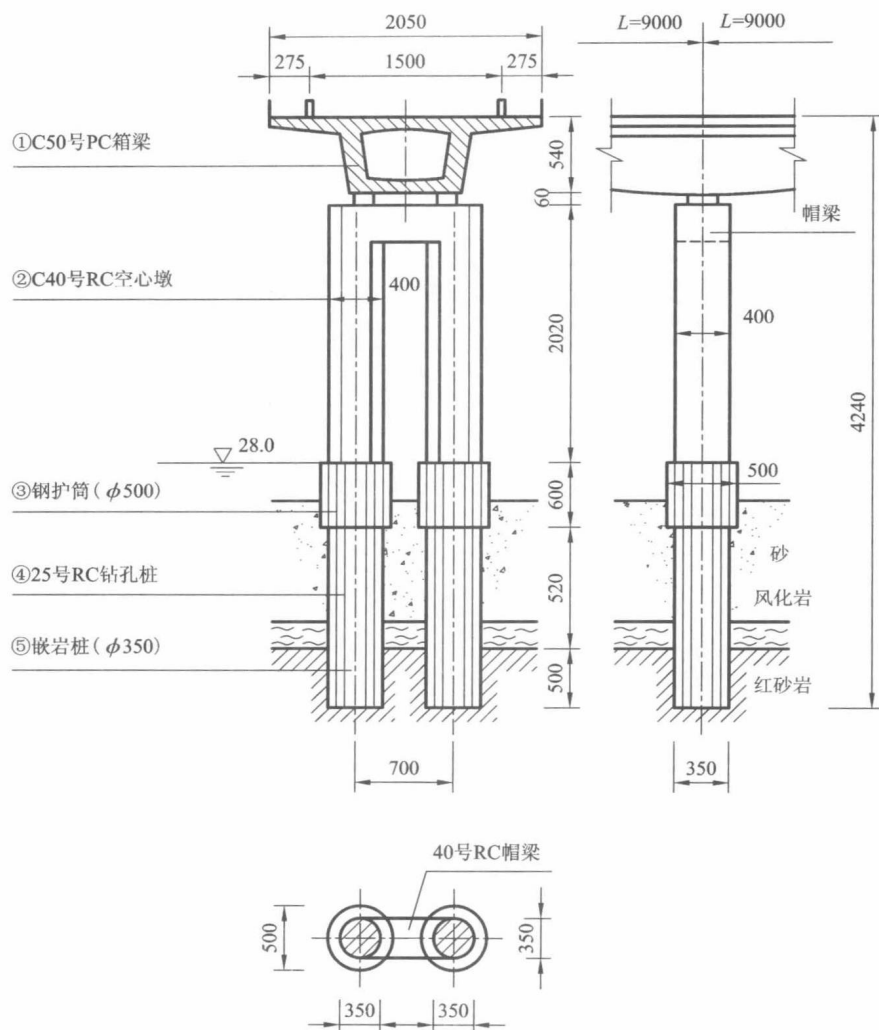
6 根 $\phi 1.5$ m 钻孔桩修改为两根 $\phi 3.0$ m/ $\phi 2.5$ m/ $\phi 2.0$ m 的变截面、无承台、单排双桩双柱墩。由于取消了承台, 给施工带来了极大的方便, 湖南路桥一公司仅用三个月就完成了 12 根变截面桩任务, 充分显示了无承台的优越性, 这是国内首例 50 m 桥墩单排无承台桩基。

1.2 倒阶梯形变截面桩的应用与发展

1.2.1 湖南湘潭湘江二桥

湖南湘潭湘江二桥是 107 国道上的一座特大桥梁, 位于湖南省湘潭市向家塘, 为一预应力混凝土连续梁桥。全长 1830.5 m, 主桥为 50 m + 5 × 90 m + 50 m +

7×42.84 m 的连续梁；南北引桥分别为 7×16 m+2×12 m 和 2×15 m+11.42 m+49×16 m 的简支空心板。主桥墩基原设计为 6φ1.8 m 的群桩基础，采用钢围堰施工，后改为 2φ5.0 m/φ3.5 m 无承台变截面大直径桩基；边跨基础改为 2φ4.0 m/φ2.8 m 无承台变截面桩基，如图 1-2 所示。桩身上部有意将钢护筒加大至 5.0(4.0)m，以便在其内直接浇筑墩身，采用牙轮式旋转机施工。



(a) 主跨 5×90 m 连续梁桩墩 2φ5.0 m/φ3.5 m

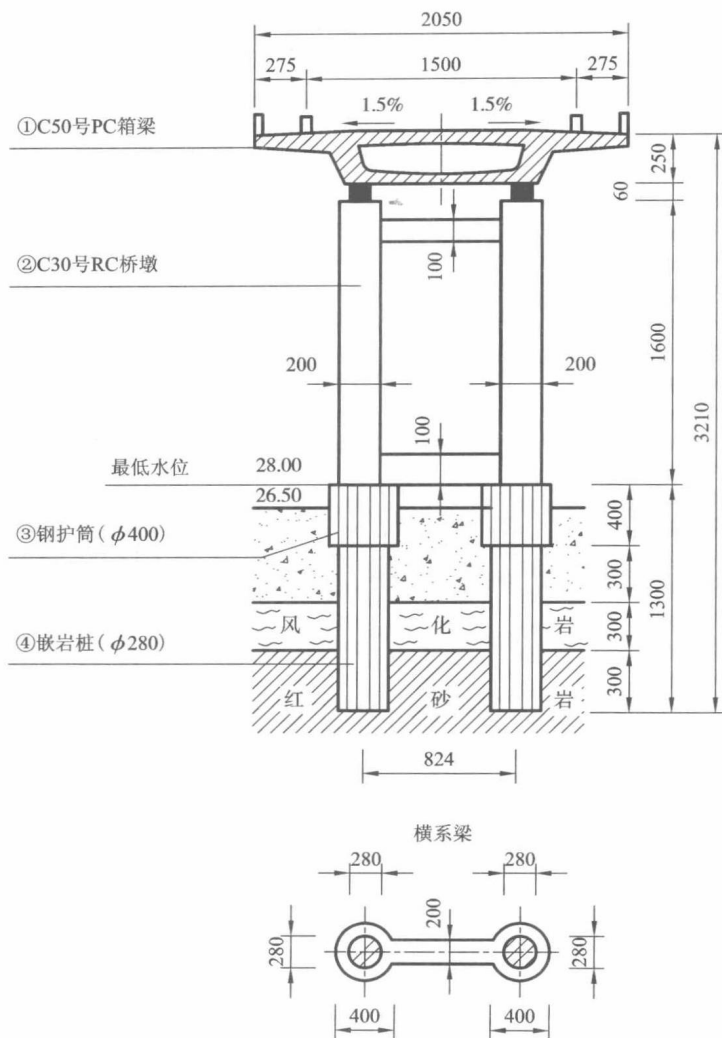
(b) 边跨 7×42.6 m 连续梁桩墩 $2\phi 4.0$ m/ $\phi 2.8$ m

图 1-2 湖南湘潭湘江二桥桩基础

(单位: cm)

1.2.2 湖南益阳资江二桥

资江二桥 1992 年 10 月 5 日奠基, 1996 年 2 月 8 日正式通车。主桥为 $51 \text{ m} + 6 \times 80 \text{ m} + 51 \text{ m} = 582 \text{ m}$ 的变截面连续梁, 桥宽 24 m, 主梁为两个单箱截面。原初步设计桥墩基础为钢围堰内 $8\phi 1.5 \text{ m}$ 钻孔桩加承台, 在施工图设计中修改为

2 ϕ 4.0 m/ ϕ 3.0 m无承台大直径桩,如图1-3所示。桩孔采用全截面一次钻进工艺,通过砾卵石层在风化砂岩中嵌固,桩长30~61 m。由于搭设了长达672 m的长跨600 kN 缆索吊机作为钻机移动和施工中起重的工具,使基础施工十分顺利,仅用一年便完成了14根 ϕ 4.0 m/ ϕ 3.0 m变截面大直径钻孔桩。

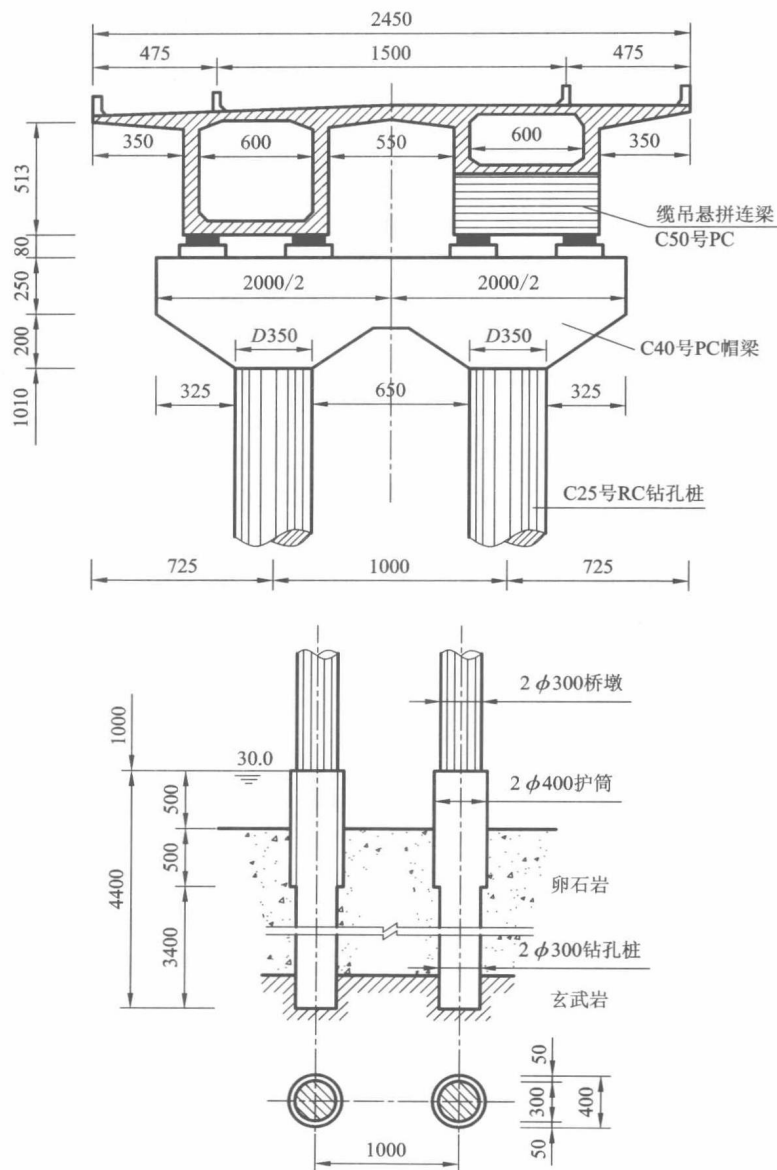


图1-3 湖南益阳资江二桥桩基础
(单位: cm)

1.2.3 安徽铜陵长江公路大桥

铜陵长江公路大桥于1991年12月开工建设,1995年12月26日建成。该桥全长2592 m,其中主桥长1152 m,引桥长1440 m,为主跨432 m的双塔双索面预应力混凝土斜拉桥,桥塔为H形塔。铜陵长江大桥位于安徽省铜陵市羊山矶下游600 m处,是国家“八五”计划的重点工程,是当时世界上同类型中第3位大跨径桥梁。

大桥7号桥墩采用两根大直径($\phi 4.6$ m/ $\phi 4.0$ m/ $\phi 2.8$ m)钻孔桩。基桩施工采用的钢护筒直径4.6 m,长10 m,形成第一级截面;冲击土层段直径4.0 m,长18 m,形成第二级截面;嵌岩段直径2.8 m,长17 m,形成第三级截面,是当时最大孔径的变截面桩基。墩位处覆盖层高程为+2.42 m,上部为深灰色粉细砂,偶含淤泥,厚2.0~2.7 m;下部为砂卵石层,厚2.45~2.63 m,卵石粒径4~10 cm,约占总质量的50%。骨架颗粒间为中粗砂所填充,其成分以坚硬状石英砂及灰岩为主。岩面高程为-2.16 m,两柱孔间岩面相对高差0.10 m,岩体上部 Ed_2 层,厚20~25 m,为黏土质粉砂岩、粉细砂岩、砂砾岩、中粗粒砂砾互层。上部 Ed_1 层,厚40 m,为巨厚层状黏土质粉砂岩、粉细砂岩、偶夹砂砾岩及中粗粒砂岩、粉砂岩及黏土质粉砂岩中普遍含有钙质疙瘩体及少量砾石。墩位处基岩裂隙线密度极低。裂隙倾角均大于 70° ,呈短小闭合状,无充填,多发育在黏土质粉砂岩内。墩基岩体较完整,黏土质粉砂岩、粉细砂岩。

1.2.4 苏通长江大桥

苏通长江公路大桥位于江苏省东南部,连接南通和苏州两市,西距江阴长江公路大桥82 km,东距长江入海口108 km,全长34.2 km,该工程于2003年6月27日开工,2008年6月30日建成通车。苏通大桥北岸连盐通高速公路、宁通高速公路、通启高速公路,南岸连苏嘉杭高速公路、沿江高速公路。苏通大桥由北接线、跨江大桥、南接线组成,双向高速6车道,其8146 m的跨江大桥由北引桥、主桥、辅桥、南引桥组成。主桥采用特大跨径双塔斜拉桥方案,为 $100\text{ m}+100\text{ m}+300\text{ m}+1088\text{ m}+300\text{ m}+100\text{ m}+100\text{ m}=2088\text{ m}$ 的七跨双塔双索面钢箱梁斜拉桥。为了减小承台自重和改善承台受力,同时尽可能地改善群桩基础的受力,经过方案优化后,施工图设计方案采用了哑铃形不等厚度的承台群桩基础(图1-4、图1-5)。采用131根 $D2.85$ m/ $D2.5$ m钻孔灌注桩基础(钢护筒内径2.8 m),呈梅花形布置,基桩变截面处配筋如图1-6所示。每个塔柱下承台平面尺寸为 $50.55\text{ m}\times 48.1\text{ m}$,其厚度由边缘的5 m变化到最厚处的13.324 m,其

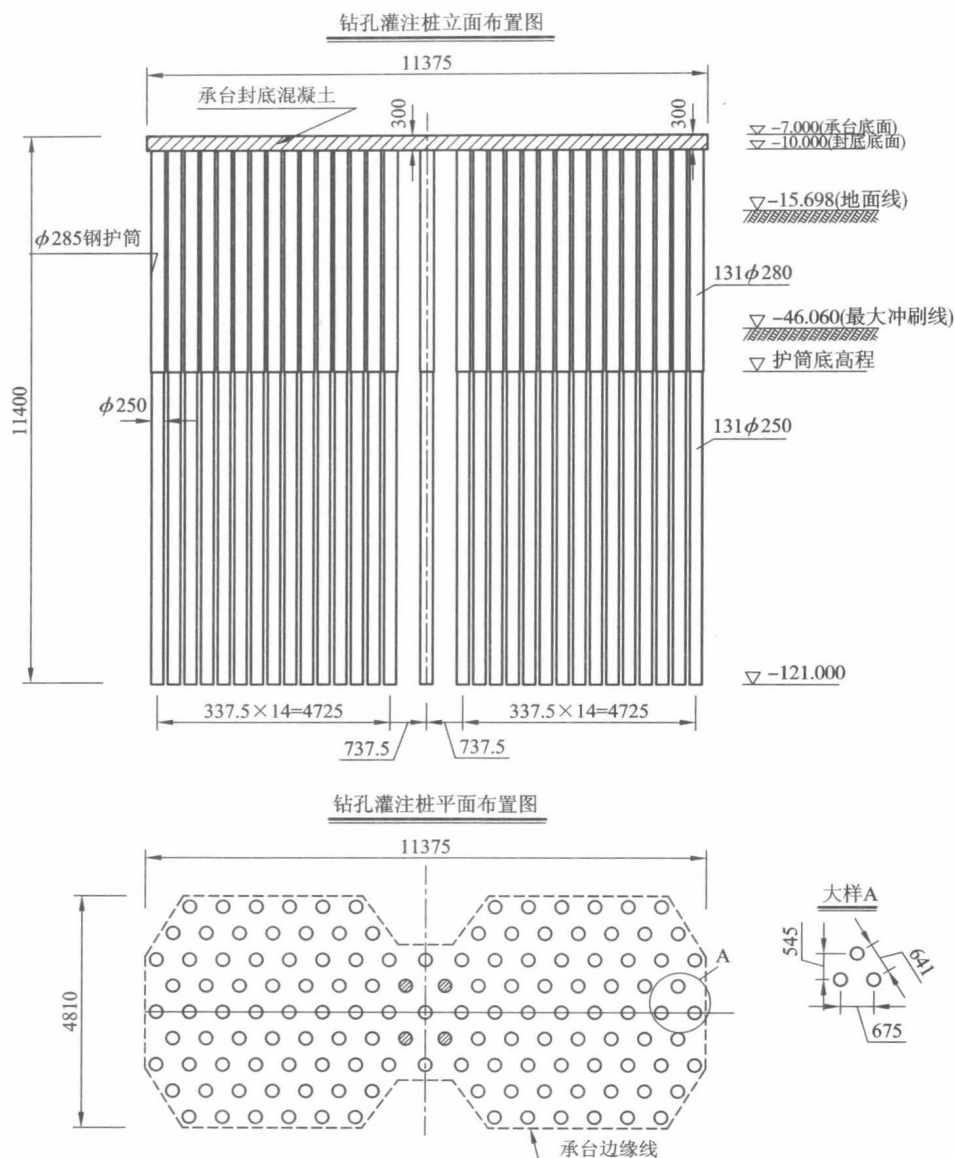


图 1-4 苏通大桥南主塔基础(主桥 5 号墩)

(单位: 除标高为 m 外, 其余为 cm)

顶部与塔柱的接触面垂直于索塔塔柱的中心线。两承台之间采用 $12.65 \text{ m} \times 27.1 \text{ m}$ 系梁相连, 系梁的厚度为 6 m 。桩长分别为北侧基础(主桥 4 号墩) 117 m 和南侧基础(主桥 5 号墩) 114 m , 其桩底高程分别为 -121 m 和 -123 m 。承台封底厚度