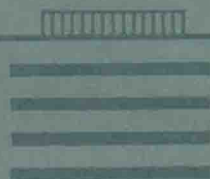


复合地基

龚晓南 著

COMPOSITE FOUNDATION



浙江大学出版社

复合地基

龚晓南 著

浙江大学出版社

(浙)新登字 10 号

内 容 提 要

复合地基技术近年来在工程建设中得到愈来愈多的应用,复合地基理论也正在发展之中。作者在书中建立了复合地基理论体系,介绍了复合地基基本理论及最新发展。全书共 6 章:绪论,土和复合土基本性状,竖向增强体复合地基承载力,水平向增强体复合地基承载力,复合地基沉降计算,复合地基工程实例等。

本书可供广大从事地基处理的设计和施工技术人员、土木工程专业大专院校师生和土木工程技术人员学习参考。

复 合 地 基

龚 晓 南 著

责任编辑 李桂云

*

浙江大学出版社出版发行
浙江省煤田地质印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 8.125 字数: 219 千

1992 年 12 月第一版 1992 年 12 月第一次印刷

印数: 0001—3000

ISBN7—308—01088—0/TU·022 定价: 6.00 元

前 言

近年来,随着地基处理技术的普及、提高和发展,复合地基技术在土木工程中得到愈来愈多的应用。然而,复合地基理论的发展远远落后于复合地基工程实践。至今,尚无一本系统论述复合地基的专著,甚至对什么是复合地基,在工程界和学术界尚缺乏统一的认识。复合地基理论正在发展之中。为了促进复合地基理论的发展,适应复合地基工程实践的要求,作者学习和总结了国内外有关复合地基工程实践和理论研究成果,总结了浙江大学岩土工程研究所近年来在复合地基领域的工程实践和理论研究成果,特别是作者主持的国家自然科学基金项目《柔性桩复合地基承载力和变形及与上部结构共同作用研究》和浙江省自然科学基金项目《复合地基承载力和变形计算理论研究》的研究成果,在为中国土木工程学会举办的地基处理学习班编写的讲义《复合地基引论》基础上完成本书稿。书中系统地介绍了复合地基的基础理论,复合地基承载力和沉降计算模式,介绍了复合地基工程应用及一些工程实例,并且第一次提出复合地基理论体系。抛砖引玉,希望能促进复合地基理论的发展。

《复合地基》全书共 6 章:绪论,土和复合土基本性状,竖向增强体复合地基承载力,水平向增强体复合地基承载力,复合地基沉降计算,复合地基工程实例。

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。钱家欢教授在审阅中提出许多宝贵意见。书中引用了许多科研、高校、工程单位及研究生的研究成果。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。

作者

1992 年春节于汤溪

作者简介

龚晓南(Gong Xiaonan)博士,浙江大学土木工程学系教授,1944年10月生,浙江金华人。1961年秋入清华大学土木建筑系工业与民用建筑专业学习。1967年大学毕业后,分配到国防科委8601工程处工作,在陕西省凤县秦岭山区从事道路、桥梁、防洪堤的设计、施工,以及1440研究所的土建施工组织管理工作。1978年秋考入浙江大学土木工程学系攻读硕士学位。研究方向软土地基,1981年秋获硕士学位。1982年在浙江大学研究生院攻读博士学位,研究方向为软粘土力学。1984年9月通过博士学位论文答辩,成为浙江省自己培养的第一位博士,也是我国岩土工程界自己培养的第一位博士。因教学科研工作突出,于1986年破格晋升为副教授。1986年底获得联邦德国洪堡奖学金赴 Karlsruhe 大学土力学和岩石力学研究所从事研究工作。1988年4月回国,同年破格晋升为教授。1988年被中国土木工程学会评为优秀中青年土木工程科技工作者。1991年评为“业绩显著的浙江大学博士、硕士学位获得者”。曾任浙江大学土木工程学系副主任(主持工作),现任浙江大学岩土工程研究所副所长,中国土木工程学会土力学及基础工程学会常务理事,地基处理学术委员会主任,《地基处理》编委会主任,《岩土工程学报》编委,浙江力学学会岩土力学专业委员会主任。

至今已在国内外发表论著50余篇,主要著作有:《土塑性力学》(浙江大学出版社,1990),《岩土塑性力学基础》(中国建筑工程出版社,1990),主编《土力学及基础工程实用名词词典》(浙江大学出版社,1992),参加《计算土力学》(上海科技出版社,1989)和《地基处理手册》(中国建筑工程出版社,1988年)的编写工作。担任《土木建筑大辞典·工程力学卷》编委。

龚晓南教授涉及的研究领域广泛,包括软粘土地基的基本性状,土的本构理论,复合地基理论,地基处理技术,土工问题中数值方法,以及反分析法在土工中应用和专家系统在土工中应用等。

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 复合地基的定义及分类	(1)
1.2 复合地基工程应用	(4)
1.3 复合地基的效用	(18)
1.4 复合地基破坏模式	(20)
1.5 复合地基置换率、桩土应力比和复合模量的概念	(23)
第 2 章 土和复合土的基本性状	(25)
2.1 概述	(25)
2.2 土的基本性状	(26)
2.2.1 土的分类	(26)
2.2.2 土的应力应变试验与试验曲线	(27)
2.2.3 土的变形特性	(33)
2.3 水泥土及其复合土的基本性状	(37)
2.3.1 水泥土的形成方法及硬化机理	(37)
2.3.2 水泥土的物理力学性质	(38)
2.3.3 水泥土-土复合体的压缩特性	(47)
2.3.4 水泥土-土复合体的强度特性	(52)
2.4 土工织物复合土体的基本性状	(55)
2.4.1 土工织物的功能	(55)
2.4.2 土工织物与土体界面反应特性	(57)
2.4.3 土工织物复合土体强度特性	(65)
2.5 石灰桩加固地基机理及复合地基性状	(70)
2.5.1 生石灰的水化反应及其特性	(70)
2.5.2 加固机理	(74)
2.5.3 石灰桩复合地基性状	(76)
第 3 章 竖向增强体复合地基承载力	(78)
3.1 承载力计算模式	(78)
3.2 桩体极限承载力计算	(83)
3.2.1 桩体刚度对荷载传递规律的影响	(83)

3.2.2	刚性桩极限承载力计算	(86)
3.2.3	柔性桩极限承载力计算	(87)
3.2.4	散体材料桩极限承载力计算	(92)
3.3	桩土应力比计算	(101)
3.3.1	桩土应力比的影响因素	(101)
3.3.2	几个桩土应力比计算式	(106)
3.4	桩间土极限承载力计算	(112)
3.4.1	桩间土承载力影响因素	(112)
3.4.2	桩间土极限承载力计算方法	(113)
3.5	复合地基加固区下卧层承载力验算	(115)
第4章	水平向增强体复合地基承载力	(118)
4.1	引言	(118)
4.2	几个承载力计算公式	(124)
第5章	复合地基沉降计算	(138)
5.1	复合地基沉降计算模式	(138)
5.2	刚性桩复合地基沉降计算	(152)
5.3	柔性桩复合地基沉降计算	(153)
5.4	散体材料桩复合地基沉降计算	(155)
5.5	水平向增强体复合地基沉降计算	(159)
5.6	复合地基有限单元法	(162)
5.7	复合地基固结分析	(167)
第6章	复合地基工程实例	(169)
6.1	碎石桩复合地基工程实例	(169)
6.2	深层搅拌桩复合地基工程实例	(181)
6.3	石灰桩复合地基工程实例	(196)
6.4	低标号混凝土桩复合地基工程实例	(205)
6.5	刚性桩复合地基工程实例	(212)
6.6	土工织物复合地基工程实例	(224)
6.7	旋喷桩复合地基工程实例	(240)

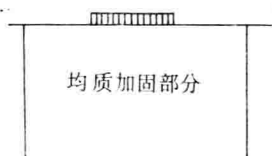
第 1 章 绪 论

1.1 复合地基的定义及分类

当天然地基不能满足结构物对地基的要求时,需要进行地基处理,形成人工地基,以保证结构物的安全与正常使用。地基处理方法很多,按地基处理的原理分类,主要有:排水固结法;振密、挤密法;置换及拌入法;灌浆法;加筋法;以及冷热处理法等。经过地基处理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善,加固区土体的物理力学性质基本上是相同的,加固区的宽度和厚度与荷载作用面积或者与其相应的地基持力层或压缩层厚度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:采用排水固结法形成的人工地基,加固区各点孔隙比减小,抗剪强度提高,压缩性减小。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。

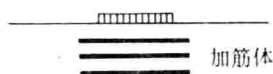
在多层地基中,较简单也较常遇到的是双层地基。双层地基有人工形成的,也有天然形成的。人工地基中的双层地基是指天然地基经地基处理形成的均质加固区的厚度与荷载作用面积或者与其相应持力层和压缩层厚度相比较为较小时,在荷载作用影响区内,地基由两层性质相差较大的土体组成。天然地基中的双层地基,如均质软粘土地基和硬壳层组成的双层地基等。双层地基示意图如图 1-1(b)所示。采用表层压实法或垫层法处理形成的人工地基一般属于双层地



(a) 均质人工地基



(b) 双层地基



(c) 水平向增强复合地基



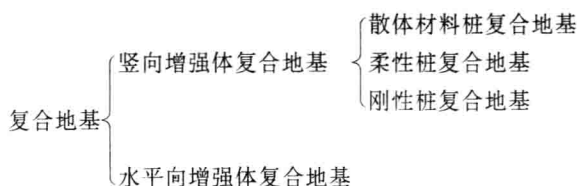
(d) 竖向增强体复合地基

图 1-1 人工地基的分类

基。

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。加固区整体看是非均质的和各向异性的。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。水平向增强体复合地基主要包括由各种加筋材料，如土工聚合物、金属材料格栅等形成的复合地基。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。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。其桩体是由散体材料组成的。散体材料只有依靠周围土体的围箍作用才能形成桩体,单独不能形成桩体。柔性桩复合地基如深层搅拌桩复合地基,旋喷桩复合地基等。柔性桩桩体刚度较小。柔性桩和刚性桩桩体刚度相差较大,两者的荷载传递特性有较大区别。刚性桩复合地基如小桩复合地基,疏桩复合地基等。按照工作机理复合地基分类如下所示。



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。一般说来,对桩基础,荷载是先传给桩,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。若刚性摩擦桩桩径较小,桩距较大,桩土共同承担荷载,则也归属于刚性桩复合地基,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。

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,以求较好的经济效果。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,常见的各种地基,包括天然地基和各种人工地基粗略地可分为均质地基、双层地基(或多层地基)、复合地基和桩基四大类。以往对均质地基和桩基础的承载力和变形计算理论研究较多,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变形计算理论的研究还很不够。复合地基理论正处于发展之中,还不够成熟,甚至对什么是复合地基无论在学术界还是在工程界尚无统一认识。然而,随着地基处理技术的发展和各种地基处理方法的推广使用,复合地基在土木工程中得到愈来愈多的应用。工程实践要求加强对复合地基基本理论的研究。

1.2 复合地基工程应用

近年来,随着地基处理技术的普及、提高和发展,各类复合地基在土木工程中得到愈来愈多的应用。下面对我国近几年来应用的几类复合地基作简要介绍:

1. 碎石桩复合地基

按施工方法不同又可分为振冲碎石桩复合地基、干法振动碎石桩复合地基、沉管碎石桩复合地基和强夯置换碎石桩复合地基。现分别加以介绍。

(1) 振冲碎石桩复合地基

振冲法施工配套机械如图 1-2 所示。起重机吊起振冲器,利用振冲器的高频振动和高压水流,边振边冲将振冲器沉到土中预定深度。经过清孔后,从地面向孔内逐段填入碎石,每段填料在振动作用下振挤密实,然后提升振冲器,通过重复填料和振密,在地基中形成碎石桩桩体,其施工顺序示意图如图 1-3 所示。

德国 S. Steuerma 在 1930 年提出采用振冲法加密砂性土原理,1933 年德国 J. Keeller 制成了第一台振冲器,并于 1935 年在纽伦堡用于加固松散粉砂地基。后来在美国、欧洲、日本等地得到应用。1960 年左右在英国开始将振冲法应用于加固粘性土地基。不久,在德国、

美国和日本也用于加固软粘土地基。振冲法在我国应用始于 1977 年,目前已在全国各地推广使用。

振冲法加固地基按照加固机理可分为振冲密实法和振冲置换法两种。采用振冲法加固砂性土地基的原理是一方面依靠振冲器的强力振动使饱和砂

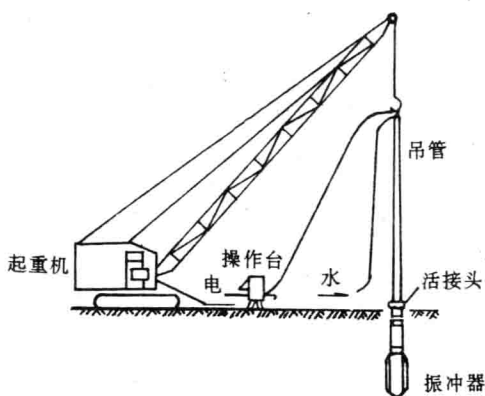


图 1-2 振冲法施工配套机械

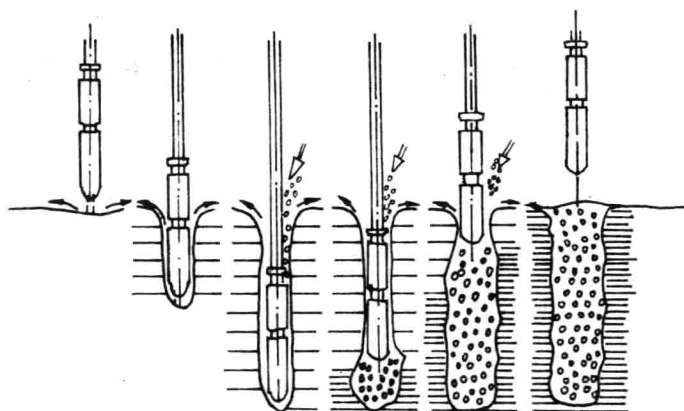


图 1-3 振冲法施工顺序示意图

层发生液化,砂颗粒重新排列,孔隙减小;另一方面依靠振冲器的水

平振动力,在加回填料的情况下通过填料使砂层挤压密实。通常桩间土相对密度可达到 75% 以上。地基承载力可提高 2~5 倍。日本的有关资料报道,经振冲法处理的砂土地基,经地震考验未曾发现过液化失稳。采用振冲法加固粘性土地基在制桩过程中不可能使饱和粘性土挤密,其加固机理是置换作用。在工时,通过振冲器的自重作用、水平振动力和高压水作用将粘性土变成泥浆排出孔外,形成略大于振冲器直径的孔,将碎石灌入孔中,通过振冲器挤压碎石桩体形成具有一定密度的桩体,桩体和原粘性土地基形成复合地基。在制桩过程中,由于振动、挤压,对桩间土产生扰动,桩间土强度会降低。实测资料表明桩间土十字板强度可能降低 10~40%。制桩结束后,桩间土结构强度会随时间得到恢复,特别是桩间土抗剪强度会随排水固结而增长。碎石桩复合地基桩间土强度可以恢复甚至超过原天然地基强度。

在软粘土地基中设置碎石桩还可采用其他方法。福州大学高有潮(1990)采用自制的简易射水器在高含水量的软粘土地基中射水成孔,用土工织物袋围护的袋装碎石桩与地基土形成碎石桩复合地基,取得良好的效果。印度曾报导应用竹笼碎石桩复合地基的工程实例。

振冲密实法适用于粘粒含量小于 10% 的松砂地基;振冲置换法适用于不排水抗剪强度大于 20kPa 的粘性土、粉土和人工填土等地基,有时还可用来处理粉煤灰地基。

(2) 干法振动挤密碎石桩复合地基

干法振动加固地基技术是由河北省建筑科学研究所等单位开发成功的一种地基加固技术。主要设备是干法振动成孔器,如图 1-4 所示。其直径为 280~330mm,有效长度 6m,自重约 22kN。干法振动加固地基的工艺是:首先用振动成孔器成孔,原桩孔位中的土体被挤到周围土体中去,提起振孔器,向孔内倒入约 1m 厚的碎石再用振孔器进行捣固密实,然后提起振孔器。继续倒碎石,直至碎石桩形成(图 1-5)。碎石桩和挤密的桩间土形成碎石桩复合地基。荷载试验表明,复合地基的承载力比天然地基的承载力大,对于粘性土地基提高

0.9~1.5 倍,对于杂填土地基提高 1.3~2.5 倍(吴廷杰,1989)。

干法振动挤密碎石桩复合地基主要适合于松散的非饱和粘性土,杂填土,素填土和二级以上非自重湿陷性黄土。

(3) 沉管碎石桩复合地基

采用沉管打桩机在地基中设置碎石桩接施工方法又可分为三种:管内投料重锤夯实法;管内投料振实法和先拔管、后投料复打密实法。

管内投料重锤夯实法也有多种施工方法。武汉某些单位开发的内击式沉管碎石桩复合地基技术采用的设备是具有两个卷扬机的简易打桩架,一根直径 300~400mm 钢管,长度根据所需加固地基的深度和打桩架高度确定,管内有一吊锤,其重 10kN 多。该法工艺为:首先将桩管立于桩位,管内填 1m 左右碎石,然后用吊锤夯击桩位,靠碎石和桩管间的摩擦力将桩管带到设计深度,最后分段向管内投料和夯实填料,同时向上提拔桩管,直至拔出桩管,形成碎石桩。

管内投料振实法通常采用振动沉拔管打桩机制桩,管内没有重锤夯实,但要控制拔管速度,注意填料量,达不到要求时要复打。

先拔管,后投料复打密实法通常采用常规沉管打桩机沉桩管,然

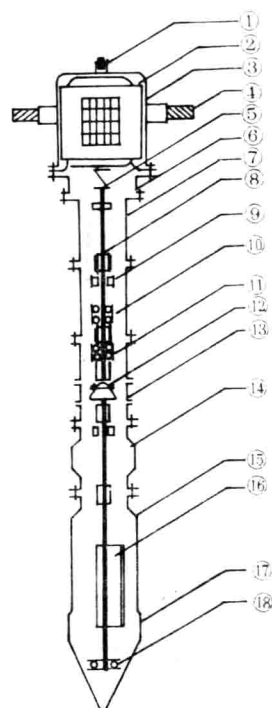


图 1-4 干法振动成孔器

1. 吊点滑轮 2. 电动机 3. 电机罩
4. 反扭臂 5. 联轴器 6. 电机座
7. 套管 8. 传动轴 9. 滚珠轴承
10. 滚珠轴承 11. 滚珠轴承
12. 万向节 13. 减振器 14. 配重物
15. 振动壳 16. 振子 17. 分动头
18. 止推轴承

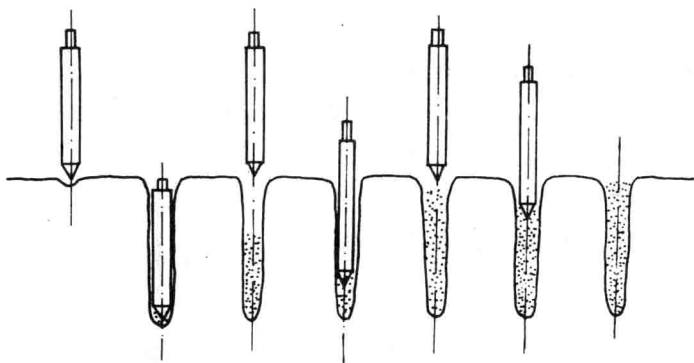


图 1-5 干法振动加固地基工艺图

后将桩管拔出。再向桩孔中投料,利用复打的方式密实桩体填料,形成碎石桩复合地基。对于容易发生缩孔的地基,该法不能采用。

根据制桩材料不同,近年来发展了干振道渣石屑桩复合地基(全钰琬,1989)和钢渣桩复合地基(吴邦颖等,1989)。

(4) 强夯置换碎石桩复合地基

强夯置换法近年来得到发展。王盛源等(1991)采用充填夯加固珠江三角洲淤泥地基。充填夯能量使用 130kN 重的锥底为圆形的锤,吊高 15.5m。每次夯击的能量为 2000kJ,点间距为 2.5m,夯锤直径 2.1m,一厂房柱基下夯点布置如图 1-6 所示。施工时按 1~9 号顺序进行夯实。第一遍控制落坑深度在 1.5~2.0m,此时一般为 6 击夯,然后在夯坑内充填石渣,石渣最大的粒径小于 30cm。将夯坑填满后,再进行第二次夯击,在第二次 6 夯后,夯坑深度又出现 1.5~2.0m,此时再充填石渣至地面平,再进行第三次夯击,这次进行三击夯,此时夯坑深度接近 1m,再用石渣充填平地面后,停止夯击。如此将九个点夯填完成后由振动碾进行三遍碾压,即完成充填夯的加固施工。被夯击加固的地基自上而下形成三个区域,充填区,压密区和

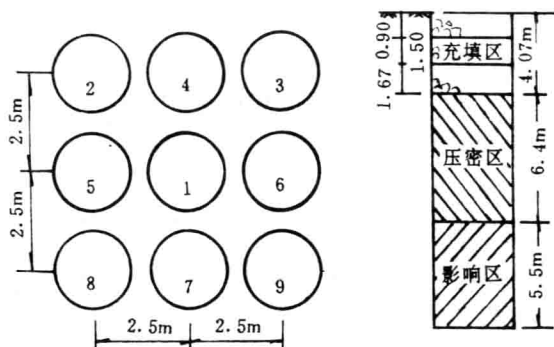


图 1-6 广东番禺莲花山充填夯施工图

影响区(图 1-6)。在充填区,碎石桩间距 2.5m,直径 2.1m,置换率达到 55%,这是充填夯的主要加固区。广东番禺莲花山地区软弱地基天然地基承载力为 40kPa 左右,经充填夯处理后,承载力达到 220kPa。张咏梅和史光金(1991)将单个夯点或有一定间距的多个夯点的置换称为点置换,密集的点置换可形成线置换或面置换。他们将面置换法成功地应用于置换沉堤工程。

目前对强夯置换碎石桩复合地基尚无可靠的计算方法,常采用现场载荷试验测定复合地基承载力。

强夯置换法适用于填土、砂土、淤泥和黄土等各种土类。

各类碎石桩复合地基属散体材料桩复合地基。

2. 砂桩复合地基

砂桩法于 19 世纪 30 年代起源于欧洲,50 年代引进我国。起初,砂桩法用于处理松散砂土地基,视施工方法不同,又可分为挤密砂桩和振密砂桩。加固原理是依靠成桩过程中对周围砂层的挤密作用和振密作用,提高松散砂地基的承载力和防止砂土振动液化。后来,也有用来加固软弱粘性土地基的,其加固原理为砂桩的置换作用和排水作用,可提高软粘土地基的稳定性,提高地基承载力,减小和加快

地基固结沉降。用于加固软弱粘性土地基,有成功的经验,也有达不到预期效果的教训。

砂桩直径国内一般采用 30~50cm,最大达 70cm,国外一般为 60~80cm,最大达 150~200cm。主要取决于施工机械能力。目前国内常用的成桩方法有振动成桩法和冲击成桩法两种。

(1) 振动成桩法

振动成桩法使用振动打桩机将桩管沉入土层中,其成桩工艺又可分为一次拔管法,逐步拔管法和重复拔管法。在一次拔管法中,往沉入土层中的桩管内灌砂后,边振动使桩管拔出一段高度后,然后只振不拔一段时间,再边振边拔一段高度,如此重复进行直至桩管拔出地面。在重复拔管法中,往沉入土层中的桩管内灌砂后,边振边拔使桩管拔起一段高度后,使砂下落,再将桩管压下一段距离,使桩径扩大,将砂压实。如此重复进行直至桩管拔出地面。

(2) 冲击成桩法

冲击成桩法使用蒸汽或柴油打桩机将桩管打入土层中,其成桩工艺可分为单管法和双管法。在单管法中,将底端焊有活瓣桩靴的桩管打入土层中,然后往桩管内灌砂,再缓慢拔出桩管,在地基中形成砂桩。在双管法中,将有底端开口的外管和底端封口的内管的双层桩管打入土层中,然后拔起内管,再向外管内灌一定高度的砂,再将内管放下到外管中的砂面上,拔起外管使其底面与内管底面齐平,按规定的贯入度再将内外管一起打下。如此重复进行直至桩管拔出地面。于是在地基中形成比桩管直径大的砂桩。双管法形成的砂桩复合地基较单管法形成的效果好。

砂桩复合地基属于散体材料桩复合地基。

3. 深层搅拌桩复合地基

深层搅拌法是通过特制机械-深层搅拌机沿深度将固化剂与地基土强制就地搅拌成桩加固地基的方法。深层搅拌法施工工艺流程如图 1-7 所示。喷浆次数和重复搅拌次数可由设计确定。也可只在第 (3) 步搅拌上升时喷浆,其它时间不喷浆。