

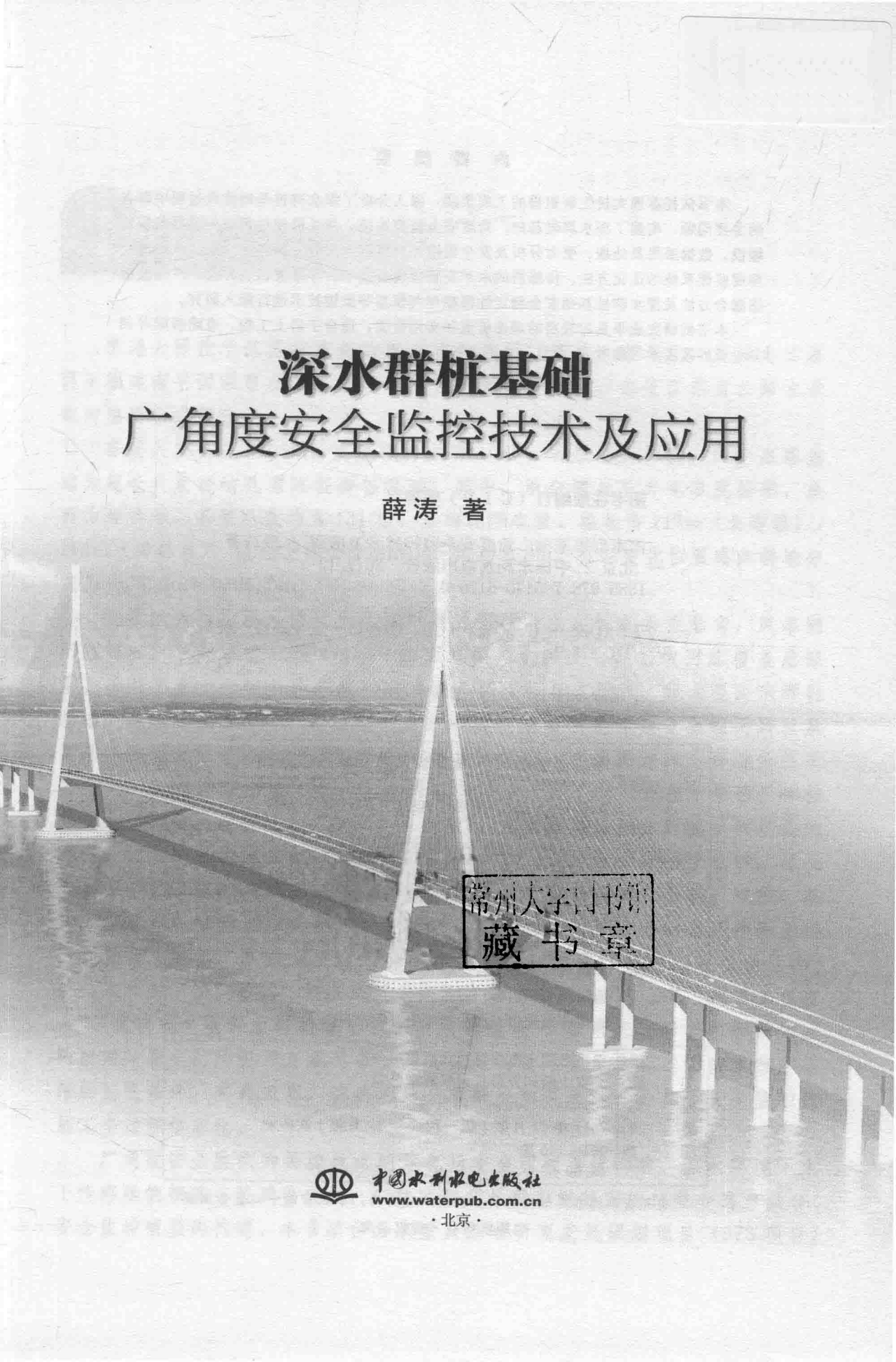
深水群桩基础 广角度安全监控技术及应用

薛涛 著

SHENSHUI QUNZHUANG JICHU
GUANGJIAODU ANQUAN
JIANKONG JISHU JI YINGYONG



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



深水群桩基础 广角度安全监控技术及应用

薛涛 著

常州大学图书馆
藏书章



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书依托苏通大桥主桥建设的工程实践,深入分析了深水群桩基础建设过程中存在的主要问题,构建了深水群桩基础广角度安全监控系统,并从监控过程中传感器的安装埋设、数据采集及处理、受力分析及安全监控评判模型构建等方面进行论述。重点对广角度监控系统的优化方法、传感器的水下安装埋设新技术、异常值识别方法、广角度数据融合方法及深水群桩基础安全性模糊评判模型等关键技术进行深入研究。

本书的研究成果具有较高的理论价值和实用价值,适合于岩土工程、道路桥梁等相关专业的读者学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

深水群桩基础广角度安全监控技术及应用 / 薛涛著

· 一 北京:中国水利水电出版社,2017.12

ISBN 978-7-5170-6170-0

I. ①深… II. ①薛… III. ①群桩—安全监控—研究
IV. ①TU473.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第326280号

书 名	深水群桩基础广角度安全监控技术及应用 SHENSHUI QUNZHUANG JICHU GUANGJIAODU ANQUAN JIANKONG JISHU JI YINGYONG
作 者	薛涛 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京中献拓方科技发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 8.75印张 207千字
版 次	2017年12月第1版 2017年12月第1次印刷
印 数	001—500册
定 价	45.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



前言

苏通大桥位于江苏省东部的南通市和苏州（常熟）市之间，是黑龙江嘉荫至福建南平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。

苏通大桥全长 8206m，主航道为主跨 1088m 的双塔斜拉桥。两个主塔基础为超长大直径钻孔灌注桩群桩基础。其中，承台横截面为变厚度梯形，底面为哑铃形，基桩总数均为 131 根，呈梅花形布置，桩长为 117m（北塔墩）/ 114m（南塔墩），桩径上部为 2.8m、下部为 2.5m。桩径变化位置南北桥墩分别为 -55.0m、-60.0m。

规模巨大的苏通大桥位于长江口潮汐河段，水文气象条件恶劣，风暴潮问题突出，最大潮差可达 4m，且江面宽阔，水深流急，松软河床覆盖层深厚。从而产生十分突出的“双向潮汐深水环境”与“超深、超大型深水群桩基础”的相互作用问题，并派生出复杂的群桩基础承载性能安全性问题以及复杂环境对群桩基础承载性能影响的评估问题等。双向潮汐深水环境给施工安全和工程的安全性带来十分复杂的影响因素，其不利组合前所未遇；群桩基础各组成结构的共性是“超深、超大型”。它大幅度突破现行规范所涵盖的范围，缺乏必要的技术支撑。苏通大桥工程前期的大量研究表明，超长大直径钻孔灌注桩群桩基础的承载性能明显不同于普通的中长桩、短桩，其传力机理和沉降变形性状在荷载传递过程中因承台、桩、土的相互作用变得更加复杂。显然，苏通大桥超大型深水群桩基础的设计和施工需要新理念、新技术和新工法。当然，创新的根本宗旨在于“确保施工安全”“确保工程安全”“突破超大型深水群桩基础施工的技术瓶颈”，新理念、新技术和新工法的应用效果也必须得到可靠的验证，而机理的揭示更是施工创新技术推广应用的前提条件。实践表明，这些问题合理解决的有效途径是基于安全监控的施工全过程信息化。

广角度安全监控的关键技术问题包括安全监控系统构建、深水环境下水下传感器的精确安装埋设技术、广角度和多尺度监测数据的信噪分离与融合、安全监控模型的构建。本书结合国家重点基础研究发展规划项目（973 项目）

“灾害环境下重大工程安全性的基础研究”之课题七“多因素相互作用下地质工程系统的整体稳定性研究”(项目编号:2002CB412707)、国家“十一五”科技支撑项目“苏通大桥建设关键技术研究”之课题五“深水群桩基础施工与冲刷防护成套集成技术研究”(项目编号:2006BAG04B05)和江苏省交通科学研究计划项目“超大型钻孔桩群桩基础关键技术研究”(项目编号:04Y029),依托苏通大桥主桥索塔地基基础稳定及安全监控工程实践,对超大型深水群桩基础广角度安全监控技术进行了研究。主要创新点有以下几个。

(1) 将广角度监控理论引入深水群桩基础施工信息化系统和安全监控系统的构建,提出了广角度监测系统的优化方法和模型。

(2) 通过大量的实践和探索,解决了深达120m的水下传感器的精确安装技术难题,并系统地提出了相关传感器的水下安装埋设新技术。

(3) 针对深水群桩基础复杂的影响因素和安全问题,将小波多尺度分析与数据融合理论相结合,提升了监测数据的处理分析水平,为深水群桩基础安全性的广角度监控和评价奠定了可靠基础。

(4) 针对深水群桩基础沉降和差异沉降问题,将高精度微压传感器技术、静力水准技术、剖面沉降观测技术和D-InSAR沉降监测技术进行了多尺度沉降监测技术集成,提出深水群桩基础施工信息化的沉降和差异沉降实用成套监测技术。

(5) 在深入分析安全性问题特点和影响因素的基础上,采用模糊推理融合算法构建了超大型深水群桩基础安全稳定性的模糊评判模型。

作者

2017年10月



目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 深水群桩基础工程问题的提出	1
1.2 超长大直径群桩基础研究现状	3
1.3 安全监控技术研究现状	8
1.4 数据融合研究现状	14
1.5 主要研究内容及技术路线	16
第2章 广角度安全监控系统的构建	19
2.1 深水群桩基础的复杂性	19
2.2 群桩基础安全监测目的及内容	23
2.3 广角度安全监控系统构成	23
2.4 传感器及数据采集系统的设计原则	28
第3章 安全监控传感器安装埋设关键技术	36
3.1 水深传感器的安装埋设技术	36
3.2 钢护筒表面应变计的安装埋设技术	38
3.3 基桩钢筋应力计的安装埋设技术	40
3.4 基桩混凝土应变计的安装埋设技术	42
3.5 桩底顶出式压力盒的安装埋设技术	45
3.6 剖面沉降管的安装埋设技术	46
3.7 静力水准系统的安装埋设技术	47
第4章 广角度安全监控中异常值识别及处理	50
4.1 异常值成因分析	50
4.2 异常值分类	51
4.3 异常属性识别的原则	51
4.4 异常值检出方法	52
4.5 小波多尺度滤波技术	56
第5章 广角度监控中的数据融合算法	60
5.1 数据融合技术概述	60
5.2 数据融合的特征	61

5.3	数据融合结构模型	61
5.4	数据融合处理层次	62
5.5	数据融合算法	64
5.6	数据融合模型构建	66
第6章	数据融合算法在群桩基础受力监测中的应用	67
6.1	基于 Bayes 估计融合的群桩基础环境因素分析	67
6.2	基于估值融合的群桩基础受力特性分析	76
6.3	基于模糊聚类分析的多传感器融合分区	82
第7章	数据融合算法在群桩基础沉降监测中的应用	87
7.1	沉降和差异沉降影响因素分析	87
7.2	沉降和差异沉降的多尺度监测技术	90
7.3	沉降和差异沉降的数据融合算法应用	99
第8章	模糊推理融合算法在群桩基础安全评判中的应用	109
8.1	模糊推理融合算法基本原理	109
8.2	群桩基础安全性判别的基本程序	110
8.3	群桩基础安全评判模型的建立	111
8.4	超大型深水群桩基础安全稳定性综合评判	121
参考文献		122
后记		133

第 1 章 绪 论

随着社会的发展和科技的进步,人类社会的要求日益提高,各种复杂大型工程项目层出不穷。其总体发展趋势是规模越来越大、建设标准越来越高、造型越来越独特、结构越来越复杂、建设条件越来越恶劣、对基础承载力和稳定性的要求越来越高。在各种基础形式中,群桩基础以其承载力高、沉降量较小且沉降均匀、施工工艺成熟、设备普及率高、施工风险小、施工效率和技术经济指标高等优点而成为高层建筑及大型桥梁首选的一种基础形式。然而,目前的规范均是以小直径的中短桩为理论和试验基础,对于基桩长度和直径日益增大的超长桩来说,其理论研究水平远远落后于工程实践,尤其是深水超长大直径钻孔灌注群桩基础的承载特性、群桩效应、承台-桩-土共同作用等问题还有待于深入的分析和研究。本书有机集成当代先进的传感器技术和数据融合技术,利用广角度监测系统所获取的不同测量目标的监测数据,通过对其合理、科学的处理和分析,建立群桩基础安全评判模型,为群桩基础安全稳定性评价和设计理论的完善提供可靠的依据。

1.1 深水群桩基础工程问题的提出

苏通大桥是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,是国家“十一五”重点建设项目。该工程于 2003 年 6 月 27 日开工,于 2008 年 6 月 30 日建成通车。桥位区东距长江入海口约 108km,西距江阴大桥约 82km,北连南通,南接苏州,路线全长 32.4km,主要由北岸接线工程、跨江大桥工程和南岸接线工程 3 部分组成。其中,跨江大桥长约 8206m,主航道桥采用主跨 1088m 的双塔双索面钢箱梁斜拉桥,是继主跨度 890m 的日本多多罗大桥之后,世界上跨径第二大的著名斜拉桥。

桩是深入土层的柱形构件,桩与连接桩顶的承台组成桩基础,简称桩基。桩基可由单根基桩构成,但为了提高桩基础的整体稳定性和水平向承载力,并减小桩长和桩径,降低施工难度,桩基础通常被设计成由多根桩组成的群桩基础。群桩基础的作用是将作用于承台上的荷载通过较软弱地层或者水而传递到深部较坚硬的、压缩性小的土层或岩层^[1],通过它可以降低荷载作用深度(使荷载作用于承载力高的持力层)、扩大荷载作用面积(主要是桩侧摩擦面积)和作用范围,以大幅度提高地基基础的承载力、减少沉降和差异沉降。

苏通大桥桥位区位于长江下游感潮河段,邻近长江入海口,水文气象条件恶劣,风暴潮问题突出,加之江面宽阔,水深流急,松软河床覆盖层深厚,工程建设条件具有以下特点。

- (1) 索塔高度 300.6m, 属高耸构筑物, 对地基基础承载力和稳定性的要求很高。
- (2) 上部结构荷载巨大、作用点高, 基础的差异沉降将改变索塔的受力条件。
- (3) 桥区河床松软, 覆盖层深厚, 基桩属典型的摩擦桩, 河床冲淤条件对基桩的承载力和沉降影响较大。
- (4) 主塔墩群桩基础体积庞大, 基础内部河床冲刷形态和冲刷机理复杂, 对群桩基础稳定性影响较大。
- (5) 钢护筒参与基桩共同受力, 致使承台-桩-土的共同作用更趋复杂。
- (6) 由于索塔荷载巨大, 且各基桩所承担的荷载具有较大的不均匀性, 从而导致索塔承台始终处于不利的受力状态。

针对上述复杂的建设环境条件, 苏通大桥主塔墩采用了 113 根, 长 117m (北塔墩) / 114m (南塔墩)、直径为 2.8m/2.5m 的变径超长大直径钻孔灌注桩群桩基础, 成为当时世界最大的群桩基础。

根据工程前期的静载试验、离心模型试验、自平衡试验和数值模拟等相关研究^[2-10]的结果, 可以看出, 超长大直径钻孔灌注桩群桩基础的承载性能明显不同于普通的中长桩和短桩, 加之群桩基础存在突出的承台-桩-土相互作用和群桩效应问题, 致使其传力机理和沉降变形性状在荷载传递过程中变得更加复杂, 它涉及众多的因素, 包括群桩的几何特征(如桩长、桩径、桩距、基础宽度、长度等)、成桩工艺、地基土层分布及其工程地质特性、施工因素等。因此, 为了揭示超长大直径钻孔灌注桩的承载性能, 确保施工过程中群桩基础的安全与稳定, 安全监控技术已成为必然的需求和安全保障^[11-13]。

安全监控技术是利用当代先进的传感器感知技术, 充分捕捉反映基础施工和运营过程中的各种响应, 并对所获原型观测数据运用数学、力学的方法进行处理, 实时了解基础的工作性能, 发现不稳定因素, 对基础安全性做出及时评价, 同时利用原型观测资料进行反馈分析, 为发展和完善群桩基础设计理论提供科学的依据。

由于超大型深水群桩基础属高桩厚承台基础, 基础施工时, 基桩的中上部均需设置钢护筒, 而且为了提高基桩的水平向承载力, 钢护筒被保留下来与基桩共同作用。同时, 浇筑承台时又采用了钢套筒施工技术, 这就使得群桩基础的传力机理非常复杂。不仅如此, 复杂的环境因素对群桩基础的影响也非常明显。这些因素相互交织、共同作用, 致使群桩基础需要监测的不安全因素大幅增多。安全监控系统不仅需要监测桩身钢筋、桩身混凝土、钢护筒应力应变, 还要监测承台大体积混凝土的温度应力、沉降变形。同时, 对于潮位变化、环境温度、风荷载及河床冲淤等因素引起的结构响应也要进行监测。这种现状使得常规的监测系统已经无法满足其安全监测的要求。因此, 采用基于多传感器有机融合的广角度监控技术对不同的基桩、同一个基桩的不同高程以及承台的不同位置、不同剖面及其河床冲刷等进行多角度的全方位监测。

随着数据自动采集仪器的出现和普及, 实时在线监测已经在各类安全监控系统中得到广泛应用。然而, 就目前的科技发展水平而言, 原始监测数据还只能揭示事物的直观表象, 加之各类观测数据难免存在的误差、各类传感器也不可避免地受到各种环境因素的干扰, 因此, 欲深刻地揭示被测对象原因量与响应量之间的客观规律, 从繁多的监测资料中找出关键问题和异常征兆, 并对群桩基础的安全状况进行客观评判, 还必须在对各类监测

数据进行处理、提炼、概括和融合的基础上,建立“安全状况”与“监测数据”之间的关系,即安全监控模型。

1.2 超长直径群桩基础研究现状

1.2.1 桩基础的发展过程

桩基础是最古老的基础形式之一,在人类有历史记载以前就已被使用。不过,早期使用的只有木桩,而且经历了漫长的历史时期。19世纪中叶以后,随着钢、水泥等桩的材料以及混凝土和钢筋混凝土等成桩工艺方法的迅猛发展,钢桩、钢筋混凝土桩逐渐取代了木桩。而且,随着机械设备和施工工艺的不断改进,20世纪20年代后产生了名目繁多的桩型和工法。到20世纪40年代初期,随着大功率钻孔机具的研制成功,钻孔灌注桩首先在美国问世,并极大地推动了对桩基理论的研究工作^[14-17]。其发展经历了先实践后理论、再实践再理论的提高过程。然而面对被不断突破的工程规模及尺寸、不断刷新的群桩规模,其所面临的理论缺失和技术难题一直是岩土界研究的热点和难点。另外,钻孔灌注桩在实践过程中,以其施工低噪声、小震动、无挤土、投资少、施工风险小、施工工艺比较成熟、工期短、对河流水沙条件影响小(与沉井相比)、能穿越各种复杂地层和单桩承载力大及适应各种地质条件和不同规模建筑物等优点,在高层建筑物、各类桥梁、高耸构筑物等工程中得到广泛应用^[18-36]。表1.1统计了近年来在桥梁结构中桩基设计所采用的部分灌注桩的情况^[37]。

表 1.1 我国近年来部分长大灌注桩统计表

序号	桥 名	最大桩径/m	最大桩长/m	年份	桥 型
1	龙江特大桥	2.8	60	2016	钢箱梁悬索桥
2	铜陵长江公铁大桥	3.3	101	2015	公铁两用斜拉桥
3	福平铁路鼓屿门水道桥	4.5	41	2015	混凝土连续箱梁桥
4	椒江二桥	2.8	139	2014	双塔双索面斜拉桥
5	夏漳跨海大桥	3.0	111	2013	斜拉桥
6	黄河特大桥	1.8	90	2010	连续钢构梁桥
7	杭州湾跨海大桥	2.8	125	2008	跨海大桥
8	苏通长江大桥	2.8	117	2008	双塔双索面钢箱梁斜拉桥
9	东海大桥	2.5	110	2005	斜拉桥
10	江阴长江大桥	3.0	90	1999	钢箱梁悬索桥
11	铜陵长江大桥	2.8	100	1995	预应力混凝土斜拉桥

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所表现出来的承载性能也是千差万别。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-桩-土的共同作用、厚承台的优化设计等问题一直是岩土工程实践中亟待解决的问题。

1.2.2 超长直径单桩理论分析方法

目前,单桩的理论分析方法主要有弹性理论法、荷载传递法、剪切位移法、神经网络法以及有限元法等^[38]。

(1) 弹性理论法利用半无限弹性体中集中力下的解给出桩竖向变形,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。目前针对土的成层性,有学者将层状弹性体的分析理论引入到桩基础的分析中或者将弹性理论解与分层总和法相结合,以考虑成层土的情况。

(2) 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)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。目前建立的单桩荷载传递的弹塑性桩土体系的理论开发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。

(3) 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。目前,研究者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。也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。

(4) 单桩沉降预估的神经网络法借助已收集到的试桩资料,建立神经元网络模型。它把一组训练样本的输入输出问题变为一个非线性化问题,在其迭代运算求权值的全过程中使用了最优化分析中的梯度下降法。

(5) 有限单元法是目前普遍采用的一种数值方法。应用有限元有很多优点,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。也有可能研究导致破坏区的应力和变形的逐渐发展过程。众多学者为获得各工况下的桩基承载性能,只能借助有限元方法来模拟现场试验,得到了很多有意义的结论。

现场单桩静载荷试验直观,且与实际受力状态类似,其结论较为可靠。因此,在实际工程实践中,现场单桩静载荷试验仍被认为是最为可靠的办法。《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)对不同设计等级桩基的单桩极限承载力标准值的确定方法进行了规定,具体见表 1.2。

表 1.2 单桩竖向极限承载力标准值确定方法

设计等级	单桩竖向极限承载力标准值确定方法
甲级	通过单桩静载试验确定
乙级	地质条件简单时,可参照相同地质条件试桩资料,结合静力触探等原位测试或经验参数综合确定,其余由载荷试验确定
丙级	根据原位测试或经验参数确定

然而,静载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,国内有些单桩极限承载力已高达 120000kN 时,静载试验根本无法实现。

由此可以看出,超长大直径单桩的承载性能的研究水平还相当低,人们对其承载机理也不甚明确。因此,依据广角度监控系统中的实时数据开展对超长大直径单桩的承载机理和承载性能的反演分析研究是目前的主要途径。

1.2.3 超长大直径群桩理论分析方法

1. 群桩基础承载性能的分析方法

从现有的研究成果看,主要包括理论计算法、数值模拟法、模型试验法和原型监测法。

(1) 理论计算法。在很多情况下,群桩中各基桩的传力机理与单桩时迥然不同,群桩的承载力并不等于各单桩的总和,这就是群桩效应。影响群桩效应的主要因素有以下两点:一是群桩自身的几何特征,包括承台的设置方式(高承台或低承台)、桩距、桩长、桩长与承台宽度比、桩的排列形式、桩数;二是桩侧与桩端的土性、土层分布和成桩工艺(挤土或非挤土)。为了反映群桩效应,定义了群桩效率系数,即

$$\eta = \frac{\text{群桩中的基桩平均极限承载力}}{\text{单桩极限承载力}} \quad (1.1)$$

考虑群桩效应问题,目前群桩基础承载力计算方法主要有^[38]:以单桩极限承载力作为参数的群桩效率系数法;以土强度为参数的极限平衡理论计算法;以侧阻力、端阻力为参数的经验计算法和考虑承台-桩-土共同作用的分项群桩效应系数法。

以单桩极限承载力为已知参数,根据群桩效率系数计算群桩极限承载力,其群桩极限承载力计算公式为

$$P_u = \eta n Q_{uk} \quad (1.2)$$

式中 η ——群桩效率系数;

n ——群桩中的桩数;

Q_{uk} ——单桩极限承载力。

该方法的关键是要确定合理的群桩效率系数,而群桩效率系数的确定非常复杂,受到许多因素的影响。因此,实际的群桩效率往往跟计算的结果相差甚远,工程实际中已不再应用此法。

群桩侧阻力的破坏分为桩土整体破坏和非整体破坏两种。因此,极限平衡理论计算方法也分两种。对于小桩距($S_0 \leq 3d$, d 为桩直径)挤土型低承台群桩基础,其侧阻一般呈桩土整体破坏,即侧阻力的剪切破裂面发生于桩群、土形成的实体基础的外围侧表面。因此,群桩的极限承载力计算可视群桩为“等代墩基”或实体深基。对于非挤土型群桩基础,其侧阻多呈各桩单独破坏,即侧阻力的剪切破裂面发生于各基桩的桩土界面或近桩表面的土体中。这种侧阻非整体破坏模式还可能发生于饱和土中不同桩距的挤土型高承台桩。

以土强度为参数的极限平衡理论方法,以侧阻力、端阻力为参数的经验计算法也分两种。该方法同上一种方法类似,只是侧阻力和端阻力取值采用单桩原型试验法、土的原位测试法、经验法等确定。

(2) 数值模拟法。数值模拟法是随着计算机技术的不断发展而逐步发展起来的一种仿真算法。常用的数值模拟法有有限单元法、有限差分法、边界单元法。其中,有限单元法由于理论基础明确,且在计算中能够同时考虑桩基诸多因素,如群桩效应、非线性变形、桩土接触效应等而得到广泛应用。最早利用有限单元法分析群桩问题的是 R. D. Ellison^[39]。随后,许多研究者都运用有限单元法对群桩基础的传力机理和承载性能进行了研究^[40-49],并取得了丰硕的成果。

数值模拟法从理论上讲是最严格有效的方法,可以考虑各种复杂因素对桩基础沉降的影响,但由于计算参数较多,三维计算要求内存大,计算时间长,其使用范围受到影响。不过作为探索和校核实用简化方法的工具,有限单元法仍有着重要的实际意义。

(3) 模型试验法。模型试验法是将原型结构按一定的比例缩小,并通过试验得到与模型力学性能相关的测试数据,再根据相似原理,由模型试验结果推断原型结构性能的一种方法。模型试验相比于现场试验来说,试验所需的人力、物力较少,且周期较短,是研究群桩基础承载特性、揭示其演变规律的一种较好方法。多年来,应用该方法来研究群桩基础的成果也比较多。例如,1964年,中国建筑科学研究院地基研究所在黄浦江边亚黏土冲积层中做了大比例尺打入桩群模型试验,对群桩的承载力和变形特性进行了研究;20世纪70年代末,山东黄河河务局在黄河边的间有亚黏土夹砂的粉土冲积层中进行了大比例尺钻孔桩群的试验研究,包括桩群28组、双桩23组、单桩23根,得到一些颇有价值的结论,并为以后的类似工程设计提供了数据依据^[50];20世纪80年代初,中国建筑科学研究院在山东济南市进行了粉土中的钻孔群桩工作性能试验研究,取得了高水平的研究成果^[51];1997年,徐建忠^[52]所做的3种入桩顺序对饱和土群桩承载特性影响的试验,表明刚性低承台下各桩分担的荷载不仅与位置有关,而且与入桩顺序有关;王年香^[53]通过18根和64根群桩的离心模型试验,获得了荷载-沉降关系曲线、桩身轴力分布规律,研究了在竖向荷载作用下超大型深水群桩基础的承载变形特性;施峰^[54]通过对11根大直径超长钻孔桩的静荷载试验,对大直径超长桩的受力特性和荷载传递机理及侧阻力、端阻力的变化规律进行了研究,分析了施工工艺、嵌岩深度、桩端高压注浆等因素对大直径超长桩承载力的影响,给出了桩周土层的分层极限侧阻力和极限桩端阻力,为相同地质条件的桩基设计提供可靠的依据。乔京生等^[55]利用国内最大型的三维模拟试验台进行了3组模型试验,研究了群桩与单桩复合地基在应力场、位移场等方面的不同。试验结果可为进一步理论研究和工程设计提供有益参考。张建新等^[56]基于静压模型试验,运用扫描电镜获取的压桩前后土样的微观结构照片对沉桩挤土效应进行了微观结构分析,从而得到压桩前后土体的微观结构变化规律,但该结论只是一种理论研究,还有待于实际工程的检验。

除了室内模型试验,针对超大群桩基础,现场原位测试也成为目前不可缺少的试验方法。马海龙等^[57]通过现场足尺试验,研究了软土中水泥土群桩的承载力特性。针对单桩、四桩、九桩复合地基情况,分别测试了承台土反力、桩身轴力及复合地基变形等参数,并根据原位测试结果,定量分析了桩长、桩间距、桩数等对水泥土群桩复合地基承载力特性的影响。钱锐等^[58]通过试验资料,对深厚软土中的超长嵌岩钻孔灌注桩的工作性能进行了研究,对荷载-沉降曲线、桩侧摩阻力、桩端阻力进行了较为详细的分析和研究。龚维

明、董武忠、王盛等^[59-61]利用自平衡试验对超长直径钻孔灌注桩的承载特性进行了研究分析,克服了常规静载试验在恶劣环境下无法实施的困难,获得了良好的效果。

(4) 原型监测法。原型监测法是通过埋设在群桩基础中的传感器获得的基桩轴力、沉降、位移等相关数据对基础的承载特性、群桩效应、桩-土共同作用等问题进行深入分析和研究,同时还是指导施工、反馈设计的重要依据。Ealy 等^[62] (1985) 利用原型监测方法对多座大桥群桩基础在负荷及异常荷载条件下的荷载传递机理和沉降特性进行了研究,得到了较好的结论。Jardine 等^[63] (1989) 通过 Hutton 张力腿平台基础特性监控系统所获得的高质量数据分析了群桩基础轴向荷载-沉降与弯矩转角的关系。Klar 等^[64] (2006) 采用 BOTDR 技术,针对荷载传递函数的建立及研究对象附近隧道开挖引起的桩土接触应力变化问题,开展了原型监测研究,并与其他应力监测方法的对比,证明了该方法的经济、有效。1975—1979 年,南京水利科学研究所、上海工业建筑设计院对软土上大型筒仓群桩基础进行了从施工到正常运转的原位观测^[50]; 1996 年,朱腾明等^[65]通过对某工程桩间土承担荷载的监测与分析,揭示了在群桩基础的实际工作状态中,桩间土承担一定份额的荷载,在设计中应当予以考虑。2002 年,陈志坚等^[66]对江阴大桥群桩基础进行了安全监控,实测资料表明,该基础能确保将 $1.2 \times 10^6 \text{ kN}$ 的垂向荷载传递至地表以下 26m 的地基岩体中,桩基嵌岩后其承担的荷载能够很快地扩散到桩周岩体中;贺武斌等^[67]进行了与工程实际相符合的现场群桩试验,通过安设的测试仪器对承台下土的反力、桩侧摩阻力、桩端阻力等进行了测定,根据监测数据分析了基桩的桩侧摩阻力和桩端阻力特性,总结了此群桩基础的荷载传递规律。2008 年,卢波^[68]依托新疆伊犁河大桥,对大桥施工阶段群桩承载性状做了现场监测,并用 ANSYS 对承台-群桩-土体共同作用进行三维弹塑性有限元分析,数值模拟所得群桩中各单桩桩顶和桩底反力与现场监测结果较一致。同时,在用静载试验和现场监测成果验证数值分析正确性的情况下,用数值分析对群桩在各荷载工况下的单桩反力分布情况、承载变形曲线做出深入分析和研究。

2. 群桩基础沉降计算方法

目前沉降计算方法主要包括等代墩基法、弹性理论法、有限元法、荷载传递法、剪切位移法和混合法等^[38]。这几种方法可以认为是桩基础沉降理论分阶段发展的产物。

(1) 等代墩基法。在工程实践中,等代墩基法是目前国内外计算群桩基础沉降应用最广泛的一种简化方法,《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)采用的就是这种计算模式。适合条件为:桩距不大于 6 倍桩径的群桩基础在工作荷载下的沉降计算。等代墩基法又称为实体深基础法,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。地基中附加应力可近似按 Boussinesq 解计算,该方法考虑的弹性半无限空间体表面上作用一个集中力的情况,但是与实体深基础的荷载作用于半无限空间体内部的情况不同。工程实践表明,用 Boussinesq 解作群桩沉降分析得出的结果偏大;为了提高地基土层附加应力的计算精度,近年来国内外根据弹性半无限空间体内集中力的 Mindlin 公式发展了一些计算桩基荷载作用下地基土层附加应力的方法。Mindlin 解计算沉降分为两种:一种是 Poulos 提出的相互作用因子法;另一种是 Geddes 对 Mindlin 公式积分而导出集中

力作用于弹性半空间内部的应力解,按叠加原理,求得群桩桩端平面下各单桩附加应力和,按分层总和法计算群桩沉降。

上述方法存在以下缺陷:①实体深基础法,其附加应力按 Boussinesq 解计算与实际不符(计算应力偏大),且实体深基础模型不能反映桩的长径比、距径比等的影响;②相互作用因子法不能反映压缩层范围内土的成层性;③Geddes 应力叠加-分层总和法对于大桩群不能手算,且要求假定侧阻力分布,并给出桩端荷载分担比。针对以上问题,规范给出了等效作用分层总和法。

(2) 弹性理论法。Polous 和 Davis 首次系统地提出了根据 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^[69,70]。后来这种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,又可分为以下几种具体应用方法,即叠加法、相互影响系数法、沉降比法。相互影响系数法和沉降比法精度要比叠加法低。此外,这两种方法都未考虑桩底压缩土的成层性,对于桩底以下有软弱层时不宜采用。

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太合适。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) 有限单元法。Ellison^[71]最早利用有限单元法分析桩基问题。梁义聪等^[72]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^[73]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,并与二维有限元进行比较,结果表明,在一定范围内二维计算方法所反映的变化规律及趋势是正确的。

有限单元法是最严格有效的方法,可以考虑各种复杂因素对桩基础沉降的影响,但由于计算参数多、计算时间长,其使用范围受到影响。

(4) 混合法。由于桩在承受轴向荷载时,桩周土体只在附近的近场高应变区产生非线性位移,群桩间的大部分土体均处于应变水平很低的远场范围内,可以认为只产生弹性反应。混合法正是基于该规律因而被提出。该法采用荷载传递函数法模拟群桩中每一单桩的非线性行为,采用 Mindlin 解、有限单元法等来考虑桩-土-承台的相互弹性作用,较好地考虑土的成层性和非线性性状以及桩-土-承台的相互作用,成为目前最常用的群桩沉降非线性计算分析方法。但该法面临的最大问题是:用 Mindlin 解分析群桩相互作用时,各桩与承台每一单元的相互作用都要积分计算,因而当桩数增多时,会出现计算机内存不足以及运行时间较长等缺点。目前已有研究者提出了近似混合法,通过构造单桩的一曲线插值函数,采用相互作用系数考虑群桩之间的弹性影响,避免了因各桩离散成许多单元而导致土体柔度矩阵集成的费时,从而可进行多桩数群桩的非线性计算,而不受微机内存和运算速度的限制。该法计算结果与混合法非常吻合^[74]。

1.3 安全监控技术研究现状

自 20 世纪 60 年代初在大坝工程上得到应用以来,安全监控技术在岩土工程、桥梁工

程及建筑工程等方面取得了显著成绩和进展。主要表现在：①监控系统硬件设施的不断更新和发展；②传感器优化方法的改进和应用；③数据处理及分析方法的应用及发展。

1.3.1 传感器系统

传感器系统由各种传感器组成，传感器是用来测量结构物理特征及其周围环境参数的重要仪器，传感器系统则负责将荷载作用以及结构响应的物理量转化为可供采集的光、电信号。传感器系统的设计与发展不仅制约着安全监控的内容，而且直接决定监控系统的可靠性和准确性；同时由于传感器系统所处的工作环境复杂，传感器的使用寿命也决定了整个系统的使用寿命。因此，要实时、准确监测结构的应力、应变情况，采用方便、可靠和耐久的传感器非常重要。目前，变形监测包括表面位移观测和内部位移观测，前者主要采用高精度水准仪、全站仪和测缝计，而后者则采用应变计、多点位移计、测斜仪等。Chen 等^[75]在 Hongcaofang 桥采用激光挠度仪实现了计算机自动采集和动态测量。但对测量的精度文献中没有述及。随着高精度微压传感器技术、光电式静力水准技术和剖面沉降观测技术的研究和应用^[76,77]，大大提高了基础变形监测的精度。当将上述观测技术用于深水群桩基础沉降监测时，微压传感器作为水位传感器使用，将根据观测值直接计算出的压力差转化为高程差，从而得出各测点沉降值。美国 Geokon 公司生产的 GK-4580 型振弦式微压传感器，可以测量出 0.2mm 的高程变化；剖面沉降观测技术可在桥梁承台中预埋剖面沉降管（包括纵桥向和横桥向），采用移动式高精度剖面沉降仪进行定期人工观测，观测时间灵活，观测点间距可根据需要确定，最小测点间距可采用 20cm，可获得超大型群桩基础沉降的平面分布规律（或承台的挠曲变形）；静力水准观测技术是在超大型承台顶面定点布置由多个静力水准仪构成的静力水准观测系统，各静力水准仪之间通过连通管建立水力联系和大气连通，利用液面平衡原理实现各静力水准点之间的差异沉降观测，特别适合那些要求高精度监测垂直位移的场合，可以监测到 0.03mm 的高程变化。应力监测主要采用电阻应变片传感器、振弦式传感器、差动式传感器以及光纤光栅应变计等。其中电阻式应变计利用应变片的电阻变化与被测结构物的应变成正比的原理来测量应变，其灵敏性好，测量精度高。深圳湾大桥采用电阻式应变计进行了全桥应变采集^[78]，但由于电阻应变片传感器的零漂、接触电阻变化以及温漂等给系统带来一定误差，且使用不便、耐久性差，所以，只能用于短暂的荷载增量下的应力测试。一般仅用于辅助应力测试与校核，但它可做动态观测；振弦式应变计利用被测结构物的应变与振弦频率之间的关系，具有良好的稳定性，自然具有应变累计功能，抗干扰能力较强，数据采集方便。故适合于现场情况复杂、连续时间较长且量测过程始终要以初始零点作为起点的应力监测，是目前使用最广泛的一种传感器。但由于振弦式应变计的尺寸不能做得很小，对应力梯度大的部位难以测出某一点的应变，因此，只能做静态观测或者应变变化较慢的长期监测；光纤光栅应变计埋入或粘贴在测点处，当光纤承受应力时，光纤光栅反射波长发生变化，通过测量反射波长就可获得应力值。光纤光栅传感器对环境干扰不敏感、输出线性范围宽、测量的分辨率高，同时光纤光栅应变计质量轻、传输信息量大、无电磁干扰、易于分布埋入结构和构成网络；但光纤光栅应变计由于其特殊结构埋入式易造成损伤成活率不高，无法集成温度测量，需单独布置温度传感器进行补偿，并且光纤光栅传感采集系统自成体系，目前技术无法与其他类型传感器集成统一采集。虽然光纤光栅传感技术已应用在桥梁等重大土

木工程的监测中^[79]，但对于现场情况复杂时，此类传感器的应用会受到限制。差动式传感器长期稳定性好，且能把应变和温度测量统一起来。但价格比较昂贵，在国外结构测量中应用广泛，而我国只在大坝结构中使用较多，在桥梁结构方面使用还很少。但王卫峰等^[80]在崖门大桥施工监控中采用了差动式应变传感器，为此类传感器的推广提供了有益的经验。

为了使应力监测更加准确合理，一些桥梁安全监控系统将几种类型传感器结合使用。例如，香港青马大桥使用电阻应变计和光纤光栅应变计联合进行应变和结构温度采集，苏通大桥同时使用振弦应变计和光纤光栅应变计进行全桥应变采集，应变测点通常布设于结构控制截面，控制截面可根据结构分析进行选择，静力测点通常布设在结构分析中应力最大的控制截面的上下缘，动力应变测点常布设于上缘应力最大截面的上缘。

1.3.2 传感器优化布设方法

对于大型桥梁群桩基础，由于几何尺寸大以及桩数多、施工风险大、群桩效应显著，在安全监控中传感器布设得越多，得到的局部响应信息就越丰富，从而更有利于分析群桩基础的真实工作性态。但传感器和数据处理设备比较昂贵，因此从经济和实际的角度考虑，如何布设有限个传感器以获取尽可能多的信息，是大型桥梁地基基础监控系统设计的关键技术之一。

通过尽可能少的传感器来获取最可靠、最全面的结构信息是传感器优化布设的目的。在这方面已经有许多人做了有效的研究工作，给出了各种不同的传感器优化布置数学模型^[81]。传感器优化布设模型的建立方法有很多，如模态动能法^[82]，这种方法通过挑选振幅较大的点或者模态动能较大的点，但与有限元网格划分的大小有很大的关系。在这种方法的基础上同时还衍生了许多方法，如通过计算所有待测模态的各可能测点的平均动能，选择其中较大者的平均模态动能法；通过计算有限元分析的模态振型在可能测点的乘积，选择其中较大者的特征向量乘积法等。

到目前为止，应用最广泛的一种方法是有效独立法^[83]。它从所有可能测点出发，利用复模态矩阵的幂等型，计算有效独立向量，并按照目标模态矩阵独立性排序，删除对其秩贡献最小的自由度，从而优化 Fisher 信息阵，且使得感兴趣的模态向量尽可能保持线性无关。还有一种常用的方法就是 Guyan 模型缩减法。这种方法可以较好地保留低阶模态，但不一定代表待测模态，有人基于上述限制分别提出改进缩减系统^[84]和连续接近缩减方法^[85]。

基于遗传算法的优化方法近年来也得到了很好的发展^[86-88]。这种方法采用可控性和客观性指数来获得所有控制模态的累积性能值，以这些指数为优化指标，使控制器和结构之间有最大的能量传递，而且根据控制律使剩余模态的影响最小。清华大学土木系在香港青马大桥的健康监控系统中利用遗传算法寻找加速度传感器的最优布置，把其中测取的变形能作为遗传进化的适应值 (Fitness)，实际上是使测点远离各阵型节点^[89]。此外，传感器布置的最佳数量在可视性、鲁棒性及抗噪性等方面也相当重要^[90]。

然而，现有的研究成果主要应用于大型桥梁上部结构的传感器最优布点。对于大型桥梁地基基础监测点的优化布置只有个别文献进行了研究，如 2002 年，冯兆祥^[91]首次将突破口理论和敏感性分析应用于大型桥梁地基基础监测区域和测点的优化设计，完善了其监