

FUHE DIJI SHEJI HE
SHIGONG ZHINAN

复合地基设计和 施工指南

■ 龚晓南 主编



人民交通出版社

内 容 提 要

复合地基技术是一门正在发展的技术,已在我国土木工程建设中得到广泛的应用,产生了良好的社会效益和经济效益。为了总结、推广复合地基技术,促进其在工程中的应用,由浙江大学龚晓南教授组织专家编写本书。全书共分十五章,包括:总论、复合地基承载力和沉降计算概论、复合地基设计若干问题、水泥搅拌桩复合地基、夯实水泥土桩复合地基、振冲碎石桩复合地基、振动挤密砂石桩复合地基、夯扩挤密桩复合地基、强夯置换碎石墩复合地基、灰土桩复合地基、低强度桩复合地基、以沉降量为控制指标的复合桩基设计、长短桩复合地基、加筋土地基、复合地基技术发展展望。

本书可供土建、交通、市政和水利等部门的设计、施工技术人员使用,也可供上述领域的科研、教学和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

复合地基设计和施工指南 / 龚晓南主编. —北京:人民交通出版社, 2003.8

ISBN 7-114-04706-1

I. 复... II. 龚... III. ①人工地基—建筑设计
②人工地基—工程施工 IV. TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 045558 号

Fuhe Diji Sheji He Shigong Zhinan

复合地基设计和施工指南

龚晓南 主编

正文设计:姚亚妮 责任校对:尹 静 责任印制:杨柏力

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010-64216602)

各地新华书店经销

北京凯通印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:22 字数:542 千

2003 年 9 月 第 1 版

2003 年 9 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0001~4000 册 定价:40.00 元

ISBN 7-114-04706-1

前 言

复合地基技术在我国土木工程建设中已经得到了广泛应用,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,而且还处在不断发展之中。有人考证,复合地基一词在国外最早见于1960年,国内应该还要晚一些。笔者认为复合地基的涵义随着其实践的发展有一个发展过程。有人认为各类砂石桩地基和各类水泥土桩地基属于复合地基,其他形式的不能称为复合地基;也有人认为桩体与基础不连接的是复合地基,相连接的就不是复合地基,至于桩体是柔性桩还是刚性桩并不重要;还有人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,而视其在工程状态下,能否保证桩与桩间土共同直接承担荷载。笔者认为对复合地基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;前述第三种意见可认为是比较广义的复合地基定义,广义复合地基的概念侧重在荷载传递机理上来揭示复合地基的本质。从发展趋势看,复合地基的涵义在不断拓展,因此,本指南是从上述广义复合地基的概念出发来讨论分析有关问题的。

我国地域广阔,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。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,复合地基技术的推广应用已产生了良好的社会效益和经济效益。

为了总结、推广复合地基技术,促进其在工程中的应用,人民交通出版社委托笔者组织全国范围内部分专家编写《复合地基设计和施工指南》,供土建、交通、市政和水利等部门的设计、施工技术人员使用,也可供上述领域的科研、教学和管理技术人员参考。

本指南由主编龚晓南(浙江大学)规划全书结构,并邀请有关专家编写。全书共十五章,分工如下:第一章总论;第二章复合地基承载力和沉降计算概论;第三章复合地基设计中的若干问题(龚晓南,浙江大学);第四章水泥搅拌桩复合地基(王启铜,广东省公路建设有限公司);第五章夯实水泥土桩复合地基(滕延京,中国建筑科学研究院);第六章振冲碎石桩复合地基(陈生水,南京水利科学研究院);第七章振动挤密砂石桩复合地基(郑尔康,铁四院软土所);第八章夯扩挤密桩复合地基(李钟,中建第一工程局);第九章强夯置换碎石墩复合地基(郑尔康);第十章灰土桩复合地基(滕文川,兰州有色金属建筑设计研究院);第十一章低强度桩复合地基(龚晓南);第十二章以沉降量为控制指标的复合桩基设计(裴捷、梁志荣,上海申元岩土工程有限公司);第十三章长短桩复合地基(龚晓南);第十四章加筋土地基(王钊,武汉大学);第十五章复合地基技术发展展望(龚晓南)。

复合地基技术是一门正在发展的技术,学术界和工程界,对此尚无比较统一的认识。参加本书编写的作者对复合地基的理解也不是完全一致的,因此本书各章在认识上存在一定差异,请读者注意。

笔者感谢参加本书编写的各位专家的辛勤劳动,书中不少资料引自许多同行的研究成果。在编写过程中,得到许多同行的支持和帮助,曾开华、葛忻声和褚航博士参加部分书稿的校对和制图工作,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不当之处,敬请读者批评指正。

来信请寄:(310027)浙江大学玉泉校区土木工程学系。

龚晓南
于杭州景湖苑
2003年5月

目 录

第一章 总论	(1)
1.1 发展概况	(1)
1.2 复合地基的定义、分类和形成条件	(2)
1.3 复合地基与地基处理	(5)
1.4 复合地基与双层地基	(6)
1.5 复合地基与复合桩基	(7)
1.6 复合地基与浅基础和桩基础	(8)
1.7 复合地基常用形式	(10)
参考文献	(12)
第二章 复合地基承载力和沉降计算概论	(13)
2.1 引言	(13)
2.2 桩体复合地基承载力计算	(13)
2.2.1 桩体复合地基承载力计算模式	(13)
2.2.2 桩体极限承载力计算	(16)
2.2.3 桩间土极限承载力计算	(20)
2.2.4 复合地基加固区下卧层承载力验算	(21)
2.3 加筋土地基承载力计算	(21)
2.3.1 加筋土地基破坏模式	(21)
2.3.2 加筋土地基承载力计算公式	(23)
2.4 复合地基沉降计算	(28)
2.4.1 概述	(28)
2.4.2 复合地基沉降计算	(29)
参考文献	(34)
第三章 复合地基设计中的若干问题	(35)
3.1 引言	(35)
3.2 复合地基位移场特点	(35)
3.3 复合地基优化设计思路	(38)
3.4 按沉降控制设计	(39)
参考文献	(40)
第四章 水泥搅拌桩复合地基	(41)
4.1 深层搅拌法概述	(41)
4.1.1 加固原理	(41)
4.1.2 适用范围	(41)
4.1.3 工艺特点	(42)

4.1.4	发展概况	(42)
4.1.5	施工机械	(43)
4.1.6	水泥土的性质	(43)
4.2	深层搅拌桩复合地基的设计理论	(46)
4.2.1	深层搅拌桩复合地基的基本定义及特点	(46)
4.2.2	水泥搅拌桩的承载性状	(47)
4.2.3	复合地基承载力	(48)
4.2.4	复合地基的应力分担比	(49)
4.2.5	复合地基下卧层强度验算	(49)
4.2.6	复合地基的变形模量	(49)
4.2.7	复合地基的沉降验算	(50)
4.3	水泥搅拌桩的施工	(50)
4.3.1	施工前的准备工作	(50)
4.3.2	施工工艺及参数	(51)
4.3.3	施工质量保证体系	(51)
4.3.4	施工安全措施	(52)
4.4	水泥搅拌桩复合地基的质量检测	(52)
4.5	工程实例	(53)
4.5.1	工程实例一 深层搅拌法在民用住宅软土地基处理中的应用	(53)
4.5.2	工程实例二 深层搅拌法在高速公路桥台等结构物软基处理中的应用	(60)
	参考文献	(63)
第五章	夯实水泥土桩复合地基	(64)
5.1	概述	(64)
5.2	夯实水泥土的力学性质	(65)
5.3	夯实水泥土桩复合地基承载和变形性状	(70)
5.4	夯实水泥土桩复合地基的设计计算	(71)
5.4.1	承载力计算	(71)
5.4.2	沉降计算	(72)
5.5	夯实水泥土桩施工设备及施工工艺	(73)
5.5.1	夯实水泥土桩施工机具	(73)
5.5.2	夯实水泥土桩施工工艺简述	(75)
5.5.3	夯击参数的确定	(76)
5.6	夯实水泥土桩复合地基的适用范围及其特点	(80)
5.7	工程实例	(81)
5.7.1	工程实例一 中科院北郊住宅 B 区 4 号楼地基处理	(81)
5.7.2	工程实例二 方庄东绿化区搬迁住宅 3 号、4 号楼地基处理	(81)
5.7.3	工程实例三 北京市旧宫住宅小区 3 号楼地基处理	(82)
5.7.4	工程实例四 华能上安电厂 1 号、2 号 Y 形住宅楼地基处理	(83)
5.7.5	工程实例五 河北省天龙果汁有限公司综合办公楼地基处理	(83)
	参考文献	(84)

第六章 振冲碎石桩复合地基	(85)
6.1 概述	(85)
6.2 碎石桩复合地基的设计	(86)
6.2.1 设计方案及其正确性评价	(86)
6.2.2 设计基本参数确定的合理性评价	(86)
6.2.3 设计中需注意的问题	(87)
6.2.4 碎石桩复合地基的设计计算	(88)
6.3 振冲碎石桩复合地基施工技术	(92)
6.3.1 施工前的准备工作	(93)
6.3.2 施工工艺	(95)
6.4 施工质量检验和验收	(99)
6.4.1 施工质量检验的目的	(99)
6.4.2 施工质量检验方法及评价	(99)
6.5 工程实例	(102)
6.5.1 工程实例一 某滤水池碎石桩复合地基	(102)
6.5.2 工程实例二 某火电厂灰场坝基碎石桩复合地基	(103)
6.5.3 工程实例三 某船厂碎石桩复合地基	(103)
参考文献	(104)
第七章 振动挤密砂石桩复合地基	(105)
7.1 概述	(105)
7.2 振动挤密砂石桩复合地基作用原理	(106)
7.2.1 复合地基的作用	(106)
7.2.2 砂石桩的作用	(106)
7.2.3 砂石桩的破坏形式	(109)
7.3 振动挤密砂石桩复合地基设计计算	(110)
7.3.1 设计前的准备工作	(110)
7.3.2 设计	(111)
7.3.3 复合地基计算	(112)
7.4 振动挤密砂石桩复合地基施工工艺	(118)
7.4.1 施工前的准备工作	(118)
7.4.2 成桩工艺试验	(121)
7.4.3 成桩工艺和质量控制	(121)
7.5 质量检验	(125)
7.5.1 质量检验方法	(125)
7.5.2 质量检验的时间、位置和数量	(126)
7.5.3 质量检验的实施	(126)
7.6 工程实例	(128)
7.6.1 工程实例一 南京长江大桥引桥墩基抗震加固	(128)
7.6.2 工程实例二 浙江杭州耀江商住公寓楼松散砂性土地基加固	(133)
7.6.3 工程实例三 江苏省江阴市利港电厂浅层地基处理	(137)

参考文献	(142)
第八章 夯扩挤密桩复合地基	(143)
8.1 概述	(143)
8.1.1 基本概念与分类	(143)
8.1.2 发展概况	(143)
8.2 夯扩挤密桩复合地基设计	(144)
8.2.1 夯扩挤密桩作用机理	(144)
8.2.2 夯扩挤密桩复合地基的设计计算	(144)
8.3 夯扩挤密桩施工	(146)
8.3.1 沉管夯扩挤密桩施工	(146)
8.3.2 钻孔夯扩挤密桩施工	(146)
8.3.3 冲孔夯扩挤密桩施工	(147)
8.4 夯扩挤密桩复合地基施工质量检验	(148)
8.5 工程实例	(148)
8.5.1 工程实例一 河北廊坊某实验楼夯扩挤密桩复合地基	(148)
8.5.2 工程实例二 北京某小区住宅楼地基处理工程实录	(153)
参考文献	(157)
第九章 强夯置换碎石墩复合地基	(159)
9.1 概述	(159)
9.2 强夯置换碎石墩复合地基作用原理	(160)
9.2.1 基本作用原理	(160)
9.2.2 加固非饱和土地基的原理	(162)
9.2.3 加固饱和土地基的原理	(162)
9.3 强夯置换碎石墩复合地基设计计算	(163)
9.3.1 有效加固深度	(163)
9.3.2 夯击能	(165)
9.3.3 夯击次数	(166)
9.3.4 夯击遍数	(167)
9.3.5 间隔时间	(167)
9.3.6 夯点布置	(167)
9.3.7 加固范围	(168)
9.4 强夯置换碎石墩复合地基施工工艺	(168)
9.4.1 施工机具	(168)
9.4.2 散体材料	(172)
9.4.3 施工	(172)
9.5 质量检验	(176)
9.5.1 强夯置换法质量检验应遵循的原则	(176)
9.5.2 质量检验的方法	(178)
9.5.3 质量检验的数量	(179)
9.5.4 质量检验的时间	(179)

9.6 工程实例	(179)
9.6.1 工程实例一 广茂铁路腰古强夯置换试验	(179)
9.6.2 工程实例二 深圳机场停机坪软弱地基加固	(186)
9.6.3 工程实例三 深圳市半岛花园工程	(191)
参考文献	(194)
第十章 灰土桩复合地基	(196)
10.1 概述	(196)
10.2 灰土桩复合地基的设计	(197)
10.2.1 灰土挤密桩的加固机理	(197)
10.2.2 桩孔直径	(198)
10.2.3 桩距和排距设计	(199)
10.2.4 桩孔深度的确定	(200)
10.2.5 承载力确定	(201)
10.2.6 处理范围	(203)
10.2.7 设计时应考虑的其他问题	(204)
10.3 灰土挤密桩复合地基施工	(206)
10.3.1 施工准备	(206)
10.3.2 桩孔定位	(207)
10.3.3 成孔工艺	(207)
10.4 灰土桩复合地基质量检测	(215)
10.4.1 桩孔位置和成孔质量	(215)
10.4.2 桩孔的夯填质量	(215)
10.4.3 桩间土的挤密效果检测	(216)
10.5 工程实例	(223)
10.5.1 工程实例一 甘肃省气象局多普勒雷达楼灰土桩复合地基	(223)
10.5.2 工程实例二 山西铝厂清涧生活居住区灰土挤密桩复合地基试验	(229)
10.5.3 工程实例三 兰州黄河铝业公司住宅楼灰土挤密桩复合地基	(231)
第十一章 低强度桩复合地基	(234)
11.1 概述	(234)
11.2 低强度桩复合地基承载力和沉降计算	(235)
11.2.1 低强度桩复合地基承载力计算	(235)
11.2.2 低强度桩复合地基沉降计算	(236)
11.3 低强度桩复合地基设计	(237)
11.4 低强度桩复合地基施工	(238)
11.4.1 施工设备与工艺	(238)
11.4.2 施工程序	(238)
11.4.3 施工中应注意的问题	(239)
11.5 工程实例	(240)
11.5.1 工程实例一 安徽蒙蚌高速公路一箱涵低强度桩复合地基	(240)
11.5.2 工程实例二 安徽铜陵金隆铜业有限公司精矿库二灰混凝土桩复	

合地基试验	(243)
11.5.3 工程实例三 杭宁高速公路一通道低强度混凝土桩复合地基试验	(251)
参考文献	(261)
第十二章 以沉降量为控制指标的复合桩基设计	(262)
12.1 摩擦桩在土体中的力学性状	(262)
12.1.1 桩土共同工作的基本概念	(262)
12.1.2 历史上的几个工程实例	(262)
12.1.3 两个试验	(263)
12.1.4 桩土共同工作的客观现象中的主要特征	(267)
12.2 以沉降量为控制指标的复合桩基的基本概念和设计方法	(268)
12.2.1 基本概念	(268)
12.2.2 设计时注意的几点问题	(269)
12.3 进一步讨论	(271)
12.3.1 关于沉降计算	(271)
12.3.2 关于地基的极限承载力	(279)
12.4 工程实例	(283)
12.4.1 工程实例一 六层住宅复合桩基设计	(283)
12.4.2 工程实例二 两组四幢复合桩基工程的对比	(287)
12.5 复合桩基长期监测试验实例	(289)
12.6 结论和几点意见	(292)
参考文献	(295)
第十三章 长短桩复合地基(龚晓南)	(296)
13.1 概述	(296)
13.2 长短桩复合地基承载力和沉降计算	(297)
13.3 长短桩复合地基设计	(298)
13.4 施工	(299)
13.5 工程实例	(299)
13.5.1 工程实例一 某商住楼长短桩复合地基	(299)
13.5.2 工程实例二 太原兰盾大厦长短桩复合地基	(307)
参考文献	(311)
第十四章 加筋土地基(王钊)	(312)
14.1 概述	(312)
14.1.1 加筋土地基的概念	(312)
14.1.2 加筋材料	(312)
14.1.3 加筋地基的设计理论	(315)
14.2 加筋土地基的设计	(317)
14.2.1 土堤的加筋土地基	(317)
14.2.2 条形浅基础的加筋土地基	(321)
14.2.3 公路土工格室加筋基层	(324)
14.2.4 加筋地基的沉降分析	(326)

14.3 施工和质检	(327)
14.4 工程实例	(327)
14.4.1 工程实例一 曼谷的试验堤	(327)
14.4.2 工程实例二 秦山核电厂海堤	(331)
14.4.3 工程实例三 油罐的土工织物加筋地基	(333)
14.4.4 工程实例四 黄石市合兴闸加筋垫层	(333)
参考文献	(335)
第十五章 复合地基技术发展展望	(337)
参考文献	(338)

第一章 总 论

1.1 发展概况

复合地基技术在我国土木工程建设中已得到广泛应用,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,而且还处在不断发展之中。有人考证复合地基一词,国外最早见于1960年,国内应该还要晚一些。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碎石桩复合地基,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,国内外对碎石桩复合地基承载力和变形计算发表了大量的论文。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的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。散体材料桩和粘结材料桩的受力性能有很大区别。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复合地基,学术界和工程界的看法是不一致的。有人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,其他形式不能称为复合地基,判别是否属于复合地基主要根据桩体的刚度确定,桩体刚度大不能称为复合地基;也有人认为桩体与基础不连接的是复合地基,相连接的就不是复合地基,至于桩体是柔性桩、刚性桩并不重要;还有人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;前述第三种意见可认为是比较广义的复合地基定义。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。《复合地基设计与施工指南》是从上述广义复合地基概念出发讨论分析有关问题的。

我国地域广阔,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。复合地基技术比较适合我国国情,因此近些年来在我国得到长足的发展。1990年在河北承德市,由中国建筑学会地基基础专业委员会黄熙龄院士主持召开了我

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)和《复合地基》(1992,浙江大学出版社)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(复合地基理论与实践,浙江大学出版社,主编龚晓南,1996),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。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。目前在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,薄壁筒桩复合地基,加筋土地基等。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 复合地基的定义、分类和形成条件

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,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。其示意如图 1-1a)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,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。双层地基示意如图 1-1b)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。其示意图分别如图 1-1c)和 d)所示。

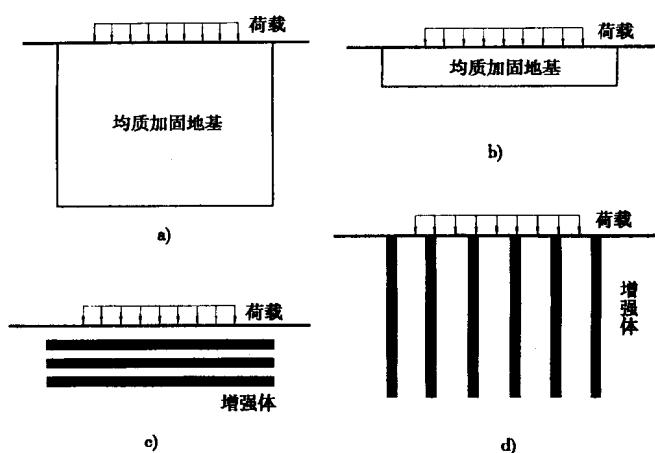


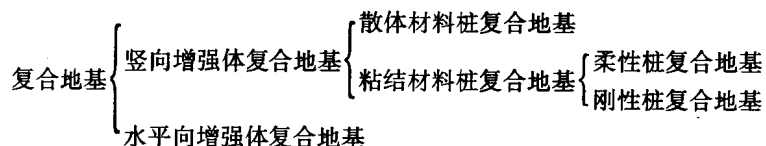
图 1-1 人工地基的分类

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、各种低强度桩和钢筋混凝土桩等。根据竖向增强体的性质,又可分为三类:散体材料桩、柔性桩和刚性桩。散体材料桩如碎石桩、砂桩等,只有依靠周围土体的围箍作用才能形成桩体,桩体材料本身不能单独形成桩体。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。柔性桩如水泥土桩、灰土桩等。刚性桩如钢筋混凝土桩、低强度混凝土桩等。严格讲,桩体的刚度不仅与材料性质有关,还与桩的长径比、土体的刚度有关,应采用桩土相对刚度来描述(龚晓南,2002)。

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将复合地基作下述分类:



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。本指南主要介绍桩体复合地基,对水平向增强体复合地基主要介绍加筋土地基。

前面已经谈到,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,这是复合地基的本质。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 1-2a)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 1-2a)中 E_{s2} 为加固区下卧层土体模量, 图 1-2b)中 E_{s2} 为加固区垫层土体模量。当增强体为散体材料桩, 图 1-2 中各种情况均可满足增强体和土体共同承担上部荷载, 因为散体材料桩在荷载作用下产生侧向鼓胀变形。当增强体为粘结材料桩时情况就不同了。在图 1-2a)中, 在荷载作用下, 桩和桩间土沉降量相同, 可保证桩和土共同承担荷载。在图 1-2b)中, 通过垫层的协调, 也可保证桩和桩间土共同承担荷载。刚性基础下的垫层是散体材料组成, 且具一定厚度, 因此在图 1-2a)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 1-2c)中, $E_p > E_{s1}$, 在承台荷载作用下, 开始时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。在这种情况下增强体与桩间土体难以形成复合地基共同承担上部荷载。在实际工程中, 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 1-2d)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中应该注意的。图 1-2d)中, $E_p > E_{s1}$, $E_{s2} > E_{s1}$, 工程师应重视 E_p 、 E_{s1} 和 E_{s2} 之间的关系, 以保证在荷载作用下通过桩体和桩间土变形协调来保证桩和桩间土共同承担荷载。因此采用粘结材料桩, 特别是采用刚性桩形成复合地基需要重视复合地基的形成条件。在实际工程中不能满足形成复合地基的条件, 而以复合地基进行设计是不安全的, 在这种情况下高估了桩间土的承载能力, 降低了复合地基的安全度, 可能造成工程事故, 应引起设计人员充分重视。

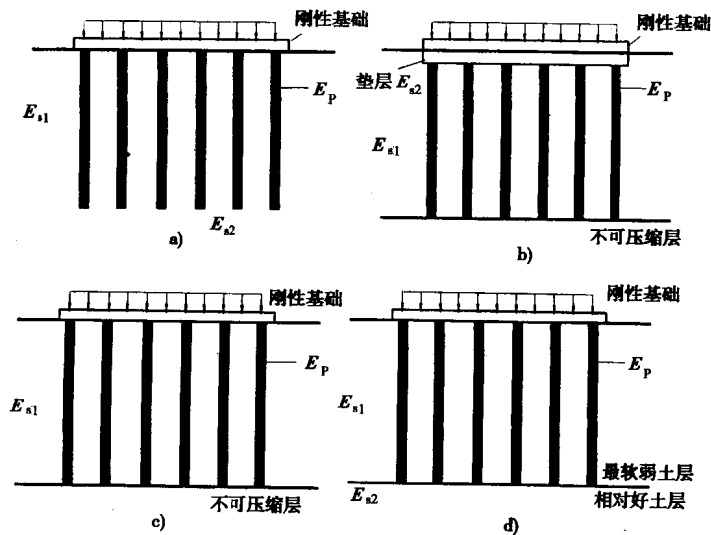


图 1-2 复合地基形成条件示意图

顺便指出, 理论研究和试验研究表明, 如图 1-2b)中所示基础和复合地基加固区之间设置垫层不仅可保证各类增强体与桩间土形成复合地基共同承担上部荷载, 而且可以有效改善复合地基中浅层的受力状态, 如减小桩土荷载分担比、提高桩间土的抗剪强度、提高增强体承受竖向荷载的能力等。

在路堤工程中,不存在刚性基础。为防止桩体向上刺入填土路堤,应在复合地基加固区上设置一层刚度较大的垫层,如灰土垫层,土工格栅垫层等,以保证桩体和土体共同承担荷载。

设置垫层是在某些情况下保证形成复合地基的一种措施,不能将是否设置垫层作为形成复合地基的必要条件。

1.3 复合地基与地基处理

当天然地基不能满足建(构)筑物对地基的要求时,采用物理的方法、化学的方法、生物的方法,或综合应用上述方法对天然地基进行处理以形成满足建(构)筑物对地基要求的人工地基,称为地基处理。地基处理技术分类方法很多,按照加固地基的机理,笔者常将地基处理技术分为六类:置换,排水固结,灌入固化物,振密、挤密,加筋和冷、热处理。对地基处理技术进行严格的分类是很困难的,一种地基处理技术加固地基机理往往有几种,如采用石灰桩技术加固地基有置换作用、石灰与地基土之间的离子交换等化学作用,生石灰熟化过程中,吸水形成桩周土排水固结作用,生石灰熟化放热形成热加固作用等。而且新的地基处理方法还在不断产生,也增加了地基处理方法分类的困难。常用地基处理方法分类如下:

1. 置换,包括换土垫层法、挤淤置换法、褥垫法、振冲置换法、强夯置换法、砂石桩置换法、EPS超轻质填土法。

2. 排水固结,包括一般堆载预压法、超载预压法、真空预压法、真空预压与堆载预压联合作用法、降低地下水位法、电渗法。

3. 灌入固化物,包括深层搅拌法、高压喷射注浆法、渗入性灌浆法、劈裂灌浆法、压密灌浆法、电化学灌浆法。

4. 振密、挤密,包括表层原位压实法、强夯法、振冲密实法、挤密砂石桩法、土桩、灰土桩法、夯实水泥土桩法、孔内夯扩桩法。

5. 加筋,包括加筋土法、锚固法、树根桩法、低强度桩复合地基法、钢筋混凝土桩复合地基法。

6. 冷、热处理,包括冻结法、烧结法。

可以将采用各类地基处理方法形成的人工地基分为二类:一类是天然地基土体的物理力学性质得到普遍的改良,类似于均质地基,这类人工地基的承载力和沉降计算方法基本上与天然地基,或者说与浅基础的相同,不同的是地基土层的物理力学指标得到改善;另一类是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,形成复合地基。例如:采用振冲置换法、强夯置换法、砂石桩置换法、石灰桩法、深层搅拌法、高压喷射注浆法、振冲密实法、挤密砂石桩法、土桩、灰土桩法、夯实水泥土桩法、孔内夯扩桩法、树根桩法、低强度桩复合地基法、钢筋混凝土桩复合地基法等均可形成复合地基。通过地基处理形成复合地基在地基处理形成的人工地基中占有很大的比例,而且呈上升趋势。浅基础的设计计算理论比较成熟,而复合地基设计计算理论正在发展之中。从上述分析可以看到重视复合地基理论研究的必要性和重要性。同时也应该看到,复合地基理论和实践的发展将进一步促进地基处理水平的提高。复合地基技术在地基处理技术中有着非常重要的地位。

1.4 复合地基与双层地基

有的学者将复合地基视为双层地基,将双层地基有关计算方法应用到复合地基计算中。笔者认为复合地基与双层地基在荷载作用下的性状有较大区别,在复合地基计算中直接应用双层地基计算方法是不妥当的,有时是偏不安全的,下面作简要分析。

图 1-3a)和 b)分别为复合地基和双层地基的示意图。设复合地基加固区复合模量为 E_1 ,其他区域土体模量为 E_2 ,显然 $E_1 > E_2$ 。设双层地基上层土体模量为 E_1 ,下层土体模量为 E_2 。双层地基上层土厚度与复合地基加固区深度相同,记为 H 。以条形基础为例,地基上荷载作用面宽度均为 b 而且荷载密度相同,现分析在荷载作用中心线下复合地基加固区下卧层中 A 点(图 a)和双层地基中对应的 B 点(图 b)竖向应力情况。不难看出复合地基 A 点竖向应力 σ_A 比双层地基中 B 点竖向应力 σ_B 大。如果增大 E_1/E_2 值,则 σ_A 值增大,而 σ_B 值减小。理论上当 E_1/E_2 趋向 ∞ 时,双层地基中 B 点竖向应力 σ_B 趋向零,而复合地基 A 点竖向应力 σ_A 是不断增大的。由上述分析可以看出复合地基与双层地基在荷载作用下地基性状的差别是很大的。

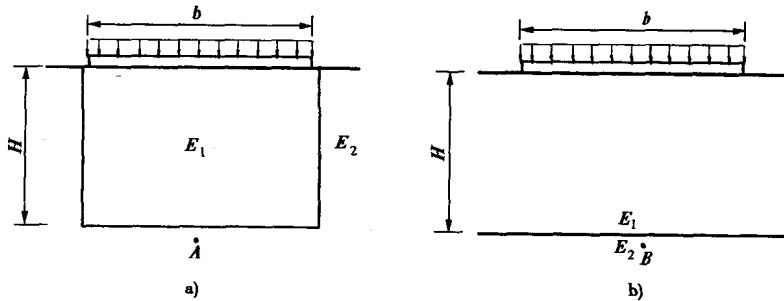


图 1-3 复合地基与双层地基

a)复合地基 ;b)双层地基

荷载作用下均质地基中的附加应力可用布西涅斯克解求解。双层地基可采用当层法求解。当层法基本思路如图 1-4 所示。若双层地基两层土模量为 E_1 和 E_2 ,则可将第一层土换成与第二层土相同模量的相当土层,其相当土层的厚度可为

$$h = H \sqrt{E_1/E_2}$$

式中: H ——第一层土层厚度。

用相当土层代替后,双层地基变成均质地基,地基中附加应力可采用布西涅斯克解求解。

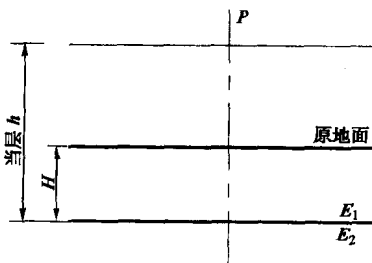


图 1-4 当层法原理图

当层法可用来计算荷载作用下双层地基中的附加应力,而将复合地基视为双层地基采用当层法计算复合地基中的附加应力可能带来很大误差,计算结果是偏不安全的。当层法不适用于复合地基中附加应力计算。

杨慧(2000)采用有限元法分析比较了复合地基和双层地基中压力扩散情况。在分析中,将作用在复合地基加固区与下卧层界面和双层地基两层土界面上的荷载作用面对应范围的竖向应力取平均值,并依此平均值计算压力扩散角。计