

※ 国家科技支撑计划资助项目 (2006BAG04B01)

千米级斜拉桥设计关键技术著作书系

超长群桩基础承载机理研究

Research on Bearing Mechanism of Super-long Pile Group



张喜刚 龚维明 著



人民交通出版社

China Communications Press

国家科技支撑计划资助项目(2006BAG04B01)
千米级斜拉桥设计关键技术著作书系

Research on Bearing Mechanism of Super-long Pile Group

超长群桩基础承载机理研究

张喜刚 龚维明 著



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书详细介绍了超长群桩基础室内外模型试验、离心试验、现场试验、数值计算、监测反分析,得出了群桩基础荷载传递机理,以及在苏通大桥基础中的应用,并专题讨论了钢混组合变截面桩、桩底后注浆技术及厚承台桁架理论。

本书可供从事桩基础设计、施工、监理工作的工程技术和科研人员以及高等院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

超长群桩基础承载机理研究/张喜刚,龚维明著.

—北京:人民交通出版社,2009,7

ISBN 978-7-114-07823-1

I. 超… II. ①张…②龚… III. 钻孔灌注桩—桩承载力—研究 IV. TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 127023 号

国家科技支撑计划资助项目(2006BAG04B01)

千米级斜拉桥设计关键技术著作书系

书 名: 超长群桩基础承载机理研究

著 作 者: 张喜刚 龚维明

责任编辑: 谢仁物 刘 倩

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757969,59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京盛通印刷股份有限公司

开 本: 880×1230 1/16

印 张: 18.5

字 数: 552 千

版 次: 2010年2月第1版

印 次: 2010年2月第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-07823-1

印 数: 0001~3000 册

定 价: 46.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

序

现代斜拉桥的发展是桥梁工程师最引以为豪的成就之一。

虽然利用藤、竹等柔性天然材料承重并实现跨越是人类最早认识到的自然规律之一,但斜拉桥作为一种固定结构形式,其发展却由于缆索材料的性能问题长期停滞。在现代材料与技术进步的推动下,1956 年 Strömsund 桥在瑞典建成通车;之后,在德国著名工程师 Franz Dischinger 的推动下,多座稀索体系斜拉桥在莱茵河上相继建成,现代斜拉桥正式形成,也实现了斜拉桥跨径的第一次发展。随后,现代斜拉桥又经历了从稀索体系到密索体系等一系列重要的发展历程,跨越能力稳步提升。1995 年,法国诺曼底大桥实现了 856m 的跨径;1999 年日本多多罗大桥实现了 890m 的跨径。而挑战千米级斜拉桥,实现斜拉桥跨径的千米级突破,则成为桥梁工程师在那之后又一个奋斗目标。

我国第一座斜拉桥为 1975 年原交通部重庆公路科学研究所设计和指导施工的四川云阳桥,跨径组合为 34.91m + 75.84m + 34.91m,主梁为混凝土单箱,每塔三对斜拉索。与此同时,上海市政工程设计研究总院也设计了新五桥,跨径组合为 24m + 54m + 24m,双车道宽 6.6m。此后国内又相继修建了三台涪江桥、上海浏港桥、广西红水河铁路桥等。在 1975 年 ~ 1985 年的 11 年间,我国大陆共建成各式混凝土斜拉桥 15 座,台湾建成了跨径 $2 \times 134\text{m}$ 的三塔斜拉桥光复桥。我国大跨径斜拉桥的发展始自 1991 年建成的 423m 跨径的上海南浦大桥;随后,1993 年上海杨浦大桥突破了 600m 跨径,建成时跨径位于世界同类桥梁前列。此后,全国各地掀起大跨径斜拉桥的建设热潮,大批 400 ~ 600m 跨径的斜拉桥相继建成通车。

据不完全统计,我国 1986 年 ~ 1990 年 5 年间建成斜拉桥 33 座,1991 年 ~ 1995 年 5 年间建成 43 座,1996 年 ~ 2000 年 5 年间建成 63 座,自 1975 年开始到 2002 年共建成斜拉桥 155 座。从一定程度上看,大跨径斜拉桥的快速发展和跨径在 600m 左右的突破,解决了我国现代交通网络建设中的关键技术问题,是 20 世纪 80 ~ 90 年代桥梁工程领域取得的最重要成就之一。通过大量的斜拉桥建设,我国也积累了丰富的斜拉桥建设经验,并与世界同步,甚至是更为超前地考虑斜拉桥千米跨径的突破问题。

20 世纪末,仍处于方案研究阶段的苏通大桥与香港昂船洲大桥几乎同时提出了超千米跨径的斜拉桥方案。2002 年苏通大桥率先进入工程实施阶段,并于 2008 年 5 月正式建成通车,成为世界首座突破千米跨径的斜拉桥,是世界桥梁建设的里程碑工程。苏通大桥

如果说 20 世纪 90 年代,实现斜拉桥跨径 600m 级的突破主要依靠引进和学习国外先进桥梁建设技术成果的话,那么本次实现的斜拉桥千米跨径的突破,则更多地体现了自主创新。全面总结苏通大桥建设经验,解决结构体系和设计方面的关键技术问题,形成系统的千米级斜拉桥设计理论与方法,开发具有自主知识产权的桥梁设计分析工具,为类似工程提供有力的技术支撑,并研究千米级斜拉桥结构性能的一般规律,探索斜拉桥跨径提升的制约条件及其工程设计对策,为斜拉桥跨径的下一步突破进行技术储备,已成为迫切需要解决的问题。

苏通大桥地处长江河口地区,该大桥建设具有水文条件差、气象条件复杂、基岩埋藏深、通航标准高等建设条件方面和高、大、长、柔等结构方面的特点,千米级斜拉桥的技术要求超越了国内外现行标准、规范规定。千米级斜拉桥结构体系及特殊设计方法、深水急流潮汐河段条件下大型群桩基础施工控制、千米级斜拉桥塔梁索施工控制等多项世界级技术难题需要攻克,工程建设面临着极大的技术挑战。为了支撑苏通大桥建设,系统攻克千米级斜拉桥建设关键技术问题,科学技术部于 2006 年批准了国家科技支撑计划支持的首个重大公路交通工程项目——“苏通大桥建设关键技术研究”。

本套丛书是课题研究成果的系统总结。《千米级斜拉桥——结构体系、性能与设计》是对千米级斜拉桥结构体系、性能和设计方法方面研究的成果总结,包括以苏通大桥为设计原型的主跨 1 088m 斜拉桥,以及在其基础上拓展的主跨 1 308m、1 500m、1 800m 斜拉桥结构性能及作用特性的研究。考虑到千米级斜拉桥特殊的结构性能,研究还针对千米级斜拉桥特殊的设计理论、前沿设计方法等进行了研究。《苏通大桥设计与结构性能》中详细介绍了苏通大桥设计过程中对抗风、抗震等关键问题的研究成果。《组合索塔锚固结构》和《超长群桩基础承载机理研究》系统介绍了在苏通大桥中应用的组合索塔锚固结构

和超长大型群桩基础的相关机理、设计理论和方法等。《千米级斜拉桥设计指南》是对研究形成的千米级斜拉桥设计方法和技术的总结,也是国内外有关超大跨径斜拉桥设计的首部专门指导性专著。

课题研究及本丛书的编写凝结了课题组近百位研究人员多年的研究成果。国内外多位知名专家及交通运输部、科学技术部相关领导也在研究过程中多次关注,并提出了重要的指导意见,在此对他们一并表示衷心的感谢。

限于研究时间和精力,有偏颇和不足之处,望不吝赐教!

张喜刚

2010年1月

前 言

在现代大型桥梁工程中,超长大直径群桩基础越来越得到广泛应用。随着桥梁跨径的进一步增大,此类大型群桩基础规模和所受荷载大幅度增加,同时在地震、船舶撞击作用以及复杂的水文地质条件下,其受力特性也更为复杂,需要通过机理研究和发展新的理论与方法来解决此类技术难题。

本书系统总结了超长大直径群桩基础的现场试验、室内外模型试验、离心试验、数值分析、现场监测、反演分析、理论与方法研究等方面的成果,以便为同类大桥的建设提供参考和借鉴。

在本书编写过程中,王年香撰写了离心试验一章,陈志坚、穆保岗、童小东、戴国亮、黄生根、程晔等也参加了部分内容的编写工作,在此一并致谢!

限于研究时间和精力,有偏颇和不足之处,望不吝赐教!

张喜刚 龚维明
2009年7月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 桩基础的应用现状	2
1.3 超长大直径群桩基础的研究现状	5
1.4 主要研究内容	13
第二章 室内外群桩模型试验研究	17
2.1 室内模型试验研究	17
2.2 室外模型试验研究	42
第三章 群桩基础的离心模型试验	59
3.1 离心试验简介	59
3.2 离心试验方法	60
3.3 试验原型模拟	61
3.4 单桩离心模型试验	63
3.5 群桩离心模型试验	68
第四章 群桩基础的数值模拟研究	91
4.1 有限元建模	91
4.2 超大群桩基础的数值模拟	94
4.3 冲刷对桩基承载性能影响的数值模型分析	100
第五章 超长群桩基础的现场检测与反演分析	104
5.1 研究现状及研究内容	104
5.2 传感器系统与监测点(孔)的布置	105
5.3 现场检测结果	108
5.4 原型群桩基础的工作特性	112
5.5 研究结论	113
第六章 超长大直径钻孔灌注桩单桩承载性能研究	114
6.1 静载试验研究	114
6.2 桩端极限承载力理论研究	119
6.3 桩身自重的研究	126
6.4 桩身压缩量(沉降量)计算	127
6.5 承载力与沉降关系的研究	129
第七章 群桩基础的理论计算研究	135
7.1 承载力计算研究	135
7.2 沉降的计算方法研究	144
第八章 钢混组合变截面桩承载性能研究	168
8.1 竖向荷载作用下承载性能研究	168
8.2 水平向荷载作用下承载性能研究	186
第九章 室内注浆试验研究	213

9.1	饱和与非饱和土注浆效果研究	213
9.2	不同注浆压力的注浆效果研究	223
9.3	注浆固化物强度随时间变化规律研究	224
9.4	不同注浆添加剂的注浆效果研究	225
9.5	不同外界条件对固化物强度、结构的影响分析	232
9.6	研究结论	233
第十章	桩端后压浆研究	235
10.1	现场试验研究	235
10.2	有限元分析	239
10.3	桩端后压浆设计应用	247
第十一章	超大型桩基承台软化协调空间桁架设计方法分析研究	249
11.1	超大型承台设计方法研究现状	249
11.2	集群桩基大型承台试验研究	252
11.3	桩基承台软化协调空间桁架理论方法研究	261
11.4	苏通大桥承台各种设计方法计算对比	266
11.5	苏通大桥承台结构有限元分析	269
11.6	苏通大桥承台空间桁架现场测试分析	273
11.7	研究结论	277
参考文献		279

第一章 绪 论

1.1 概述

1.1.1 桩基础的发展历史

桩是深入土层的柱形构件,可以定义为垂直或微斜埋置于土中的受力杆件。

在基础工程中,按其功能可分为竖向抗压桩、竖向抗拔桩和抗侧压桩。本书的主要研究对象为竖向抗压桩。

人类对桩的应用历史至今已有 12 000 ~ 14 000 年。首先使用的是取之于天然资源的木桩,然后是钢桩、钢筋混凝土桩。随着机械设备的不断改进,产生了各种各样的桩型和工法。桩的发展过程,伴随着桩的材料和成桩工艺方法不断的更新。

随着桩的用途的拓宽以及施工技术和机械设备的改进与发展,新的桩型不断呈现,人们对桩的承载性能、设计方法、检测技术等也在不断进行探索研究。

1.1.2 桩的作用

采用桩基础有两个主要作用:一是提高地基承载力,二是有效控制地基及基础的沉降。

针对桩基的作用,目前的桩基础设计可分为三种情况:①桩承担所有上部结构的荷载;②桩承担大部分上部结构的荷载,同时也起到减少沉降变形的目的;③桩承担一小部分上部结构荷载,主要起到减少或控制沉降的作用。

然而,在现行设计规范中,桩基设计理论是建立在满足承载力基础上的,也即均按上述第一种情况处理。显然,这种传统的桩基设计方法,对于上述第二、三种情况是过于保守的,并且在设计概念上也不很清楚。对于上述第二、三种情况,在如何减少桩基工程费用上值得研究;即使对第一种情况,也存在如何合理选择桩数和布桩的问题。

设计中桩起控制沉降作用的不在少数,如在深厚软土层中宜使用长桩,基础变形敏感的结构宜采用桩基础等。

1.1.3 桩的基本要素

桩的三个基本要素是:设置方向、周围介质和结构特性。由桩的定义可知桩的设置方向一般是垂直的(或微斜的),且主要用于承受竖向压力荷载。上部结构作用于桩顶的荷载,通过桩土接触面传递到桩周介质(岩土)中,而桩的周围介质就是指桩所影响的周围岩土。因此,桩与周围介质接触面的上剪切特性,是决定桩的承载力和变形特征的主要因素之一。桩的结构特性是指桩体结构力学中杆件的强度性质,也是决定桩工作特性的因素之一。

虽然桩的基本要素中设置方向单一,结构特性简单,但由于桩周介质(岩土)的复杂性,无论是桩的承载力预测方法,还是桩的沉降分析计算理论,均有待进一步完善。

1.1.4 桩基承载力的确定

根据破坏机理的不同,单桩承载力的分析确定原则可分为三大类,即:

(1) 桩的内部强度稳定准则;

(3) 桩的功能性稳定准则。

由桩的外部强度稳定准则分析确定单桩承载力,是指桩的基本要素中,由周围介质与桩接触面剪切强度特性决定桩承载力。由于桩周介质的复杂性,根据这一破坏机理形成了多种形式的桩承载力计算方法。但是,到目前为止,只有原位静载荷试验确定的桩承载力,可以达到结构设计要求的精度和可靠性,并可直接应用于工程设计。而其他的分析计算方法和试验方法得到的桩承载力,相对可靠性降低,直接用于工程设计,可能趋于保守或不够安全的两个极端。

由于各单桩之间相互影响,群桩的极限承载力并不简单地等于各单桩极限承载力之和。对于端承型群桩基础,桩、土相互作用小到可忽略不计,其群桩极限承载力可取各单桩极限承载力之和;而摩擦型群桩基础,其极限承载力可按群桩效应系数法和等代墩基法进行计算。

桩基沉降是指桩顶部作用竖向荷载所引起的桩顶向下方向的位移。

从桩的受力机理分析,单桩的沉降量由三部分组成:

- (1) 桩本身的弹性压缩;
- (2) 由于桩侧摩阻力向下传递引起桩端下土体压缩所产生的桩端沉降;
- (3) 由于桩端荷载引起桩端下土体压缩所产生的桩端沉降。

而群桩的沉降量除了上述三项外还包括了桩尖刺入桩端土的沉降量。

不同的桩基各以不同的工作机理和特点来适应某一具体的特定工程,桩型和如何充分发挥桩基的潜力成为桩基技术首先要考虑的两个问题。和其他的地基处理方法一样,桩基础的发展存在“实践在先,理论计算在后”的现象。

随着国民经济的快速发展,高层建筑及桥梁工程的日益增多,桩基础的应用量也随之增大。类型和功能的多样性,使得桩基础几乎可以用于各种工程地质条件和各种类型的工程中。

(1)单桩设计承载力越来越大,达到了以“ $\times 10^4 \text{kN}$ ”计的承载水平。通过桩身材料优选、加大桩身截面、最大限度地提高桩身混凝土强度、寻求新的有效沉桩工艺、对持力层进行加固等途径来提高单桩承载力,于是出现了各种系列的新型改良桩系。

(2) 桩基的施工涉及各式各样的桩和复杂多变的工程地质和水文地质条件,随着工程技术的不断发展,桩工机械也趋向于专门化和复杂化,桩机新品种、施工工艺和用途范围也在不断地发展着。桩基本身的特点导致桩工机械构造比较复杂,品种多,规格型号多,专用性较强而又生产批量不大。尽管如此,桩工机械工业仍然发展很快。桩工机械行业通过横向联合、发挥群体优势,能够成套开发机械新产

品。同时,桩工机械的制造质量、可靠性和使用寿命有了明显提高。

(3) 由于在城区兴建高层建筑的需要,桩基施工的环境效应消减问题受到了充分的重视。

1.2.2 超长直径钻孔灌注桩的应用发展现状

钻孔灌注桩适用于各种土层和基岩施工,具有成桩直径和桩长灵活、单桩承载力大的优点。

目前大型桥梁工程的基础设计中,钻孔灌注桩往往是主要桩型,并常常采用超长直径钻孔灌注桩(桩径超过 0.8m,桩长超过 40m)。

20 世纪 70 年代末,特别是改革开放以来,全国公路交通建设迅速发展,在大江大河上建造了大量的大跨径桥梁,桩径、桩长不断刷新记录。1985 年,河南省郑州黄河大桥,桩长 70m,桩径 2.2m;1989 年,武汉长江公路桥,桩长 65m,桩径 2.5m;1990 年,铜陵长江大桥,桩长 100m,桩径 2.8m。目前,我国桥梁工程中最大桩长已达 125m,桩径 3.8m,单桩承载力高达 200 000kN。

国内已建及在建工程的超长直径钻孔灌注桩如表 1-1 所示。

部分国内超长直径钻孔灌注桩概况

表 1-1

工程项目名称	桩 号	桩径 (m)	桩长 (m)	桩端持力层	静载测试结果 (kN)
五河口大桥	27~26 号	2.5	95.00	黏土	65 937
京杭运河大桥	14~1 号	2.5	85.00	细砂	46 939
灌河大桥	23 号	2.5	96.00	黏土	50 309
东海大桥	Pm336	2.5	110.00	粉细砂	41 275
南京长江三桥	2 号	2.0	100.00	微风化泥岩	93 780
上海长江大桥	62 号	2.5/3.0	107.85	粉砂	57 170
杭州湾大桥	11 号	2.8	120.00	粉砂	67 232

从表 1-1 可以看出,目前超长直径钻孔灌注桩被越来越广泛的应用,但由于地质条件的差异,施工工艺的差别,各地区建成的超长直径钻孔灌注桩表现出来的承载性能也是有差别的,对其开展研究远远落后于实践。特别是超长直径钻孔灌注桩的荷载传递机理、群桩效应、承台一桩一土的共同作用、厚承台的优化设计等问题一直是岩土工程的难点和热点。目前设计应用所采纳的规范条文是建立在我国早期小直径中短桩的研究基础上的,对于超长直径桩应用中的设计仍需进行大量深入细致的研究工作。

1.2.3 苏通大桥的基础概况

苏通大桥是沈阳至海口南北国家重点干线公路跨越长江的重要通道,也是江苏省公路主骨架的重要组成部分。

苏通大桥桥位区的江面宽约 6km,大桥全长 8 206m,按双向 6 车道高速公路标准建设。主航道采用主跨 1 088m 的双塔斜拉桥,港区专用航道采用 140m+268m+140m 的预应力混凝土连续刚构,引桥分别采用跨径 75m、50m、30m 的等高度预应力混凝土连续梁。其中主航道采用主跨 1 088m 的双塔斜拉桥,为世界最长;主跨双塔高达 300m,重约 10 万吨。大桥主塔桥墩区内第四系土层厚达 270m 左右,地质条件复杂,属软弱地基。为安全承担上部荷载,进一步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性能,经过方案优化后,设计采用基础为超大哑铃形承台+131 根超长直径群桩基础(图 1-1)。

主桥索塔基础为超长直径灌注桩群桩基础,桩径上部 2.8m,下部 2.5m。钻孔灌注桩桩长分别为北侧基础(主 4 号墩)117m 和南侧基础(主 5 号墩)114m。

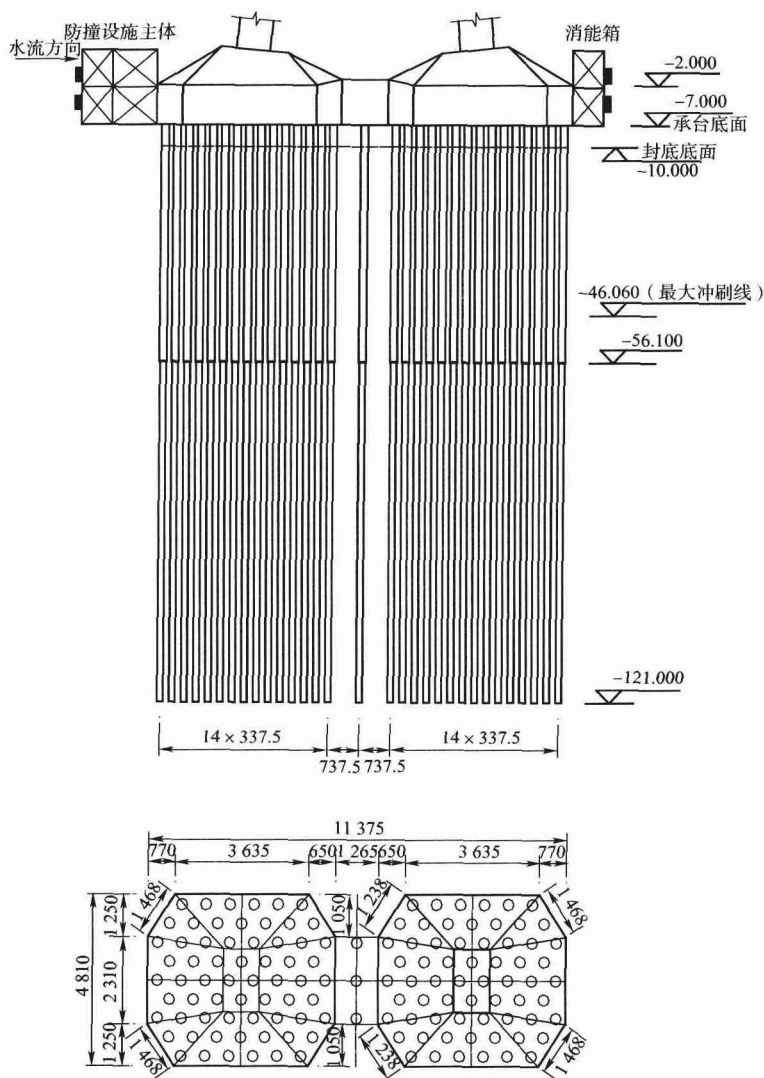


图 1-1 主桥南塔群桩基础构造图

承台横截面为变厚度梯形,底面为哑铃形,外部尺寸为 $113.75\text{m} \times 48.1\text{m}$,承台顶面为斜面,在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 6m 变化到最厚处的 13.324m 。

苏通大桥主墩的地质条件如下:软土分布很厚,270m 以内没有岩层可作为桩的持力层。依据桥位区揭露地层的地质时代、成因类型、岩性、埋藏条件及其物理力学特征等,桥位区共分为 22 个工程地质层,各层主要特征如下。

全新统(Q4)分为 4 层(1~4 层):1 层为北侧上部的粉砂或亚黏土夹粉砂,又细分成 3 个亚层;2 层为南侧上部的亚黏土“硬壳层”;3 层为南侧上部的淤泥质亚黏土或粉砂夹层,分为 2 个亚层;4 层为底部的亚黏土或亚黏土与粉砂互层。

上更新统(Q3)分为 4 层(5~8 层):5 层以粉砂为主,局部亚黏土,分为 2 个亚层;6 层为粗砂含砾,局部细砂,又分 2 个亚层;7 层为细砂、粉砂;8 层为粗砂夹细砂含砾、细砂,夹透镜体状亚黏土,分 2 个亚层。

中更新统(Q2)分为 7 层(9~15 层),岩性为粉细砂层、黏性土。

下更新统(Q1)、上第三系(N)顶板埋深在 200m 以上,粗略分为 7 个工程地质层(16~22 层)。下更新统以砂层为主夹黏性土;上第三系以半胶结状黏土、砂土为主,底部揭露玄武岩。

从南、北区地层情况来看,全新统地层差异较大,北区主要为 1-1、1-3 亚砂土、粉砂及 4 层亚黏土,

层底高程 $-56.94 \sim -63.69\text{m}$; 南区主要为 3-1 淤泥质亚黏土、3-3 亚黏土及 4 层亚黏土, 层底高程 $-46.64 \sim -52.48\text{m}$, 层位上 I 区下降约 10m 。上更新统均为 5~8 工程地质层的粉细砂、粗砾砂夹亚黏土, 但 I 区沉积韵律多, 透镜体多, 单层厚度小, 剖面连线更复杂。中更新统地层相对稳定, 其上部的 9 黏土及亚黏土层顶高程均位于 -130m 左右。这里仅例出主 5 号墩地基土层的主要物理力学指标, 见表 1-2。

主 5 号墩地基土层的主要物理力学指标统计表

表 1-2

统	地层 代号	岩土名称	天然	天然	天然	液限 I_L	塑限 I_P	快剪		固结快剪		压缩	压缩	无侧限抗	标贯	容许承	桩周土
			含水率 w (%)	密度 ρ (g/m^3)	孔隙比 e			黏聚力 C (kPa)	内摩 擦角 ϕ ($^\circ$)	黏聚力 C (kPa)	内摩 擦角 ϕ ($^\circ$)	系数 $a_{0.1-0.2}$ (MPa^{-1})	模量 E_s (MPa)	压强度 q_s (kPa)	试验 击数 N (击)	载力 [σ_0] (kPa)	极限摩 阻力 τ_i (kPa)
Q4	3-1	淤泥质 亚黏土	40.6	1.79	1.122	36.1	20.8	25	2.6			0.593	3.52		4.3	90	20
	3-3	亚黏土	35.6	1.78	1.09	34.1	20.4	12.8	10.8	11.8	18.5	0.601	3.28	25.83	11	100	30
	4-1	淤泥质 亚黏土	40.6	1.74	1.187	33.8	20.6	3.9	5.7	4.2	15.6	0.72	2.77	8.67	11.8	90	20
	4-2	亚黏土	33.1	1.83	0.988	31.9	19.8	9.8	25.8	14	20.3	0.497	3.98	44	17	115	35
Q3	5-2	粉细砂	25	1.96	0.721			18.6	30.6	23.5	30	0.125	13.35		35.9	230	50
	5-3	亚黏土	30.7	1.88	0.832	31.4	20.4			17	26.6	0.211	8.4		26.1	130	40
	6-1	中粗砾砂	13.9	2.12	0.44			11.8	26.6			0.06	23.95		38.4	460	90
	6-2	粉细砂													59.1	250	55
	7-1	粉细砂	19.3	2.01	0.593			19.9	31.2	20	29.9	0.112	13.68		54.5	250	55
	8-1	中粗砾砂	11.6	2.15	0.383			22.3	36.1	17.7	31.7	0.073	18.91		73.3	500	100
	8-2	粉细砂 砂	17.1	2.04				19.2	32.7	22	31.6	0.134	11.17		58.7	250	60
Q2	9	亚黏土 及黏土	23.5	2.05	0.646	37.5	20.1	80.1	13.5	59.9	21.1	0.175	9.44	445	60.3	380	70
	10	粉细砂	19.4	1.99	0.596			9	29.9	7	33.6	0.154	10.48		64.5	250	60
	11	亚黏土 及黏土	24.6	2.02	0.687	37	20.5	85	15.7	55.9	19.1	0.216	8.63	432	70.5	380	80
	12	粉细砂	18.7	2.07	0.532			16.8	29.2			0.095	16.75			250	60
	13	亚黏土 及黏土	26.3	1.99	0.734	33	17.6	43.8	20.9	39	22.8			466		360	75
	14	细砂	23	1.98	0.675			17	29.9	16	35	0.134	12.57			250	60

1.3 超长直径群桩基础的研究现状

苏通大桥主塔基础为超长直径钻孔灌注桩组成的群桩基础, 缺乏相应的设计计算方法, 同时国际上没有类似的工程经验可供参考。本项目结合国家重点工程苏通大桥建设需要, 在广泛和深入的现场调研与文献调查的基础上, 制订了详细的研究方案, 进行了系统深入的理论分析与试验研究。针对竖向荷载作用下超长直径钻孔灌注桩单桩承载性能、超大型钻孔桩群桩基础承载性能、超大型厚承台空间桁架设计理论和方法开展研究工作。

1.3.1 超长直径钻孔灌注桩单桩

苏通大桥基础为超长直径钻孔灌注桩, 桩长达 117m , 直径为 $2.8\text{m}/2.5\text{m}$, 其承载性能无法以传统方法进行准确评估。课题组综合运用静载试验、离心试验、理论分析、有限元分析等方法进行了研究,

对超长桩竖向承载性能有了一定认识。

1. 承载性能研究现状

单桩理论分析方法主要有:弹性理论法、荷载传递法、剪切位移法及有限元法等,而在实际工程实践中,现场静载测试仍被认为是最为可靠的方法。

弹性理论法利用半无限弹性体中集中力下的 Mindlin 解给出桩竖向变形,这与实际地基土的成层性差别较大,并且与土的实际变形特性也相差较大。有人针对土的成层性将该方法进行改进,如 Ta 等将层状弹性体的分析理论引入到桩基础的分析中;费勒发等将弹性理论解与分层总和法相结合,以考虑成层土的情况。

荷载传递法认为桩身任何一点的位移只与该点的剪应力有关,忽略了桩周土的应力场效应,即忽略了桩周介质的连续性,也无法反映软弱下卧层的影响。潘时声(1991 年)提出了用分层位移迭代法求解单桩,并推广到群桩分析中,有效改善了该法不同的传递函数对应的临界位移值相差大的问题。陈如桂建立了单桩荷载传递的弹塑性桩土体系的理论并提出了可供工程应用的实用方法,但其方法是独立考虑一根桩的沉降特性,未扩展到群桩分析中。

剪切位移法假设桩产生竖向位移时,桩侧摩阻力通过环形单元向四周传递,桩侧周围土体的变形可视为同心的圆柱体,适用性较强。杨嵘昌等进一步将剪切位移法推广到塑性阶段,并且用于桩—土—承台结构的非线性共同作用分析。有人在剪切位移法的基础上,给出了层状土中轴向受荷桩土相互作用的问题分析方法,对于解决一般地基土的桩土相互作用问题较为有效。杨敏等提出沉降控制的桩基础设计方法,是桩土相互作用的进一步发展。董建国等则对桩土共同作用机理的计算方法进行了较系统的研究,但该方法在分析计算中,桩的影响半径的确定主要基于经验,缺少理论支持。

有限元法是目前较普遍的一种数值方法,可以考虑实际的三维效应,并可计算桩中和沿桩周的应力和变形。众多学者为获得各工况下的桩基承载性能,只能借助于有限元方法来模拟现场试验,得到了很多有意义的结论。有的将桩体作为杆件,周围土体对桩的作用采用弹簧单元模拟,弹簧可以模拟土体的黏弹性。这种做法,割裂了桩土之间的相互作用。更多的学者采用实体单元模拟桩体和土体单元,但各自的本构关系并不一样,土体有的用 Mohr-Coulomb,也有的用 Drunk-Prager,还有的直接采用线弹性的。对桩土界面的模拟也大相径庭,有的采用无厚度的 Goodman 单元,有的采用有厚度的接触单元。土体的弹塑性模型本构关系众多,在实际应用时,应综合考虑参数选取的方便可靠、与实际尽可能接近等原则。

现场单桩静载测试直观,与实际受力状态类似,其结论较为可靠,然而,静载试验方法需耗费较多的人力、物力,耽误工期,甚至在条件恶劣时或者吨位太大时,静载试验根本无法实现。

由此可见,超长大直径单桩的承载机理不甚明确,其承载性能的研究还有很多工作要开展。因此,开展苏通桥超长大直径单桩的承载机理的研究显得非常必要。

2. 相关规范现状

目前,单桩的承载力和沉降计算没有统一起来(德国规范除外),即分析单桩的承载力时,没有与单桩沉降联系起来。

对于单桩的设计,国外规范在承载力计算方面与国内规范相似,沉降计算时考虑桩身压缩的影响。国内《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)、《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)和《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB 10002.5—2005)都只规定了承载力的验算,而未给出其沉降的计算方法。单桩承载力计算,各规范在形式上均是表达为侧阻与端阻之和,只是其设计代表值和取值大小不一样。特别值得注意的是上述规范的侧阻、端阻取值均是在小直径、短桩的工程实践经验和试验结果的基础上统计得出的,直接将这些结论应用到超长大直径灌注桩不太合适。

超长大直径灌注桩与小直径、短桩的区别主要表现为以下几点:

- (1)超长大直径灌注桩的桩身自重力占总承载力的比例较大;
- (2)超长大直径灌注桩的桩身压缩量很大,需要采取适当的计算方法予以考虑;

(3)超长大直径灌注桩承受荷载巨大,桩顶局部的应力水平高,桩身必须采用高强度混凝土,荷载才能传至深层土体中;

(4)受施工因素的影响更明显,施工质量更难于保证;

(5)由于桩长较长,深度效应明显,超长桩的承载性能与土层中应力状态密切相关。

这些问题都是目前超长大直径灌注桩设计急需解决的,而现有的单桩分析计算方法都未能够考虑到上述因素的影响。

1.3.2 超长大直径群桩基础

苏通大桥主墩的群桩基础由 131 根长 117m 的钻孔灌注桩组成,单桩之间相互影响机理复杂,同时其与上部承台共同作用、相互影响。课题组对苏通大桥超大规模群桩基础的竖向承载力计算、整体沉降计算及与承台的相互作用进行了研究。

1. 群桩承载力研究现状

群桩承载力的计算必须根据群桩破坏模式建立相应的计算模式,这样才符合实际工程情况。群桩的破坏模式分为整体破坏和非整体破坏,如图 1-2 所示。整体破坏即桩端土与桩共同变形,非整体破坏即桩端土与桩发生滑移,各基桩发生刺入破坏。

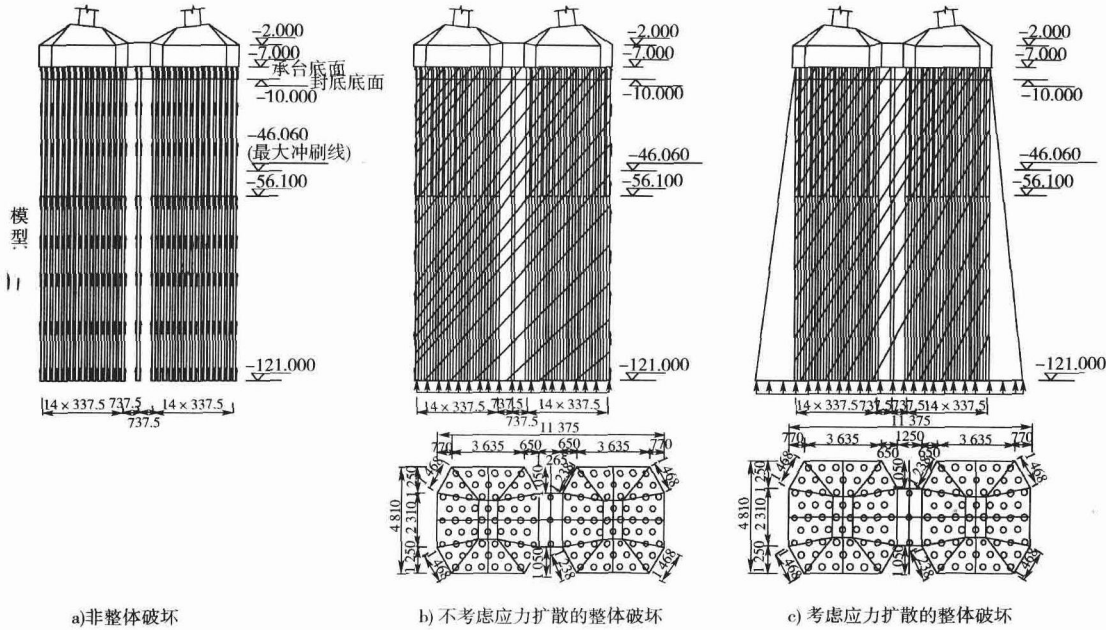


图 1-2 群桩破坏模式示意图(高程单位为 m,其余单位为 cm)

当桩距为 5~6 倍桩径时,群桩为非整体破坏,群桩承载力等于单桩承载力之和。当桩距小于 5~6 倍桩径,为整体破坏,相应的承载力计算可分为按等代墩基础计算承载力和考虑群桩效应折减后计算承载力两种方法。目前交通部^①规范中采用按等代墩基础计算承载力的方法,而建设部^②规范中采用考虑群桩效应折减后计算承载力的方法。美欧等国规范则按两者的较小值计算群桩承载力。

群桩效率系数 $\eta = \text{群桩承载力} / (n \times \text{单桩承载力})$,一般情况下 $\eta < 1$ 。群桩效率系数的确定非常困难,目前只能由小型现场试验和离心模型试验确定。

美国规范规定 $\eta = 0.65 \sim 1$, η 随“桩距/桩径”比增大而增大;欧洲规范则为 0.75。

① 交通部现已更名为交通运输部。

② 建设部现已更名为住房和城乡建设部。

建设部规范规定 $\eta = 1$ 。

由于苏通大桥桩距为 6.7(6.4)m,属于整体破坏。故课题主要研究苏通大桥的群桩基础的群桩效应系数。

2. 群桩沉降研究现状

(1) 研究方法

目前,群桩沉降的计算方法主要有:等代墩基法、弹性理论法、有限单元法、荷载传递法、剪切位移法等。

① 等代墩基法

等代墩基法是群桩沉降计算的一种简化方法,即假定承台周边范围内群桩和桩间土为一天然地基上的实体深基础,同时假定等代范围内的桩间土不产生压缩变形,按实体基础沉降计算方法来估算群桩的沉降。该法桩端以下地基土的附加应力按照 Boussinesq 解来确定。为减少上述假定对计算结果的影响,人们在计算模式上采取了许多措施来修正。

对于超长桩,当上部荷载与承台及覆土重力之和小于群桩外围总剪力时,此时等代墩基法的假定不合理。为此,董建国、赵锡宏对等代墩基法进行修正,提出了计算群桩沉降的简易计算方法,该法计算的沉降与实测值比较相符,但是该方法的有些关键计算参数取值有争议或确定有很大困难。

此外,还有提出等代墩基法的适用性可由因子 R 分类,设某一群桩桩数为 n 、桩距为 s 、埋深为 L_p 的群桩,则, $R = \sqrt{ns/L_p}$,当 $R \leq 4$ 时,等代墩基法才有效,对此本课题开展了重点研究。

② 弹性理论法

Polous 和 Davis 系统地提出了根据 Mindlin 位移解答计算均质弹性半空间中桩基沉降的弹性理论法。后来该方法推广到非均质层状土、有限深度土层、桩—土滑移等问题的分析。弹性理论法按照其应用模式不同又可分为:叠加法、相互影响系数法、沉降比法。

弹性理论法仅需把桩土界面进行离散,但是计算大规模群桩时仍然占用大量机时,限制了其推广使用;此外,用单一的弹性模量去反映分层、非线性土的压缩特性也不很合适。弹性理论法夸大了桩土相互作用,由此计算的桩侧摩阻力分布形式和桩顶反力与实测相差较大,因此在工程应用中有很大的局限性。

③ 有限元法

R. D. Ellison 最早利用有限元方法分析桩基问题。G. M. Zhuang 和 I. K. Lee 等用三维有限元法得到计算桩—筏沉降和筏内应力所需参数,包括筏板相对刚度、桩的相对长度、桩数等。L. D. Ta 和 J. C. Small 用有限元分析筏板、有限层法分析土层,有效处理成层土的问题,但仅限于土层的线性行为。国内梁义聪等用三维有限元—接触面单元—三维无限元相耦合的数值方法来模拟群桩体系。倪新华在三维条件下运用有限元—无限元耦合的方法分析筏基—群桩—土体的共同作用。

④ 荷载传递法

荷载传递法能有效地解决土的分层性和非线性等问题,较好地反映桩侧土的成层非均质性、非线性特征,然而该方法仅从桩土界面状况开始分析,以桩身侧面上点的位移为基础,不涉及桩周一定范围内土的位移分布,故不能模拟桩与桩之间的相互作用而难以直接应用于群桩分析。田美存等人根据荷载叠加的原理,运用分层位移迭代法,较方便地把荷载传递法应用于群桩分析,计算过程简单,结果令人满意。

⑤ 剪切位移法

该法是一种半分析的近似解法,不需迭代就可计算群桩沉降值,其计算方法简单易行,计算精度较高,但该方法没考虑桩端以下土层情况,尤其对于桩端以下存在软弱下卧层时,其预测沉降偏小,工程上偏于不安全。此外,剪切位移法计算参数不易确定,在国内很少使用。

(2) 国内外规范对群桩基础沉降采用的计算方法

① 国内规范方法