

复合地基 理论及工程应用

龚晓南 编著

中国建筑工程工业出版社

复合地基理论及工程应用

龚晓南 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

复合地基理论及工程应用/龚晓南编著. —北京:
中国建筑工程出版社, 2002
ISBN 7-112-05299-8

I. 复... II. 龚... III. 人工地基—研究
IV. TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 067188 号

复合地基理论及工程应用

龚晓南 编著

*

中国建筑工程出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京市兴顺印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 12 字数: 319 千字

2002 年 11 月第一版 2002 年 11 月第一次印刷

印数: 1—2,000 册 定价: 18.00 元

ISBN 7-112-05299-8

TU·4945 (10913)

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)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

本书较全面地介绍了作者和他的学生在复合地基理论和实践方面的研究成果,对作者已出版的《复合地基》一书中形成的复合地基理论框架作了补充和完善,较全面地介绍了复合地基技术的新发展和工程应用,对发展中存在问题也作了论述。全书分十章:绪论,土和复合土的基本性状,桩体复合地基承载力,水平向增强体复合地基承载力,复合地基沉降计算,复合地基优化设计和按沉降控制设计,基础刚度对复合地基性状影响,复合地基在地基基础工程中的地位和评价,复合地基振动反应和地震响应,复合地基工程应用及实例。本书可供土木工程师学习、应用复合地基技术时参考,也可用作土木工程类专业研究生教学参考书。

* * *

责任编辑 黎 钟 赵梦梅

前 言

今天对土木工程师,复合地基已不是陌生的词汇,但是对什么是复合地基,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,正在不断发展之中。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,各种各样型式的复合地基在工程建设中得到应用,取得了良好的经济效益和社会效益。

1992年笔者在《复合地基》一书前言中谈到复合地基理论的发展远远落后于复合地基工程实践,十年过去了,这一状况至今尚未得到改变。不仅仅是理论研究进展不快,而且更为主要的是工程实践发展更快。理论研究进展没有工程实践发展快是造成这一状况的根本原因。目前在我国复合地基(composite foundation)、浅基础(shallow foundation)和桩基础(pile foundation)已成为常用的三种基础形式。复合地基在建筑工程、市政工程、道路工程,以及堤坝工程中得到广泛应用。近十几年来,笔者一直在学习、探讨、总结、宣传复合地基理论和实践的进步,促进复合地基技术的推广应用和应用技术水平的提高。本书较全面地总结了笔者在复合地基理论和实践方面的研究成果和心得体会。对笔者在《复合地基》中形成的复合地基理论框架作了补充和完善,较全面地介绍了复合地基技术的新发展和工程应用,对发展中存在的问题也作了论述。笔者认为复合地基的概念随着其实践的发展有一个发展过程。对复合地基概念的认识存在狭义和广义之分。广义复合地基概念侧重在荷载传递机理上来揭示复合地基本质。凡是在荷载作用下,地基中的增强体(桩体)和基体(桩间土)共同直接承担荷载则可归属于复合地基范畴。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。复合地基能较好地发挥桩和桩间土的承载潜能,因此具有较好的经济效益和社会效益。本书是从广义复合地基概念出发讨论和分析有关问题的。

全书共十章:绪论,土和复合土的基本性状,桩体复合地基承载力,水平向增强体复合地基承载力,复合地基沉降计算,复合地基优化设计和按沉降控制设计,基础刚度对复合地基性状影响,复合地基在地基基础工程中的地位和评价,复合地基振动反应和地震响应,复合地基工程应用及实例。前九章介绍复合地基技术的基本理论,最后一章介绍各类复合地基工程实例,供应用时参考。

作者感谢国家自然科学基金会和浙江省自然科学基金会对复合地基理论研究工作的资助,感谢曾国熙教授和浙江大学岩土工程研究所同事们的鼓励和帮助。书中引用了许多科研、高校、工程单位及研究生的研究成果和工程实例。在成书过程中杨晓军博士,黄明聪博士,曾开华博士,博士研究生褚航,葛忻声等帮助校稿、制图。在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免有错误和不当之处,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第1章 绪 论	1
1.1 复合地基概念的发展	1
1.2 复合地基定义和分类	3
1.3 复合地基形成条件	7
1.4 复合地基常用型式	8
1.5 复合地基效用	11
1.6 复合地基破坏模式	13
1.7 复合地基置换率、荷载分担比和复合模量的概念	16
第2章 土和复合土的基本性状	19
2.1 概述	19
2.2 土的基本性状	20
2.2.1 土的分类	20
2.2.2 土的应力应变试验与试验曲线	22
2.2.3 土的变形特性	27
2.2.4 土的强度特性	30
2.3 水泥土及其复合土的基本性状	41
2.3.1 水泥土的形成方法及硬化机理	41
2.3.2 水泥土的物理力学性质	42
2.3.3 水泥土-土复合体的强度特性	52
2.3.4 水泥土-土复合体的压缩特性	55
2.3.5 循环荷载作用下水泥土-土复合体性状	59
2.4 灰土基本性状	60
2.4.1 灰土的分类	60
2.4.2 生石灰成分、水化反应及其特性	61
2.4.3 粉煤灰的成分及性质	64

2.4.4 灰土形成方法和加固机理	65
2.4.5 灰土的强度和变形特性	67
2.5 土工合成材料复合土体性状	70
2.5.1 土工合成材料简介	70
2.5.2 土工合成材料的效用	72
2.5.3 加筋土强度特性	73
2.5.4 土工合成材料加筋土地基性状	83
第3章 桩体复合地基承载力	100
3.1 概述	100
3.2 承载力计算模式	101
3.3 桩体极限承载力计算	105
3.3.1 桩体刚度对荷载传递规律的影响	105
3.3.2 刚性桩极限承载力计算	108
3.3.3 柔性桩极限承载力计算	108
3.3.4 散体材料桩极限承载力计算	114
3.4 桩间土极限承载力计算	122
3.4.1 桩间土承载力影响因素	122
3.4.2 桩间土极限承载力计算方法	123
3.5 复合地基加固区下卧层承载力验算	123
3.6 桩土荷载分担比和桩土应力比的影响因素	124
3.7 刚性基础下桩体复合地基垫层的效用	128
第4章 水平向增强体复合地基承载力	131
4.1 概述	131
4.2 几个承载力计算公式	136
第5章 复合地基沉降计算	150
5.1 概述	150
5.2 复合地基沉降计算模式	150
5.3 复合地基有限单元法	161
5.4 复合地基固结分析	165
5.5 刚性桩复合地基沉降计算	167
5.6 柔性桩复合地基沉降计算	168
5.7 散体材料桩复合地基沉降计算	168
5.8 水平向增强体复合地基沉降计算	169

第 6 章 复合地基优化设计和按沉降控制设计	173
6.1 概述	173
6.2 复合地基位移场特性	174
6.3 复合地基优化设计思路	178
6.4 按沉降控制设计理论	180
6.5 复合地基按沉降控制设计	182
第 7 章 基础刚度对复合地基性状影响	184
7.1 概述	184
7.2 基础刚度对复合地基性状影响试验研究	184
7.3 基础刚度对复合地基性状影响数值分析	189
7.4 柔性基础下复合地基垫层的效用	194
第 8 章 复合地基在地基基础工程中的地位和评价	195
8.1 概述	195
8.2 复合地基与地基处理	196
8.3 复合地基与浅基础和桩基础	198
8.4 复合地基与双层地基	201
8.5 复合地基与复合桩基	205
第 9 章 复合地基振动反应和地震响应	207
9.1 引言	207
9.2 复合地基的振动反应分析	207
9.2.1 荷载形式及其在地基中引起的主要问题	207
9.2.2 竖向周期荷载作用下复合地基振动反应分析	208
9.2.3 水平周期荷载作用下复合地基振动反应分析	214
9.3 复合地基的地震响应分析	218
9.3.1 复合地基在地震作用下的线性粘弹性分析	218
9.3.2 复合地基在地震作用下的非线性分析	223
9.3.3 复合地基在地震作用下的有效应力分析	228
第 10 章 复合地基工程应用及实例	240
10.1 概述	240
10.2 砂石桩复合地基	242
[工程实例 1] 烟台工贸大厦振冲碎石桩复合地基	244
[工程实例 2] 茂名石油化工公司大型油罐挤密砂石桩复合地基	250

10.3 水泥土桩复合地基	258
[工程实例 1] 舟山大型油罐搅拌桩复合地基	259
[工程实例 2] 南京南湖小区南苑新村搅拌桩复合地基	270
[工程实例 3] 宁波某中外合资工程搅拌桩复合地基	276
10.4 低强度桩复合地基	291
[工程实例 1] 铜陵精矿库二灰混凝土桩复合地基	292
[工程实例 2] 北京慧忠北里 C 区高层住宅 CFG 桩复合地基	299
[工程实例 3] 浙江上虞某住宅砂石混凝土桩复合地基	305
10.5 石灰桩复合地基	310
[工程实例 1] 上海金达棉纺厂石灰桩复合地基	311
[工程实例 2] 华中理工大学汉口分校某住宅楼石灰桩复合地基	319
10.6 刚性桩复合地基	321
[工程实例 1] 浙医一院医技楼刚性桩复合地基	322
[工程实例 2] 云南省金融保险综合大楼刚性桩复合地基	334
[工程实例 3] 上海某住宅减少沉降量桩基	336
10.7 灰土桩复合地基	342
[工程实例] 陕西省农贸中心大楼灰土桩复合地基	342
10.8 长短桩复合地基	345
[工程实例 1] 太原兰盾大厦长短桩复合地基	345
[工程实例 2] 杭州白荡海小区某住宅楼长短桩复合地基	351
10.9 加筋土地基	357
[工程实例] 沪嘉高速公路土工织物加筋土地基	357
参考文献	363

第 1 章 绪 论

1.1 复合地基概念的发展

今天对土木工程师,复合地基已不是陌生的词汇,但是对什么是复合地基,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,正在不断发展之中。有人考证复合地基一词国外最早见于 1960 年,国内还要晚一些。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,各种各样型式的复合地基在工程建设中得到应用。

复合地基的涵义随着其实践的发展有一个发展过程。初期,复合地基主要是指在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桩复合地基。随着减少沉降量,桩和桩筏基础的应用和研究,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,又出现了水平向增强体复合地基的概念。前面已经提到,目前对什么是复合地基,或者说哪些地基基础形式可称为是复合地基,学术界和工程界看法是不一致的。一种意见认为各类砂石桩复合地基和各类水泥土桩复合地基属于复合地基,其他各类形式不能称为复合地基;另一种意见认为桩体与基础不连接是复合地基,相连接就不是复合地基,至于桩体是柔性桩、刚性桩并不重要;还有一种意见认为是否属于复合地基与桩体刚度、桩体与基础是否连接无关,而视其在工作状态下,能否保证桩和桩间土共同承担荷载。笔者认为对复合地基的定义认识上存在狭义和广义之分。上述第一种对复合地基的定义可认为是狭义的复合地基定义,更狭义的只认为砂石桩复合地基属于复合地基,或者说只有散体材料桩才能与地基土形成复合地基,其他形式均不应称为复合地基;第三种意见可认为是比较广义的。从发展趋势看,复合地基的概念不断在拓广。广义复合地基概念侧重在荷载传递机理上来揭示复合地基的本质。拙作是从上述广义复合地基概念出发讨论分析有关问题。

我国软弱地基类别多,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。近些年来我国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讨论会。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和实践在我国的发展。笔者在复合地基引论(《地基处理》,1991~1992)^[12]和《复合地基》^[14]中较系统总结了国内外复合地基理论和实践方面的研究成果,提出了基于广义复合地基概念的复合地基定义和复合地基理论框架,总结了复合地基承载力和沉降计算的思路和方法。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^[21],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进一步提高。近年来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。

随着地基处理技术和复合地基理论的发展,近些年来,复合地基技术在我国各地得到广泛应用。目前我国应用的复合地基类型主要有:由多种施工方法形成的各类砂石桩复合地基、水泥土桩复合地基、低强度桩复合地基、土桩、灰土桩复合地基、钢筋混凝土桩复合地基、加筋土地基等。目前复合地基技术在房屋建筑(包括高层建筑)、高等级公路、铁路、堆场、机场、堤坝等土木工程建设中得到广泛应用。复合地基技术的推广应用产生了良好的社会效益和经济效益。

1.2 复合地基定义和分类

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区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。其示意图如图 1-1(a)所示。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已满足一定要求,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,在荷载作用影响区内,地基由两层性质相差较大的土体组成。双层地基示意图如图 1-1(b)所示。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,可归属于双层地基。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。根据地基中增强体的方向又可分为水平向增强体复合地基和竖向增强体复合地基。其示意图如图 1-1(c)和(d)所示。

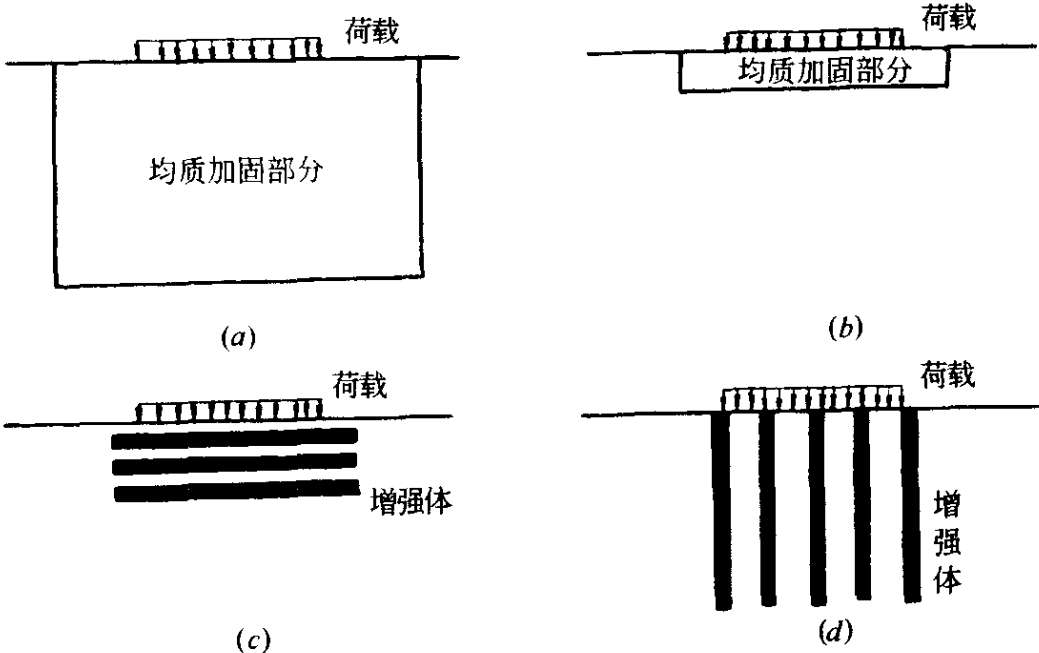


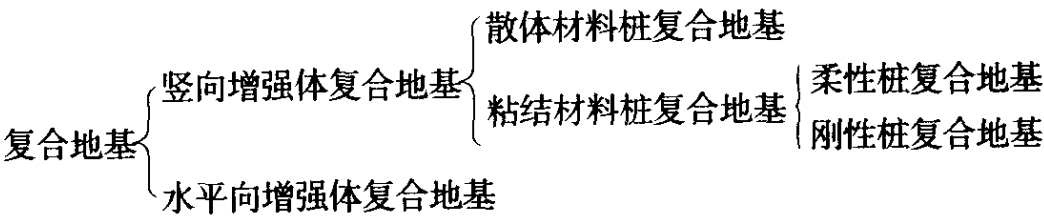
图 1-1 人工地基的分类

(a)均质人工地基;(b)双层地基;(c)水平向增强体复合地基;
(d)竖向增强体复合地基

竖向增强体习惯上称为桩,有时也称为柱。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、灰土桩、钢筋混凝土桩等。根据竖向增强体的性质,桩体复合地基又可分为三类: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如:碎石桩复合地基、砂桩复合地基等。散体材料桩只有依靠周围土体的围箍作用才能形成桩体,桩体材料本身单独不能形成桩体。对应于散体材料桩,柔性桩和刚性桩也可称为粘结材料桩。视桩体刚度不同将粘结材料桩分为柔性桩和刚性桩两种。也有人将其称为半刚性桩和刚性桩。柔性桩复合地基如水泥土桩复合地基、灰土桩复合地基等。刚性桩复合地基如钢筋混凝土桩复合地基,低强度混凝土桩复合地基等。严格讲,桩体的刚度不仅与材料性质有关,还与桩的长径比有关,应采用桩土相对刚度来描述。详细分析见第3章。

水平向增强体复合地基主要指加筋土地基。随着土工合成材料的发展,加筋土地基应用愈来愈多。加筋材料主要是土工织物和土工格栅等。笔者考虑在荷载作用下加筋土地基中筋材与土体的复合作用,故将加筋土地基也纳入复合地基的范畴。

复合地基中增强体方向不同,复合地基性状不同。桩体复合地基中,桩体是由散体材料组成,还是由粘结材料组成,以及粘结材料桩的刚度大小,都将影响复合地基荷载传递性状。根据复合地基工作机理可作下述分类:



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为复合地基。本书主要论述桩体复合地基,对水平向增强体复合地基只作简要介绍。

桩体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,基体和增强体共同直接承担荷载的作用。

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。根据传统的桩基理论,桩基础在荷载作用下,上部结构通过基础传来的荷载是先传给桩体,然后通过桩侧摩擦力和桩底端承力把荷载传递给地基土体的。近年来在摩擦桩基础设计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视为是一种刚性桩复合地基,可采用复合地基理论计算。从某种意义上讲,复合地基界于均质地基和桩基之间。关于复合地基与均质地基和桩基础的关系将在复合地基在地基基础工程中的地位和评价部分(第8章)进一步讨论。

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如图 1-1 所示。大家知道,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着深度变化的。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,上述的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。按照上述的思路,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(或称为浅基础)、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很不够。复合地基理论正处于发展之中,许多问题有待进一步认识,应加强研究。

1.3 复合地基形成条件

在上一节中已经谈到,在荷载作用下,增强体和地基土体共同承担上部结构传来的荷载是复合地基的本质。然而如何设置增强体以保证增强体与天然地基土体能够共同承担上部结构荷载是有条件的,这也是在地基中设置增强体能否形成复合地基的条件。在荷载作用下,增强体与天然地基土体通过变形协调共同承担荷载作用是形成复合地基的基本条件。在图 1-2(a)和(b)中, $E_p > E_{s1}$, $E_p > E_{s2}$,其中 E_p 为桩体模量, E_{s1} 为桩间土模量, E_{s2} 为加固区下卧层土体模量或加固区垫层模量。图 1-2(a)中 E_{s2} 为加固区下卧层土体模量,在图 1-2(b)中为加固区垫层土体模量。容易理解,在图 1-2(a)和(b)中,在承台传递的荷载作用下,通过增强体和桩间土体变形协调可以达到增强体和桩间土体共同承担荷载作用,形成复合地基。图 1-2(c)中, $E_p > E_{s1}$ 。在承台荷载作用下,开始增强体和桩间土体中竖向应力大小大致上按两者的模量比分配,但是随着土体产生蠕变,土中应力不断减小,而增强体中应力逐渐增大,荷载向增强体上转移。若 $E_p \gg E_{s1}$,桩间土承担的荷载比例极小,特别是若遇地下水位下降等因素,桩间土体进一步压缩,桩间土可能不再承担荷载。这样增强体与桩间土体难以形成复合地基共同承担上部荷载。在工程实用上,为了有效减小沉降,复合地基中增强体设置一般都穿透最薄弱土层,落在相对好的土层上,如图 1-2(d)所示。如何保证增强体与桩间土体形成复合地基共同承担上部荷载,是设计工程师应该注意的。图 1-2(d)中, $E_p > E_{s1}$, $E_{s2} > E_{s1}$ 。设计工程师应重视 E_p 、 E_{s1} 和 E_{s2} 之间的关系。当然,对于散体材料增强体,在荷载作用下,桩体产生侧向鼓胀变形,桩体和桩间土的变形可保证桩体和桩间土永远共同承担荷载,因此图 1-2 中各种情况均可形成复合地基。也就是说,采用散体材料桩在各种情况下均可形成复合地基而不需要考虑形成条件;采用粘结材料桩,特别是采用刚性桩形成复合地基需要重视复