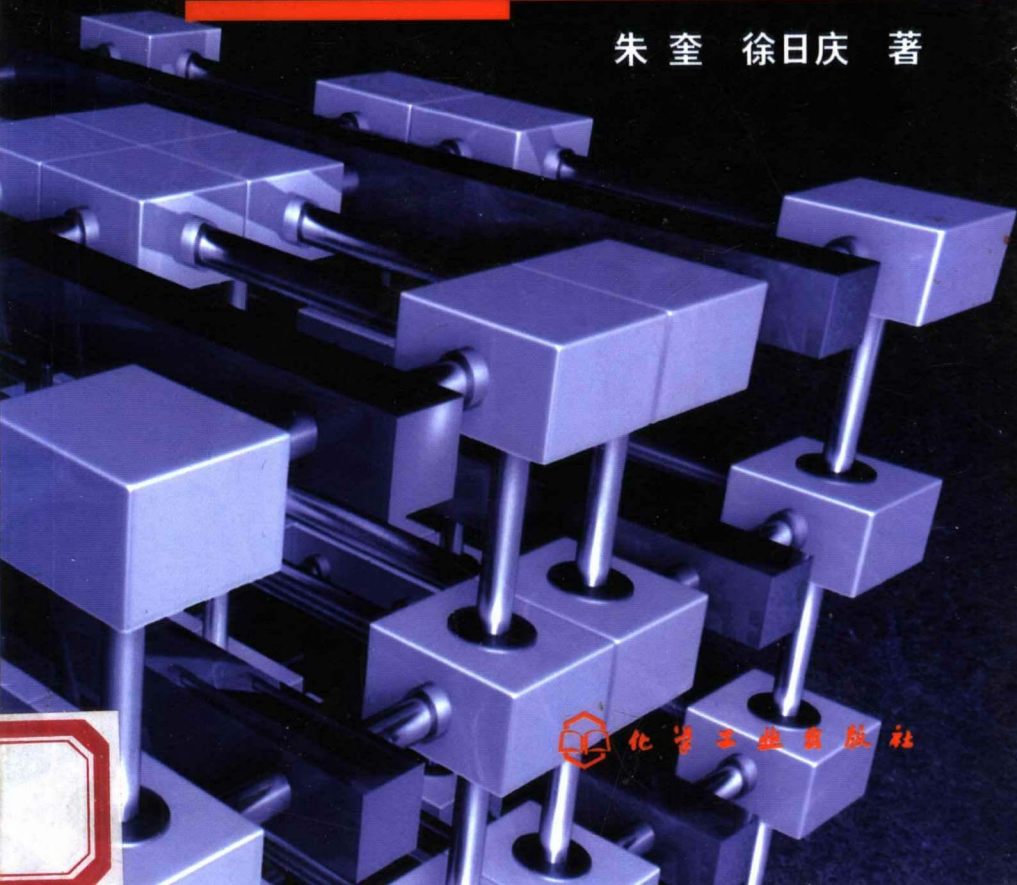




ANG-ROUXINGZHUANG FUHE DIJI

# 刚·柔性桩 复合地基

朱奎 徐日庆 著



化学工业出版社



ANG-ROUXINGZHUANG FUHE DIJI

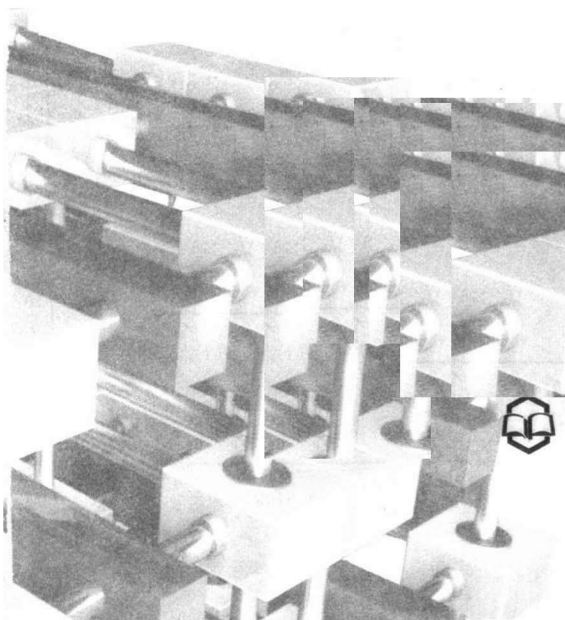
# 刚-柔性桩 复合地基

朱奎 徐日庆 著



化学工业出版社

· 北京 ·



刚-柔性桩复合地基是一种具有巨大经济效益和社会效益的新型复合地基。本书从系统的现场试验、有限元数值分析、理论研究三方面对刚-柔性桩复合地基特性进行了研究,介绍了刚-柔性桩复合地基荷载分担比和复合模量解析解的研究成果,提出了沉降计算方法和面向实践的设计方法,解决了刚-柔性桩复合地基设计和施工技术难题。本书实践应用性强,研究成果具有相当大的推广价值。

本书可供土建、交通、市政和水利部门的设计、施工技术人员使用,也可供上述领域的科研、教学和管理人员参考。

#### 图书在版编目 (CIP) 数据

刚-柔性桩复合地基/朱奎,徐日庆著. —北京:化学工业出版社,2007.7  
ISBN 978-7-122-00471-0

I. 刚… II. ①朱…②徐… III. 人工地基-研究  
IV. TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 079370 号

---

责任编辑:邢 涛

文字编辑:朱 磊

责任校对:凌亚男

装帧设计:史利平

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:北京市兴顺印刷厂

850mm×1168mm 1/32 印张9 1/4 字数246千字

2007年7月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:36.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

随着地基处理技术的不断发展，在实践工程中不断涌现出新型复合地基形式，刚-柔性桩复合地基就是其中的一种地基处理方式。刚-柔性桩复合地基根据传统桩基础减少沉降和满足强度的要求，优化设计施工，具有降低工程造价、有利于保证质量的优点。

刚-柔性桩复合地基近年来在沿海软基地区地基处理中有所应用，并积累了一定的工程实践经验，但至今人们对刚-柔性桩复合地基荷载传递机理认识还处于初步阶段。本书目的在于通过对刚-柔性桩复合地基特性的系统研究，使这种地基处理形式达到理论上的成熟和技术上的完善，从而能大面积推广应用，取得良好的经济效益和社会效益。

本书从试验分析、数值分析和理论分析三条途径研究了刚-柔性桩复合地基的特性，提出了较成熟的设计施工方法。刚-柔性桩复合地基的核心问题有三个：承载力问题、变形问题、桩土共同作用问题。本书是围绕着这三个问题展开的，实质上承载力和变形问题是检验任何地基处理方式是否可行的依据，它决定了地基处理的成败。而桩土共同作用问题是统领刚-柔性桩复合地基技术问题的灵魂，如何保证在荷载作用下通过刚性桩、柔性桩和桩间土变形协调来保证刚性桩、柔性桩和桩间土共同承担荷载是检验刚-柔性桩复合地基技术是否合理的关键。在实际工程中如不能满足形成刚-柔性桩复合地基的条件，而以刚-柔性桩复合地基的理念进行设计是不安全的，这种情况高估了柔性桩和桩间土的作用，降低了地基安全度，并有可能造成工程事故，应引起工程师的充分重视。

可以期望，随着刚-柔性桩复合地基技术的完善，人们对刚-

柔性桩复合地基荷载传递机理认识还会继续深入，本书希望在推动刚-柔性桩复合地基理论发展方面起到抛砖引玉的作用。由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

著 者

2007 年 2 月

# 目 录

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| <b>第 1 章 绪论</b>                | 1   |
| 1.1 复合地基的特点和分类                 | 1   |
| 1.2 刚-柔性桩复合地基概述                | 3   |
| 1.3 刚-柔性桩复合地基的工程应用             | 3   |
| 1.4 刚-柔性桩复合地基的研究现状             | 5   |
| 1.5 桩土共同作用试验研究现状               | 8   |
| 1.6 本书的研究思路                    | 12  |
| <b>第 2 章 刚-柔性桩复合地基静荷载试验</b>    | 14  |
| 2.1 试验原理和方法                    | 14  |
| 2.2 单桩承载变形性状试验                 | 22  |
| 2.3 带褥垫层刚-柔性桩复合地基特性分析          | 37  |
| 2.4 无褥垫层刚-柔性桩复合地基特性分析          | 47  |
| 2.5 变参数刚-柔性桩复合地基               | 55  |
| 2.6 刚-柔性桩复合地基中刚性桩和自由状态下刚性桩性能比较 | 69  |
| 2.7 静荷载试验的相关问题讨论               | 76  |
| 2.8 本章小结                       | 84  |
| <b>第 3 章 刚-柔性桩复合地基原位试验</b>     | 89  |
| 3.1 原位试验概述                     | 89  |
| 3.2 原位试验仪器的布置                  | 94  |
| 3.3 测试结果分析                     | 101 |
| 3.4 本章小结                       | 124 |
| <b>第 4 章 刚-柔性桩复合地基有限元分析</b>    | 126 |
| 4.1 有限元分析方法                    | 127 |
| 4.2 褥垫层参数对刚-柔性桩复合地基特性影响        | 141 |
| 4.3 承台参数对刚-柔性桩复合地基特性影响         | 149 |
| 4.4 刚性桩参数对刚-柔性桩复合地基特性影响        | 156 |
| 4.5 柔性桩参数对刚-柔性桩复合地基特性影响        | 167 |
| 4.6 土参数对刚-柔性桩复合地基特性影响          | 175 |

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 4.7 本章小结 .....                    | 182        |
| <b>第5章 刚-柔性桩复合地基荷载分担比 .....</b>   | <b>185</b> |
| 5.1 荷载分担比的理论解 .....               | 185        |
| 5.2 有限元实用计算公式 .....               | 189        |
| 5.3 工程实测和理论解、经验公式的比较 .....        | 192        |
| 5.4 本章小结 .....                    | 192        |
| <b>第6章 刚-柔性桩复合地基复合模量解析解 .....</b> | <b>195</b> |
| 6.1 研究现状 .....                    | 195        |
| 6.2 复合模量的理论推导 .....               | 196        |
| 6.3 工程实例 .....                    | 197        |
| 6.4 不同参数对复合地基复合模量的影响 .....        | 199        |
| 6.5 本章小结 .....                    | 201        |
| <b>第7章 刚-柔性桩复合地基沉降计算 .....</b>    | <b>203</b> |
| 7.1 群桩沉降理论分析 .....                | 203        |
| 7.2 现有刚-柔性桩复合地基沉降计算方法分析 .....     | 207        |
| 7.3 刚-柔性桩复合地基沉降计算方法 .....         | 211        |
| 7.4 工程实例比较 .....                  | 227        |
| 7.5 本章小结 .....                    | 227        |
| <b>第8章 刚-柔性桩复合地基设计 .....</b>      | <b>229</b> |
| 8.1 刚-柔性桩复合地基的分类 .....            | 229        |
| 8.2 条形基础刚-柔性桩复合地基设计 .....         | 231        |
| 8.3 筏板基础刚-柔性桩复合地基设计 .....         | 240        |
| 8.4 改良型刚-柔性桩复合地基设计 .....          | 243        |
| 8.5 本章小结 .....                    | 263        |
| <b>第9章 柔性基础上刚-柔性桩复合地基特性 .....</b> | <b>265</b> |
| 9.1 工程概况 .....                    | 265        |
| 9.2 地基处理方案选择 .....                | 266        |
| 9.3 设计和施工基本参数 .....               | 267        |
| 9.4 试验方案 .....                    | 267        |
| 9.5 应力测试结果及分析 .....               | 268        |
| 9.6 沉降测试结果及分析 .....               | 272        |
| 9.7 本章小结 .....                    | 274        |
| <b>参考文献 .....</b>                 | <b>275</b> |

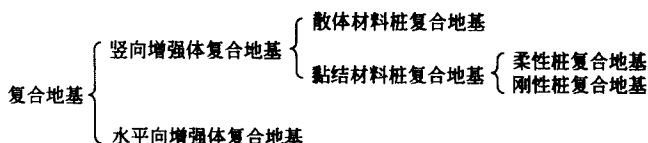
# 第 1 章

## 绪 论

### 1.1 复合地基的特点和分类

当天然地基不能满足建筑物对地基的要求时,就必须对地基进行处理或采用桩基础。随着地基处理技术的不断发展,复合地基技术在土木工程建设中被广泛应用<sup>[1~3]</sup>。复合地基是指天然地基在地基处理过程中部分土体得到增强或被置换,或在天然地基中设置加筋材料,加固区是由基体(天然地基土体)和增强体两部分组成的人工地基。根据地基中增强体的设置方向可分为水平向增强体复合地基、竖向增强体复合地基。竖向增强体复合地基通常称为桩体复合地基。根据竖向增强体的性质,桩体复合地基可分为三类:散体材料桩复合地基、柔性桩复合地基和刚性桩复合地基。散体材料桩复合地基中桩体是由散体材料组成,桩身材料没有黏结强度,单独不能形成桩体,只有依靠周围土体的围箍作用才能形成桩体。通常有碎石桩等。柔性桩复合地基桩体刚度较小,但桩体具有一定黏结强度。常用的柔性桩有水泥搅拌桩、粉喷桩、石灰桩、灰土桩等。刚性桩复合地基的桩体刚度较大,桩身强度较高,桩身材料一般采用混凝土。沉管灌注桩、预应力管桩、钻孔灌注桩为目前应用较广泛的刚性桩。

按照工作机理复合地基可分为:



复合地基也可按荷载传递规律来分类。竖向增强体复合地基

是增强体和土体共同承担竖向荷载。水平向增强体复合地基中,增强体基本不承担或分担竖向荷载,自身只承受拉力,而不是承受压力,因而,该类复合地基中,由于土体和增强体的共同作用而形成一定的抗弯刚度,把竖向荷载传递到更大的面积中去;或增大主应力,使大主应力得到提高,从而提高承载力或使沉降更均匀。

复合地基有两个基本的特点:

(1) 加固区是由基体和增强体两部分组成的,是非均质的,各向异性的;

(2) 在荷载作用下基体和增强体共同承担荷载。

前一特征使复合地基区别于均质地基,后一特征使复合地基区别于桩基础。桩基础中土不承担荷载(高桩基础)或只承受极小部分荷载(低桩基础),土体处于弹性变形阶段,而复合地基中桩和土体共同承担荷载,土体承担较大的荷载,使得部分土体在工作荷载阶段就能达到非线性变形或塑性变形阶段,这就使得复合地基和桩基础的计算方法不同,从荷载传递机理看,复合地基介于均质地基和桩基础之间。

组成复合地基中增强体的材料不同,施工方法不同,复合地基的效用不同。综合各类复合地基的效用,主要有五个方面:一桩体效用;二垫层效用;三排水效用;四挤密效用;五加筋效用。每种复合地基具备其中一种或几种效用。各种复合地基中的效用都是为了达到提高地基承载力,改善地基的变形特性,减小在荷载作用下可能发生的沉降和不均匀沉降,有时还为了改善地基的抗震性能。并且复合地基技术较充分地发挥了桩间土的承载能力,有效地节省了工程造价。选用合理的增强材料,如二灰混凝土桩复合地基技术,合理利用工业废料,能解决环境污染问题。合理地选用和使用复合地基技术,具有较好的社会效益和经济效益。这些优点使得复合地基技术具有较大的生命力,日益受到重视,并得到愈来愈多的应用。复合地基现较多应用于多层建筑以及高层建筑的基础、路堤、大面积堆场基础、油罐基础、港口码头地基处理。

## 1.2 刚-柔性桩复合地基概述

由于在荷载作用下,地基中附加应力随着深度增加而减小,地基应变也逐渐减小,所需“地基刚度与强度”也相应变小。为了更有效地利用复合地基中桩体的承载潜能,可以通过调整竖向增向体复合地基的桩土刚度与强度分布来适应附加应力由上而下减小的特征。于是,刚-柔性桩复合地基这种新的地基处理形式便应运而生。所谓刚-柔性桩复合地基是相对于散体材料桩复合地基、柔性桩复合地基、刚性桩复合地基而提出的新概念,它是指通过刚性桩、柔性桩和桩间土体变形协调共同承担荷载的复合地基。当前,这种新型复合地基在温州、杭州等沿海软土地区得到了应用,但目前尚没有一个比较完善的理论,设计人员只能按照半经验半理论的方法进行设计。

## 1.3 刚-柔性桩复合地基的工程应用

### 1.3.1 刚-柔性桩复合地基的适用条件

(1) 地质土层中具有两个不同埋深持力层的情况 由于刚性桩荷载传递能力较强,可把刚性桩桩端置于较深的持力层,把上部大部分荷载传递到土质较好的持力层,从而大大减少了加固土层的压缩,达到了控制沉降的目的。柔性桩荷载传递能力较差,可以把柔性桩桩端置于较浅的持力层,承担部分荷载,发挥柔性桩参与承载的作用。通过较长的刚性桩和较短的柔性桩优化组合,形成空间变刚度复合地基,取得了良好的技术经济效果。

(2) 有深埋地下室,且整体性较好的建筑物 由于地下室深埋、嵌固以及桩的遮拦加强作用,刚性桩、柔性桩、土以及筏基共同作用条件得以充分保证,建筑物承载力极限设计状态的安全储备得到了很大的提高。

(3) 疏桩设计时天然地基补偿量不足的情况 当疏桩设计时遇到不良地质现象(如浜、塘、坑),而浜、塘、坑等的范围不

很大（一般小于建筑物底面投影的  $1/3 \sim 1/2$ ），可考虑采用刚-柔性桩复合地基，柔性桩主要是弥补因局部浅持力层（硬壳层）缺失而造成的承载力降低。另外，对于一些承载力较差的浅层土（地下 3m 以内天然地基承载力设计值在 100kPa 以下），也可考虑采用这种复合地基。

（4）因特殊原因不宜进行单一桩型进行地基处理的情况 刚性桩因过密受施工挤土影响或其他原因酿发的桩基质量事故，以及旧房因改建、加层需要柔性桩进行补强、加固而采取刚-柔性桩复合地基。

（5）工程进度要求较快而承载力要求较高的多层或小高层建筑物 根据刚-柔性桩复合地基特点，可以考虑逆作法施工。传统施工一般是先打桩后建房，而逆作法施工工艺不同于此。具体做法是首先将柔性桩按设计要求施工，在浇捣基础底板时预留刚性桩（一般采用锚管静压桩）孔位，然后刚性桩和上部结构可同时施工，再根据承载力及沉降情况再封闭刚性桩桩孔，刚性桩参与承载。值得注意的是采用该方法时设计要考虑两种不同地基状态时的地基承载力与沉降情况（类似于结构工程中叠合梁的验算）。

### 1.3.2 刚-柔性桩复合地基的注意事项

（1）地基土处于固结稳定状态 刚-柔性桩复合地基核心技术之一为桩土共同作用，如果承台下土为欠固结土或新填土，在附加应力作用下会出现固结沉降，随时间推移固结沉降会增大，如无褥垫层有可能使地基土与承台底面脱空，即使承台下有褥垫层，由于褥垫层一般为 20~30cm，可能不能完全补偿固结沉降量，会使天然地基承担的荷载转嫁到刚性桩，使安全储备大大降低，对结构安全十分不利。

（2）桩端持力层不能是基岩等坚硬土层 刚性桩通过桩端刺入或桩顶刺入迫使地基土参与工作，刚性桩桩端若是基岩等坚硬层时，桩土变形协调很难达到要求，安全度将不符合要求。从工程实践来看，当刚性桩桩端为较好的持力层如砾石层、密实砂层或  $E_s > 10\text{MPa}$  的硬层，应慎用刚-柔性桩复合地基。在这样的地

质条件下如采用此类复合地基,由于刚性桩桩端很难刺入下部土体,桩土间变形协调只能单纯依靠桩顶刺入,故基础和地基之间必须设置厚度较大的褥垫层,通过褥垫层协调刚性桩、柔性桩和桩间土变形,以保证刚性桩、柔性桩以及土在建筑物工作阶段能协同承载。

(3) 场地不能处于人工降水地区 建筑物附近如出现大量降水,如开挖大型基坑或工程纠偏采用降水时,地基土也会出现固结沉降,造成桩土共同作用减弱,设计时应尽量避免采用刚-柔性桩复合地基。

(4) 桩端持力层要有足够厚度,其下设有明显的软弱下卧层 刚-柔性桩复合地基中刚性桩是控制沉降和提供承载力的主要构件。刚性桩桩端持力层要有足够的厚度,目的是为了保证在刚性桩发生刺入沉降时土对桩的支承力不下降。否则,容易发生刚性桩刺入破坏,采用刚-柔性桩复合地基会有安全隐患。

(5) 要重视挤土桩或部分挤土桩施工引起的不利影响 挤土桩或部分挤土桩在施工过程中会产生超孔隙水压力,使基底土体隆起,桩施工完毕后,随着孔隙水压力消散土会发生固结沉降,承台易与桩间土脱离,降低地基安全度,对于此类情况必须采用适宜的褥垫层,以保证桩土共同作用。

## 1.4 刚-柔性桩复合地基的研究现状

海南省规划勘察院沙祥林等(1996)<sup>[4]</sup>发展的CM三维高强复合地基在海南省得到了一定的工程应用,他们对这种复合地基的工作机理、褥垫层效应、变形及承载机理作了简要的说明,但未对其变形及承载特性进行深入阐述。郭昭、王景铭(1996)<sup>[5]</sup>将之推广到上海,认为其应用对象应着眼于小高层,在采用常规的水泥土加固地基时承载力不够、采用大型桩基显得浪费的情况下采用。CM复合地基实际上是刚-柔性桩复合地基的一种类型,但他们对这种新型地基的贡献仅停留在应用方面,未对这种新型地基进行进一步的研究。

朱小友、尹华濂 (1999)<sup>[6]</sup>通过介绍某高层建筑灌注桩承载力未达到设计要求而采用水泥粉喷桩成功补强原基础的实践,提出这种二元组合桩基作为桩基补救处理措施是经济可行的。郭培红 (1999)<sup>[7]</sup>通过在某建筑基础工程处理中利用原有沉管灌注桩,通过水泥搅拌桩加固的方法,解决了旧房拆除后原旧桩基上新建房屋的基础设计问题。吴建华、张涛 (1999)<sup>[8]</sup>提出了刚性桩和柔性桩共同组合的复合地基承载力标准值的计算公式,并通过静荷载试验方法来确定公式系数,但由于刚-柔性桩复合地基中桩性状和自由状态下桩性状存在差异,该方法缺乏说服力。刘吉福、周正忠、张旷成 (1999)<sup>[9]</sup>根据一个由沉管灌注桩、深层搅拌桩和褥垫层组成的复合地基工程实例,指出了褥垫层在复合地基中的重要作用。郭红梅、马培贤 (2000)<sup>[10]</sup>结合工程实例介绍了利用夯实水泥土桩与高压灌注桩组合进行地基处理,认为通过合理布桩,并设置砂石褥垫层来协调两种桩及桩间土受力及变形的组合型复合地基是可行的。戴浩、王兴梅、陈祖德 (2000)<sup>[11]</sup>认为尽管刚-柔性桩复合地基技术还不够成熟,但对于土层多样性而言,特别是房屋的增层改造中对原有地基基础的进一步加固处理方面应用前景较好。应永法、章雷 (2000)<sup>[12]</sup>针对刚性桩复合地基和柔性桩复合地基各自的缺点,构想出复合桩地基,并认为该复合桩地基设计可按常规刚性桩基础进行,在此基础上提出了承载力和变形的计算公式,但该强度公式未考虑变形协调的问题,变形公式按刚性桩和柔性桩各自承担的荷载比例分配沉降,误差很大。马骥 (2001)<sup>[13]</sup>阐述了长短桩复合地基的设计思想,介绍了长短桩复合地基承载和变形的计算方法,并对设计中有关设计参数进行了分析。郭志强 (2002)<sup>[14]</sup>通过一个由夯实水泥土桩和 CFG 桩构成的组合桩型复合地基工程实例说明采用组合桩型复合地基既可消除地基土层的湿陷性,又能获得较高的承载力。白晓红 (2002)<sup>[15]</sup>认为组合桩型复合地基在黄土地基中应用效果显著。阎明礼 (2003)<sup>[16]</sup>讨论了多桩型复合地基及其复合模量的基本概念,提出了多桩型复合地基承载力和变形的计算方法。徐新跃 (2003)<sup>[17]</sup>结合工程实例认为在一定地质条件

下,混凝土管桩-水泥搅拌桩复合地基是一种有效的地基处理方法。许朝阳 (2004)<sup>[18]</sup>提出了组合桩基的简易设计方法,但依据似乎并不充分。周德泉 (2004)<sup>[19]</sup>认为组合桩型复合地基在具体工程中要结合基础类型、荷载大小、场地地质条件和环保要求,合理选择褥垫层和桩体材料、施工工艺、尺寸和布局,使设计的地基基础满足强度、变形和稳定性要求。

浙江大学对这种新型复合地基相当关注,并对此进行了一定的研究。石旭光 (2001)<sup>[20]</sup>利用 ALGOR 有限元分析程序对由一根刚性桩和四根柔性桩构成的刚-柔性桩复合地基承载和变形进行了分析。张忠苗、唐朝文 (2002)<sup>[21]</sup>对由两根刚性桩和两根柔性桩构成的刚-柔性桩复合地基进行有限元分析,并结合白荡海人家工程对刚性桩、柔性桩以及注浆加固后桩间土组合复合地基进行研究,得出注浆后刚-柔性桩复合地基承载力提高显著,沉降量明显减少的结论。王经雨 (2002)<sup>[22]</sup>对混凝土桩、碎石桩、土构成的复合地基进行三维弹塑性分析,研究其受力变形特性。杨军龙 (2002)<sup>[23]</sup>探讨了长短桩复合地基沉降计算模式,建立了复合地基沉降计算简化公式。张世民 (2004)<sup>[24]</sup>参照复合桩基沉降计算方法,提出了刚-柔性桩复合地基沉降计算的简化办法,即在修正应力法的基础上,假定刚性桩实际承载力达到极限承载力极限值来计算沉降,但假设条件可能与实际情况有差距,故该方法显得牵强。葛忻声 (2002)<sup>[25]</sup>利用有限元对同地质条件下的长短桩、全长桩、全短桩和天然地基的情况进行了应力、变形的对比分析,认为长短桩复合地基在有效减小建筑物沉降量的同时,可降低基础沉降差,使基础受力更均匀。

综上所述,目前刚-柔性桩复合地基的理论研究已滞后于实践应用,对刚-柔性桩复合地基认识还不深入。目前理论分析以数值模拟为主,而大部分数值模拟分析都是小面积的模型基础而言,由于小面积的模型基础与实际情况有出入,而且不能反映桩间距、承台宽度等参数对刚-柔性桩复合地基的影响。由于实际工程中条形基础刚-柔性复合地基应用较多,但是目前尚无人涉及条形基础刚-柔性复合地基的研究,开展这方面研究为设计提

供依据已势在必行。刚-柔性桩复合地基荷载分担比是一个重要的参数,但纵观现有文献尚未有这方面的成果;复合模量是关系复合地基沉降计算结果精确与否的参数,当前传统复合模量一般采用面积加权法,但工程实践表明误差较大,有必要对其进行修正。刚-柔性桩复合地基沉降计算方法还不完善,有待进一步改进。另外,从工程应用角度,目前尚无对刚-柔性桩复合地基的设计提出系统性的、可操作性的设计方法,因此有必要提出可靠的设计方法来指导设计和施工。

## 1.5 桩土共同作用试验研究现状

通过现场试验进行研究刚-柔性桩复合地基的应力场和位移场,无疑可加深对这种复合地基的认识并给出正确的评价。由于刚-柔性桩复合地基试验涉及的因素较多,试验费用也比较大,试验条件也较高,所以国内外关于这种新型复合地基试验方面的报道很少。由于刚-柔性桩复合地基的理论基础在于桩土共同作用,合理和可行的刚-柔性桩复合地基设计方法依赖于对桩土共同作用问题的全面了解,下面对国内外关于桩土共同作用试验研究方面的文献做一下概述。

Hooper (1973)<sup>[26]</sup>对伦敦海德公园骑兵大楼(高 90m, 31 层)的桩和桩间土反力进行了测试,发现该建筑物在使用期间,桩和筏分别分担上部竖向的荷载的 60% 和 40%。

Cooke (1979)<sup>[27]</sup>在伦敦黏土做了群桩的现场试验,此试验验证了计算群桩沉降和受力时运用叠加原理的可行性,并实测了相互影响系数。发现桩土相互影响距离远小于弹性理论计算结果,约为  $6d$ 。

Leung (1980)<sup>[28]</sup>对一座 42 层塔楼的桩筏基础进行了监测,试验表明单桩试验时桩的受力情况和实测的群桩桩体受力情况很不一样。

Cooke (1981)<sup>[29]</sup>观测了伦敦北部一座 16 层大楼的桩筏基础受力变形情况,数据显示群桩中外围桩所承受的荷载是内部桩

的两倍。

Horikoshi、Randolph (1991)<sup>[30]</sup>通过离心模型实验得到桩土共同作用方面有益的结论。

Koizumi、Ito (1992)<sup>[31]</sup>对低承台桩基础、高承台桩基础以及浅基础进行了承载力试验。结果表明桩未达到破坏荷载之前,大部分荷载由桩承担;当低承台桩基础达到极限荷载时,承台土承载只达到浅基础时土承载的20%。

Rowe (1992)<sup>[32]</sup>在伦敦黏土地基上进行了桩基试验,认为承台承担的荷载份额较小,只有8%左右;承台参与工作减少了桩土相对位移,并使桩基摩阻力有所强化;承台使地基土刚度增强约为10%。

童翊湘等 (1981)<sup>[33]</sup>在上海近郊软土上做了一组单桩、单桩带台的对比荷载试验,对比试验结果表明在加荷过程中,承台对桩的影响并不是降低桩的竖向刚度的。从原体工程实测或模型试验结果,都存在桩土共同分担上部总荷载现象。

德国法兰克福展览会大楼(高256m,56层)采用补偿式摩擦桩基,Franke和Sommer (1986)<sup>[34]</sup>对其进行现场测试,测试结果表明筏底土承担了非常可观的荷载,当加载至总荷载的65%时,土的荷载分担比为25%,而建筑物沉降为4cm。

何颐华 (1990)<sup>[35]</sup>通过工程原位实测和模型试验结果揭示了桩和桩间土共同承担荷载。桩间土荷载分担比随桩基沉降的增大而增加,可根据建筑基础沉降变形情况酌情考虑桩土共同作用。

段继伟、龚晓南 (1994)<sup>[36]</sup>通过现场足尺试验研究了水泥搅拌桩的荷载传递规律,试验结果显示桩体的变形、轴力和摩阻力主要集中在有效桩长范围内。

刘金砺 (1995)<sup>[37]</sup>通过模型试验研究了竖向荷载下群桩变形性状,结果表明群桩变形性状随桩距变化而变化。

吴春林、阎明礼 (1993)<sup>[38]</sup>在CFG桩复合地基中埋设压力盒,根据实测数据得出CFG桩复合地基承载简易计算方法。

姚仰平 (2001)<sup>[39]</sup>对桩及筏板下土反力进行原位实测,测试结果表明筏板与其下黄土之间存在着较大的接触压力,群桩与桩

间土共同承担着建筑物的总荷载,桩间土分担荷载高达 28.6%。

池跃君 (2001)<sup>[40~42]</sup>对刚性桩复合地基荷载传递机理、位移场、应力场的分布进行了试验研究,较系统地给出了刚性桩复合地基的承载和变形特点。

贺武斌 (2002)<sup>[43]</sup>进行了与工程实际相符合的现场群桩试验,通过埋设的测试仪器对承台下土反力、桩侧摩阻力、桩端阻力等进行了测试。根据试验结果分析了承台、桩、土的相互作用特性,对承台下土反力的分布、群桩基础的荷载传递规律、荷载分担比等进行了研究,并与单桩的情形进行了比较。

贺为民 (2002)<sup>[44]</sup>对比分析了单桩、两桩和四桩复合地基静荷载试验资料,揭示了由复合地基静荷载试验获得的复合地基承载力变形参数与桩数之间的关系。

商翔宇 (2003)<sup>[45]</sup>通过现场实测数据分析了条基-疏桩复合基础的位移性状及应力性状。结果表明桩及桩周土应力明显大于条基,建议工程应用时可在桩与条基间设置褥垫层,使桩有一定的刺入量,从而使条基-疏桩基础的优越性较好地发挥。

张忠苗 (2003)<sup>[46]</sup>结合杭州白荡海小区进行了不同褥垫层材料的 4 桩复合承台荷载板试验,发现褥垫层提高了复合桩基的承载性能,均化了基础底面的接触压力,更充分发挥了桩土共同作用性能。

刘奋勇 (2003)<sup>[47]</sup>通过混合桩型复合地基静荷载试验测试了不同桩型及桩间土上的应力,分析了这种复合地基桩土应力比的变化规律及破坏模式。

刘海涛 (2003)<sup>[48]</sup>通过试验得出了刚-柔性桩复合地基能使刚性桩、柔性桩以及土体协调变形,合理发挥了它们各自的承载能力。

齐良锋 (2004)<sup>[49]</sup>对陕西省邮政电信网管中心大楼的桩筏基础进行了原位测试,发现桩与桩间土的荷载分担比随着施工过程有所变化,结构封顶时桩间土分担建筑物荷载比例约为 14%。

陈龙珠 (2004)<sup>[50]</sup>对采用带褥垫层的长-短桩复合地基的 14