

复合地基与变刚度复合地基 模型试验与数值模拟

乔京生 著

中国建筑工业出版社

唐山学院学术专著出版基金资助出版

唐山学院岩土工程重点学科建设基金资助出版

复合地基与变刚度复合地基 模型试验与数值模拟

乔京生 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

复合地基与变刚度复合地基模型试验与数值模拟/乔京生著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2016. 5
ISBN 978-7-112-19233-5

I. ①复… II. ①乔… III. ①人工地基-模型试验②人工地基-数值模拟 IV. ①TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 050092 号

责任编辑: 杨 杰 张伯熙

责任设计: 董建平

责任校对: 陈晶晶 刘梦然

复合地基与变刚度复合地基模型试验与数值模拟

乔京生 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

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 10¼ 字数: 245 千字

2016 年 6 月第一版 2016 年 6 月第一次印刷

定价: 45.00 元

ISBN 978-7-112-19233-5

(28505)

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)

前 言

从 20 世纪 80 年代开始,复合地基在国内大量应用,取得了显著的经济效益和社会效益,然而工程实践超前,而理论研究滞后的现象依然存在。本文以模型试验和数值模拟为基础,对传统复合地基及变刚度复合地基在竖向荷载作用下的力学性状进行分析研究,主要完成工作如下:

1. 完成模型试验 14 组,对改变桩长和褥垫层厚度的单桩、群桩复合地基及变刚度复合地基在竖向荷载作用下的内力及变形进行了量测和记录,试验揭示了桩土相互作用、荷载传递过程、应力分布特点、沉降变形等规律。

2. 利用 ANSYS,系统地分析了不同桩长、桩径、桩体模量、加固区和下卧层土体模量、褥垫层厚度和模量等因素对复合地基力学性状的影响,对采用不同桩长的变刚度复合地基进行分析研究,为建立经验公式提供了必要数据。

3. 针对群桩复合地基的差异沉降问题,进行了变刚度复合地基的必要性和方案研究。

4. 提出了采用“桩体沉降法”来计算复合地基沉降的公式,该计算方法通过与模型试验结果和工程实测数据相比较,达到较高的精度,能直接应用于工程设计。在该沉降计算方法的基础上提出变刚度复合地基的沉降计算公式。

5. 应用加权均值 GM (1, 1) 模型对复合地基进行沉降预测,并与传统 GM (1, 1) 模型相比较,具有更高的预测精度。

在本书即将出版之际,特别感谢中国矿业大学(北京)陶龙光教授、刘波教授对本部专著提出的诸多意见;

感谢袁则循、张凤红在试验期间的帮助与合作。

感谢唐山学院的诸位同事。

由于作者水平和能力有限,书中的缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

尽管在前辈研究成果的基础上作出了一点点成绩,但科学研究永无止境;随着国家经济建设的发展,工程建设将有更广阔的前景,各种地基处理技术将不断发展,复合地基及变刚度复合地基技术还需要去不断地探索,希望本书的出版能起到抛砖引玉的作用,在有关部门的领导和支持下,通过研究者和现场工作人员的共同努力,提出更加安全、经济、环保、高效的地基处理方法。

目 录

1 绪论	1
1.1 复合地基的定义、分类和形成条件	1
1.1.1 复合地基的定义	1
1.1.2 复合地基的分类	2
1.1.3 复合地基的形成条件	4
1.2 研究背景	6
1.3 复合地基效应与破坏模式	7
1.3.1 复合地基效应	7
1.3.2 复合地基破坏模式	8
1.4 复合地基的研究现状	10
1.4.1 试验研究	10
1.4.2 数值计算	13
1.4.3 复合地基承载力和沉降研究	14
1.4.4 变刚度理论研究	16
1.5 研究思想、方法和内容	17
2 模型试验设计	19
2.1 城市地下工程相似模拟试验系统介绍	19
2.1.1 模型箱体	20
2.1.2 加载系统	20
2.1.3 加载油路系统	20
2.1.4 数据采集系统	20
2.2 相似理论基础	22
2.2.1 相似理论概述	22
2.2.2 相似理论基础	23
2.2.3 相似定理	23
2.2.4 相似准则的导出	25
2.2.5 准则的判断和选择	26
2.2.6 物理相似模型试验设计的基本原则和设计步骤	27
2.3 模拟试验设计	28
2.3.1 罗列参数、求准则	28
2.3.2 试验内容	30
2.3.3 试验方案	31
3 模型试验结果及分析	38
3.1 单桩复合地基模型试验	38

3.1.1	$p-s$ 曲线	38
3.1.2	桩土应力比及荷载分担	39
3.1.3	桩身应力分布	40
3.1.4	桩侧摩阻力沿桩身分布	40
3.1.5	土体竖向应力沿深度分布	41
3.2	群桩复合地基模型试验	42
3.2.1	$p-s$ 曲线	42
3.2.2	桩土应力比及荷载分担	43
3.2.3	桩身应力分布	44
3.2.4	桩侧摩阻力沿桩身分布	46
3.2.5	土体竖向应力沿深度分布	47
3.2.6	差异沉降	49
3.3	变刚度复合地基模型试验	50
3.3.1	$p-s$ 曲线	50
3.3.2	桩土应力比及荷载分担	50
3.3.3	桩身应力分布	51
3.3.4	差异沉降	52
3.4	改变褥垫层厚度的复合地基模型试验	53
3.4.1	$p-s$ 曲线	53
3.4.2	桩土应力比及荷载分担	53
3.4.3	桩身应力分布	55
3.4.4	褥垫层对桩间土应力分布的影响	55
3.5	桩长、荷载对复合地基沉降的影响规律	55
3.5.1	单桩复合地基	55
3.5.2	九桩复合地基	56
4	数值模拟结果及分析	58
4.1	概述	58
4.2	ANSYS 在土木工程中的应用	58
4.2.1	ANSYS 简介	58
4.2.2	ANSYS 在土木工程中应用介绍	60
4.3	有限元模型的建立	69
4.3.1	计算模型体系	69
4.3.2	单元划分	69
4.3.3	刚度矩阵的建立	72
4.3.4	方程组求解方法的选择	72
4.4	材料非线性的模拟	73
4.5	复合地基数值模拟分组方案	74
4.6	单桩复合地基数值模拟	75
4.6.1	桩长的影响	75
4.6.2	桩径的影响	78

4.6.3 桩身模量的影响	79
4.6.4 加固区土体压缩模量的影响	80
4.6.5 下卧层土体压缩模量的影响	82
4.7 褥垫层作用机理的数值模拟	84
4.7.1 褥垫层厚度的影响	84
4.7.2 褥垫层模量的影响	85
4.8 群桩复合地基数值模拟	86
4.8.1 桩长的影响	86
4.8.2 桩身模量的影响	90
4.8.3 加固区土体压缩模量的影响	93
4.8.4 下卧层土体压缩模量的影响	95
4.9 变刚度复合地基的数值模拟	97
5 实现变刚度复合地基的必要性与方案研究	100
5.1 控制沉降和差异沉降的重要性	100
5.2 差异沉降的产生	101
5.2.1 群桩中不同桩位的差异沉降	101
5.2.2 不同荷载下产生的差异沉降	101
5.2.3 桩体下不同下卧层的差异沉降	101
5.3 群桩复合地基应力场、位移场的分析	102
5.3.1 群桩复合地基应力场、位移场特点	102
5.3.2 群桩复合地基中桩、边桩、角桩应力场、位移场比较	104
5.4 实现变刚度复合地基的方案研究	106
5.4.1 改变桩长	106
5.4.2 改变桩径	106
5.4.3 改变桩体模量	107
5.5 变刚度复合地基应力场、位移场的分析	107
5.5.1 桩顶应力	108
5.5.2 负摩阻力和桩身最大应力	108
5.5.3 桩侧正摩阻力和桩端应力	108
5.6 变刚度调平设计的基本内容	109
5.6.1 变刚度调平设计的概念	109
5.6.2 天然地基箱基的变形特征	109
5.6.3 均匀布桩的桩筏基础的变形特征	110
5.6.4 均匀布桩的桩顶反力分布特征	110
5.6.5 碟形沉降和马鞍形反力分布的负面效应	111
5.6.6 变刚度调平概念设计	111
5.6.7 试验验证	113
5.6.8 工程应用	113
6 复合地基承载力和沉降计算	115
6.1 传统复合地基承载力计算	115

6.1.1	复合地基承载力计算模式	115
6.1.2	应力比公式	116
6.1.3	稳定分析法	116
6.1.4	粘结材料桩极限承载力计算	117
6.1.5	桩间土极限承载力计算	118
6.1.6	复合地基加固区下卧层承载力验算	118
6.2	传统复合地基沉降计算	118
6.2.1	复合地基沉降计算模式	118
6.2.2	加固区压缩量的计算方法	119
6.2.3	下卧层压缩量的计算方法	120
6.3	变刚度复合地基承载力计算	122
6.4	变刚度复合地基沉降计算	122
6.4.1	加固区压缩量的计算方法	122
6.4.2	下卧层压缩量的计算方法	124
6.5	桩体沉降法计算复合地基沉降	124
6.5.1	单桩复合地基	125
6.5.2	群桩复合地基	127
6.5.3	桩体沉降法与模型试验值检验	131
6.5.4	桩体沉降法与唐山会展中心广场沉降观测值检验	132
6.6	变刚度复合地基沉降计算经验公式推导	133
6.7	长短桩复合地基设计	135
6.7.1	长短桩复合地基适用范围	135
6.7.2	长短桩复合地基设计步骤	135
6.8	以沉降量为控制指标的复合桩基设计	136
6.8.1	桩土共同工作的客观现象中的主要特征	136
6.8.2	以沉降量为控制指标的复合桩基设计基本概念	137
7	应用灰色理论预测复合地基沉降	141
7.1	应用传统 GM (1, 1) 模型进行沉降预测	141
7.1.1	传统 GM (1, 1) 模型建立	141
7.1.2	模型精度的检验	142
7.1.3	预测分析	143
7.2	应用加权均值 GM (1, 1) 模型进行沉降预测	144
7.2.1	加权均值生成	144
7.2.2	加权均值生成的性质	144
7.2.3	加权均值生成的逆运算	146
7.2.4	建模原理	146
7.2.5	预测分析	147
7.3	精度检验	148
	参考文献	149

1 绪 论

1.1 复合地基的定义、分类和形成条件

1.1.1 复合地基的定义

复合地基 (Composite Subgrade, Composite Foundation) 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,复合地基中增强体和基体是共同承担荷载的。《建筑地基处理技术规范》JGJ 79—2012 定义:部分土体被增强或置换形成增强体,由增强体和周围地基土共同承担荷载的地基。

对于什么是复合地基无论是学术界还是工程界至今尚无比较统一的认识。复合地基是一个新概念,正在不断的发展中。不少地基处理技术是通过地基处理形成复合地基来达到提高地基承载力、减少沉降的。随着地基处理技术的不断发展和复合地基技术在土木工程建设中应用的推广,多种形式的复合地基在工程建设中得到应用。

初期,复合地基主要是指天然地基中设置碎石桩而形成的复合地基,人们将注意力主要集中在碎石桩复合地基的应用和研究上。随着深层搅拌法和高压喷射注浆法在地基处理中的推广应用,人们开始重视水泥土桩复合地基的研究。碎石桩和水泥土桩的差别表现在前者桩体材料碎石为散体材料,后者水泥土为粘结材料。碎石桩属于散体材料桩,水泥土桩属于粘结材料桩。随着水泥土桩复合地基的应用,复合地基的概念发生了变化,由碎石桩复合地基这种散体材料桩复合地基逐步扩展到粘结材料复合地基。随着减少沉降量,桩和桩筏基础的应用研究,以及各类低强度混凝土桩复合地基的应用,人们将复合地基概念进一步拓宽。将粘结材料桩按刚度大小分为柔性桩和刚性桩两大类,于是提出了柔性桩复合地基和刚性桩复合地基的概念。随着土工合成材料在工程建设中的广泛应用,又出现了水平增强体复合地基的概念。

我国软弱地基类别较多,分布广,自改革开放以来土木工程建设规模大,发展快。我国又是发展中国家,建设资金短缺。如何在保证工程质量的前提下,节省工程投资显得十分重要。复合地基技术能够较好地利用增强体和天然地基两者共同承担建(构)筑物荷载的潜能,因此具有比较经济的特点。复合地基技术近年来在我国得到重视发展是与我国工程建设对它的需求分不开的。近年来不少专家学者从事复合地基理论和实践研究,1990年中国建筑学会地基基础专业委员会在承德召开了我国第一次以复合地基为专题的学术研讨会。会上交流总结了复合地基技术在我国的应用情况,有力促进了复合地基理论实践在我国的发展。1996年,中国土木工程学会土力学及基础工程学会地基处理学术委员会在

浙江大学召开了复合地基理论和实践学术讨论会,总结成绩,交流经验,共同探讨发展中的问题,促进了复合地基理论和实践水平的进一步提高。目前,复合地基理论和实践研究日益得到重视,复合地基已成为一种常用的地基基础形式。

1.1.2 复合地基的分类

当天然地基不能满足建(构)筑物对地基的要求时,需要进行地基处理,形成人工地基,以保证建(构)筑物的安全与正常使用。地基处理方法很多,按地基处理的加固原理分类,主要有下述六大类:置换,排水固结,振密、挤密,灌入固化物,加筋,以及冷、热处理等。经过地基处理形成的人工地基大致上可分为三类:均质地基、多层地基和复合地基。

人工地基中的均质地基是指天然地基在地基处理过程中加固,土体性质得到全面改良,加固区土体的物理力学性质基本上是相同的,加固区的范围无论是平面位置与深度,与荷载作用对应的地基持力层或压缩层范围相比较都已满足一定的要求。例如:均质的天然地基采用排水固结法形成的人工地基。在排水固结过程中,加固区范围内地基土体中孔隙比减小,抗剪强度提高,压缩性减小。加固区内土体性质比较均匀。若采用排水固结法处理的加固区域与荷载作用面积相应的持力层厚度和压缩层厚度相比较也满足一定要求,则这种人工地基可视为均质地基。均质人工地基承载力和变形计算方法基本上与均质天然地基的计算方法相同。

人工地基中的双层地基是指天然地基经地基处理形成的均质加固区的厚度与荷载作用面积或者与其相应持力层和压缩层厚度相比较为较小时,在荷载影响区内,地基由两层性质相差较大的土体组成。采用换填法或表层压实法处理形成的人工地基,当处理范围比荷载作用面积较大时,可归为双层地基。双层人工地基承载力和变形计算方法基本上与天然双层地基的计算方法相同。

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(天然地基土体或被改良的天然地基土体)和增强体两部分组成的人工地基。在荷载作用下,基体和增强体共同承担荷载的作用。

竖向增强体习惯上称为桩,竖向增强体复合地基通常称为桩体复合地基。目前,在工程中应用的竖向增强体有碎石桩、砂桩、水泥土桩、石灰桩、钢筋混凝土桩等。

对于桩体复合地基,按传统的分类方法,依据桩的类型进行分类:碎石桩复合地基、砂桩复合地基、深层搅拌桩复合地基、旋喷桩复合地基、石灰桩复合地基、土桩复合地基、CFG桩复合地基、小桩复合地基、疏桩复合地基等。

龚晓南根据竖向增强体的性质,将复合地基分为三类:

- (1) 散体材料桩复合地基。如砂桩、碎石桩、矿渣桩复合地基等。
- (2) 柔性桩复合地基。如土桩、石灰桩、灰土桩、CFG桩复合地基。
- (3) 刚性桩复合地基。如混凝土疏桩、小桩复合地基等。

向春尧按桩体性质将复合地基分为两大类:散体材料复合地基和柔性材料复合地基;按制桩工艺分为:挤土桩(分振填和夯填两类)和非挤土桩(分为旋喷桩和搅拌桩等)。

叶书麟等将复合地基按成桩材料分为如下三类:

- (1) 散体类桩复合地基。如碎石桩、砂桩复合地基等。

(2) 水泥土桩复合地基。如水泥搅拌桩、旋喷桩复合地基等。

(3) 混凝土类桩复合地基。如树根桩、CFG 桩复合地基等。

《建筑地基处理技术规范》JGJ 79—2012 将复合地基划分为：

(1) 振冲碎石桩和沉管砂石桩复合地基：适用于挤密处理松散砂土、粉土、粉质黏土、素填土、杂填土等地基。

(2) 水泥土搅拌桩复合地基：适用于处理正常固结的淤泥、淤泥质土、素填土、粘性土（软塑、可塑）、粉土（稍密、中密）、粉细砂（松散、中密）、中粗砂（松散、稍密）、饱和黄土等土层。

(3) 旋喷桩复合地基：适用于处理淤泥、淤泥质土、粘性土（流塑、软塑和可塑）、粉土、砂土、黄土、素填土和碎石土等地基。

(4) 灰土挤密桩和土挤密桩复合地基：适用于处理地下水位以上的粉土、粘性土、素填土、杂填土和湿陷性黄土等地基。

(5) 夯实水泥土桩复合地基：适用于处理地下水位以上的粉土、粘性土、素填土和杂填土等地基。

(6) 水泥粉煤灰碎石桩复合地基：适用于处理粘性土、粉土、砂土和自重固结已完成的素填土地基。

(7) 桩锤冲扩桩复合地基：适用于处理地下水位以上的杂填土、粉土、粘性土、素填土和黄土等地基。

(8) 多桩型复合地基：适用于处理不同深度存在相对硬层的正常固结土，或浅层存在欠固结土、湿陷性黄土、可液化土等特殊土，以及地基承载力和变形要求较高的地基。

水平向增强体复合地基主要是指加筋土地基。随着土工合成材料的发展，加筋土地基应用越来越广泛。加筋材料主要是土工织物和土工格栅等。

若不考虑水平向增强体复合地基，则竖向增强体复合地基可称为桩体复合地基或简称复合地基。

桩体复合地基有两个基本特点：

(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，基体和增强体共同直接承担荷载的作用。

第一个特征使复合地基区别于均质地基，第二个特征使复合地基区别于桩基。根据传统的桩基理论，竖向荷载施加于桩顶，上部桩身首先受到压缩而发生相对于土的向下位移，于是桩周土在桩侧界面上产生向上的摩阻力，荷载沿桩身向下传递的过程就是不断克服这种摩阻力并通过它向土中扩散的过程；因而桩身轴力沿着深度而逐渐减小；及至桩端，与桩底土反力相平衡，桩端将出现桩端反力，同时使桩底土压缩，致使桩身下沉，又使摩阻力进一步发挥。随着荷载的逐渐增加，上述过程周而复始地进行，直至变形稳定为止。此乃荷载传递全过程。近年来在摩擦桩基础中考虑桩土共同作用，也就是说考虑桩和桩间土共同直接承担荷载。因此考虑桩土共同作用的摩擦桩基也可以视为刚性桩复合地基，可采用复合地基理论计算。从某种意义上讲，复合地基介于均质地基和桩基之间。

前面已经提到人工地基中的均质地基，双层地基和复合地基。严格地说，天然地基也不是均质、各向同性的半无限体。天然地基往往是分层的，而且对每一层土，土体的强度

和刚度也是随深度变化的。天然地基需要进行地基处理时,被处理的区域在满足设计要求的前提下应尽可能小,以求得较好的经济效益。而且各种地基处理方法在加固地基的原理上又有很大差异。因此,对人工地基进行精确分类是很困难的。然而,上述分类有利于我们开展对各种人工地基的承载力和变形计算理论的研究。常见的各种天然地基和各种人工地基粗略地可分为均质地基(或称浅基础)、双层地基(或多层地基)、复合地基和桩基四大类。以往对浅基础和桩基础的承载力和沉降计算理论研究较多,而对双层地基和复合地基的计算理论研究较少。特别是对复合地基承载力和沉降计算理论的研究还不够。复合地基理论正处于发展之中,许多问题有待进一步认识。

《建筑地基处理技术规范》JGJ 79—2012 列出的主要地基处理技术包括:

- (1) 换填垫层;
- (2) 预压地基;
- (3) 压实地基和夯实地基;
- (4) 复合地基;
- (5) 注浆加固;
- (6) 微型桩加固。

其中复合地基主要包括:

- (1) 振冲碎石桩和沉管砂石桩复合地基;
- (2) 水泥土搅拌桩复合地基;
- (3) 旋喷桩复合地基;
- (4) 灰土挤密桩和土挤密桩复合地基;
- (5) 夯实水泥土桩复合地基;
- (6) 水泥粉煤灰碎石桩复合地基;
- (7) 柱锤冲扩桩复合地基;
- (8) 多桩型复合地基。

1.1.3 复合地基的形成条件

复合地基是通过增强体与地基土的共同作用,提高地基承载力,减少结构物沉降,共同满足结构物对地基的要求。增强体和基体形成复合地基是有条件的:在荷载作用下,增强体和基体应能共同承担上部荷载。

1. 中高粘结强度桩(如夯实水泥土桩和 CFG 桩)

(1) 基础与桩之间不设褥垫层

如图 1-1 所示,土层 I 为较软弱土层,土层 II 为坚硬土层,土层 II 的压缩模量远大于土层 I 的压缩模量。图 1-1(a) 中基础直接作用于桩和桩间土上,桩穿透土层 I,桩端落在土层 II 上,由于桩端落在土层 II,复合地基沉降主要由桩的压缩变形控制。通常桩的压缩模量远大于桩间土,其压缩变形很小。相应桩间土的变形很小,桩间土的承载能力很难发挥,荷载基本由桩承担。为了发挥桩间土的承载能力,也可人为缩短桩长,使桩端落在土层 I 中,形成悬浮桩,如图 1-1(b) 所示。此时,桩的沉降加大,桩间土的变形有所增加,其承载力有所发挥,有的学者认为,此种情况可认为是复合地基。但即使如此,桩

间土的承载能力也不能充分发挥，其受力特性与桩基础相类似。

摩擦桩的桩间土承载能力发挥系数为 0.11~0.48，显然，桩间土强度的发挥程度很低。因此，基础直接作用在桩和桩间土上，无论桩端是否落在好土层上，桩间土的承载能力都不能充分发挥。更重要的是，在图 1-1 (b) 中，桩端落于土层 I，端阻效应大大削弱，导致复合地基的承载能力显著降低，这尤为不合理。

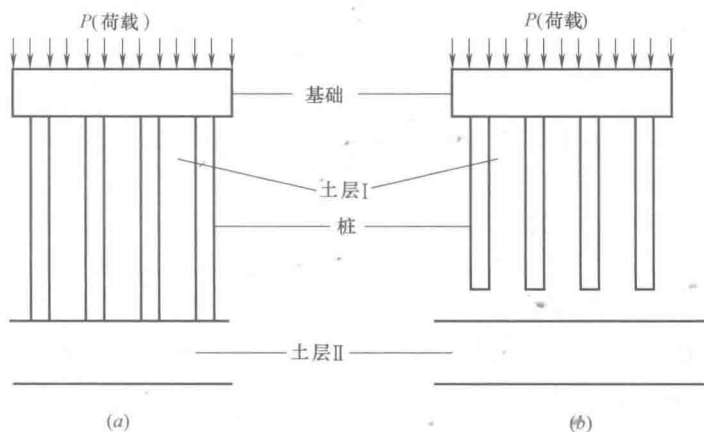


图 1-1 基础直接作用在桩上的情况

(2) 基础与桩和桩间土之间设置一定厚度的褥垫层

如图 1-2 所示，基础与桩和桩间土之间设置一定厚度的散体粒状材料组成的褥垫层，则受力情况与图 1-1 所示的情况就有很大的不同。

在荷载作用下，由于桩的模量远大于土的模量，桩间土表面变形大于桩顶变形，桩向褥垫层刺入，伴随这一变化过程，粒状散体材料不断补充到桩间土表面上，基础通过褥垫层始终与桩间土保持接触，桩间土始终参与工作，桩间土承载能力得以发挥。

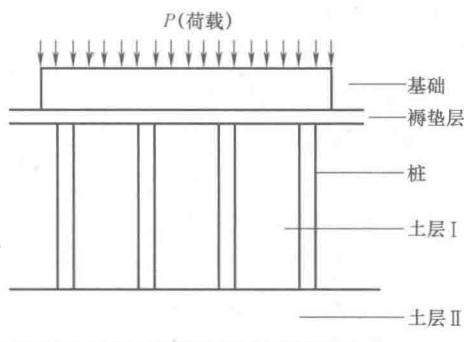


图 1-2 基础与桩顶之间设褥垫层的情况

可见，基础下是否设置褥垫层，对复合地基受力影响很大。基础下不设褥垫层，复合地基承载特性与桩基础相似，在给定荷载作用下，桩承受较多荷载，随时间增加，桩发生一定沉降，一部分荷载逐渐向土体转移，桩承担的荷载随时间的增加而有所减少，土承担的荷载随时间的增加有所增加。桩间土承载力发挥依赖于桩的沉降，如果桩端落在坚硬土层上，桩的沉降很小，桩上荷载向土体转移很小，桩间土承载能力难以发挥，不能成为复合地基。基础下设置褥垫层，桩间土承载力的发挥就不单纯依赖于桩的沉降，即使桩端落在好土层上，也能保证荷载通过褥垫作用传递到桩间土上，使桩土共同作用。

2. 散体桩和低粘结度桩（如碎石桩和石灰桩）

碎石桩等散体材料桩复合地基及石灰桩等桩体粘结度很低的复合地基，不设褥垫层，

也可以充分发挥桩间土的承载能力。这是因为这些桩体本身或为散体材料组成,具有褥垫层的作用,或在荷载作用下,桩体顶部破坏,形成了褥垫层。

深层搅拌桩和旋喷桩复合地基桩体具有一定粘结强度,从前文所述可知,基础下不设置一定厚度的褥垫层,复合地基工作性状与桩基相似,桩间土强度难以充分发挥。因此,《建筑地基处理技术规范》JGJ 79—2012 中提到这两种桩型的复合地基桩间土承载能力发挥系数 β 为:深层搅拌桩复合地基,当桩端下为软土时, β 可取为 0.5~1.0;当桩端下为硬土时, β 可取为 0.1~0.4。旋喷桩复合地基, β 可取为 0.2~0.6。

由于不设置褥垫层,复合地基桩间土承载能力很难发挥,许多学者认为,这样的人工地基不能划分为复合地基,同时建议在基础和桩之间设置一定厚度的褥垫层并相应提高桩间土承载力发挥系数。

CFG 桩复合地基,建议 β 取 0.8。

尤为重要的是,对水泥土桩复合地基,基础下设置一定厚度的褥垫层,还可以显著改善复合地基桩土相互作用性状。由于褥垫层的变形调整作用,桩间土表面沉降大于桩顶沉降,在桩的上部形成负摩擦区。负摩阻力对于桩基础是不利的,但对于复合地基,桩有阻止桩间土下沉的作用,减少桩间土的沉降变形。

对水泥土桩复合地基,基础下设置一定厚度的褥垫层,还可以提高桩的承载能力。基础下设置褥垫层后,桩间土分担的荷载大大增加,使桩间土垂直附加应力增加,桩间土水平附加应力随之增加。

水平附加应力增加对桩有两个作用:增加了桩间土对桩侧的正压力,提高了桩的侧摩阻力,从而提高了桩的承载力。桩体材料的室内三轴试验表明,水泥土抗压强度随围压的增加而有所增加。

通过以上讨论可以得到如下认识:

(1) 增强体(桩)、桩间土构成的复合土体与基础之间应设置一定厚度的褥垫层(褥垫层材料一般为散体材料,如:砂、碎石等),以保证桩土共同承担荷载。特别是对于中、高粘结强度桩,褥垫层是不可缺少的一个组成部分。

(2) 在散体桩(如:碎石桩)和低粘结强度桩(如:石灰桩),有时没有设置褥垫层,也能保证桩土共同承担荷载。

1.2 研究背景

从 20 世纪 80 年代开始,由于改革开放,我国经济得到快速、持续发展,基本建设规模的扩大,土建工程日益增多,尤其是沿海地区大批工业项目的上马兴建和沿海城市高层建筑的发展,城市发展的空间越来越小,不得不在不良的地基上修建较大的建筑,因而土建对地基提出了越来越高的要求,对不良地基的处理成为必然。复合地基有工艺简单、施工方便、造价低廉等优势,目前复合地基较广泛地应用于建筑工程、公路、铁路路基、水电地基处理工程中,自 80 年代后期,逐步在全国 21 个省市推广应用,在高层、超高层(30 层以上)建筑地基处理过程中也已开始应用。

复合地基有以下特点:

工艺简单。无论是振冲碎石桩复合地基,还是 CFG 桩复合地基、夯实水泥土桩复合地基,目前都有成熟的施工工艺,原料拌合、夯填均易操作,技术指标容易控制。

施工方便。一般不需要大型施工机械,对 CFG 桩等夯填类桩复合地基,使用小型搅拌机、洛阳铲和夯锤即可施工。

造价低廉。耗用建筑三材少,一般可就地取材或者使用工业废料,如粉煤灰、矿渣或其他工业垃圾、建筑垃圾;不但原料费低廉,还具有良好的环境效益。

在实际应用中,施工技术得到迅速发展,并取得了良好的加固效果,很大程度地推动了工程建设。

但是,工程实践超前,而设计理论研究滞后,例如,在《建筑地基基础设计规范》GB 50007—2011 中只提出:“复合地基设计应满足建筑物承载力和变形要求,复合地基承载力特征值应通过现场复合地基载荷试验确定,或采用增强体的荷载试验结果和其周边土的承载力特征值结合经验确定。”而没有比较具体的规定。同时该规范对褥垫层的材料、厚度也没有太明确的规定。这种现象已成为制约复合地基进一步应用的因素。

复合地基研究的关键在于各类复合地基中附加应力的分布规律及特点,桩土共同作用的机理,复合地基与基础变形协调关系的协调把握,以往对这些问题的研究所采用的解析方法与室内外测试方法,多以探索单桩复合地基桩、土作用或某一特定条件下的单一问题为研究对象,而对于复杂的复合地基进行较综合的研究往往由于其自身的局限性而难以继续深入。为了进一步推动复合地基在我国的研究及工程建设的应用,开展复合地基力学性状的物理与数值模拟研究是非常必要和极具现实意义的。

随着工程实践的发展,许多问题需要研究和亟待解决。如:褥垫层厚度、褥垫层加固机理、桩间土加固机理、桩土荷载分担比、桩与土的应力传递方式、地基刚度分布对地基反力分布的影响、单桩承载能力、群桩效应及群桩合理布型、复合地基沉降计算、群桩复合地基的差异沉降问题等一直是工程建设中具有重要现实意义的理论问题。

本文拟在已有研究基础上,以 CFG 桩复合地基为研究对象,进行单桩和群桩复合地基承载变形力学性状的试验研究及数值模拟,具有重要的学术价值和应用价值。

同时研究具有空间变异性的新型复合地基(作者称之为变刚度复合地基),变刚度复合地基比传统的单一型复合地基有更优越的承载性能、变形协调性能,并能更有效地发挥桩土共同承载作用,从原理上讲是先进的。现有进行复合地基施工的设备与配套设施能满足该新型复合地基的施工要求,无需投入与开发专门的施工设施,从技术上讲是可行的。因而,研究具有重要意义,该技术的成功开发将具有很好的经济效益与广泛的应用前景。

1.3 复合地基效应与破坏模式

1.3.1 复合地基效应

复合地基通过设置增强体,将地基分为二部分:加固区和非加固区。增强体的设置对加固区土体有加筋作用,有的还有挤密作用、排水固结作用和其他物理化学作用。

一些复合地基在施工过程中对桩间土体有挤密作用。如振冲挤密碎石桩复合地基、振动挤密砂石桩复合地基等。采用振动成桩施工工艺设置桩体的,对桩间土都有挤密作用。另外,石灰桩,粉体喷射深层搅拌桩中的生石灰、水泥粉具有吸水、发热、膨胀作用,除对桩周土具有一定的挤密效果外,还与土体产生一系列物理—化学作用。

不少竖向增强体或水平向增强体,如碎石桩、砂桩、土工织物加筋体间的粗粒土等,都具有良好的透水性,是地基中的排水通道。在荷载作用下,地基土体中会产生超孔隙水压力。由于这些排水通道有效地缩短了排水距离,加速了桩间土的排水固结,桩间土排水固结过程中土体抗剪强度得到了增长。

增强体的设置使复合地基加固区整体抗剪强度提高,压缩性减小。在工程设计计算中通常采用复合抗剪强度和复合模量来度量加固区复合土体的强度和模量。加固区往往是荷载持力层的主要部分,加固区复合土体具有较高的抗剪强度,可有效地提高地基稳定性,或者说提高地基承载力。加固区也是地基压缩层的主要部分,复合土体具有较高模量,可有效减小土层的压缩量,或者说减小沉降。应该注意到,具有较高模量的加固区的存在,将对荷载作用下在地基中产生的应力场和位移场产生较大影响。

对桩体复合地基,通过桩体作用,可将荷载传递给地基中较深的土层,使上层地基土(加固区)中附加应力减小,而使深层地基土(下卧层)中的附加应力相对增大。应力场的变化,位移场也相应发生变化。与未设置增强体时(天然地基)相比较,复合地基加固区中不仅模量提高,而且附加应力减小,土层压缩模量减小明显。与未设置增强体时相比较,加固区下卧层中的附加应力是增大的,其压缩量也是增大的。

对水平向增强体复合地基,水平向增强体的存在使地基中附加应力得到较好的扩散。一般情况下,水平向增强体复合地基加固区比荷载作用区范围要大,而加固区厚度不会太厚。水平向增强体复合地基的存在,对地基稳定性会有较大提高,但对减小地基沉降的效果应视软土层厚度大小作具体分析。加固区下软土层较薄,由于应力扩散作用明显,地基沉降可明显减小。若加固区下软土层较厚,由于影响深度深,浅部的应力扩散对深层软土中附加应力减小有限,故减小地基最终沉降效果不明显。

复合地基的效应应根据不同的地基处理形式、施工方法以及天然地基情况作具体分析。不同的工程地质条件下、不同形式的复合地基具有不同的效应,应具体问题具体分析。

1.3.2 复合地基破坏模式

竖向增强体复合地基和水平向增强体复合地基破坏模式是不同的,现分别加以讨论分析。

对竖向增强体复合地基,刚性基础下和柔性基础下破坏模式也有所区别。

竖向增强体复合地基的破坏形式首先可以分成下述两种情况:一种是桩间土首先破坏,进而发生复合地基全面破坏;另一种是桩体首先破坏,继而引起复合地基全面破坏。在实际工程中,桩间土和桩体同时达到破坏是很难遇到的。大多数情况下,桩体复合地基都是桩体先破坏,继而引起复合地基全面破坏。

竖向增强体复合地基中桩体破坏的模式可以分成下述四种情况:刺入破坏,鼓胀破

坏, 桩体剪切破坏和滑动剪切破坏。如图 1-3 所示。

桩体发生刺入破坏如图 1-3 (a) 所示。桩体刚度较大, 地基承载力较低的情况下发生刺入破坏。桩体发生刺入破坏, 承担荷载大幅降低, 进而引起复合地基桩间土破坏, 造成复合地基全面破坏。刚性桩复合地基较易发生刺入破坏模式。特别是柔性基础下 (填土路堤下) 刚性基础复合地基更容易发生刺入破坏模式。若处在刚性基础下, 则可能产生较大沉降, 造成复合地基失效。

桩体鼓胀破坏模式如图 1-3 (b) 所示。在荷载作用下, 桩周土不能提供桩体足够的围压, 以防止桩体发生过大的侧向变形, 产生桩体鼓胀破坏。桩体发生鼓胀破坏造成复合地基全面破坏, 散体材料桩复合地基较容易发生鼓胀破坏模式。在刚性基础下和柔性基础下散体材料桩复合地基均可能发生桩体鼓胀破坏。

桩体剪切破坏模式如图 1-3 (c) 所示。在荷载作用下, 复合地基中桩体发生剪切破坏, 进而引起复合地基全面破坏。低强度的柔性桩较容易产生剪切破坏。刚性基础下和柔性基础下低强度柔性桩复合地基均可能产生桩体剪切破坏。相比较柔性基础下发生的可能性更大。

滑动剪切破坏模式如图 1-3 (d) 所示。在荷载作用下, 复合地基沿某一滑动面产生滑动破坏。在滑动面上, 桩体和桩间土均发生剪切破坏。各种复合地基均可能发生滑动破坏模式。柔性基础下比刚性基础下发生的可能性更大。

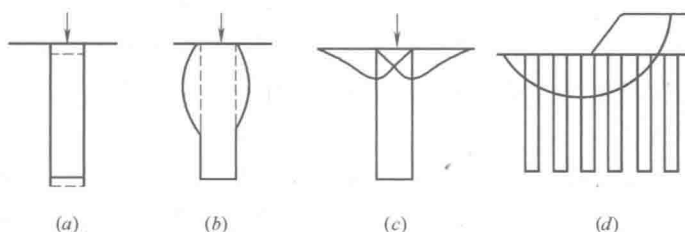


图 1-3 竖向增强体复合地基破坏模式

(a) 刺入破坏; (b) 鼓胀破坏; (c) 桩体剪切破坏; (d) 滑动剪切破坏

在荷载作用下, 一种复合地基的破坏究竟取什么模式, 影响因素很多。从上面分析可知, 它不仅与复合地基中增强体材料性质有关, 还与复合地基上结构形式有关。除此之外, 还与荷载形式有关。竖向增强体本身的刚度对竖向增强体复合地基的破坏模式影响较大。桩间土的性质与增强体的性质的差异程度会对复合地基的破坏模式产生影响。若两者相对刚度较大, 较易发生桩体刺入破坏。但桩筏基础下的刚性桩复合地基, 由于筏形基础的作用, 复合地基中的桩体也不易发生刺入破坏。显然, 复合地基上的基础形式对复合地基的破坏模式也有较大影响。总之, 对于具体的桩体复合地基的破坏模式应考虑上述各种因素, 通过综合分析加以估计。

另外, 刚性基础下复合地基失效主要不是地基失稳, 而是沉降过大, 或不均匀沉降过大。路堤或堆场下复合地基失效首先要重视地基稳定性问题, 然后是变形问题。

水平向增强体复合地基通常的破坏模式是整体破坏。受天然地基土体强度、加筋体强度和刚度以及加筋体的布置形式等因素影响而具有多种破坏形式。不同学者有不同的分