

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学号: 25320101151709

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

两阶段变刚度桩筏基础工作机理研究

On the Working Mechanism of Two-Phase Varying Stiffness
Piled Raft Foundation

冯新建

指导教师姓名: 林树枝 教授

张建霖 教授

专业名称: 结构工程

论文提交日期: 2013 年 5 月

论文答辩时间: 2013 年 6 月

学位授予日期: 2013 年 6 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2013 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(两阶段变刚度复合桩基础工作机理研究)课题(组)的研究成果,获得(两阶段变刚度复合桩基础工作机理研究)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):

2013年6月1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）：

2006年6月1日

摘 要

两阶段变刚度桩筏基础是“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。通过桩顶设置变形调节装置，两阶段变刚度桩筏基础克服了天然筏板基础沉降和差异沉降过大的问题和常规端承型桩筏基础无法发挥筏板底部表层地基土承载力的问题。在沉降和差异沉降控制方面，两阶段变刚度桩筏基础与常规端承型桩筏基础相当，但是前者可充分发挥良好的地基土承载力，在满足整体安全度的前提下，显著减少桩数和筏板内力，表现出明显的优越性和经济性。

本文主要研究内容包括：

(1) 利用 ABAQUS 有限元软件建模，通过两阶段变刚度桩筏基础与天然筏板基础、常规复合桩基的对比，得到两阶段变刚度桩筏基础的“两阶段”特性。同时分别从桩数、桩径、桩间距、筏板厚度、桩端土体弹性模量以及变刚度时间六个方面，建立相应工况模型，考察相关因素对两阶段变刚度桩筏基础的承载力和沉降性状的影响，对两阶段变刚度桩筏基础理论的进一步完善有重要意义。

(2) 通过建立承载力计算的极限状态方程，结合工程实例，运用可靠度理论，对两阶段变刚度桩筏基础的承载力进行可靠度分析与验证，对其安全系数指标和可靠度指标的关系进行了研究分析，得到了基于概率极限状态设计方法即现行规范《建筑结构可靠度设计统一标准》的可靠度指标，验证了采用安全系数法作为两阶段变刚度桩筏基础承载力计算方法的合理性。

(3) 以厦门当代天境工程为例，建立简化的三维数值模型，利用 ABAQUS 有限元软件进行数值模拟，计算结果和工程实测数据均体现“两阶段”特性，说明两阶段变刚度桩筏基础是成功的。理论分析和工程实践均表明两阶段变刚度桩筏基础可以合理地利用地基土的承载力，从而验证了其工作机理和设计方法的合理性与可行性。

关键词：两阶段 变刚度 桩筏基础 桩土共同作用

ABSTRACT

Two-phase varying stiffness piled raft foundation is a new technology proposed by "Xiamen granite residual soil composite pile foundation" research group. All types of existing building foundations have their own weaknesses and shortcomings. For example, the non-uniform settlement and average settlement of raft foundation are too large and the good bearing capacity of topsoil cannot be used by end-bearing piled raft foundation. Two-phase varying stiffness piled raft foundation can solve those problems by using the deformation-coordinating device at the top of pile. Using this new technology, this new form of foundation not only has good control on non-uniform settlement and average settlement, but also can take advantage of excellent bearing capacity of topsoil. Furthermore, the number of piles and the internal forces of raft can be significantly reduced. The significant superiority and economy of two-phase varying stiffness piled raft foundation have been shown in engineering applications.

The main contents of research are as follows:

(1) The model of two-phase varying stiffness piled raft foundation was built up by using the ABAQUS software as well as the models of raft foundation and composite piled raft foundation. "Two-stage" characteristics of two-phase varying stiffness piled raft foundation can be obtained through the comparison of the three models. Meanwhile, models under different working conditions were respectively built up from different aspects such as the number of piles, pile diameter, pile spacing, raft thickness, elastic modulus of pile-end soils and switch stiffness time for deformation-coordinating device. Then the way relevant factors affecting the bearing capacity and settlement behavior of two-phase varying stiffness piled raft foundation were studied by comparing the results of various models. Those results have great significance in further improvement of the two-phase varying stiffness piled raft foundation theory.

(2) The reliability for the bearing capacity of the two-phase varying stiffness

piled raft foundation was analyzed by means of establishing limit state formula. The relationship between the safety and reliability was studied in details. The reliability index based on the probability limit state design method was obtained. It was verified that the safety coefficient method is reliable for calculating the two-phase varying stiffness piled raft foundation.

(3) A simplified three-dimensional numerical model of Dangdai Tianjing building in Xiamen was established and analyzed by using the ABAQUS software. The results of numerical simulation and in-situ measured data reflect "two-stage" characteristics of foundation. Thus "two-stage" characteristics indicated that the new form of foundation works successfully. According to the theoretical analysis and engineering application, two-phase varying stiffness piled raft foundation can reasonably use the bearing capacity of topsoil. Therefore, the working mechanism and design method of two-phase varying stiffness piled raft foundation is reasonable and practicable.

Key Words: two-phase; varying stiffness ; piled raft foundation ; pile-soil interaction

目 录

第一章 绪论	1
1.1 前言	1
1.2 桩筏基础桩土共同作用实现方法	2
1.3 两阶段变刚度设计概念	5
1.4 本文研究的背景与主要内容	6
第二章 两阶段变刚度桩筏基础设计理论与方法	8
2.1 桩基竖向承载力的确定与计算	8
2.2 桩基数量的确定与计算	9
2.3 桩基沉降计算	9
2.4 桩基安全度计算与校核	10
2.5 变形调节装置的设计	11
第三章 两阶段变刚度桩筏基础桩土工作性状的数值分析	14
3.1 数值分析商用有限元程序 ABAQUS	14
3.1.1 ABAQUS 有限元程序简介	14
3.1.2 ABAQUS 在岩土工程中的应用	14
3.2 ABAQUS 应用于两阶段变刚度桩筏基础模拟的相关问题	15
3.2.1 初始地应力在 ABAQUS 中的实现	15
3.2.2 变形调节装置在 ABAQUS 中的实现	20
3.2.3 桩土相处作用在 ABAQUS 中的实现	22
3.2.4 本构模型选取	24
3.3 不同基础形式的桩土工作性状数值分析	25
3.3.1 模型建立	25
3.3.2 数值模拟结果分析	27
3.3.3 本节小结	37
3.4 两阶段变刚度桩筏基础桩土工作性状的影响因素	37
3.4.1 模型建立	38

3.4.2 数值模拟结果分析.....	38
3.4.3 本节小结.....	57
3.5 本章小结	58
第四章 两阶段变刚度桩筏基础承载力可靠度分析.....	60
4.1 两阶段变刚度桩筏基础承载力的计算方法简介	60
4.2 基于规范的以概率理论为基础的极限状态设计方法和可靠度指标	61
4.3 两阶段变刚度桩筏基础承载力的可靠度分析	61
4.3.1 天然地基极限承载力计算.....	61
4.3.2 单桩极限承载力计算.....	62
4.3.3 桩筏基础承载力计算.....	62
4.3.4 桩筏基础承载力极限状态方程.....	62
4.3.5 桩筏基础承载力可靠度分析.....	63
4.4 工程实例可靠度分析	65
4.4.1 工程概况与水文地质条件.....	65
4.4.2 基础设计.....	65
4.4.3 可靠度校核.....	66
4.4.4 天然地基极限承载力修正.....	66
4.5 本章小结	67
第五章 两阶段变刚度桩筏基础工程应用	68
5.1 工程概况与地质条件	68
5.1.1 工程概况.....	68
5.1.2 工程地质概况.....	69
5.2 两阶段变刚度桩筏基础设计	72
5.2.1 桩基础承载力和数量计算.....	72
5.2.2 桩基础的安全度计算.....	74
5.2.3 沉降变形计算.....	74
5.2.4 变形调节装置支承刚度计算.....	75
5.3 工程现场测试分析与研究	76
5.3.1 建筑物沉降.....	77

5.3.2 基底土压力.....	79
5.3.3 桩土荷载分担比.....	81
5.4 简化数值模拟分析	83
5.4.1 模型建立.....	83
5.4.2 数值模拟计算结果分析.....	87
5.5 本章小结	90
第六章 结论与展望	92
6.1 结论	92
6.2 展望	93
参考文献	94
致 谢	98
攻读硕士学位期间发表论文	99

CONTENTS

Chapter1 Introduction.....1

1.1 Introduction..... 1

1.2 Pile-Soil Interaction of Piled Raft Foundation.....2

1.3 Design Concept of Two-Phase Varying Stiffness Method..... 5

1.4 Research Background And Main Contents..... 6

Chapter2 Design Theory and Method for Two-Phase Varying Stiffness Piled Raft Foundation..... 8

2.1 Calculation of Vertical Bearing Capacity of Pile..... 8

2.2 Calculation of the Number of Piles..... 9

2.3 Calculation of Settlement for Pile Foundation..... 9

2.4 Calculation of Safety for Pile Foundation..... 10

2.5 Design of Deformation-Coordinating Device..... 11

Chapter3 Numerical Analysis for Pile-Soil Interaction of Two-Phase Varying Stiffness Piled Raft Foundation.....14

3.1 The ABAQUS FEM Software..... 14

 3.1.1 Introduction of ABAQUS..... 14

 3.1.2 ABAQUS in Geotechnical Engineering..... 14

3.2 Related Problems of ABAQUS Simulation.....15

 3.2.1 Initial Geostress in ABAQUS 15

 3.2.2 Deformation-Coordinating Device in ABAQUS..... 20

 3.2.3 Pile-Soil Interaction in ABAQUS..... 22

 3.2.4 Selection of Constitutive Model..... 24

3.3 Numerical Analysis for Pile-Soil Working Behavior in Different Forms of Foundation.....25

 3.3.1 Modeling..... 25

 3.3.2 Analysis of Numerical Simulation Results..... 27

 3.3.3 Summary..... 37

3.4 Factors Influencing Pile-Soil Working Behavior in Two-Phase Varying

Stiffness Piled Raft Foundation.....	37
3.4.1 Modeling.....	38
3.4.2 Analysis of Numerical Simulation Results.....	38
3.4.3 Summary.....	57
3.5 Summary.....	58
Chapter4 Reliability Analysis for Two-Phase Varying Stiffness Piled Raft Foundation.....	60
4.1 Method for Calculating Bearing Capacity.....	60
4.2 Limit State Design Method and Reliability Index.....	61
4.3 Reliability Analysis for Bearing Capacity.....	61
4.3.1 Calculation of Ultimate Bearing Capacity of Soil.....	61
4.3.2 Calculation of Ultimate Bearing Capacity of Single Pile.....	62
4.3.3 Calculation of Bearing Capacity of the Foundation.....	62
4.3.4 Bearing Capacity Limit State Equation of the Foundation.....	62
4.3.5 Reliability Analysis of Bearing Capacity in the Foundation.....	63
4.4 Reliability Analysis for Engineering Case.....	65
4.4.1 Project Overview and Hydrogeological Conditions.....	65
4.4.2 Foundation Design.....	65
4.4.3 Reliability Check.....	66
4.4.4 Amendment for Ultimate Bearing Capacity of Soil.....	66
4.5 Summary.....	67
Chapter5 Engineering Application of Two-Phase Varying Stiffness Piled Raft Foundation.....	68
5.1 Project Overview and Hydrogeological Conditions.....	68
5.1.1 Project Overview.....	68
5.1.2 Hydrogeological Conditions.....	69
5.2 Design of Two-Phase Varying Stiffness Piled Raft Foundation.....	72
5.2.1 Calculation of Bearing Capacity and Number of Piles.....	72
5.2.2 Calculation of Safety.....	74
5.2.3 Calculation of Settlement.....	74
5.2.4 Calculation of Stiffness for Deformation-Coordinating Device.....	75
5.3 Analysis and Research of Engineering Field Test.....	76
5.3.1 Settlement.....	77

5.3.2 Soil Pressure.....	79
5.3.3 Bearing Ratio in Piles and Soil.....	81
5.4 Analysis of Simplified Numerical Model.....	83
5.4.1 Modeling.....	83
5.4.2 Analysis of Numerical Simulation Results.....	87
5.5 Summary.....	88
Chapter6 Conclusions and Outlook.....	92
6.1 Conclusions.....	92
6.2 Outlook.....	93
References.....	94
Acknowledgements.....	98
List of Publications.....	99

第一章 绪论

1.1 前言

随着我国基础建设的大力推进,桩基础这一古老的基础形式得到前所未有的广泛应用和发展。作为桩基础的主要表现形式之一的桩筏基础,近年来同样发展迅速,桩筏基础,顾名思义是指桩与承台共同承受上部结构荷载的基础形式,具有基础整体性好、抗弯刚度大、适应性广且便于实现桩土共同作用等优点^{[1]-[2]}。变刚度调平设计^[3]、减沉复合疏桩基础^[4]、塑性支承桩^{[5]-[6]}等设计方法都在工程得到了大量的实践应用。

常规桩筏基础桩-筏之间直接刚性连接,其整体刚度由筏板刚度和桩基支承刚度决定。如为某些原因需调节桩筏刚度,则筏板刚度可通过筏厚调整,但往往造价较高;桩基支承刚度则可通过改变桩长、桩径以及桩距等方法来调整,但不同桩径、不同桩长的布桩方式受上部结构形式和地质条件的影响较大,应用范围受到相当大的限制。^{[1]-[2]}为实现经济、有效地根据需要调整桩筏基础的整体刚度,林树枝教授、周峰教授、郭天祥总工及其课题组近年来提出在桩顶与筏板之间设置专门研制的变形调节装置(ZL200510040316.4)来调整、优化桩筏的支承刚度,称之为两阶段变刚度桩筏基础^{[7]-[10]}。与常规桩筏基础相比,两阶段变刚度桩筏基础的特点仅在于在桩顶设置了可人为按需设定刚度的变形调节装置。但上述改进使人为有效、经济地干预桩筏基础的整体刚度提供了可能,同时极大地扩展了桩筏基础的应用领域。从目前的研究来看,两阶段变刚度桩筏基础至少可成功解决以下难题^[7]:

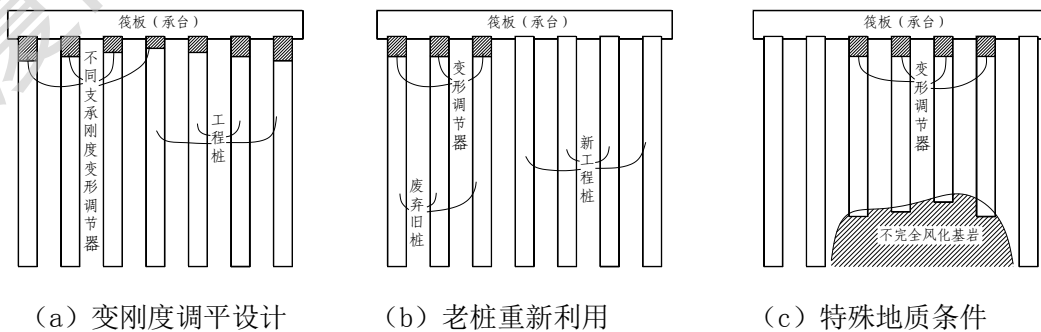


图 1.1 两阶段变刚度桩筏基础应用范围示意图

① 浅层地基土承载力较高,具有一定利用潜力,且桩基类型为端承型地区,需考虑桩、土共同作用的情况。此种情况又称为端承型桩复合桩基,与应用于软土地区的常规复合桩基合称为广义复合桩基^{[11]-[13]};

②以减小差异沉降和筏板(承台)内力为目标的变刚度调平设计;

③考虑建筑物老桩基的承载潜力,新、旧桩基共同承担上部结构荷载的情况;

④特殊地质条件下的桩筏基础,如建筑场地基岩面起伏较大或缺失以及土岩组合地基等地基土支承刚度严重不均匀的情况;

⑤上述两种或多种情况的组合。

1.2 桩筏基础桩土共同作用实现方法

当地基土有较好的承载力,创造条件对其进行合理充分的发掘与利用,不仅能节省大量的工程造价,而且可减少桩基础的设置对地下空间利用带来的不利影响,上述思想目前已经得到工程界和学术界一致认同。

考虑桩土共同作用的桩筏基础理论是一个研究多年的课题,在国内外已有大量的文献发表^{[14]-[21]},也达到了相当的深度。国外如 Burland^[14](1977),Cooke^[15](1986)及 Hopper^[16](1987)通过模型试验和数值模拟的方法最早提出复合桩基(或类似于复合桩基)的概念,其后 Poulous^[17](2001)以及 Randolph^[18](2004)等又进一步对其进行了研究。国内黄绍铭^[19]等从1982年起开始对软土中的单桩和群桩沉降量的估算及桩与承台共同作用等问题进行了理论和试验研究工作,并探讨了按沉降控制的复合桩基设计方法;宰金珉^[20]在1994年明确地提出了复合桩基的设计方法,并进行了初步的应用,取得了良好的效果;其后杨敏^[21]等(2000)也对沉降控制复合桩基进行了进一步的研究和应用。但是应该指出的是,上述关于桩土共同作用方面的研究成果尚只适用于以摩擦桩(或端承力较小的端承摩擦桩)为主的软土地区,国内如上海、浙江、江苏等地,其它大部分以端承桩(或摩擦力较小的摩擦端承桩)为主的非软土地区,却一直无法应用。究其原因,主要是在非软土地区,地基土承载力较高,多层建筑往往直接采用天然地基,而小高层、高层建筑的基础设计实践中,却往往会遇到以下情形:天然地基承载力虽较高,但尚不满足承载要求或沉降过大,其下又有比较理想的桩端持力层。此时如果采用天然地基上的筏板(箱)基础,不能满足要求;如采用桩筏(箱)基础,因桩端持力层土质很好,压缩性低,基桩沉降亦很小,系端承桩或摩擦端承桩,

即使加大桩距（6d 以上），亦很难充分发挥桩间土的承载力，上部结构荷载主要由桩来承担，使地基土承载力得不到利用，造成浪费。

上述问题归根结底实际上是如何实现桩土共同作用的问题。正常情况下，桩土的支承刚度存在数量级上的差异，因此要实现桩土共同作用，则必须要保证桩土的变形协调^[22]。对于软土地区的摩擦桩基础，可通过人为使桩顶荷载接近或达到其极限承载力而发生向下“刺入”的方式，来协调桩土变形（所谓“塑性支承桩”^[20]）。对于非软土地区的端承桩（摩擦端承桩），由于桩无法向下“刺入”（或“刺入”量很小），如不采取一定的措施，桩土变形往往无法协调，共同作用亦无法实现。这时比软土地区更有利用价值的良好天然地基弃之不用，极为可惜。

实际上为了在非软土地区的小高层以及高层建筑中，充分发挥地基土的承载力，实现桩土共同作用，许多学者开展了有意义的研究^{[23]-[34]}。最早如龚晓南^[23]提出的刚性桩复合地基概念，当刚性桩（预应力管桩、CFG 桩等）用于复合地基时，为保证桩土的共同作用特意在桩顶设置了一定厚度的褥垫层，以利桩顶向上“刺入”。同时期，陈龙珠^[24]对用柔性短桩处理浅层软弱土、刚性长桩控制沉降、褥垫层调整和改善桩土应力分担比的带褥垫层刚-柔性桩复合地基形式进行现场工程观测论证。朱世哲^[25]对带垫层刚性桩复合地基桩土应力比进行计算与分析，从理论上分别论证了各种因素对桩土应力比的影响。郑刚^[26]对不同厚度褥垫层刚性桩复合地基工作特性进行了研究，研究了刚性桩复合地基褥垫层在垂直荷载作用下的工作性状。当然，桩顶设置褥垫层的复合地基主要用于摩擦端承桩（或端承摩擦桩）。当刚性桩为完全端承（嵌岩）时，由于桩端沉降较小基本可以忽略不计，地基土沉降却可达几厘米，甚至更多，因此桩土变形存在很大的差异，而褥垫层多为砂石垫层或素混凝土垫层，其压缩量有限，故对于完全端承（嵌岩）桩，刚性桩复合地基的褥垫层能否保证桩土的共同作用还需进一步的探讨。国外，Fleming^[27]（1990）以及 Cao^{[28]-[30]}（1998，2000，2004）等开展的研究类似于国内的刚性桩复合地基。

受刚性桩复合地基中设置褥垫层的启发，李应保^[31]（2004）等曾提出一种在桩顶设置泡沫软垫（或柔性材料）的桩基设计方法来协调桩土的变形，从而保证在桩基沉降较小甚至为零的情况下，实现桩土的共同作用。该方法的提出为在非软土地区的建筑中实现桩土共同作用提供了一种崭新的思路。但是在该方法中，

泡沫软垫刚度很小，不能直接承受荷载，基桩在受荷初始阶段基本不受力，当地基土的变形达到泡沫软垫厚度时，基桩开始受力并由零迅速增加。此时，如泡沫软垫厚度过大，则可能导致设置的桩基础无法发挥作用，只作为安全储备，容易造成浪费；如泡沫软垫厚度过小，则桩基有可能因为支承刚度过大（如嵌岩端承桩等），造成筏板局部应力集中（“顶死”），留下一定的安全隐患。因此上述方法应用的前提就是在设计桩基时，能准确地估算出既定荷载作用下地基的沉降量，这在目前沉降计算理论相对还不成熟的情况下，尚有一定的难度。使得上述方法在高层建筑特别是超高层建筑的应用中受到一定的限制。此后郑刚^{[32]-[34]}等（2004, 2007, 2009）也曾提出通过在桩顶预留净空的方法协调桩土的变形，进行了大量的试验和研究，并取得了许多有价值的成果。该方法中预留净空和设置泡沫软垫的作用基本相同，沉降计算理论的相对不成熟仍然是制约其在高层建筑（超高层建筑）中发展的一个重要因素。目前除上述作者以外，国外关于此类问题的研究还鲜见报道。

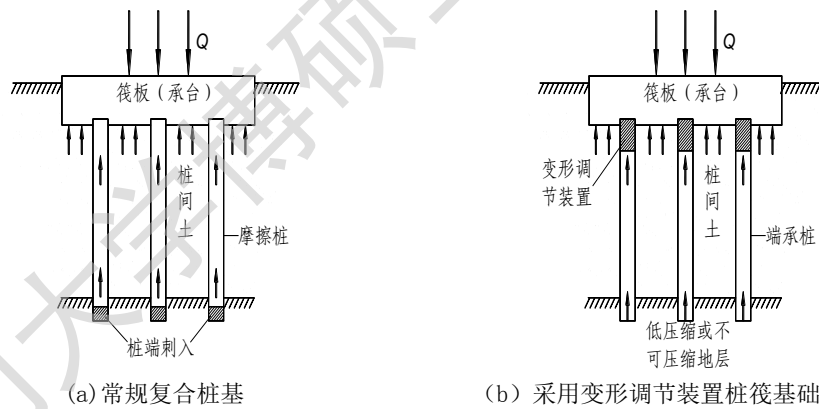


图 1.2 采用变形调节装置和常规复合桩基共同作用模式对比示意图

同样为了解决非软土地区端承桩基础较难实现桩土共同作用的问题，周峰、宰金珉^[8]（2007）通过自主开发，研制了一种变形调节装置（ZL200510040316.4），该装置设置于桩顶后能调节基桩的支承刚度，使桩基的支承刚度与地基土支承刚度相匹配，在保证桩土变形协调的同时，桩基始终发挥作用并和地基土同步承担上部结构荷载，实现了端承型桩的桩土共同作用（具体如图 1.2 所示）。此后，周峰、宰金珉、林树枝^{[11][13][35]-[38]}（2007, 2008, 2009, 2011）又对变形调节装

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 for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库