

学校编码: 10384

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_

学号: 25320081151811

UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

桩顶设置变形调节装置的复合桩基应用研究

The Application Research of Composite Foundation With  
Deformation-Coordinating Devices at the top of Pile

汪亚建

指导教师姓名: 张建霖 教授

林树枝 教授

专 业 名 称: 防灾减灾工程及防护工程

论文提交日期: 2011 年 5 月

论文答辩时间: 2011 年 6 月

学位授予日期:

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2011 年 5 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为(厦门市花岗岩残积土复合桩基)课题(组)的研究成果,获得(厦门市花岗岩残积土复合桩基)课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 摘要

桩顶设置变形调节装置的复合桩基是“厦门市花岗岩残积土复合桩基”课题组提出的一项复合桩基新技术。本文在总结前人研究的基础上，深入研究了桩顶带变形调节装置的复合桩基沉降控制设计方法，该方法利用桩顶变形调节装置，使建筑物的差异沉降得到较好的控制，平均沉降和整体承载力满足规范的要求，且降低基础工程的造价。主要研究内容包括：

①在国内外复合桩基研究的基础上，深入研究了复合桩基沉降控制优化设计方法，为复合桩基差异沉降控制的模拟计算做铺垫。

②分析了桩顶设置变形调节装置的原理、设计及其应用领域。按照两阶段变刚度设计方法，应用 Plaxis 有限元软件分析两阶段变刚度的工作机理。端承桩桩顶安装变形调节器，可解决端承桩与承台下地基土的变形协调问题，实现了端承桩复合桩基在高层建筑中的应用。理论分析和工程实践均表明，该项复合桩基新技术可以合理地利用地基土的承载力，对端承桩复合桩基的设计和应用有一定的指导意义。

③应用 Plaxis 程序建模分析了复合桩基和常规桩基的沉降特性。通过建模分析了复合桩基和常规桩基总位移、平均应力、单桩的位移以及桩身应力，对比得出复合桩基在节省工程造价、缩短工期等方面优势明显。厦门地区地质条件复杂，土层中含有大量坚硬的孤石，难以穿透，以嘉益大厦为例，采用桩顶设置变形调节装置的复合桩基新技术可解决桩基施工难题。

④以蓝湾国际的工程为例，建立简化的模型计算，有限元数值模拟，双曲线拟合最终沉降，计算结果和工程实测数据基本吻合，说明桩顶设置变形调节装置的复合桩基是成功的，从而验证本文优化设计方法的可行性和实用性。

关键词：复合桩基 差异沉降 变形调节装置

## ABSTRACT

Composite pile foundation with deformation-coordinating device at the top of pile is a new technology come up by the research group of Xiamen granite residual soil composite pile foundation. Based on the former researches, the Balanced Settlement Optimum Design Method is presented in this paper. Using deformation-coordinating device at the top of pile, the differential subsidence can be better reduced. Meanwhile, the average subsidence and the whole capacity all satisfy the standard requirements, and the cost of foundation can be also reduced. The main research contents are as the followings:

1. Based on composite foundation research at home and abroad, there is a deep research method of optimum design for settlement control, and it is pave the way for simulating different subsidence of composite foundation.

2. The principle of deformation-coordinating device, design and application domain is analyzed. According to two process and variable stiffness method, the Plaxis finite element software is used to analyze the working mechanism of two process and variable stiffness. End-bearing pile with deformation-coordinating device on the top can solve piles and soil deformation coordination, and realize the composite pile foundation application in high-rise buildings. The theoretical analysis and engineering practice all show that the new technique can reasonable use the bearing capacity of soil, there is certain directive significance to the design and application of composite pile foundation.

3. Plaxis software is used to build model and analyze the settlement characteristics between composite pile foundation and general pile foundation. Through the modeling analysis for the total displacement, the average stress, pile displacement and stress, there are many advantages for the composite pile foundation on saving engineering cost, shortening the construction period etc. The geological conditions in Xiamen area is complex. The soil contains a lot of hard boulders, and it is difficult to penetrate. Taking the Jiayu building as an example, composite pile

foundation with deformation-coordinating device on the top of pile can solve this construction problem.

4. Taking the Blue Gulf International building as an example, a simplified model calculation, finite element numerical simulation, and a hyperbolic fitting method were used to analyze the final settlement. The calculation results of those three methods coincide with the engineering measured data. It is shown that the composite pile foundation with deformation-coordinating device on the top of pile is very successful, it is also testified that the optimized design method in this paper is with good feasibility and practicability.

**KEYWORDS** : composite pile foundation; differential settlement; deformation-coordinating device

## 目 录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
目 录.....	IV
第一章 绪论.....	1
1.1 复合桩基简介.....	1
1.2 国内外复合桩基优化的发展和应用情况.....	2
1.3 复合桩基优化的意义.....	8
1.4 本文研究的背景与内容.....	8
第二章 复合桩基沉降机理与计算方法.....	10
2.1 复合桩基沉降机理分析.....	10
2.2 复合桩基沉降计算方法.....	12
2.3 本章小结.....	21
第三章 桩顶设置变形调节装置的原理及两阶段变刚度设计的有限元 分析.....	22
3.1 桩顶设置变形调节装置的工作原理.....	22
3.2 变形调节装置的设计.....	24
3.3 桩顶变形调节装置的应用领域.....	26
3.4 两阶段变刚度的设计概念.....	28
3.5 plaxis 程序简介.....	29
3.6 两阶段变刚度设计的有限元分析.....	33
3.7 本章小结.....	40

<b>第四章 基于沉降控制的桩顶设置变形调节装置的复合桩基有限元分析</b> .....	<b>41</b>
4.1 差异沉降控制.....	41
4.2 上部结构与基础和地基的共同作用分析.....	42
4.3 基于差异沉降控制的复合桩基优化设计原理.....	42
4.4 复合桩基和常规桩基有限元对比分析.....	43
4.5 本章小结.....	53
<b>第五章 蓝湾国际的工程运用</b> .....	<b>54</b>
5.1 工程概况.....	54
5.2 地基基础设计情况.....	55
5.3 地基沉降计算.....	56
5.4 工程实测结果.....	63
5.5 双曲线拟合最终沉降.....	65
5.6 结果分析.....	67
5.7 附图.....	69
<b>第六章 结论与展望</b> .....	<b>73</b>
6.1 结论.....	73
6.2 展望.....	74
<b>参考文献</b> .....	<b>75</b>
<b>攻读硕士学位期间发表论文</b> .....	<b>78</b>
<b>致谢</b> .....	<b>79</b>



## CONTENTS

Chapter1 Preface .....	1
1.1 Composite pile foundation introduction .....	1
1.2 The development and application of composite pile foundation at home and abroad.....	2
1.3 The significance of composite pile foundation optimization.....	8
1.4 The study background and content in this paper.....	8
Chapter2 The subsidence mechanisms and calculation method of composite pile foundation.....	10
2.1 The analysis of composite pile foundation subsidence mechanism.....	10
2.2 The calculation method composite pile foundation settlement.....	12
2.3 Summary .....	21
Chapter3 The principle of deformation-coordinating device and finite element analysis of two process and variable stiffness method .....	22
3.1 The working principle of deformation-coordinating device .....	22
3.2 The design of deformation-coordinating device .....	24
3.3 The application fields of deformation-coordinating device.....	26
3.4 The design concepts of two process and variable stiffness method.....	28
3.5 plaxis profile .....	29
3.6 The finite element analysis of two process and variable stiffness method ....	33
3.7 Summary .....	40

Chapter4 Finite element analysis based on the settlement control of composite pile foundation with deformation-coordinating device.....	41
4.1 Different subsidence control .....	41
4.2 The analysis of superstructure and foundation joint action .....	42
4.3 The principle of composite pile foundation optimization design .....	42
4.4 The finite element comparative analysis between composite pile foundation and general pile foundation.....	43
4.5 Summary .....	53
Chapter5 Engineering application of blue gulf international building .....	54
5.1 Project summary .....	54
5.2 Foundation designed .....	55
5.3 Foundation settlement caculation .....	56
5.4 Engineering measured data .....	63
5.5 Hyperbolic fitting the final settlement .....	65
5.6 Results analysis.....	67
5.7 Appended drawings.....	69
Chapter6 Conclusion and prospect .....	73
6.1 Conclusion .....	73
6.2 Prospect.....	74
References.....	75
Thesis published during master's .....	78
Thanks .....	79

## 第一章 绪论

### 1.1 复合桩基简介

桩基是一种古老的基础型式，桩基工程技术经历了几千年的发展过程。现在，无论是桩基材料和桩类型，或者是桩基工程机械和施工方法都有了巨大的发展，已经形成了现代化的桩基础工程体系。在某些情况下，采用桩基可以大量减少施工现场工作量和材料的消耗。

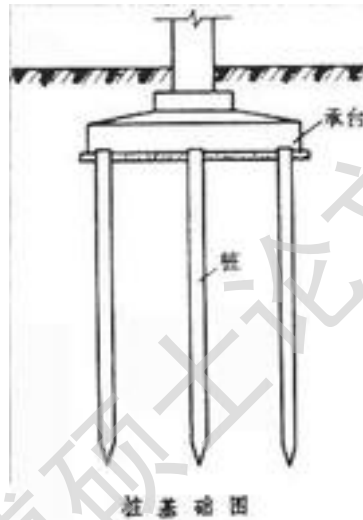


图 1-1 桩基础图

一般的基础工程中，当浅基础不能满足设计要求时，利用竖向承载桩基础将作用于承台的竖向荷载传递到深部土层，以满足上部结构物对基础的承载力和变形的要求。70 年代，中国曾发生了几次大地震。以其中的唐山大地震为例，凡采用桩基的建筑物一般受害轻微。这说明桩基在地震力作用下的变形小，稳定性好，是解决地震区软弱地基和地震液化地基抗震问题的一种有效措施。

传统的桩基础设计方法上部结构的荷载是完全由桩来承担，而未考虑到桩间土的承载性能。这样的设计固然安全，但必然造成了一定的资源浪费。在高层建筑中，桩基的造价约占整个工程总造价的 20~30%，常规桩基设计理论存在较大改进的空间，如何在保证工程质量的前提下节省工程投资呢？近些年来，考虑桩土共同作用的复合桩基设计理论的发展和运用正试图解决这一问题。

复合桩基是指按大桩距（一般在 5~6 倍桩径以上）稀疏布置的低承台摩擦群桩或端承作用较小的端承摩擦桩与承台体共同承载的桩基础。它是天然地基和

纯桩基之间的过渡型。它的沉降量比常规桩基要大，但比天然地基明显的小，当复合桩基中单桩达到极限状态后承台还能继续承担一部分荷载。它发挥了桩间土的承载能力，使工程用桩数量大大减少，取得了很好的经济效益。从上世纪 80 年代复合桩基开始在上海地区局部应用，到目前在天津、上海、温州、厦门等地的普遍推广，运用复合桩基设计建造的多层和高层建筑物已超过数百万平方米，工程应用正逐渐趋于成熟，并取得了很多地方经验<sup>[54]</sup>。

工程实践表明，在深厚软粘土地基上的一般工业与民用建筑，有时不能采用天然浅基础方案，并不是因为天然地基的强度不足，而是由于地基产生过大的平均沉降和差异沉降。如果按照传统的桩基理论来设计的话，外荷载全部由桩承担，则桩间土的承载力全部被浪费了，必然会造成用桩数量过多、工程造价过高，差异沉降满足设计要求而总沉降却远远低于建筑物容许沉降量的情况。为了发挥桩间土的承载能力并使桩土共同承担荷载，工程上已越来越多地应用复合桩基技术。桩的设置主要是为了减少和控制建筑物的沉降，并同时使基础满足整体承载力的要求<sup>[14]</sup>。

## 1.2 国内外复合桩基优化的发展和应用情况

### 1.2.1 国内研究应用现状

由于复合桩基的经济效益显著，基于差异沉降控制的复合桩基设计在我国得到了广泛重视，并且进行了较多的实践，积累了一定的工程实践经验。目前，国内现有的设计方法有以下几种：

#### 1.2.1.1 黄绍铭等人的减少沉降量桩基础设计方法

80 年代中后期黄绍铭<sup>[58][59]</sup>等人提出了减少沉降<sup>[55]</sup>的设计思想与方法，黄绍铭认为减少沉降量实际上是以变形控制为原则，考虑了桩与承台共同作用，介于天然地基上浅基础与桩基础的一种形式。软土地区有时使用桩基础的原因是由于基础底面以下深厚的软弱下卧土层引起的沉降量过大，这时使用较少数量的桩即可使沉降量达到允许范围。桩基的极限荷载  $P_u$  可按下式计算：

$$p_u = n(\lambda p_{su} + p_{pu}) + R_d F \quad (1-1)$$

式中， $n$  为桩数； $\lambda$  为修正系数，在软土中可近似取为 1.0； $P_{su}$ 、 $P_{pu}$  分别为单桩桩侧极限阻力和桩端极限阻力； $R_d$  为承台底面地基土的极限承载力； $F$  为承台底面积。

关于桩筏基础的沉降计算，区分下列两种情况：

①当外荷载小于桩基中各单桩极限承载力之和时，假设桩基的外荷载全部由桩来承担，忽略承台的分担作用，用 Geddes 方法计算桩承担的荷载在土中产生的应力，然后按照分层总和法计算桩筏基础的沉降。

②当外荷载超过桩基中各单桩极限承载力之和时 ( $P > P_a$ )，桩筏基础中的桩群始终保持承担荷载  $P_a$ ，而承台承担荷载为  $(P - P_a)$ 。这时，用 Geddes 方法计算的桩承担的荷载在土中产生的应力，用天然地基中的应力计算方法计算承台承担的荷载在土中产生的应力。土中的应力为这两者之和，然后按照分层总和法计算桩筏基础的沉降。

为确保桩基础有足够的安全度，在实际用桩数量未确定前，首先可按假定外荷载全部由承台承担时的极限承载力仍有一定安全储备为原则，先初步确定承台的埋深以及其平面尺寸，待实际用桩数量确定后，再对承台的初步尺寸进行验算，必要时进行调整。

### 1.2.1.2 管自立的疏桩基础设计方法

自 1987 年开始，浙江温州市建筑设计院的管自立<sup>[60][42]</sup>工程师进行桩基设计新探索，提出用桩来补偿天然地基，改善地基的新构思，从而利用天然地基的承载力来减少桩基和硫化桩基，使桩基与天然地基达到互补效应。并称之为疏桩基础。

九十年代初管自立提出了“长桩疏布、宽基浅埋”的疏桩基础设计思想，为充分利用浅埋硬土层的良好承载力，对传统桩基设计所确定的桩数和桩距进行精简和疏布。当用疏桩率  $\eta$  表示地基土的桩的含量，就可把天然地基、桩基、广义复合桩基的划分在一个定义上进行归类，这样的分类更便于比较与分析各类基础的适用性。定义疏桩率  $\eta$  为：

$$\eta = \frac{n_{\text{桩}} - n_{\text{疏桩}}}{n_{\text{桩}}} \quad (1-2)$$

管自立认为在饱和软土地基中，地基土对桩的容量存在一个“最佳桩容量”，对应于这个桩容量时，建筑物的沉降量为最小，并建议疏桩率控制在 30~45% 为宜；只有当疏桩率大于 50% 时，才需要作沉降的验算。

疏桩基础的沉降量为地基土由  $P_{承}$  引起的沉降量  $S_1$  和由  $P_{桩}$  引起的沉降量  $S_2$  之和。 $S_1$  和  $S_2$  的计算方法可分别参照一般天然地基浅基础与一般桩基础的沉降计算方法计算，计算  $S_1$  时可忽略桩的影响。

### 1.2.1.3 杨敏的减少沉降桩的设计方法

同济大学的杨敏<sup>[5]</sup>教授在上世纪 90 年代提出减少沉降桩基础就是建立在桩土相互作用的理论基础上，以控制沉降变形为设计原则的一种新型基础形式和地基处理技术。

减少沉降桩基础的优点主要有：充分利用和发挥桩对控制基础的沉降能力；桩可接单桩极限承载力设计，使桩的承载能力得到充分的发挥；减少了桩数量，大大降低了工程造价。

杨敏等人认为，软土地区大量的建筑物由于沉降过大而采用桩基础<sup>[37]</sup>，因此采用桩基础来减小建筑物沉降。在这种情况下，单桩分担的荷载比常规设计中桩承担的荷载要大，其值可表示为：

$$P_{桩} = \gamma P_u \quad (1-3)$$

式中， $\gamma$  为单桩承载力发挥系数，可取 0.75~1.0。

基础的沉降可分为两部分：一部分为桩群分担荷载引起的基础沉降  $S_1$ ；另一部分为承台分担荷载引起的地基沉降  $S_2$ 。其中，承台分担荷载引起的地基沉降  $S_2$  可按地基基础规范规定的天然地基浅基础的沉降计算方法计算； $S_1$  按下式计算：

$$S_1 = \psi R_s \cdot P_{桩} I / (E_s \cdot d) \quad (1-4)$$

式中， $R_s$  为群桩沉降系数，与桩距、桩长、桩数和土性有关； $\psi$  为考虑桩端土刚度及基础平面形状影响的修正系数； $P_{桩}$  为单桩承担的荷载； $d$  为桩的直径； $E_s$  为桩长范围内土压缩模量的平均值； $I$  为均匀土中单桩沉降影响系数。

杨敏等人通过对分层土中群桩的研究发现，基础的形状和桩的布置方式对沉

降的影响不大。当基础面积、桩数以及土参数与荷载情况均相同时，正方形基础的沉降最大，各情况间的差异不超过 10%；桩的布置对沉降的影响极小，各种布置方式下基础沉降的差异最大不超过 1%。通过使用上述沉降计算方法可以得到基础沉降与用桩数量之间的关系，从而为合理确定桩数提供依据。

#### 1.2.1.4 宰金珉的桩土明确分担荷载的复合桩基设计方法

上世纪九十年代宰金珉教授提出了复合桩基的设计方法<sup>[1][2]</sup>，并将复合桩基定义如下：按大桩距布置的低承台摩擦群桩或端承作用较小的端承摩擦群桩承台底土体共同承载上部荷载，纯桩基础与天然地基之间的新型基础形式。这是桩土荷载明确分担的整体承载力与沉降量双重控制下的复合桩基非线性设计方法<sup>[50]</sup>，并对复合桩基的沉降计算进行了研究<sup>[56][57]</sup>。

复合桩基主要适用于当地基承载力能够承担上部荷载但沉降量却不满足要求，或者地基承载力虽不满足要求但却可以承担一半以上上部荷载的情况。这时按复合桩基理论设计桩基础所需的资金投入将比常规设计大大减少。在总体安全度  $K \geq 2$  和总沉降小于容许沉降的双重控制下，单桩近似取用极限承载力，对于给定的基底面积  $A$  和总荷载  $Q$ ，当地基承载力设计值为  $f$  的天然地基的承载力满足率  $\psi = fA/Q > 0.5$  时，桩数  $n$  确定如下<sup>[39]</sup>：

$$n = \frac{(Q - \xi fA)}{\zeta P_u} \quad (1-5)$$

式中， $\zeta$  为基底土承载力利用系数，一般小于 0.5； $\xi$  为桩承载力利用系数，一般取大于 0.8 小于 0.9。

#### 1.2.1.5 刘金砺的变刚度调平设计方法

九十年代末刘金砺等通过对粉土和软土中不同桩距、不同桩长的原型和模型群桩竖向荷载下变形试验研究表明<sup>[43]</sup>：均匀土层中群桩变形性状随桩距变化。桩间土压缩变形所占比率随桩距增大而增大，桩底平面以下整体压缩变形和压缩层深度随桩距增大而减小，桩沉降的相互影响比线弹性理论值小的多。之后他对桩土变形计算模型进行了修正，并提出了共同作用变刚度调平优化设计概念和方法<sup>[44]</sup>，即通过增减桩径、桩长、桩数和改变桩身材料、布桩方式来调整桩土刚度分布，适当加大沉降较大部分的刚度，减小沉降较小部分的刚度，使差异沉降减小

至满意水平。

由以上的叙述不难看出,无论是“减少沉降量桩基础”、“复合桩基”或是“疏桩基础”理论,虽然表述方式和具体计算方法有所不同,但其本质是相同的,概括起来就是:对于带桩基础,基于上部结构与地基基础的共同作用原理,以控制建筑物的沉降为目标,充分发挥地基土的承载能力,以其补偿按规范设计方法(即桩承担全部荷载)所减少的桩的承载力;或以少量的桩来弥补地基土承载力的不足,以达到即控制建筑物的沉降变形又满足承载力要求,进而减少工程用桩数量、提高技术经济效益这一最终目的。

建筑地基基础设计规范(GB50007-2002)中 8.5.13 提到,以控制沉降变形为目的的设置桩基时,应结合地区经验,并满足下列条件:①桩身强度应按桩顶荷载设计值验算;②桩、土荷载分配应按上部结构与地基共同作用分析确定;③桩端进入较好的土层,桩端平面处土层应满足下卧层承载力设计要求;④桩距可采用 $4\sim 6d$  ( $d$  为桩身直径)。

### 1.2.2 国外研究应用现状

作为介于天然地基浅基础和常规桩基础之间的一种地基基础形式,复合桩基设计长期以来一直受到国内外工程界和学术界的关注。

对复合桩基最早的研究开始于上世纪 50 年代中期,当时墨西哥 Zeevaert<sup>[29]</sup>教授就提出了适用于软土地基上中高层建筑物的附加摩擦桩的补偿基础方案。

1977 年英国 Burland<sup>[30]</sup>教授等学者根据桩土相互作用理论的研究指出,对于天然地基的强度能满足设计荷载要求但沉降却过大的情况,可以采用少量的桩用于减少基础沉降变形。

1979 年 Hooper<sup>[32]</sup>教授根据有限元的模拟分析,指出为了建立竖向刚度较大的桩土混合地基而需要的桩数并不多,桩数的进一步增加对减少最大沉降和差异沉降的作用非常小。七、八十年代英国建筑研究所 (BRE)对桩筏基础进行了一系列现场实测试验、室内模型试验和理论研究。

1986 年 R.W.Cooke<sup>[33]</sup>总结了他对伦敦硬土地区高层建筑桩基础研究的几十年成果,认为按照目前强度控制的桩基常规设计方法设计的桩基础的实际的安全系数要远大于设计中所取的 2 或 3 倍,并且指出,“在桩基础纯粹用来减少基础沉降的地方,均质土中模型桩的试验表明,在桩间距为 4 倍桩径时再加入更多的



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库