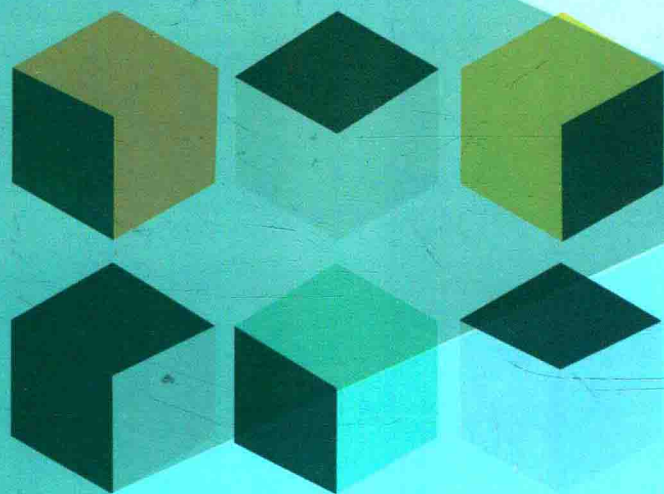


可控刚度桩筏基础设计 理论及应用研究

周 峰 著



中国建筑工业出版社

可控刚度桩筏基础 设计理论及应用研究

周 峰 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

可控刚度桩筏基础设计理论及应用研究/周峰著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2016. 2

ISBN 978-7-112-19053-9

I. ①可… II. ①周… III. ①桩筏基础-研究 IV. ①TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 024896 号

常规桩筏基础在有效调节桩筏体系整体刚度方面存在一定的问题和不足。本书首次提出可控刚度桩筏基础的概念,通过在桩顶与筏板之间设置专门研制的变形调节装置来调整、优化桩筏的支承刚度,使桩筏基础的应用领域得到了较大的扩展。本书通过室内试验、理论分析、数值模拟以及现场测试研究等方法,对可控刚度桩筏基础开展了以下研究工作:①变形调节装置的开发与研制;②可控刚度桩筏基础的室内模型试验;③可控刚度桩筏基础工作性状的数值模拟与分析;④可控刚度桩筏基础设计计算方法;⑤可控刚度桩筏基础的大型现场测试分析。本书内容丰富、图文并茂,可供土木工程及岩土工程领域的科研工作者和广大工程技术人员学习与参考。

* * *

责任编辑:郇锁林 王 治

责任设计:董建平

责任校对:陈晶晶 李美娜

可控刚度桩筏基础设计理论及应用研究

周 峰 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:13 字数:316 千字

2016 年 8 月第一版 2016 年 8 月第一次印刷

定价:32.00 元

ISBN 978-7-112-19053-9

(28325)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

序

在中国，高层建筑与地基基础共同作用（包括桩土共同作用）理论与实践研究已超过半个世纪，并且取得瞩目的成就，相关成果在工程界有所应用，部分内容进入行业标准，许多专家学者为此贡献毕生的精力，我的学生、南京工业大学教授宰金珉博士是其中的一位先行者。

目前，为工程界和学术界接受的桩土共同作用理论，主要是沉降控制复合桩基（或称“疏桩基础”等），适用于以摩擦桩为主的软土地区。21 世纪初，宰金珉教授和他的课题组联合厦门市当地专家，首次提出在端承桩的桩顶设置专门研制的变形调节装置，用以调节端承桩与地基土之间的支承刚度差异，成功地实现端承桩的桩土共同作用。这是桩土共同作用理论和实践的一次重要突破。

正当宰金珉教授更加发挥他的才华的黄金年代，2009 年突然因病仙逝，我悲痛万分，一是痛失爱徒，二是为高层建筑与地基基础共同作用领域中失去一位杰出的学者而深感痛惜。令我安慰的是，他的学生们勇敢地挑起重担，继续在该研究领域不断开拓，周峰博士是其中的佼佼者。周峰博士时常和我联系，将一些新的想法和研究进展和我讨论与共享。特别是把通过调节装置协调桩土刚度差，发展应用于常规桩筏基础上的桩与桩的刚度差。

据悉，可控刚度的桩筏基础迄今已在一百多万平方米的高层及超高层建筑中得到应用，取得了显著的经济效益和社会效益，可喜可贺。周峰博士将这一创新发展的工作机理、设计理论、计算方法、施工实践以及具体的工程实例等，加以汇总与进一步提炼，遂成这本《可控刚度桩筏基础设计理论及应用研究》新著，这是对该理论和实践的一次系统总结与提高！

我诚挚地希望广大读者通过阅读具有创造性的《可控刚度桩筏基础设计理论及应用研究》这本新书，使之用于实践，加以检验，加以发展与完善，为岩土工程学术理论积累更多硕果，为社会创造更多财富。

目睹我弟子的学生们的不断进取，甚感欣慰，命笔感言，是为序！



于上海同济大学

2015 年 7 月

赵锡宏，男，1929 年生，广东台山人，同济大学教授、博士生导师，岩土工程领域国内外知名专家，长期从事地基基础、基坑工程以及损伤土力学研究，成果卓著。主持或参与国家多个重大工程关键技术问题的研究和咨询工作，是我国高层建筑与地基基础共同作用理论的奠基人之一。

前 言

基础建设中天然地基自然存在,对其利用基本不需花费代价或代价很小,因此采用天然地基一直以来都是基础设计的首选。当建筑物高度逐渐加大,天然地基不能满足要求时,桩基础随即被大量使用。由于桩基础和天然地基的支承刚度差异巨大,在桩基础设计时通常不考虑地基土的承载作用,造成大量浪费。如何充分、有效地利用地基土的承载能力,一直是学术界和工程界关注的热点,相关研究可以追溯到 20 世纪 60 年代。如今现有研究成果已经能较好解决软土地区摩擦型桩的桩土共同作用,具体设计方法也已进入国家相关规范,而对于支承刚度较大的端承型桩尤其是嵌岩桩,现有理论尚无有效对策。由于端承型桩通常出现在硬土地区,使得更具承载潜力的地基土得不到充分利用,浪费更大。硬土区有些严格定义上不属于端承桩但支承刚度特别巨大的桩基,实际上也面临同样的问题。

2003 年宰金珉教授首次提出主动干预桩基支承刚度的设想,通过在桩顶设置类似于弹簧的变形调节装置,来调节桩基支承刚度,实现桩土变形协调,从而保证地基土与桩基一起充分参与工作。这一意图成功地在厦门嘉益大厦和蓝湾国际项目中得到实现,7 幢 30 层的高层建筑地基土分担了近 80% 的上部荷载,桩基使用数量大幅减少,取得了显著的经济效益。笔者作为博士生全程参与了设计工作,并主持了桩顶变形调节装置的研发及现场安装施工,获益良多。2009 年宰金珉教授不幸因病离世,在王旭东教授的鼓励与帮助下,笔者继承先师遗愿,继续在该方向不断探索,先后完成了被动式变形调节装置的系列化和主动式变形调节装置的研制工作,将原桩土共同作用的设计思想进行拓展,系统提出可控刚度桩筏基础的概念,并完善了相关设计理论、方法及工法。拓展后的可控刚度桩筏基础可应用于以下领域:①考虑桩、土共同作用但桩、土变形不协调的情况;②以减小差异沉降和筏板(承台)内力为目标,需要进行变刚度调平设计,如基桩支承刚度差异大等情况;③考虑建筑物旧桩基的承载潜力,新、旧桩基协同工作,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、岩溶、孤石地基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。

本书通过室内试验、理论研究、数值分析以及现场测试等方法,对可控刚度桩筏基础开展了以下研究工作:①开展主动、被动变形调节装置的研制;②可控刚度桩筏基础工作性状的数值模拟;③可控刚度桩筏基础的室内模型试验;④可控刚度桩筏基础理论分析及设计方法;⑤可控刚度桩筏基础的大型现场测试分析。

迄今为止,可控刚度桩筏基础已经成功应用于上述除新旧桩协同工作以外的其他所有可能领域,共 13 个项目 31 幢高层、超高层建筑,建筑物最大高度近 160m,共计建筑面积 200 万 m^2 ,节省造价超 2 亿元,取得了显著的经济效益和社会效益,也逐渐得到了同

行和前辈的关注。对可控刚度桩筏基础进行的理论、方法研究和工程实践的总结分析构成了本书论述的内容。当然上述工作还只是初步的结果，尚需从理论到实践的不断检验、充实和完善。笔者已经得到众多前辈与同行的鼓励和支持，更期待着诤友们的指正与合作，在探索真理的长河中携手奋进。

特别感谢厦门建设局林树枝博士在课题研究与工程实践方面做出的创新性指导，感谢上海盛捷土木工程结构设计事务所裴捷教授、南京工业大学王旭东教授、厦门建设局廖河山博士、福建省建筑科学研究院陈振建教授、福建省施工图审查中心彭伙水教高、厦门新区建筑设计有限公司郭天祥高工、中元（厦门）工程设计研究院有限公司赖艳芳高工等专家为本研究工作的开展提供的指导与帮助。当然其他很多专家和学者也提供了有益的帮助和建议，由于人数众多，在此不一一列出，一并表示感谢！课题组研究生刘壮志、濮士坤、蒋专成、蒋超及屈伟等也开展了部分研究工作。

本书相关研究工作得到了国家自然科学基金（51008159、51278244）的资助。

承蒙我国著名土木与岩土工程专家、共同作用问题研究领域的开创者赵锡宏教授为本书作序，言语多有肯定，深感惭愧。另在赵老师的建议下，原书稿又做较大幅度的调整和修改。

笔者满怀虔诚之心谨以此书告慰我国杰出的岩土工程专家、土与结构相互作用理论的开拓与实践者先师宰金珉教授。追本溯源，本书可控刚度的创新性思想最早由先师于 21 世纪初提出，笔者仅在如何实现这个思想以及将其由桩—土变形协调推广到桩—桩变形协调上开展了一些工作，并取得了些许进展。上述进展离不开先师的谆谆教诲和学术熏陶，每念及此，倍增缅怀之情。

书中疏误不当之处，谨请专家读者不吝批评指正。



谨识于

南京工业大学·虹桥

2015 年 12 月

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	1
1.3 基于差异沉降控制的桩筏基础变刚度调平设计	3
1.4 土岩组合地基高层建筑桩筏基础的可行性分析	5
1.5 建筑物废弃桩基础的再生利用探索	6
1.6 本书主要研究内容	7
参考文献	8
第二章 变形调节装置的开发与研制	11
2.1 变形调节器的研制	11
2.2 变形调节装置的构造与安装	15
2.3 主动式变形调节器的探索	18
2.4 特殊要求下的变形调节装置构造	21
2.5 本章小结	23
参考文献	23
第三章 可控刚度桩筏基础室内模型试验	24
3.1 室内模型试验设计	24
3.2 单桩承台系列试验对比分析	30
3.3 端承型桩筏基础模型试验对比分析	35
3.4 摩擦型桩筏基础模型试验对比分析	40
3.5 混合支承桩筏基础模型试验对比分析	45
3.6 主动式变形调节装置试验探索	51
3.7 本章小结	55
参考文献	56
第四章 可控刚度桩筏基础工作性状的数值分析	57
4.1 数值分析商用有限元程序简介	57
4.2 可控刚度桩筏基础工作机理初步分析	59
4.3 三维数值仿真计算模型	67
4.4 三维数值仿真计算结果	72
4.5 三维数值计算结果对比与分析	79
4.6 本章小结	86
参考文献	87

第五章 可控刚度桩筏基础设计理论与方法	88
5.1 可控刚度桩筏基础的整体分析方法	88
5.2 地基承载力计算与相关指标确定方法	90
5.3 地基计算简化分析模型	101
5.4 简化地基模型上筏板的分析	108
5.5 可控刚度桩筏基础设计方法	118
5.6 本章小结	122
参考文献	123
第六章 可控刚度桩筏基础工程实践之一——复杂地质条件下的端承桩复合桩基	125
6.1 工程概况与地质条件	125
6.2 基础设计方案及创新点	132
6.3 可控刚度桩筏基础设计	136
6.4 工程现场测试分析与研究	139
6.5 简化数值模拟分析	146
6.6 经济效益分析	147
6.7 本章小结	148
参考文献	148
第七章 可控刚度桩筏基础工程实践之二——沉降控制端承桩复合桩基	149
7.1 工程概况与地质条件	149
7.2 基础方案的选择与确定	150
7.3 基础的设计方法及过程	152
7.4 数值计算与分析	154
7.5 现场实测结果与分析	160
7.6 本章小结	164
参考文献	164
第八章 可控刚度桩筏基础工程实践之三——土岩组合复杂地基上的高层建筑	165
8.1 工程概况与地质条件	165
8.2 桩基静载试验	168
8.3 项目总体设计方案	173
8.4 桩筏基础设计计算	174
8.5 变形调节装置刚度	177
8.6 抗侧移计算	178
8.7 筏板的设计计算	179
8.8 监测结果分析	186
8.9 本章小结	187
参考文献	187
第九章 可控刚度桩筏基础工程实践之四——岩溶地区端承桩复合桩基	188
9.1 工程概况	188

9.2 基础方案的选择与确定	189
9.3 复合桩基设计过程	191
9.4 数值计算与分析	193
9.5 项目实施与现场测试	195
9.6 本章小结	197
参考文献.....	197
第十章 结论与展望	198
10.1 结论.....	198
10.2 展望.....	200

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^[1,2]。作为桩基础主要应用形式之一的桩筏基础,近年来同样发展迅速。桩筏基础^[3,4],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,充分利用地基土承载力等优点。

常规桩筏基础桩一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。为满足使用要求需调节桩筏刚度时,筏板刚度可通过调整筏板厚度来实现,但往往造价较高、代价较大;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。为实现经济、有效地根据需要调整桩筏基础的整体刚度,笔者及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,称之为可控刚度桩筏基础^[5,6]。

与常规桩筏基础相比,可控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支承刚度的变形调节装置。上述改进给人为有效、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。从目前的研究成果来看可控刚度桩筏基础至少可有效解决以下技术难题:

① 建筑物基底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或支承刚度较大的地区,需考虑桩、土共同作用的情况。此种应用情况通常又称为端承桩复合桩基,与应用于软土地区的常规复合桩基合称为广义复合桩基^[24~26]。

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 考虑建筑物废旧桩基的承载潜力,新、旧桩基共同承担上部结构荷载的情况。

④ 特殊地质条件上高层建筑的桩筏基础,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时,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城市地下空间开发利用带来的不利影响,上述设计思想目前已经得到工程界和学术界专家的一致认同。

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^[7~14], 也达到了相当的深度。国外如 Burland^[7] (1977), Cooke^[8] (1986) 及 Hopper^[9] (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 Poulos^[10] (2001) 以及 Randolph^[11] (2004) 等又进一步对其进行了研究。国内黄绍铭^[12] 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^[13] 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^[14] 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, 其他大部分以端承桩 (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^[15]。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”^[13])。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^[16~23]。最早如龚晓南^[16] 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”。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有效保证桩土的共同作用还需进一步的探讨与验证。国外, Fleming^[17] (1990) 以及 Cao^[18~20] (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^[21] (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,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^[22,23]等(2004)也曾提出通过在桩顶预留净空的方法协调桩土的变形,并进行了大量的试验和研究,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原理基本相同,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,国内外关于此类似问题的研究还鲜见报道。

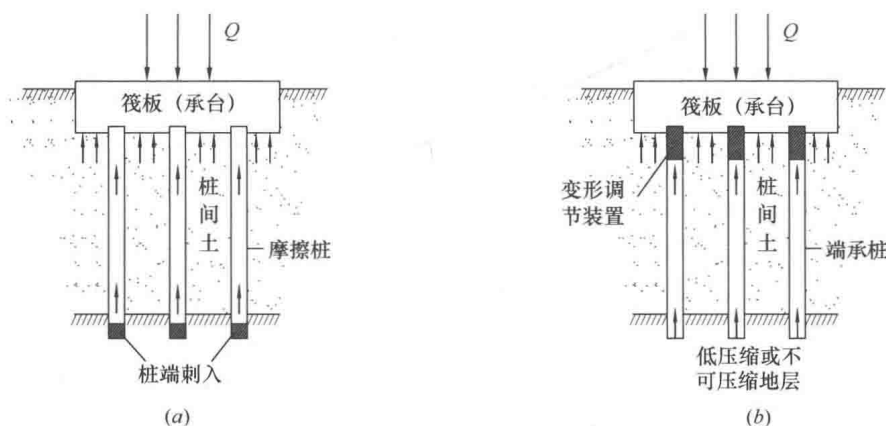


图 1-1 采用变形调节装置和常规复合桩基共同作用模式对比示意图

(a) 常规复合桩基; (b) 采用变形调节装置桩筏基础

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^[5](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 1-1 所示)。此后,周峰、宰金珉^[24~26](2007, 2008, 2009)又对变形调节装置用于端承型桩筏基础桩土共同作用机理和设计方法进行了探讨。

1.3 基于差异沉降控制的桩筏基础变刚度调平设计

上部结构-基础-地基结构体系中,当基础出现差异沉降时,会在筏板中产生很大内力。上部结构巨大的刚度能减少建筑物的不均匀沉降、改善筏板的受力状态,但不可避免地会在上部结构中产生较大的次应力,目前上部结构设计还无法完善地考虑次应力的存在对上部结构的影响,给建筑物带来一定的安全隐患。可见差异沉降是导致基础内力和上部结构次应力增大、板厚与配筋增加的根源所在。因此,考虑建筑物上部结构-基础(桩

筏)-地基的共同作用下,保证建筑物筏板的差异沉降为零,是建筑物基础乃至上部结构保持最优状态的根本。

多年的共同作用理论研究表明^{[27][28]},不同的上部结构、基础(桩筏)与地基的刚度分布均会对建筑物的内力与变形产生影响。上部结构由于受到使用功能的制约,一般很难对其进行调整。筏板和其他形式基础,虽可通过变化板厚、设置肋梁、缩小墙距(箱基)等来调整基础刚度分布,但是效果并不明显,且代价很大。因此对地基与基础构成的支承体的支承刚度进行可控、合理的调整才是差异沉降控制设计最有效的方法。

目前国内外有部分学者对控制建筑物的差异沉降等问题开展一些研究。宰金珉^{[29][30][31]}(1989、1999、2001)提出用不同刚度的垫层以及不同桩径、不同桩长的布桩方式来改善基础的工作性状,减少建筑物的沉降和不均匀沉降,特别是通过塑性支承桩尝试了零差异沉降控制的实际工程应用,效果显著;刘金砺^[32](2000)提出共同作用变刚度调平优化设计概念与方法,通过基底局部地区加桩、减桩以及调整桩长等方法改变地基基础的刚度,来减少建筑物的差异沉降;罗宏渊^[33](1997)、童衍蕃^[34](2003)提出在高层建筑的主裙楼分别采用不同刚度垫层以解决建筑物沉降差的问题;Padfield C J 和 Sharrock M J^[35](1983)讨论了通过中心布桩可以减少基础的沉降差;Fleming^[36](1992)等人建议,为了减少基础的差异沉降,可仅在柔性筏板的中心区域采用群桩;Randolph^{[37][38][39]}(1994, 1998, 2003)亦通过模型试验探讨不同布桩方式对筏板内力和变形的影响。另外, Hain, S. J. 和 Lee, I. K.^[40](1978), Chow, Y. K. 和 Teh, C. I.^[41](1991), Clancy, P 和 Randolph, M. F.^[42](1996)以及 Horikoshi, K. 和 Randolph, M. F.^[43](1998)通过数值计算,建立了以零差异沉降控制为目标的桩基设计指南:桩应分布于筏板中心 16%至 25%区域,桩的总承载力应该设计为总外荷载的 40%至 70%之间,具体与桩筏面积比和土的泊松比有关。桩基支承刚度分布的常规调整方式如图 1-2 所示。

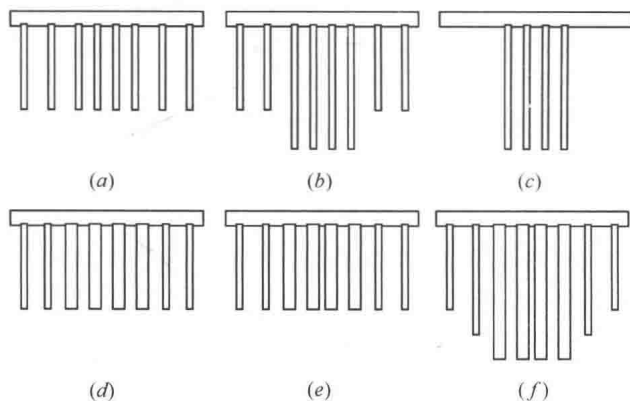


图 1-2 桩基支承刚度分布的常规调整方式

(a) 等径不等距等长; (b) 等径或不等距不等长; (c) 中心局部布桩; (d) 不等径等距等长; (e) 不等径不等距等长; (f) 不等径不等距不等长

上述探索与研究本质上皆属于变刚度调平设计的范畴,目前已经取得了大量有价值的成果,但仍存在一定的局限性,如: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,其应用范围受到相当大的限制;在高层建筑主、裙楼分别设置不同刚度垫

层的方法亦有承载力确定、沉降计算、刚度定量控制等设计计算理论不完善、方法不成熟、施工难以控制的问题。

鉴于以上问题,如通过在桩顶设置变形调节装置来对整个基础的支承刚度分布按需要进行较精确的人为调控,则可达到建筑物零差异沉降的目标,另外变形调节装置不受任何地质条件和上部结构形式的束缚,具有广泛的适应性。可控刚度桩筏基础的变刚度调平方法示意如图 1-3 所示。

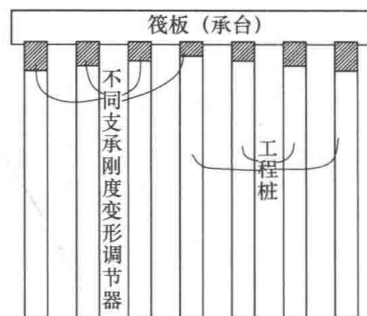


图 1-3 可控刚度桩筏基础
变刚度调平设计示意图

1.4 土岩组合地基高层建筑桩筏基础的可行性分析

应该明确的是,1.3 节探讨的桩筏基础变刚度调平设计仅是减少建筑物差异沉降和结构内力的优化设计方法,出发点是节省工程造价和减少建设工期。对于某些特殊地质条件来说,桩筏基础的差异沉降控制方法可能直接决定建筑物建造的可行性和安全性,如土岩组合地基。所谓土岩组合地基^[44],是指主要受力范围内出现土岩组合并存情况的建筑地基,其支承刚度分布极不均匀,极易出现差异沉降过大的问题,从而影响建筑物的安全,对荷载很大的高层建筑尤其明显。

影响建筑物安全的土岩组合地基大致可以分为以下几种情况^[45](如图 1-4 所示):①石灰岩地区常见的石芽地基;②由于基岩表面起伏不平导致覆盖土层厚薄极度不均匀的地基;③基岩崩坍沉积引起的土岩沿水平方向垂直分布地基;④球状风化岩块与残积层混杂堆积的地基。

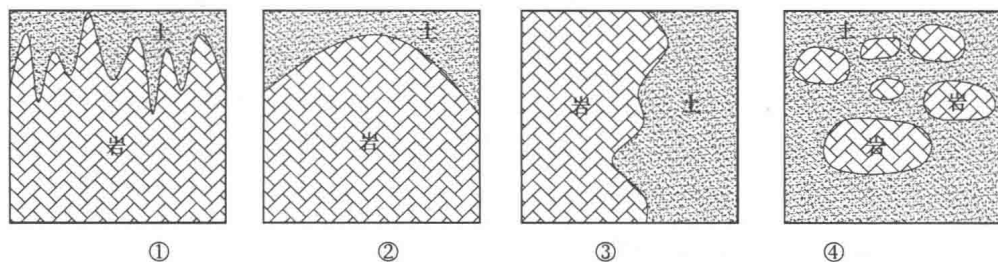


图 1-4 土岩组合地基示意图

纵观国内外相关文献,目前处理土岩组合地基的方法主要是通过刚度较大处设置褥垫层以尽可能消除土、岩并存形成的变形差。如潘青春^[46](2001)介绍了一例通过在基岩出露部位设置 300~500mm 厚炉渣褥垫层的方法解决土岩组合地基上 6 层砌体结构的住宅楼差异沉降的问题,取得了成功。罗庆英^[47](2008)指出了土岩组合地基中由于岩石与土变形模量的较大差异使地基变形不均匀是地基设计中面临的主要问题,并系统介绍了用褥垫层法处理土岩组合地基的具体方法及注意事项。另外罗宏渊^[33](1997)、童衍蕃^[34](2003)提出在高层建筑裙楼基底设置泡沫软垫解决主裙楼沉降差的方法,也为处理土岩组合地基提供了有益的参考。

进一步分析发现,褥垫层方法可协调岩基部分和土基部分的沉降差,且在工作时直接承担荷载,但由于褥垫材料一般采用炉渣、中砂、粗砂、土夹石等,其变形大多在 1cm 左右^[48],尚不足以承担协调高层建筑尤其是超高层建筑在土岩组合地基上形成变形差的任务(现场实测和计算表明,该变形差通常达到 3~5cm,甚至更大)。另外,泡沫软垫虽可协调较大的变形差,但刚度过小,不能直接承担荷载,故仅用于调节比较明确的变形差,而土岩组合地基在不同荷载下明确的变形差以目前技术手段尚无法给出。

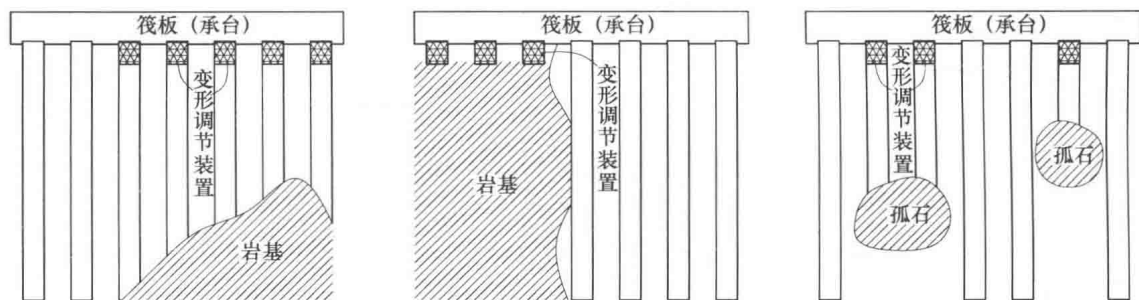


图 1-5 变形调节装置协调土岩地基高层建筑桩筏基础变形差示意图

研制成功的变形调节装置具有“大载荷”(最大 10000kN 以上)、“大变形”(3~10cm)的特点,设置于桩、筏之间完全可实现在土岩组合地基上建造高层建筑的目的,目前该设想已经在厦门、贵阳等地多个高层建筑项目上得到应用,效果显著。变形调节装置用于协调土岩组合地基上高层建筑桩筏基础变形差示意如图 1-5 所示。

1.5 建筑物废弃桩基础的再生利用探索

经济发展,城市规模不断扩大,城市建筑的更新速度也不断加快,为充分利用土地资源,往往拆除老旧建筑物,建设更高、更大的新建筑。这种拆旧建新的做法,是当前城市改造的必然,拆除的旧建筑基础对将在原址上新建的建筑来说,将产生相当大的影响:如旧建筑物基础为天然地基或浅基础,则对新建筑物的影响较小;如旧建筑物基础为深基础(如桩基础等),则对新建筑物的影响巨大。

目前,建筑物废弃桩基的处理方案大致可分为两种:

(1) 完全废除旧桩基础,重新设计桩基础

对完全废除的桩基础,旧桩位不影响新桩施工的前提下,可将桩顶截去 500~1000mm,桩孔回填砂石垫层,以削弱旧桩基础的支承刚度对新建建筑的影响。当新、旧桩位置冲突时,就必须将旧桩清除,目前常用的清除方法有:拔除法^{[49][50]}(如静拔法、桩周取土减摩振拔法、套钻或套冲成孔减摩吊拔法及振动沉管加水力切割拔桩法)和全回转清桩法^[51]。拔除法尤其是直接拔除法对周边环境影响较大,通常只适用于较短的桩,较长的桩容易形成断桩;对于体积较大、深度大的难以避开的障碍物可以采取全回转清障,全回转清障对周边影响不大,对于深沉的障碍物有较好的效果,适用于周边环境保护要求较高的部位,但采用全回转清障费用相对较大。

(2) 在条件允许的前提下, 全部或部分利用旧桩基础, 不足部分补打新桩。

目前国内外对旧桩进行利用的典型方法有: ①史佩栋^[52] (1991) 介绍了伊拉克某电厂工程中, 降低桩基的荷载设计值, 使新、旧桩在 700kN 荷载水平下, 桩顶沉降差不小于 1—2mm, 实现了旧桩的利用; ②郭培红^[53] (1999) 在某 6 层综合楼设计中采取了加大新桩刚度和增加筏板厚度的方法对位于建筑物中心位置的旧桩进行了利用; ③谭宇胜等^[54] (2005) 介绍了广东某 18 层小高层建筑中将旧的嵌岩端承桩接桩到新的桩顶标高后直接进行利用。

上述工程实例第①、②种方法中, 旧桩利用均是在上部结构荷载不是很大的多层建筑中, 而且方法①牺牲了桩基的部分承载潜能, 方法②额外增加新桩数量和基础的厚度, 均造成了一定的浪费。方法③旧桩直接利用, 但是其前提是新、旧桩均为嵌岩端承桩, 基本不存在沉降差的问题。至于针对高层建筑中摩擦型旧桩的再利用 (该情况实际很具代表性), 目前国内外文献还鲜有报道。

为了能够实现在高层建筑中对摩擦型旧桩的再生利用, 可通过在桩顶设置变形调节装置来协调新、旧桩的支承刚度差, 从而消除建筑物在两种不同类型基础上出现差异沉降的可能性, 其构思可如图 1-6 所示。

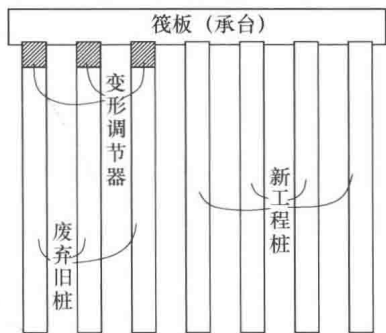


图 1-6 变形调节装置用于建筑物废弃桩基再生利用探索

1.6 本书主要研究内容

综上所述, 本书在创造性提出桩基支承刚度根据需要人为干预调整设想的基础上, 主要开展以下工作:

(1) 开展变形调节装置的研制工作。首先研制结构简单、质量可靠的被动式变形调节器, 满足工程应用“大荷载、大变形”的要求, 同时要求其刚度可根据需要自由设定。在此基础上, 进一步研制主动式变形调节器, 使其在工作时随时根据需要动态调整支承刚度, 最终实现桩筏基础刚度的智能化调节。

(2) 可控刚度桩筏基础工作性状的数值模拟研究。在桩土共同作用理论研究的基础上, 建立桩基支承刚度可人为调节的共同作用数值分析模型, 开展数值模拟研究, 重点探索可控刚度桩筏基础在以上各领域应用的可行性和有效性, 同时对各工况下桩筏基础的作用机理和荷载传递规律进行分析。

(3) 可控刚度桩筏基础的室内模型试验研究。和数值模拟相比, 模型试验可更真实地反映可控刚度桩筏基础在各应用领域的工作性状, 同时模型试验还可观测到在常规荷载尤其是极限荷载作用下许多现场测试无法得到的试验结果, 这些结果对判断和明确整个桩筏基础的工作机理非常有效。因此开展模型试验研究往往是无法被其他研究方法和手段所代替的。

(4) 可控刚度桩筏基础设计计算方法。为将可控刚度桩筏基础从理论构思推动到工程实践, 就必须进行相关设计计算的探索与研究。一套成熟的设计计算方法需要在其他研究

成果逐渐明确的情况下不断修正与完善。

(5) 可控刚度桩筏基础的大型现场测试分析。通过对典型应用项目进行现场测试研究进一步验证本书创新思想和研究内容的先进性与有效性,同时测试结果又为数值计算和室内试验提供对比分析的数据,对可控刚度桩筏基础设计理论的不断完善和不断发展起着至关重要的作用。

参 考 文 献

- [1] 林天健,熊厚金,王利群. 桩基础设计指南[M]. 北京:中国建筑工程出版社,1999.
- [2] 史佩栋. 桩基工程手册[M]. 北京:人民交通出版社,2008.
- [3] JGJ 6-1999. 高层建筑箱形与筏形基础技术规范[S]. 北京:中国建筑工程出版社,1999.
- [4] 钱力航. 高层建筑箱形与筏形基础的设计计算[M]. 北京:中国建筑工程出版社,2003.
- [5] 周峰,宰金珉,梅国雄,王旭东. 变形调节器的研制与应用[J]. 建筑结构,2009,39(7): 40-42.
- [6] 林树枝,周峰. 可控刚度桩筏基础工作机理及应用领域[J]. 福建建筑,2010,150(12): 1-3.
- [7] Burland, J. B., Broms, B. B. & De Mello, V. F. B. (1987). Behaviour of foundation and structures. Proc. 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Tokyo. 2: 495-546.
- [8] Cooke, R. W. (1986). Piled Raft Foundations on Stiff Clay-A Contribution to Design Philosophy. Geotechnique Vol. 36, NO. 2.
- [9] Hopper, J. A. (1987). Review of Behaviour of Piled Raft Foundation on Soft Ground Proc. 8th Asian Regional Conf. SMFE. Vol. I .
- [10] Poulos, H. G. (2001). Piled raft foundation; design and applications Geotechnique. 51(2): 95-113 .
- [11] Reul, O., Randolph, M. F. (2004). Design strategies for piled raft subjected to nonuniform vertical loading. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 130(1): 1-13.
- [12] 黄绍铭,等. 减少沉降量桩基的设计与初步实践[C]. 全国第六届土力学及基础工程会议论文集,上海,1991.
- [13] 宰金珉. 桩土明确分担荷载的复合桩基及其设计方法[J]. 建筑结构学报,1995(4): 66-74.
- [14] Yang M. (2000). Study on reducing-settlement pile foundation based oncontrolling settlement principle. Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 22(4): 481-486.
- [15] Zai, J. M., Mei G. X., Wang, X. D., Zhou, F. (2005). Concept of Plastically Bearing Pile and its Engineering Application, 6th International Conference on Tall Buildings, World Science Press, Hong Kong.
- [16] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京:中国建筑工程出版社,2002.
- [17] Fleming W. G. K., Weltman, A. J., Randolph, M. F. (1990). Pile Foundation (2nd edition), John Wiley&Sons.
- [18] Cao, X. D. (1998). Performance of Raft Foundation With Settlement Reducing Piles. Meng thesis, Nanyang Technological University, Singapore.
- [19] Wong, I. H., Chang, M. F., Cao, X. D. (2000). Raft Foundation with Disconnected Settlement Reducing Piles. Design Application and Ground slabs, Chap. 17, Thomas Telford, London, 469-486.
- [20] Cao, X. D., Wong, I. H., Chang, M. F. (2004). Behavior of model rafts resting on pile-reinforced sand. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(2): 129-138.