



Fuzadizhitiaojianxia  
qiaoliangzhuangji  
chengzaixingzhuangyanjiu

# 复杂地质条件下 桥梁桩基承载性状研究

李 晋 李君强 纪 续 袁 凯 王守斌 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 复杂地质条件下桥梁桩基承载性状研究

李 晋 李君强 纪 续 袁 凯 王守斌 著



浙江工业大学图书馆



72138702



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

## 内 容 提 要

本书是编者在总结多年来从事桥梁桩基科研和工程实践的基础上,结合国内外桥梁桩基研究的最新成果,通过现场测试和模型试验研究,利用数值仿真技术,并结合理论推导,对海洋环境、湿陷性黄土地基等复杂环境下桥梁桩基承载特性进行了系统分析、总结。全书共 12 章,主要包括:特殊地质条件下桥梁桩基应用现状、桩—土理论与试验研究进展、湿陷性黄土地基桩基研究进展、浸水黄土地基大型桥梁桩基现场静载试验、沉陷地基桩长确定理论、海上桩基研究与应用现状、跨海桥梁的受力环境、跨海桥梁荷载组合分析、海上钢管桩承载特性数值仿真、海上钢管桩模型试验研究、海上钢管桩现场静载试验、总结与展望等。

本书可供桩基工程设计与施工人员、土木工程专业师生及科研人员参考使用。

## 图书在版编目(C I P)数据

复杂地质条件下桥梁桩基承载性状研究 / 李晋等著  
— 北京:中国水利水电出版社, 2015. 1  
ISBN 978-7-5170-2823-9

I. ①复… II. ①李… III. ①桥梁基础—桩基础—桩  
承载力—研究 IV. ①U443. 15

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第000612号

策划编辑:雷顺加 责任编辑:陈洁 加工编辑:谌艳艳 封面设计:李佳

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 复杂地质条件下桥梁桩基承载性状研究                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 作 者  | 李 晋 李君强 纪 续 袁 凯 王守斌 著                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038)<br>网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a><br>E-mail: <a href="mailto:mchannel@263.net">mchannel@263.net</a> (万水)<br><a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a><br>电话: (010) 68367658 (发行部)、82562819 (万水)<br>北京科水图书销售中心(零售)<br>电话: (010) 88383994、63202643、68545874<br>全国各地新华书店和相关出版物销售网点 |
| 经 售  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 排 版  | 北京万水电子信息有限公司                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 印 刷  | 三河市天润建兴印务有限公司                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 规 格  | 184mm×260mm 16 开本 9.75 印张 251 千字                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 版 次  | 2015 年 4 月第 1 版 2015 年 4 月第 1 次印刷                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 印 数  | 0001—3000 册                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 定 价  | 35.00 元                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

我国地域辽阔,从内陆到沿海,由平原到山区,分布着多种多样的土类,由于不同的地理环境、气候条件、地质成因、物质成分和次生变化等原因,不同地质条件下的桥梁桩基承载性状也大相径庭。桩基础与周围岩、土体之间的相互影响十分复杂,当桥梁等构筑物坐落于复杂地质环境下,会使桩基的设计计算与施工技术大大复杂化。随着我国交通基础建设的大发展,当代桥梁建设在东部向海上发展,西部向黄土高原延伸,这些正在建设或者筹划中的桥梁基础建设带动了桩基工程的发展,同时也带来了一系列新的技术难题。

我国黄土分布广,厚度大,其中湿陷性黄土的分布面积约占 60%。对黄土特有的工程特性,特别是湿陷性考虑不足,导致的工程病害屡见不鲜。交通部桥梁桩基方面的规范由于颁布时间过长,很多内容已不适用于指导当前桥梁基础的设计;对于在湿陷性黄土地基的桩基设计,规范给出的只是半经验性的、粗略的定性规定,对于湿陷性黄土地基下桩基的诸多理论问题都还未能给出令人满意的解答,这些问题都严重制约着桥梁桩基的建设和发展。

超大跨江、跨海大桥将在我国未来的政治、经济和交通枢纽中占有重要地位,仅我国当前已建和要建的跨海桥梁已经近 10 座,且每座跨海大桥的工程造价都在几十亿甚至上百亿元。然而目前海洋环境下桥梁基础的理论研究很少,海上桥梁桩基设计多套用跨河桥梁基础的经验。在跨海桥梁基础设计中,采用以前的荷载组合设计的传统结构形式是否合理?规范规定的计算方法是否还适合?海洋环境下桩基的受力特性如何等一系列问题都还没有很好的研究和解决。

复杂地质环境包罗众多,本书仅是围绕以上两个专题研究成果的总结,特别是海洋环境下桥梁基础的研究还处于起步阶段,理论研究严重滞后于工程实践,至今尚无较为完整与系统的设计理论。因此,无论从科研还是从工程应用的角度,本专著的出版都是必要的,以期能抛砖引玉,推动该问题的研究。

本书研究内容,分别得到了国家自然科学基金项目:“湿陷性黄土地基桥梁群桩负摩阻力效应及有效承载力研究(51108255)”、山东省交通运输厅科技项目:“复杂应力条件下高墩桥梁基础受力特性及结构优化研究(2010Y25-1)”和“青岛跨海大桥施工临时钢管桩基础承载力研究(2010Y10-2)”等的系列资助。

在课题研究期间,长安大学谢永利教授在百忙之中多次给予指导和鼓励,在此表示感谢。在现场试验和模型试验中,得到了山东路桥集团有限公司胶州湾大桥工程项目部,济南金日公路工程有限公司的大力支持,研究生张起、陈杰、韩涛等参与了资料整理、模型试验和数值仿真工作,在此一并表示感谢。

由于时间和作者水平有限,书中难免有错误和不当之处,敬请广大读者批评、指正。

编 者  
2015 年 1 月

# 目 录

## 前言

## 第1章 特殊地质条件下桥梁桩基应用现状 ..... 1

### 1.1 桩基础发展历程 ..... 1

### 1.2 桥梁桩基应用现状 ..... 2

### 1.3 发展与挑战 ..... 7

#### 1.3.1 桥梁桩基发展趋势 ..... 7

#### 1.3.2 桥梁桩基面临的挑战 ..... 9

## 第2章 桩—土理论与试验研究进展 ..... 10

### 2.1 理论研究进展 ..... 10

### 2.2 试验研究进展 ..... 15

### 2.3 数值仿真二次开发技术 ..... 18

#### 2.3.1 基本功能 ..... 19

#### 2.3.2 MARC 用户子程序研发 ..... 19

#### 2.3.3 自定义单元类型子程序

##### SUBROUTINE USELEM ..... 19

#### 2.3.4 土体初始应力子程序

##### SUBROUTINE UINSTR ..... 20

#### 2.3.5 接触面单元 ..... 20

## 第3章 湿陷性黄土地基桩基研究进展 ..... 27

### 3.1 黄土的工程特性 ..... 27

### 3.2 研究意义 ..... 27

### 3.3 国内外研究进展 ..... 28

## 第4章 浸水黄土地基大型桥梁桩基现场

### 静载试验 ..... 31

### 4.1 工程概况 ..... 31

#### 4.1.1 工程简介 ..... 31

#### 4.1.2 地质概况 ..... 31

#### 4.1.3 试验概况 ..... 31

#### 4.1.4 试验研究目的 ..... 31

#### 4.1.5 试验研究内容 ..... 32

#### 4.1.6 试验研究思路 ..... 32

### 4.2 现场试验方案 ..... 32

#### 4.2.1 试桩设计 ..... 32

#### 4.2.2 测试元件布设 ..... 32

#### 4.2.3 锚桩设计 ..... 35

### 4.3 加载系统设计 ..... 35

#### 4.3.1 反力梁设计 ..... 35

#### 4.3.2 反力梁的加工 ..... 36

#### 4.3.3 加载系统安装 ..... 36

### 4.4 试验加载与测试 ..... 38

#### 4.4.1 测试内容 ..... 38

#### 4.4.2 加、卸载方法 ..... 38

### 4.5 浸水试验设计 ..... 38

#### 4.5.1 浸水范围 ..... 38

#### 4.5.2 注水孔设计参数 ..... 39

#### 4.5.3 测点布设 ..... 39

#### 4.5.4 测试设计 ..... 40

#### 4.5.5 浸水试验保温措施 ..... 40

### 4.6 试验成果分析 ..... 41

#### 4.6.1 试验成果 ..... 41

#### 4.6.2 桩浸水后的承载特性 ..... 51

#### 4.6.3 桩的承载力性状 ..... 51

#### 4.6.4 桩身轴力及桩端阻力发挥性状 ..... 52

#### 4.6.5 桩的侧阻力发挥性状 ..... 53

### 4.7 主要结论 ..... 54

## 第5章 沉陷地基桩长确定理论 ..... 56

### 5.1 可靠性论证 ..... 56

#### 5.1.1 模型验证 ..... 56

#### 5.1.2 分析方法 ..... 57

### 5.2 仿真计算 ..... 58

#### 5.2.1 选取计算参数 ..... 58

#### 5.2.2 合理桩长计算 ..... 58

### 5.3 成果分析 ..... 64

#### 5.3.1 湿陷系数 $\delta_s$ 对中性点的影响 ..... 64

#### 5.3.2 湿陷系数对 $P_1/P_0$ 的影响 ..... 65

#### 5.3.3 桩径对 $P_1/P_0$ 的影响 ..... 65

#### 5.3.4 桩长对 $P_1/P_0$ 的影响 ..... 66

|                                   |    |                         |     |
|-----------------------------------|----|-------------------------|-----|
| 5.3.5 $\Delta L$ 与 $h_0$ 的关系及影响因素 | 67 | 8.4.1 国内冰荷载计算方法         | 99  |
| 5.4 理论计算分析                        | 68 | 8.4.2 国外冰荷载计算方法         | 100 |
| 5.4.1 力学模型的建立                     | 68 | 8.5 主要结论                | 101 |
| 5.4.2 计算公式的推导                     | 68 | 第9章 海上钢管桩承载特性数值仿真       | 102 |
| 5.4.3 分析                          | 72 | 9.1 数值仿真软件              | 102 |
| 5.5 工程应用                          | 75 | 9.2 土体本构模型              | 102 |
| 5.5.1 工程概况                        | 75 | 9.2.1 屈服面               | 103 |
| 5.5.2 对比分析                        | 75 | 9.2.2 塑性势面              | 103 |
| 5.6 主要结论                          | 76 | 9.3 ABAQUS 钢管桩三维数值仿真计算  | 104 |
| 第6章 海上桩基研究与应用现状                   | 77 | 9.3.1 数值仿真模型的确定         | 104 |
| 6.1 问题的提出                         | 77 | 9.3.2 模型参数              | 104 |
| 6.2 国内外研究现状                       | 77 | 9.3.3 模型建立              | 105 |
| 6.2.1 竖向荷载                        | 78 | 9.3.4 地应力平衡             | 107 |
| 6.2.2 水平荷载                        | 78 | 9.4 ABAQUS 模型仿真结果分析     | 108 |
| 6.3 工程应用现状                        | 82 | 9.4.1 钢管桩群桩基础竖向位移分析     | 108 |
| 第7章 跨海桥梁的受力环境                     | 85 | 9.4.2 钢管桩群桩基础水平承载特性分析   | 110 |
| 7.1 中国海洋概况                        | 85 | 9.4.3 钢管桩群桩基础剪刀撑和横梁应力分析 | 114 |
| 7.2 中国近海地质地形                      | 85 | 9.4.4 深水区钢管桩基础水平承载特性分析  | 117 |
| 7.2.1 中国近海的地形                     | 85 | 9.5 主要结论                | 121 |
| 7.2.2 中国近海沉积物分布特点                 | 86 | 第10章 海上钢管桩模型试验研究        | 122 |
| 7.3 风                             | 87 | 10.1 试验目的               | 122 |
| 7.4 潮汐                            | 89 | 10.2 相似判据的确定            | 122 |
| 7.4.1 我国沿海潮差                      | 89 | 10.2.1 相似判据的推导          | 123 |
| 7.4.2 我国近海潮流                      | 89 | 10.2.2 模型设计             | 125 |
| 7.4.3 大洋环流                        | 90 | 10.2.3 试验方案             | 125 |
| 7.5 波浪                            | 90 | 10.2.4 变形监测方案           | 127 |
| 7.5.1 波浪参数                        | 90 | 10.3 两种监测方法结果分析         | 129 |
| 7.5.2 我国近海波高                      | 91 | 10.3.1 三维激光扫描测量结果分析     | 129 |
| 7.5.3 海啸                          | 91 | 10.3.2 千分表测量结果分析        | 132 |
| 7.6 海冰                            | 92 | 10.3.3 两种方法监测数据比较       | 133 |
| 第8章 跨海桥梁荷载组合分析                    | 93 | 10.4 水平往复荷载试验结果分析       | 134 |
| 8.1 汽车制动力                         | 93 | 10.5 主要结论               | 136 |
| 8.2 波浪荷载                          | 93 | 第11章 海上钢管桩现场静载试验        | 137 |
| 8.2.1 规范计算方法                      | 93 | 11.1 试验背景               | 137 |
| 8.2.2 改进方法                        | 94 | 11.2 第一次试桩              | 137 |
| 8.3 风荷载                           | 95 | 11.2.1 试验设计             | 137 |
| 8.3.1 横向风荷载                       | 95 |                         |     |
| 8.3.2 顺桥向风荷载                      | 98 |                         |     |
| 8.4 冰荷载                           | 99 |                         |     |

|        |                             |     |        |                             |     |
|--------|-----------------------------|-----|--------|-----------------------------|-----|
| 11.2.2 | 试验准备 .....                  | 137 | 11.3.3 | 根据地质图计算第二次试桩的<br>极限荷载 ..... | 141 |
| 11.2.3 | 根据地质图计算第一次试桩的<br>极限荷载 ..... | 138 | 11.3.4 | 第二次试桩试验结果 .....             | 142 |
| 11.2.4 | 第一次试桩试验结果 .....             | 139 | 11.3.5 | 第二次试桩单桩承载力理论计算 .....        | 142 |
| 11.2.5 | 第一次试桩单桩承载力理论<br>计算 .....    | 140 | 11.4   | 主要结论 .....                  | 143 |
| 11.3   | 第二次试桩 .....                 | 140 | 第 12 章 | 总结与展望 .....                 | 144 |
| 11.3.1 | 试验目的及内容 .....               | 140 | 12.1   | 本书主要成果 .....                | 144 |
| 11.3.2 | 试验设计 .....                  | 140 | 12.2   | 今后工作的展望 .....               | 145 |
|        |                             |     | 参考文献   | .....                       | 146 |

# 第 1 章 特殊地质条件下桥梁桩基应用现状

## 1.1 桩基础发展历程

桩基础是最古老的基础形式之一，最早在有文字记载以前，人类就懂得在地基条件不良的河谷和洪积地带采用木桩来支撑结构物，如 20 世纪 30 年代建造的上海最高建筑——上海国际饭店采用的仍然是木桩基础，而桩基础在桥梁方面的应用，据《水经注》记载，公元前 532 年，在今山西汾水上建成的三十墩柱木柱桥梁，即为桩柱式桥墩。而中国汉代古霸桥等对桩基础的应用，则是对桩基础的推广。

1893 年，人工挖孔桩在美国问世，当时美国芝加哥、底特律等大城市由于土地紧张，建筑物层数不断增加，而某些高强轻质材料相继开始生产，为高层建筑设计施工创造了条件。但这些城市地表以下存在着厚度很大的软土或中等强度的粘土，建造高层建筑仍沿用当时通用的摩擦桩，必然会产生很大的沉降。于是工程师开始考虑使桩穿越软弱土层，把桩端设在很深的持力层上，并且为满足承载力的要求，桩身横截面的设计也增大，这样的桩不可能用木桩制作。即使用钢管、型钢或钢筋混凝土预制桩，但依靠当时的打桩设备也难以打至所需要的深度，于是，借鉴人类相传的掘井技术，人工挖孔桩在这一历史背景下试验成功，解决了工程中的难题。这种桩因其施工工艺简单，且不需特殊机械，不久便不胫而走，被美国各大城市及世界各地的工程界所采用。50 年后，即 20 世纪 40 年代，大功率钻孔机具的研制成功，使钻孔灌注桩在美国问世，之后，南美委内瑞拉某高速公路的桥梁工程马拉开波法特大桥的基础施工中，首次用旋转钻浇筑混凝土桩。此后，钻孔灌注桩技术在日本、英国乃至在世界范围内出现了蓬勃发展的局面，其用量逐年上升，居高不下。

我国桩基础的发展是在 20 世纪 50 年代，当时多采用木桩基础，虽然钢筋混凝土桩和钢桩也有应用，但数量较少，桩的制造工艺和施工质量均不高，如 20 世纪 30 年代建造的钱塘江大桥就曾采用木桩和钢筋混凝土桩基础。50 年代以后，木桩逐渐被钢筋混凝土桩和预应力混凝土桩所代替，工程中开始普遍采用普通钢筋混凝土预制管桩和方桩基础，如武汉长江大桥、余姚江大桥、奉化江大桥、南京长江大桥及潼关黄河大桥等。由于普通钢筋混凝土管桩的抗裂能力不高，尤其在沉桩过程中，桩身防止横向裂缝的能力较差，1966 年丰台桥梁厂开始研制先张法预应力离心混凝土管桩，并于 1970 年正式投入成批生产。

我国自 1955 年在武汉长江大桥和南京长江大桥先后以管桩钻桩下到基岩持力层后再浇筑混凝土。上世纪 60 年代初，在河南省安阳冯宿河大桥的修建中首先成功地应用了人工冲击钻和回转钻成孔的钻孔灌注桩基础，接着在河南竹杆河和白河两座大桥扩大应用，并在国内其他一些省、市地相继推广。1965 年交通部在河南省南阳市召开了钻孔桩技术鉴定会，认为它是一项重大的技术革新，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。因钻孔灌注桩具有工艺简单、承载力大、适用性强等突出的优越性，很快被公路工程技术人员认同并接受，成为公路桥梁基础的首选形式。桩基技术的发展历史简要概括如表 1-1 所示。

表 1-1 桩基技术发展历史

| 阶段   | 年代              | 主要桩型                                           | 特    点                                                                                                                                                              |
|------|-----------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 初期阶段 | 人类有历史纪录以前至19世纪  | 木桩<br>石灰桩                                      | 1. 由天然材料做成，桩身较短，桩径小<br>2. 采用竖直桩，主要用于传递结构的竖向荷载<br>3. 多设置于地质条件不利的河谷及洪积地带<br>4. 采用简单的人工锤击下沉的施工方法                                                                       |
| 发展阶段 | 19世纪中叶至20世纪20年代 | 除天然材料制成的桩外，主要是混凝土桩和钢筋混凝土桩                      | 1. 桩型较少，打桩机械沉桩的施工方法开始使用<br>2. 土力学理论的建立为桩技术的发展奠定了理论基础<br>3. 桩的设计理论和施工技术比较简单，处于初级发展阶段<br>4. 桩的尺寸有所增大，直径约30cm，桩长900~1500cm                                             |
| 现代阶段 | 第二次世界大战后至今      | 除钢筋混凝土桩外发展了一系列的桩系，如钢桩系列、特殊桩（超高强度、超大直径、变截面等）系列等 | 1. 多种桩型的出现与发展，形成现今桩基的各种不同体系<br>2. 桩基技术与理论吸取其他学科的先进技术与成果，拓宽了桩的研究领域，使桩的应用范围得到极大的发展<br>3. 人工成桩被复杂的机械和专门化的工艺所代替<br>4. 新型桩的出现，使桩的承载力得到极大的提高<br>5. 公路桥梁桩基础普遍采用大直径钢筋混凝土灌注桩 |

1.2 桥梁桩基应用现状

随着公路桥梁桩基础施工技术的进步与桩基础设计计算理论的发展，目前大江大河上修建桥梁的跨径不断增大，而为提高桥梁基础的承载力，相应的要求桥梁桩基的桩径与桩长也越来越大。1985年，河南郑州黄河大桥，采用桩径2.2m、桩长70m的摩擦桩；我国最大的江阴长江大桥和南京长江二桥主塔墩基础反循环钻孔灌注桩直径均为3.0m，且后者桩长达150m。目前，公路桥梁桩基直径大于2.5m的情况已较普遍，最大的桩径已达8.0m。采用大直径桩与小直径桩相比有明显的差异，不仅可以提高承载力，而且可以减少水中作业，加快工程进度；提高结构的抗震、抗风稳定性与抵御冲击能力，降低工程造价。如广东九江大桥主桥为2×160m的独塔斜拉桥，主跨基础采用变截面钻孔灌注桩高桩承台结构，此前曾采用了不同桩径的方案比较，如表1-2所示，从表中可以明显看出，三种方案均在满足工程要求的前提情况下，大直径桩的材料用量明显小许多。据粗略统计，国内有大量的公路桥梁桩基础直径超过2.5m。表1-3列举了国内部分公路大桥采用2.5m以上直径桩基的情况。表1-4列举了国内部分公路大桥采用超长钻孔灌注桩的情况。

表 1-2 广东九江大桥主墩基础灌注桩设计方案比较

| 桩径<br>(m) | 桩数<br>(根) | 桩身混凝土<br>(m³) | 承台混凝土<br>(m³) | 基础混凝土<br>(m³) |
|-----------|-----------|---------------|---------------|---------------|
| 1.5       | 63        | 6234          | 4250          | 10484         |
| 2.0       | 32        | 5634          | 3850          | 9484          |
| 2.5       | 18        | 4873          | 3200          | 8073          |

桩基础与周围岩、土体之间的相互影响十分复杂。当桥梁等构筑物坐落于软土、填土、湿陷性黄土、膨胀土、冻土、盐渍土、岩溶、山区滑坡、泥石流、地震带土或岩地基上时，因这些地基土或岩的工程特性各不相同，如软土、填土的次固结特性，膨胀土的胀缩特性，盐渍土的溶陷性和盐分对结构的腐蚀性，黄土的湿陷性，冻土的冻胀和融沉性，山区的滑坡、坍塌

及泥石流等工程灾害及地震产生的特殊荷载等，都会使桩基的设计计算与施工技术大大复杂化。针对特殊地区桩基础施工的复杂性，在进行相应的设计计算时，现场实际的工程地质勘察和试验参数的获取就显得更加重要，以确保工程的安全可靠。我国地域辽阔，从沿海到内陆，由山区到平原，分布着多种多样的土类，由于不同的地理环境、气候条件、地质成因、物质成分和次生变化等原因，桥梁桩基设计也要有相应的变化。表 1-5 主要列举了特殊地质条件下的桩基工程。

表 1-3 国内部分公路大桥采用大直径桩的情况表

| 桩径（m） | 桥 名                                                                                   |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 2.5   | 泸州长江大桥、九江长江大桥、常德沅江大桥、宣城汉江大桥、三门峡黄河大桥、钱塘江二桥、武汉长江大桥、广东斗门大桥、广东肇庆西江大桥                      |
| 2.8   | 钱塘江三大桥                                                                                |
| 3.0   | 湖南石龟山大桥、黄石长江大桥、珠海横琴大桥、益阳资江大桥、江汉四桥、广州鹤洞大桥、芜湖高铁长江大桥、南京长江二桥、江苏江阴大桥、广东番禺大桥、及新会崖门大桥、湖南安乡大桥 |
| 3.5   | 湖南沅陵大桥、湘潭湘江二桥                                                                         |
| 4.0   | 铜陵长江大桥、南昌新八一大桥、湖南石龟山大桥、湖南益阳资江二桥                                                       |
| 5.0   | 湖南张家界鹭鹭湾大桥（挖孔空心桩）、江西湖口大桥（多次成孔及人工挖孔）、湖南大庸鹭鹭大桥                                          |

表 1-4 国内部分公路大桥采用超长钻孔灌注桩的情况表

| 项目               | 参数 | 基础形式    | 直径（m）       | 数量（根） | 桩长（m） | 混凝土用量（m <sup>3</sup> ） |
|------------------|----|---------|-------------|-------|-------|------------------------|
| 杭州湾大桥南航道桥主塔基础    |    | 钻孔灌注桩   | 2.8         | 38    | 125   | 29233                  |
| 舟山金塘跨海大桥主塔基础     |    | 变径钻孔灌注桩 | 2.8 变径至 2.5 | 42    | 115   | 26626                  |
| 青岛海湾大桥大沽河航道桥主塔基础 |    | 钻孔灌注桩   | 2.5         | 24    | 85.5  | 10068                  |
| 青岛海湾大桥沧口航道桥主塔基础  |    | 钻孔灌注桩   | 2.5         | 28    | 67    | 9204                   |
| 青岛海湾大桥红岛航道桥主塔基础  |    | 钻孔灌注桩   | 2.2         | 27    | 83    | 8514                   |
| 湛江海湾大桥主塔基础       |    | 变径钻孔灌注桩 | 2.9 变径至 2.5 | 31    | 100   | 17740                  |
| 苏通长江大桥主塔基础       |    | 变径钻孔灌注桩 | 2.8 变径至 2.5 | 131   | 120   | 86659                  |
| 湖北荆州长江大桥北汉桥主塔基础  |    | 钻孔灌注桩   | 2.5         | 22    | 90.4  | 9758                   |
| 南京长江二桥北汉桥塔       |    | 钻孔灌注桩   | 3.0         | 21    | 87    | 12907                  |
| 南京长江二桥南汉桥主塔基础    |    | 钻孔灌注桩   | 3.0         | 21    | 102   | 15133                  |
| 南京长江三桥主塔基础       |    | 钻孔灌注桩   | 3.0         | 24    | 96    | 16277                  |
| 武汉天兴洲大桥主塔 3 号墩基础 |    | 钻孔灌注桩   | 3.4         | 40    | 84    | 30490                  |
| 武汉阳逻长江大桥南塔基础     |    | 钻孔灌注桩   | 2.0         | 50    | 92    | 14444                  |

续表

| 项目 \ 参数       | 基础形式  | 直径<br>(m) | 数量<br>(根) | 桩长<br>(m) | 混凝土用量<br>(m <sup>3</sup> ) |
|---------------|-------|-----------|-----------|-----------|----------------------------|
| 济南黄河二桥主跨基础    | 钻孔灌注桩 | 2.0       | 26        | 92.5      | 7552                       |
| 滨州黄河大桥 2 号墩基础 | 钻孔灌注桩 | 2.0       | 15        | 90        | 4239                       |
| 济南黄河三桥主桥基础    | 钻孔灌注桩 | 2.0       | 97        | 80-119    | 30458                      |

表 1-5 特殊地质条件下的桩基工程

| 地质条件 | 地质特点                                                               | 应注意的问题                                                                                                     | 所选桩基的类型                             | 工程应用实例                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 软土地区 | 软土一般是指主要由细粒土组成的孔隙比大 ( $e \geq 1$ )、天然含水量高、压缩性高、强度低、渗透性差和具有灵敏结构性的土层 | 覆盖层较厚的软土地区,大、中型桥梁常采用桩基础。软土层较厚需采用长摩擦桩时,要注意对桩底软土承载力和沉降的验算。在设计中,应充分注意由于软土侧向移动而使基桩挠曲和受到的附加水平压力以及软土下沉对基桩产生的负摩擦力 | 通常采用打入(压入)桩、钻孔灌注桩等                  | 同三线宁波大契至西坞高速公路第三合同段,位于宁波市东侧五乡镇,全长 3.6km,共有大中桥 7 座,小桥、通道 6 座,在 K15+090 处还设有五乡互通立交一座,全线除 120 非软基外,其余均是软土地基。此合同段土层较厚,一般都在 20m 以上,塑性压缩变形很大<br>经探讨采用人工挖孔现浇钢筋混凝土护筒的办法钻孔桩施工,直径以桩径加护筒壁厚 12cm 来控制,用开口钢护筒作内模板,放入钢筋网,浇筑混凝土。经施工观察和后期的台前卸载检查,没有发现泥浆渗漏等情况,而且也改善了软基路段的桥头跳车         |
| 冻土地区 | 冻土是指当温度为 0℃或负温时,含有冰且与土颗粒呈胶结状态的土,具有冻胀和融沉等特性                         | 在桩基设计中,应多考虑如何正确估计桩的承载力、桩的类型、桩间距以及蠕变对桩承载力的影响。一定要注意冻土的融沉和冻胀对桩基产生的影响                                          | 多年冻土地区桩基础一般采用钻孔打入桩、钻孔灌注桩、钻孔插入桩、钢管桩等 | 青藏铁路段“空介查曲大桥”位于西藏自治区安多县多年冻土区,桥全长 242.09m,全桥均采用钻孔灌注桩。多年冻土地区的铁路桥梁的工程,由于地基土的冻融作用、不良地质现象的影响,使桥梁基础易产生病害,因此对于桩基在冻土地区的施工应用就显得更为严格<br>此次施工,旋挖钻机采用干法和湿法两种钻法。大桥一号墩、二号墩为干法钻孔,大桥三号墩、四号墩、五号墩及六号墩使用湿法作业。桩基回冻是青藏线桩基施工中的一大特色,在多年冻土地区,桩基施工改变了地基的热平衡,引起桩周土一定范围内升温及融化,钻孔灌注桩需要 70 天完成回冻 |

续表

| 地质条件    | 地质特点                                                                    | 应注意的问题                                                                                                       | 所选桩基的类型                                                    | 工程应用实例                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 湿陷性黄土地区 | 黄土是在第四纪形成的一种特殊的陆相疏松堆积物，颗粒成分以粉粒为主，富含碳酸钙。湿陷性黄土含盐量较大，是一种非饱和的欠压密土，具有大孔和垂直节理 | 对于湿陷性黄土地区桩基设计应考虑桩型的选择、负摩阻力的影响，在工程实践中，要根据实际工程地质状况、环境、气候条件等综合因素来选择一种适合该工程施工的办法，以尽量减少负摩阻力                       | 在黄土地区一般采用沉桩、灌注桩、钻埋空心桩及爆扩桩等                                 | 陕西地区对黄土层中的桩基础设计一般按两种情况考虑。第一种是对地下水位不可能上升到桩基础底面以上，且桩侧湿陷性土层不可能出现局部浸水情况，以及地下水位不可能上升且对桩侧湿陷性土层偶然发生浸水采取了防水措施的情况，不考虑负摩阻力，桩侧仅有正摩阻力。第二种是对桩侧湿陷性土层可能因地下水位上升或因偶然性原因出现桩侧一定深度完全浸水情况，陕西地区根据实际情况考虑桩侧地面以下 6m 范围为负摩阻力，6m 以下为正摩阻力<br>宁夏地区借鉴以前设计反馈的信息，结合已经存在的信息，对湿陷性黄土地区的桩长计算采取了桩长自地面 10m 以下以 30%的摩阻力计入负值；湿陷性黄土层不足 10m 的桥涵桩长，以黄土层实际厚度层的 30%摩阻力计入负值，在同等条件下桩长普遍增加 5~15m |
| 沿海地区    | 沿海地区地质一般较软弱，地形复杂，填土下面有软弱下卧层                                             | 在沿海地区，应考虑如何选择合理的桩基础形式，这对于保证安全、施工方便、降低造价起着举足轻重的作用，注意选择一个最优化的基础方案。在沿海地区，地质条件较差，施工复杂，对桩基础防腐工作也要重视，从而真正提高桩基础的耐久性 | 目前沿海地区桩基础普遍采用的基础形式(按施工分)有：沉管灌注桩基础、钻孔灌注桩基础、锤击灌注桩基础、人工挖孔桩基础等 | 杭州湾大桥全长 37.6 公里，为跨海大桥，总投资 150 亿人民币。海域海水 pH>7 的弱碱性的 Cl-Na 型咸水，氯离子含量约 159/L，为典型的近岸海洋腐蚀环境。为了使杭州湾大桥达到 100 年的设计服役寿命，采取以下主要措施：采用海工耐久混凝土；构造措施和裂缝限制；其他辅助措施，如混凝土表面涂层、混凝土表面硅烷浸渍、钢筋阻锈剂、预置阴极防护和渗透性模板                                                                                                                                                         |

续表

| 地质条件 | 地质特点                                                                               | 应注意的问题                                                                                    | 所选桩基的类型                                                                                   | 工程应用实例                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 复杂山区 | 复杂山区常见的不良地质现象有滑坡、崩塌、断层、岩溶、土洞以及泥石流等                                                 | 在复杂山区建设中，应该充分重视地基基础的问题，要做好工程地质勘察工作，了解地层构造、岩土的性质及地下水的埋藏状况，从而分析其稳定性，结合山区特点来布局               | 由于在复杂山区上，地貌非常复杂，山体岩层外露，风化严重，施工一般选择桩基础，且采用人工挖孔                                             | 马水河分离式特大桥位于鄂西山区恩施境内，是沪蓉国道主干线湖北宜昌至恩施段高速公路重点控制性工程。主桥为预应力混凝土变截面箱型连续钢构桥。桥全长 989.0m，基础为桩基础，最大桩长 50m。桥址区地貌属于溶蚀—低中山地貌，河流切割较深，呈“V”形谷地面起伏大，若采用机械施工，则运输、安装困难，废渣也无法排出。采用人工挖孔桩时，成孔施工简单，施工机具简单，不污染环境，挖孔桩与钻孔桩相比，桩身混凝土坍落度小、水灰比小，可以节约水泥，工期短。经比较，选择人工挖孔                                                                                                                                                                   |
| 岩溶地区 | 岩溶是可溶性岩层（石灰岩、白云岩、石膏、岩盐等）以被水溶解的化学溶蚀作用为主，并伴随以机械作用而形成的沟槽、裂隙、洞穴。地表附近岩溶较发育，随深度的增加岩溶发育较弱 | 对于岩溶地区，地形较复杂，桩基础施工要特别注意漏浆、坍塌、孤石等问题的处理。要确保岩溶地基的稳定性，对其断裂构造、褶皱构造、溶洞形态以及地下水状况等作出全面勘察，从而保证工程稳定 | 岩溶地区的桩基，宜采用钻孔灌注桩或人工挖孔灌注桩。当单桩荷载较大及岩层埋深较浅时，宜采用嵌岩桩。当桩基范围内存在充填沉积软土或沙土时，可利用高压旋喷桩将上部结构的荷载传至溶洞底板 | 翁江大桥位于广东英德华侨茶厂境内，是京珠国道粤境高速公路跨越翁江的一座大桥，上部构造为 50 m 预应力混凝土 T 梁和 30 m 预应力混凝土 T 形组合梁，单幅桥宽 17 m；下部构造采用柱式墩台，钻孔灌注桩基础，桩径 1.5m，全桥共计 60 根<br>桥区地质条件复杂，基岩起伏较大，岩溶极为发育，存在暗河和多层溶洞。经过讨论，翁江大桥溶洞桩基施工采用了如下施工方案：①溶洞高度在 1 m 以内，施工时采用片石黄土造壁成孔。②溶洞高度在 1~3m，溶沟未与水平暗河直接连通的，根据溶洞所处的深度情况确定处理措施：溶洞埋深在 10m 以内的单层溶洞，采用片石黄土造壁封堵；大于 10m 的采用钢护筒护壁。③溶洞高度在 3~5m，水平发育区域较大，溶洞埋深在 10~20m 的溶洞，采用双层钢护筒护壁。④对于水平区域发育连通性大和溶洞高度大于 5m 的多层溶洞，采用三层钢护筒护壁 |

在公路桥梁桩基础设计与施工技术发展过程中，受地层土质与工程性质的影响及灌注桩施工工艺上的局限性，常会遇到即使增加桩长和桩径，桩承载力提高的幅度并不明显，从而使桩的承载力难以满足大型公路桥梁工程使用上的要求。以现行公路桥梁桩基础采用的钻孔灌注

桩为例,由于桩成孔过程中以泥浆护壁法为主,使成桩工艺存在着固有的缺陷(如桩底沉渣、桩侧泥皮对桩承载力的影响等),导致桩侧阻力与桩端阻力显著降低,为改善桩端与桩周土的工程性质,提高桩承载力,减小桩的沉降量,桩端与桩周注浆技术应运而生。桩周与桩端注浆技术在国外已有40年的历史,1961年在修建 Maracaibo 大桥桩的施工中首次应用,此后,日本、意大利、法国、英国、德国及前苏联等国均开始使用该技术,并在施工中使该项技术不断得到发展与完善。20世纪80年代,注浆技术首先在我国的工业与民用建筑行业得到应用,90年代初,该项技术被引入公路桥梁桩基础的施工中并得到广泛应用和发展,获得了明显的技术经济效益。大量的现场实测结果表明,由于地质情况的差异和注浆技术的差异使桩侧与桩端注浆后的承载力较注浆前的承载力提高程度相差较大,最小可提高30%,最大的超过了百分之百。因此,该项技术将会成为我国公路桥梁钻孔灌注桩必备的配套技术。

另外,为提高桩的承载力,有关专家与学者,从桩的受力机理出发,提出了人工挖孔扩底桩的设计方法。该方法就是通过扩大桩端头的截面尺寸,提高桩端承受外荷载的能力,从而使桩的整体承载力得到提高。在日本,扩底直径与桩身直径之比小于2.0,而扩大头则有数米之高(已有的实体工程达8.0米),目前的施工方法近30种。而我国近年推荐采用锅底形扩底桩,锅底矢高取 $0.1\sim 0.15D$ ,扩底起始侧面的斜率取 $1/3\sim 1/2$ 。人工扩底桩目前在工业与民用建筑中应用较多,现有的扩底桩种类超过20种,而该桩型在公路桥梁桩基础的设计与施工中,辽宁等地已逐渐开始使用。但该桩型的设计计算理论目前不同的行业采用不同的标准与方法,仍处于研究探索阶段。

## 1.3 发展与挑战

### 1.3.1 桥梁桩基发展趋势

21世纪公路桥梁桩基础技术发展的动向主要有以下几个方面:

(1) 以数值仿真为核心的岩土力学。

桩基工程是把岩石和土作为研究对象,以加固或改造地基岩土为目的,以数值仿真为研究方法,所以研究并掌握岩石和土的工程物理—力学性质将是研究的前提条件。

现有的土力学理论都是建立在室内重塑土样的基础之上,弹塑性本构模型也是在重塑土试验结果的基础上提出的,重塑土是指受扰动的土,土本身固有结构已被破坏。若要合理描述天然土的特性,必须发展新一代的本构模型——结构性模型。20世纪70年代以来,临界状态土力学逐渐形成和发展,一些著名的本构关系相继提出,如剑桥粘土模型(Cam-Clay)、拉德-邓肯(Lade-Duncan)模型等,数值仿真得到了支撑和发展。数值解法如有限元、差分法等的应用日趋普及。目前可用于数值分析的软件有ABAQUS、ANSYS、ADINA、MARC、PLAXIS等。在这种情况下,未来几十年数值仿真在公路桥梁桩基工程等应用中将从普及到广泛应用。

(2) 向大直径长桩方向发展。

基于大型桥梁主塔基础等承载的需要,桩径越来越大,桩长越来越长。欧美及日本的钢管桩长已超过百米以上,桩径超过2.5m。济南黄河三桥采用了桩径2.0m,桩长119m的摩擦桩;南京长江二桥主塔墩基础灌注桩直径达3.0m,桩长达150m;铜陵长江大桥的钻孔灌注桩桩直径达4.0m;湖南的石龟山大桥等10多座大桥采用大直径钻埋预应力混凝土空心桩,用单根大直径桩代替群桩基础,使得结构轻型化,简化施工程序和节省多排桩所需的承台及围堰,

使工程费用大大降低。例如, 1992 年湖南湘潭二桥采用了无承台 5.0m 和 3.5m 的大直径桩; 1996 年又顺利在江西南昌八一大桥中主塔基础采用 4 根直径为 4.0m, 嵌入风化岩层 8.0m 的大直径桩。

### (3) 复杂环境下向高墩基础方向发展。

超大连跨桥梁是水上交通基础建设的主要发展趋势, 由于通航、泄洪及安全的要求, 大型跨江、跨海桥梁常常采用高墩基础的形式。水上地质、水文和气候环境与内陆地区差别很大, 特别是水上高墩桥梁基础会时时刻刻受到风、浪、流冰和地震等环境载荷的作用, 高墩桥梁基础比一般桥梁基础的受力条件更复杂, 因此要求水上高墩桥梁基础应具有更高的安全和耐久性。2010 年山东省遭遇了 40 年来最严重海冰灾害, 流动冰体对高墩桥梁撞击产生的动弯矩值比一般桥梁大, 破坏性也更大。穿越复杂地质、水文及气候条件下的大型跨江、跨海大桥高墩基础是桩基础发展的一个必然趋势。

### (4) 向高强度桩方向发展。

桥梁桩基础在向埋入式桩方向发展的同时, 对桩自身的要求也越来越高, 诸如高承载力, 普通钢筋混凝土桩 (简称 P.C 桩, 混凝土强度通常为 C20~C30) 已满足不了工程上的要求, 因此, 预应力钢筋混凝土桩 (简称 P.H.C 桩, 混凝土强度通常为 C40) 使用越来越多。P.H.C 管桩在欧美、日本、前苏联及东南亚等地被大量应用, 我国公路桥梁桩基础的施工中采用的大直径钻埋预应力混凝土空心桩就属于 P.H.C 桩一类。

### (5) 向复合式施工工艺桩方向发展。

由于桩承载力的要求、环境保护的要求及工程地质与水文地质条件的限制等, 采用单一工艺的桩型往往满足不了工程要求, 工程中采用了复合式施工工艺桩。如对于桩径超过 3.0m 的桩基础, 施工中常采用一次、两次甚至多次扩孔进行成孔, 成桩采用灌注混凝土与放置预制桩两种工艺; 桩端压力注浆有成孔成桩与成桩后给桩端压力注浆两种工艺; 桩侧注浆有成桩后注浆与桩侧回填粗集料后再注浆两种工艺; 钻孔扩底灌注桩有直接成孔和扩孔两种工艺等。

### (6) 向降低公害的成桩工艺发展。

我国公路桥梁桩基础以灌注桩为主, 对于钻孔灌注桩采用的是泥浆护壁的成孔方法。钻孔灌注桩中的泥浆在成桩后目前仍未能采取有效的方法进行处理, 往往造成环境污染, 且泥浆在使用中会造成施工现场的不文明。目前国外主要采用贝诺特灌注桩, 国内已在昆明、浙江及北京等地的十几处工地进行了应用, 贝诺特灌注桩的优点是环保效果好 (噪音低、振动小、无泥浆污染与排放)、施工现场文明。

### (7) 异形桩的推广与应用。

异形桩是一种特殊的桩种系列, 它是在圆形桩基础上发展起来的有前途的新桩型。异形桩不仅能够最大程度地发挥桩本身和地基岩土潜在能力, 而且还可以降低工程造价, 节省原材料, 异形桩的发展已成为桩基础发展的趋势之一。

异形桩主要有挤扩支盘桩、扩底桩、大直径 PHC 桩、钢管混凝土桩等。

支盘桩的发展起源于中国, 是普通混凝土灌注桩的一种新形式。它是在普通混凝土灌注桩的桩身适当位置通过挤扩或旋扩的方式形成承力盘, 从而提高桩自身的承载能力。其特点主要有: 单桩承载力高、支盘桩不受地形复杂影响, 具有适应性强、工程造价较低、适用范围较广等特点。支盘桩主要应用于沿海、沿河及内陆软地基的房屋桩基础工程, 还可应用于抗震结构等。

扩底桩是在灌注桩基础上发展起来的一种新桩型, 通过压力或机械的方式在桩底形成一

个扩大头,增大有效承载面积,从而提高桩端承载力,使扩底桩成为以桩端支承为主,桩周侧摩阻力为辅的桩型。扩底桩可以充分发挥持力层的潜力,提高单桩承载力,而且具有较低的工程造价。扩底桩主要应用于较重型建筑物,特别是高层或超高层建筑,用来替代大直径灌注桩,具有较好的经济效益。

大直径PHC桩具有结构强度高、刚度大、可贯入性好、耐锤击能力强、抗渗性能好、抗弯能力高、结构承载力大、经济性较好、适应范围较广等特点,已成为打入桩的主力桩型。现阶段,大直径PHC桩( $\Phi=800\text{mm}$ 、 $1000\text{mm}$ 、 $1200\text{mm}$ )也已能生产并投入使用。近年来,大直径PHC管桩的需求在逐年增加,其研究和开发亦已取得很大的成就,而且性能价格普遍比钢管桩、预应力混凝土方桩及短管节PHC大管桩优越,因此在跨海大桥、外海深水码头等港口工程中已广泛应用。

钢管混凝土桩基结构充分发挥了钢管和混凝土两种材料的优点,具有承载力高、抗弯性能好、塑性和韧性好、经济效益高等优点。钢管混凝土桩基主要应用领域有桥梁结构、高层和超高层建筑、地铁站台柱、电杆塔等,其在桩基工程中具有较好的发展。

### 1.3.2 桥梁桩基面临的挑战

从桩基技术的发展趋势上可以看出,桩基技术在进入现代化阶段后获得了迅速的发展,也面临着以下几方面的挑战。

(1) 由于工程造价、工程进度和工程质量的要求越来越高,使得桩基技术显得越来越重要,事实上,对于不同的桥梁结构、不同的地质条件、不同的桩型,而就同一工程往往有多种不同的桩型可以采用,这就必须对其分别进行技术与经济比较,选择承载能力大、工期短、造价低且能确保工程质量的桩型。

(2) 随着基础建设力度的加大,桥梁桩基础建设的难度也越来越大,对减小环境不良效应的要求更高,因此,针对实体工程,推陈出新,克服传统桩基中存在的技术缺陷势在必行。

(3) 随着新型桩基技术的不断推出,相应的桩基施工机械设备暴露出很多缺陷,这就要求加速桩基施工机械的研究、开发和改进,确保新技术的推广和应用。

(4) 某些特殊性状土地基,如湿陷性黄土、软土、欠固结土等地基沉陷所引起的桩基负摩阻力的作用性状和计算理论认识不清,使得在桩径和桩长的设计中存在较大的随意性和不确定性,使这些特殊地基桥梁群桩的设计基本上处于无章可循状态,给桥梁结构的安全稳定带来极大危害,也使资源配置效率大大降低,给工程投资造成巨大浪费。

(5) 随着海上桥梁的大规模兴建,复杂海洋环境下超大海上群桩基础的设计计算方法与施工技术等一系列技术难题亟需解决,已成为当前桩基研究的热点问题。

## 第2章 桩—土理论与试验研究进展

桩是深入土层的柱形构件,其作用是将上部结构的荷载,通过较弱地层或水传递到深部较坚硬的压缩性小的土层或岩层。从历史发展来看,桩是一种比较古老的基础形式,也是迄今应用最为广泛的建筑物基础或支护构件,属于深基础的一种。桩基础因其具有承载力高、可靠性大、适用范围广等优点在我国桥梁基础中被普遍采用。桥梁桩基主要承受轴向荷载,有时由于水流、土体侧向滑移、风载、船舶撞击及车辆制动力等因素也可能承受部分横轴向荷载,对于海洋环境下桥梁桩基,由于桥梁受到复杂、恶劣的海洋环境荷载作用显著,其所受环境荷载作用及相应荷载变异都很大,且由于考虑到海深及通航净空,海上桥梁基础的悬空高度往往大于常规桥梁,使得水平荷载引起的弯矩值更大。导致其不同于以车载为控制荷载的常规桥梁,而是以风浪流的水平组合荷载为控制荷载。

### 2.1 理论研究进展

“在土力学研究中已经把相互作用的研究提到了重要地位,它是系统论思想的体现。”——谢定义(1997)。轴向荷载作用下桩土共同作用理论研究一直是桩基研究的主流,相对比较成熟,到目前为止,主要研究方法集中在以下几个方面。

#### 1. 荷载传递分析法

最早由 Seed 和 Reese (1957) 提出,澳大利亚著名学者 Poulos 和 Davis (1980) 在其经典著作中对此作了进一步阐述,其基本思路是把桩离散成许多弹性单元,每一单元(包括桩端)与土体之间用非线性弹簧模拟桩—土间荷载传递关系,桩侧摩阻力与剪切位移的关系用非线性弹簧的应力—应变关系来定义,这一传递关系称为传递函数。

这类方法的关键在于传递函数  $\tau(z) \sim s$  的确定。传递函数的主要形式有指数关系函数 (Kazadi, 1957), 线弹性全塑性关系函数 (佐藤悟, 1965), 以 Duncan 和 Chang (1970) 双曲线模式来表示的非线性函数 (Kraft, 1981 及何思明, 1999), Heydinger 和 O'Neill 初始切线斜率函数方法 (1987) 以及应用实测的传递函数方法 (Seed 和 Reese, 1955 及张展骥, 2003)。

我国学者对该法也进行了相关研究,如罗惟德 (1990) 提出了模拟桩周土约束的全深度—变深度剪切弹簧约束的解法。陈龙珠等人 (1994) 先对双折线硬化模型推导出一组计算桩的轴向荷载—沉降曲线的解析算式,并由此分析桩周和桩底土特性参数对曲线形状的影响。卢应发等人 (1995) 提出了一种以 P-S 曲线求解桩的荷载和沉降分布的方法,该方法能划分任一级荷载下的桩侧摩阻力、桩端反力和桩侧摩阻力产生的桩身变形,桩端反力产生的桩身变形及桩端沉降。台湾学者梁明德、刘乐 (1995) 对 Kraft (1981) 与 Baguelin 和 Frank (1983) 的单桩的  $\tau(z) \sim s$  曲线进行了引申,并把剪切模量以双曲线模式表示,应用于刚性群桩分析,研究认为桩—土—桩之间的互制作用使群桩的刚度降低,却提高了其极限承载力,即在同一荷载下,群桩比使用具有相同断面的单桩安全。并认为非线性群桩 Q-S 曲线得到的预测值比实测值要保守。

有些学者把荷载传递法与其他方法相结合,主要研究有:袁建新等人 (1991) 结合理论  $\tau(z) \sim s$  曲线和试验  $\tau(z) \sim s$  曲线的分析,提出了一种桩荷载与变位的数值分析方法;张保良