

新编

建筑地基处理 工程手册

深圳市岩土综合勘察设计有限公司 主编
徐至钧等 编著

XINBIAN
JIANZHUDIJI CHULI
GONGCHENGSHOUCE

中国建材工业出版社

新编建筑地基处理工程手册

深圳市岩土综合勘察设计有限公司 主编
徐至钧等 编著

中国建材工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

新编建筑地基处理工程手册/徐至钧等编著. —北京:
中国建材工业出版社, 2005. 7

ISBN 7-80159-932-2

I. 新… II. 徐… III. 建筑工程—地基处理—技
术手册 IV. TU472-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 060848 号

内 容 提 要

本书按中华人民共和国行业标准“建筑地基处理技术规范”(JGJ 79—2002)中主要地基处理方法的内容进行分章列节,按加固机理、设计计算、施工方法、质量检验等分别介绍,每章都附有工程应用实例。

本手册系统地介绍了各种地基处理方法,包括换填、预压、强夯和强夯置换、振冲、砂石桩、低强度桩复合地基、夯实水泥土桩、水泥土搅拌、高压喷射注浆、石灰桩、灰土挤密桩和土挤密桩、柱锤冲扩桩、注浆加固及深基坑支护等十多种地基处理方法,使其能成为一本较完整的符合国情的地基处理工程技术手册。

本手册可作为建筑、水利、交通、铁路、施工等系统的勘察、设计、施工、监理的工程技术人员参考和应用。

新编建筑地基处理工程手册

深圳市岩土综合勘察设计有限公司 主编
徐至钧等 编著

出版发行: **中国建材工业出版社**

地 址: 北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 46.5

字 数: 1153 千字

版 次: 2005 年 10 月第 1 版

印 次: 2005 年 10 月第 1 次

定 价: 85.00 元

网上书店: www.ecool100.com

本书如出现印装质量问题,由我社发行部负责调换。联系电话: (010) 88386906

序

地基处理在岩土工程技术范围内是一门较新的学科。它的任务在于提高地基承载能力,减少房屋的沉降,保证上部结构的安全和正常使用。由于土的力学性质极其复杂,各地地质条件有所差别,使地基处理工作增加了很大难度。到目前为止,我们掌握了一些处理方法,改进了处理工艺,建造起许多房屋,包括宫殿、港湾海堤,但应当承认,地基处理的一些机理还不成熟,仍然是处于发展中的试验性科学。

早在新石器时代,人类就发明了地基夯实技术,陕西半坡文化遗址中,在房屋基础下的土层内,遗留着经过夯实的基土,其中掺合了红烧土碎块及粗陶片等材料。可以说明,夯土垫层自古有之,只是初期的规模很小,随着时代发展,逐渐出现灰土垫层、三合土垫层、碎石垫层。新中国成立以来,我国机械工业迅速成长,过去夯实的简单工艺亦已被机械工艺所代替,形成了许多夯实工法,例如重锤夯实、强夯、振动夯实等。夯实质量大有提高,夯实的有效深度可达到 8m,对湿陷性黄土、杂填土、高填土、开山后堆积的石渣等土层的处理都极有成效。此外,堆载预压对饱和软黏土的固结作用解决了沿海地区建设中不少难题,为减少预压时间,采用砂井排水、塑料排水板,为减少堆载来源及运输问题,真空排水预压发展较快。

任何地基处理技术都有它的适用范围,它与土的自然属性有关,认识土的成因及力学特性是选取处理技术的依据,有一段时间,在推广强夯法时引起较大的争论,关键问题是淤泥在动力性质下的压密性质各家看法不一。解决的办法是现场试验。国家有关规范和相应规程、工程手册和教科书中都对试验作出严格的规定,试验不仅在施工之前,在施工中还要解决大面积处理所带来的问题。如果处理的目的是为建筑物的地基,还要考虑沉降所带来的问题,这时需要进行沉降观测,只有沉降观测数据才能证明哪些处理在什么条件下是合适的,哪些是需要改进的。沉降观测还能为解决上部结构与人工地基的相互作用问题提供资料。

编写一本手册不容易。我们应当感谢所有编写手册的作者。

黄熙龄

二〇〇五年一月二十五日 北京

注:黄熙龄同志为中国工程院院士,原中国建筑科学研究院地基所所长。

前 言

地基处理是工程界经常碰到的一门学科。随着我国国民经济的持续发展,事先不仅要选择地质条件良好的场地从事建设,而且有时也不得不在地质条件不良的地基上进行工程建设,如软弱土层、杂填土、人工填土、特殊土等。地基处理的对象就是对各类不良地基进行加固处理。由于各种错综复杂的土质,地基处理的许多实际问题靠理论上分析是根本无法解决的,这是因为各类土层千差万别,很难列出各种理论计算分析程序,即使列出了,也会因为土的参数测定困难等,而无法从理论上加以求解。当前应该说各类地基处理的理论研究是滞后于实践的,进行完全的理论求解较为困难,于是不得不靠现场检测方法,如载荷试验或工程监测的结果来探求其规律性。但这种直接试验方法也有很大的局限性,即只能推广到试验条件完全相同或相似的工程上去;另外,也只能得出个别现象,地基与土质之间的表面经验性关系,难以抓住它们的内在本质。因此说地基处理是一门实践性很强的应用学科。

本手册按中华人民共和国行业标准《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2002)的主要地基处理方法的内容进行分章列节,按加固机理、设计计算、施工方法、质量检验等进行介绍,每章都附有工程应用实例。可提供给有关工程技术人员参考和应用。

本手册由国内 20 多位地基处理的专家、教授、高级工程师和工程技术人员合作编写,比较系统地介绍了各种地基处理方法,包括换填、预压、强夯和强夯置换、振冲、砂石桩、低强度桩复合地基、夯实水泥土桩、水泥土搅拌、高压喷射注浆、石灰桩、灰土挤密桩和土挤密桩、柱锤冲扩桩、注浆加固及深基坑支护等十多种地基处理方法,使其能成为一本较完整的符合国情的地基处理工程技术手册。

另外,在编写本手册的过程中,深圳市粤地建设工程有限公司、深圳市地质局、深圳市通力建设工程有限公司的下列同志:何会齐、江婵辉、李伟文、古小胡、肖长生、栗新辉、吴旭彬、赖有修、林婷、彭绳武等参加了部分编写和校对工作。

在编写中,本手册引用了许多科研、教学和工程单位的一些研究成果和技术总结,在书中参考文献中都尽量注明出处,但难免有遗漏,在此谨向所有原作者表示深情的谢意。

由于水平有限,书中不妥之处,尚祈各界读者朋友不吝指正。

参加编写人员

序

第一章 总 论

王曙光、全科政

深圳市岩土综合勘察设计有限公司

第二章 换填垫层法

崔江余

北方交通大学

第三章 软土地基预压加固

胡中雄、泮林有

同济大学

汤胜宁

深圳市粤地建设工程有限公司

第四章 强夯和强夯置换法加固地基

徐至钧、张亦农

深圳市通力建设工程有限公司

第五章 砂石桩

叶观宝、高彦斌

同济大学

第六章 振冲法

叶观宝、高彦斌

同济大学

第七章 低强度桩复合地基

张立人、陈 俊

湘潭大学

第八章 夯实水泥土桩法

李 景

深圳市地质局

第九章 水泥土搅拌法

曹名葆

同济大学

第十章 高压喷射注浆法处理地基

徐至钧、全科政

深圳市粤地建设工程有限公司

第十一章 石灰桩法

汪国烈

甘肃建筑科学研究所

第十二章 灰土挤密桩法和土桩密桩法

汪国烈

甘肃建筑科学研究所

第十三章 柱锤冲扩桩法加固地基

周幼敏

天津市建筑设计院

徐至钧

深圳市通力建设工程有限公司

第十四章 注浆法加固地基

葛家良

广州市建设委员会

邝建政

中科院广州化灌工程有限公司

乔海兵

广州建材地质工程勘察院

第十五章 岩土深基坑支护法原理设计
及施工指南

曾文婷、曾宪明、张明聚、贾全青、左 魁

总参工程兵科研三所

附录 A 复合地基载荷试验

杨瑞清

深圳市长勘勘察设计有限公司

目 录

第一章 总 论	(1)
1-1 地基处理的目的	(1)
1-2 地基处理技术的发展	(2)
1-3 各类地基处理技术发展简况	(4)
1-4 地基处理方法分类及应用范围	(8)
1-5 对今后地基处理发展的几点意见	(12)
1-6 地基处理的基本原则	(12)
第二章 换填垫层法	(14)
2-1 概述	(14)
2-2 换填垫层的设计	(15)
2-3 换土垫层法的施工	(19)
2-4 垫层的质量检查	(19)
2-5 工程实例	(20)
第三章 软土地基预压加固	(45)
3-1 概述	(45)
3-2 分级等速加载时地基固结度计算	(47)
3-3 预压荷载下地基变形量及强度增长的估计	(55)
3-4 砂井与塑料板竖向排水系统	(63)
3-5 三向排水的轴对称问题	(74)
3-6 固结系数的测定	(77)
3-7 固结计算实例	(81)
3-8 软土预压加固工程实例	(89)
第四章 强夯和强夯置换法加固地基	(119)
4-1 概述	(119)
4-2 强夯法加固地基的原理	(129)
4-3 强夯加固机理及其环境影响	(142)
4-4 强夯法和强夯置换法加固地基的设计	(157)
4-5 强夯加固地基的施工细则和要求	(167)

4-6	强夯质量检验	(176)
4-7	工程应用实例	(179)
第五章	砂 石 桩	(224)
5-1	概述	(224)
5-2	砂石桩加固无黏性土地基原理	(225)
5-3	砂石桩加固黏性土地基原理	(229)
5-4	一般设计原则	(231)
5-5	砂性土地基砂石桩设计计算	(232)
5-6	黏性土地基砂石桩设计计算	(236)
5-7	砂桩施工	(242)
5-8	碎石桩施工	(247)
5-9	施工质量与效果检验	(255)
5-10	工程实例	(262)
第六章	振 冲 法	(282)
6-1	概述	(282)
6-2	振冲器	(283)
6-3	振冲法加固砂性土地基原理	(285)
6-4	振冲法加固黏性土地基原理	(288)
6-5	砂性土地基振冲法设计	(289)
6-6	黏性土地基振冲法设计	(291)
6-7	振冲法施工工艺	(295)
6-8	施工质量控制	(306)
6-9	施工质量与处理效果检测	(307)
6-10	工程实例	(307)
第七章	低强度桩复合地基	(325)
7-1	低强度桩复合地基的分类	(325)
7-2	低强度桩复合地基承载力计算的基本方法	(326)
7-3	工程应用实例	(327)
第八章	夯实水泥土桩法	(340)
8-1	概述	(340)
8-2	夯实水泥土桩复合地基作用原理	(340)
8-3	夯实水泥土的物理力学性质及影响因素	(342)
8-4	夯实水泥土桩复合地基的设计计算	(345)
8-5	夯实水泥土桩的施工工艺及质量控制	(350)
8-6	夯实水泥土桩复合地基质量检验	(354)

8-7 工程实例	(354)
第九章 水泥土搅拌法	(361)
9-1 概述	(361)
9-2 水泥土的室内外试验	(364)
9-3 柱状水泥土搅拌桩复合地基的设计与计算	(372)
9-4 壁状水泥土搅拌桩的设计计算	(380)
9-5 拱形水泥土搅拌桩挡墙的设计计算	(386)
9-6 工程实践中值得关注的几个问题	(392)
9-7 工程实例	(398)
第十章 高压喷射注浆法处理地基	(412)
10-1 概论	(412)
10-2 高压喷射注浆加固地基基本原理	(422)
10-3 高压喷射注浆法的水平旋喷	(434)
10-4 注浆材料及配方	(441)
10-5 高压喷射注浆法的设计与计算	(446)
10-6 高压喷射注浆法的施工	(457)
10-7 质量检验和施工监理	(462)
10-8 工程应用实例	(465)
第十一章 石灰桩法	(485)
11-1 概述	(485)
11-2 石灰桩的桩体材料及其性质	(486)
11-3 石灰桩的物理加固作用	(488)
11-4 石灰桩的化学加固作用	(492)
11-5 石灰桩的水下硬化	(494)
11-6 石灰桩的加固规律	(495)
11-7 石灰桩的龄期	(498)
11-8 石灰桩法的适用范围	(498)
11-9 石灰桩复合地基的设计计算	(499)
11-10 施工工艺	(506)
11-11 质量控制与效果检验	(509)
11-12 工程应用实例	(511)
第十二章 灰土挤密桩法和土挤密桩法	(514)
12-1 概述	(514)
12-2 加固机理与适用范围	(514)
12-3 我国挤密地基设计计算方法的形成	(516)

12-4	挤密地基设计的技术条件	(516)
12-5	挤密地基处理效果的影响因素	(517)
12-6	桩孔填料选择	(519)
12-7	桩孔布置与孔心距确定原则	(520)
12-8	挤密地基的处理宽度	(522)
12-9	挤密地基的处理深度	(523)
12-10	挤密地基的表层松动带	(524)
12-11	桩孔填料用料与夯实质量的要求尺度与评价	(525)
12-12	孔心距计算	(526)
12-13	挤密地基设计	(527)
12-14	挤密地基施工	(528)
12-15	质量检验与试验	(531)
12-16	工程应用实例	(535)
第十三章	柱锤冲扩桩法加固地基	(542)
13-1	“柱锤冲扩桩处理技术”的机理	(542)
13-2	散体桩复合地基	(551)
13-3	散体桩复合地基的一般规定	(561)
13-4	复合地基的设计	(564)
13-5	柱锤冲扩桩法施工要点	(578)
13-6	施工质量控制和效果检验	(581)
13-7	工程应用实例	(584)
第十四章	注浆法加固地基	(605)
14-1	岩土注浆总论	(605)
14-2	注浆材料	(611)
14-3	注浆理论研究	(623)
14-4	注浆设计与施工工艺	(636)
14-5	注浆质量检验	(644)
14-6	工程应用实例	(647)
第十五章	岩土深基坑支护法原理设计及施工指南	(658)
15-1	土钉支护法	(658)
15-2	复合土钉支护法	(689)
15-3	预应力锚杆柔性支护法	(708)
15-4	工程实例	(714)
附录 A	复合地基载荷试验	(717)
参考文献		(721)

第一章 总 论

1-1 地基处理的目的

地基处理(ground treatment)是为了提高地基承载力,改善其变形性质或渗透性质而采取的人工处理地基的方法。

我国土地辽阔、幅员广大、自然地理环境不同、土质差异很大、地基条件区域性很强,因而地基处理这门科学特别复杂。地基处理的对象是对天然的软弱地基和人工堆填地基进行加固,以满足各类土木建筑和水利、交通、石化、电力等工程的技术要求。地基处理的目的是为了

提高软弱地基和人工堆填地基的强度,保证地基的稳定;降低地基的压缩性,减少基础的沉降和不均匀沉降;防止地震时液化;消除特殊性土的湿陷性、胀缩性和冻胀性等。

随着我国国民经济的持续发展,不仅事先要选择在地质条件良好的场地上从事工程建设,而且有时也不得不在地质条件不良的地基上进行建设,另外,随着科学技术的日新月异,结构物的荷载日趋增大,高层建筑层数越来越高,对变形要求也越来越严,因而原来一般可被评价为良好的地基,也可能在某些特定条件下非进行地基处理不可。所以,我们不仅要善于针对不同的地质条件、不同的结构物选定最合适的基础型式、尺寸和布置方案外;而且要善于选取最恰当的地基处理方法。

在软弱不良地基上建造工程可能发生的问题,如表 1-1 所示。

表 1-1 软弱不良地基上建造工程可能发生的问题

工程性质	地基承载力及稳定	地 基 沉 降	其 他
加 载 工 程	1. 地基剪切破坏; 2. 建筑物基础承载力不够; 3. 由于偏心荷载及压力作用,使结构物产生变形或破坏; 4. 由于填土或建筑物荷载,使邻近地基产生隆起	1. 沉降或差异沉降特大; 2. 作用于建筑物基础的负摩擦; 3. 由于有填土或建筑物荷载,邻近地基产生固结沉降; 4. 大范围地基沉降	1. 由于交通荷载等原因,对邻近地基产生振动下沉; 2. 地震时地基产生液化; 3. 堤坝等基础产生地基渗漏
开 挖 工 程	1. 开挖时边坡破坏; 2. 开挖时基坑底部隆起; 3. 开挖时的应力降低或松弛,引起基坑侧面破坏	1. 开挖引起邻近地基沉降; 2. 由于降水产生地基固结沉降	1. 渗水; 2. 管涌

地基处理的目的,系针对表 1-1 所列举的问题,采取适当的措施以改善地基条件,这些措施应包括以下五方面内容:

1. 改善剪切特性

地基的剪切破坏以及在土压力作用下的稳定性,取决于地基土的抗剪强度。因此,为了防止剪切破坏以及减轻土压力,需要采取一定措施以增加地基土的抗剪强度。

2. 改善压缩特性

需要研究采用何种措施以提高地基土的压缩模量,借以减少地基土的沉降。另外,防止侧向流动(塑性流动)产生的剪切变形,也是改善剪切特性的目的之一。

3. 改善透水特性

由于在地下水的运动中所出现的问题。为此,需要研究采用何种措施使地基土变成不透水或减轻其水压力。

4. 改善动力特性

地震时饱和松散粉细砂(包括一部分轻亚黏土)将会发生液化。为此,需要研究采取何种措施防止地基土液化,并改善其振动特性以提高地基的抗震性能。

5. 改善特殊土的不良地基的特性

主要是指消除或减少黄土的湿陷性和膨胀土的胀缩性等特殊土的不良地基的特性。

1-2 地基处理技术的发展

近些年来,基本建设规模不断扩大,在建筑、水利、石化、电力、交通和铁道等土木工程建设中,人们愈来愈多地遇到不良地基问题,各种不良地基需要进行地基处理才能满足建造上部构筑物的要求。地基处理是否恰当关系到整个工程质量、进度和投资。合理地选择地基处理方法和基础型式是降低工程造价的重要途径之一。因此地基处理日益得到工程建设部门的重视。

全国土力学及基础工程学术讨论会自第一届(上海宝钢,1986)、第二届(山东烟台,1989)、第三届(河北秦皇岛,1992)、第四届(广东肇庆,1995)、第五届(福建武夷山,1997)、第六届(浙江温州,2000)、第七届(甘肃兰州,2002)全国地基处理学术讨论会之后,又召开了第八届全国地基处理学术讨论会(湖南长沙,2004)。来自全国各行业的地基处理专家、学者、工程技术人员和有关厂家的代表会聚一堂,交流地基处理工程勘察、设计计算、施工技术、施工机械和现场测试等方面的理论和经验,介绍新材料、新产品和新工艺的开发和应用,讨论如何进一步发展和提高我国地基处理水平,更好地为国家经济建设服务。第八届会议共收到论文 114 篇,经审查后录用 100 篇,内容包括基础理论,排水固结,振密、挤密(强夯、强夯置换、碎石桩、灰土桩),灌入固化物(深层搅拌法、高压喷射注浆法、灌浆法),加筋(土工合成材料),刚性桩复合地基和长短桩复合地基,桩基工程,基坑工程,托换与纠倾及其他共 9 个专题。论文集的内容反映了当前我国地基处理领域的主要成就和发展水平,可供同行们参考。国内在各种地基处理技术的普及和提高两个方面都得到了较大的发展,积累了丰富的经验。中国建筑学会地基基础学

术委员会于1989年在南京召开了全国地基基础新技术学术会议。收入论文集的论文,地基处理方面占1/3以上,1990年在承德市召开了复合地基会议,收入论文集论文77篇,还有其他兄弟学会也召开了各种形式的地基处理学术讨论会。1988年中国建筑工业出版社出版了由地基处理学术委员会组织编写的《地基处理手册》,受到广大同行的欢迎。中国土木工程学会学术部以及有关单位还在全国各地举办了各种类型的地基处理技术研讨班。这些活动对地基处理技术的推广和普及起了很好的作用。中国建筑科学研究院会同有关高校和科研单位,组织编写了两版《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—91)(JGJ 79—2002)。上海、天津、广东、深圳、浙江、福建等地已经编制了地区性地基和地基处理规范,根据各自的情况,因地制宜,把一些地基处理方法编入规范。应广大同行的要求,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和浙江大学土木工程学系共同主办《地基处理》刊物为同行们提供了推广、交流地基处理新技术的园地。

近几年来,地基处理的发展主要表现在以下几个方面:

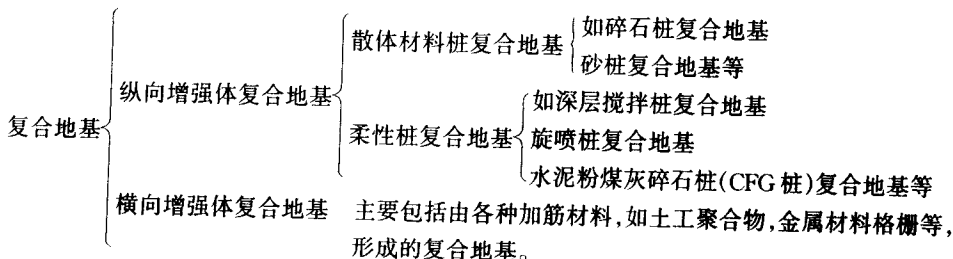
(1)对各种地基处理方法的适用性和优缺点有了进一步的认识,在根据工程实际选用合理的地基处理方法上减少了盲目性。能够注意从实际出发,因地制宜,选用技术先进、确保质量、经济合理的地基处理方案。对有争议的问题,能够采取科学的态度,注意调查研究,开展试验研究,在确定地基处理方案时持慎重态度。能够注意综合应用多种地基处理方法,使选用的地基处理方案更加合理。

(2)地基处理能力的提高。一方面,已有的地基处理技术本身的发展,如施工机具、工艺的改进,使地基处理能力提高。另一方面,近年来,各地在实践中因地制宜发展了一些新的地基处理方法,取得了很好的社会、经济效益。各类地基处理技术的发展情况将在第三部分介绍。

(3)复合地基理论的发展。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,复合地基概念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础理论的研究。然而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是学术界还是工程界尚未统一认识。

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。加固区整体是非均质和各向异性的。根据地基中增强体的方向又可分为纵向增强体和横向增强体复合地基。

纵向增强体复合地基根据纵向增强体的性质,可分为散体材料桩复合地基和柔性桩复合地基。



横向增强体复合地基,散体材料桩复合地基和柔性桩复合地基的载荷传递机理是不同的,应该分别加以研究。国内也有人狭义地只把通过以桩柱形式置换形成的由填料与地基土相互

作用并共同承担荷载的地基定义为复合地基。

复合地基有两个基本特点:一、它是由基体和增强体组成的,是非均质和各向异性的;二、在荷载作用下,基体和增强体共同承担荷载的作用。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,然后通过桩侧摩阻力和桩底端承力把荷载传递给地基土体的。若钢筋混凝土摩擦桩桩径较小,桩距较大,形成所谓疏桩基础,桩土共同承担荷载,也可视为复合地基,应用复合地基理论来计算。

人工地基中有均质地基、双层地基和复合地基等。事实上,对人工地基进行精确分类是很困难的。大家知道,天然地基也不是均质的、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尽可能小,以求较好的经济效益。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,将形成的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,包括天然地基和人工地基粗略地大致上可分为均质地基、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小。特别是对复合地基,其承载力和变形计算的一般理论尚未形成,需加强研究。

国内学者对碎石桩复合地基研究较多,通过载荷试验积累了不少资料,并提出了多个碎石桩复合地基承载力计算公式。随着深层搅拌法和高压喷射注浆法形成的水泥土桩的应用,人们开始注意柔性桩复合地基的研究。小桩技术的应用还促使人们注意小桩复合地基设计计算方法的研究。复合地基承载力计算应以增强体和天然地基土体共同作用为基础。对桩体复合地基,人们不仅注意散体材料桩和柔性桩的承载力研究,还注意桩间土承载力的研究。起初用天然地基承载力作为桩间土承载力,现在则已开始考虑由固结引起强度增长,周围桩体的围护,成桩过程中的挤压以及扰动等因素对桩间土承载力的影响。近年来对桩土应力比的确定及影响因素开展了大量研究。试验资料分析表明,桩土应力比与桩体性质、桩距、天然地基承载力、复合地基强度发挥度等因素密切相关,还与施工方法,质量控制等因素有关。桩土应力的确定通常采用现场载荷试验,其测定值也受载荷板尺寸的影响。近几年来,各类复合地基承载力与变形计算的研究工作愈来愈得到人们的重视。然而复合地基计算理论的发展,但还远不能满足工程实践的要求。

1-3 各类地基处理技术发展简况

1. 强夯法和强夯置换法

强夯法处理地基首先由法国 Menard 技术公司于 20 世纪 60 年代末创用。我国于 1978 年引进,交通部一航局科研所及协作单位在天津首先开展试验研究。由于该法设备简单、效果显著、经济和施工快,很快得到推广。除强夯挤密外,近年来,强夯置换得到不少应用。强夯置换和强夯挤密在加固机理上是不同的,应用范围也不相同。强夯挤密法常用来加固碎石土、砂土、低饱和度的黏性土、素填土、杂填土、湿陷性黄土等各类地基。对于饱和度较高的黏性土等地基,如有工程经验或试验证明采用强夯法有加固效果的也可采用。通常认为强夯挤密法只

适用于塑性指数 $I_p \leq 10$ 的土。对于设置有竖向排水系统的软黏土地基,是否适用强夯法处理目前尚有不同看法。对于厚度小于 6m 左右的软黏土层采用强夯置换法处理,边夯边填碎石等粗粒料形成深度为 3~6m,直径为 2m 左右的碎石桩体,与周围土体形成复合地基,也已取得较好的加固效果。

强夯法至今还没有一套成熟的理论和设计计算方法,还需要在实践中总结和提高。

强夯施工主要设备包括夯锤、起重机、脱钩器和门架等部分。工程实践表明,施工机具和工艺直接影响加固效果和经济效益。近几年来,人们重视强夯机具装置的科学化、系列化和规格化的研究。

强夯置换对厚度小于 6m 的软弱土层,边夯边填碎石,形成深度 3~6m,直径为 2m 左右的碎石桩体与周围土体形成复合地基。

强夯造成的振动、噪音等公害也应引起足够的重视。

2. 排水固结法

排水固结法又称预压法。该法适用于淤泥质土、淤泥、冲填土等饱和黏性土地基。饱和软黏土在载荷作用下,孔隙中的水慢慢被排出,土的孔隙比减小,随着超静孔隙水压力消散,有效应力提高,土的强度增长。通过排水固结法处理地基可以使地基沉降在加载预压期间大部或基本完成,减少建筑物在使用期间的沉降和沉降差,也可提高地基承载力。排水固结法是由排水系统和加压系统两部分共同组合而成的。排水系统通常有普通砂井、袋装砂井和塑料排水带等。加压系统通常有堆载预压法,真空预压法、降低地下水位法、电渗法和联合法。近几年来,排水系统采用塑料排水带和袋装砂井较多,加压系统采用堆载预压和真空预压法较多,也有采用真空加堆载联合预压法,以及利用建筑自重加载法。

袋装砂井和塑料排水带的长细比大,井阻影响得到人们的重视。近年来非理想井的固结理论得到发展,谢康和和曾国熙(1989)为非理想井的设计提供了简易曲线和设计方法。为了消除地基在使用荷载下的主固结变形,减小或消除次固结变形,可以采用超载预压。所谓超载预压就是在预压过程中采用比使用荷载大的预压荷载预压。宁波机场和温州机场都建筑在深厚的软黏土地基上,为满足机场跑道对地基变形和回弹模量的严格要求,采用超载预压处理均取得良好效果。

真空预压法一般能够取得相当于 78~92kPa 的等效荷载,为了进一步提高加固效果,可采用真空-堆载联合预压法。几年来根据工程要求已获得相当于 130kPa 的等效荷载。真空-堆载联合预压法先后在天津、上海和福州等地得到应用。对真空预压法的有效加固深度学术界看法不一致。有的学者认为有效深度在 10m 以内,有的则认为可达 20m,甚至更深。真空预压的有效深度需引起重视和进一步研究。袋装砂井也存在一个有效深度问题。有的日本学者认为袋装砂井有效深度在 15m 以内。对于超软弱地基,要注意防止地基固结过程中塑性排水带或袋装砂井的折断问题。要研制柔性塑料排水带以满足工程需要。

3. 振冲法

利用振动和水冲加固地基的方法叫做振冲法。振冲法由德国 S.Steuerman 在 1939 年提出,我国应用始于 1977 年。由于大量工业民用建筑、水利和交通工程地基抗震加固的需要,该法得到迅速推广。振冲法早期用来振密松砂地基,后来也应用于黏性土地基,振冲法演变成两

类:振冲密实法和振冲置换法。振冲密实法的加固原理是一方面依靠振冲器的强力振动使饱和和砂层发生液化,砂颗粒重新排列,孔隙减少,另一方面依靠振冲器的水平振动力,在加回填料情况下通过填料使砂层挤压加密。振冲置换的加固原理是利用振冲器在高压水流下边振冲在软弱黏性土地基中成孔,再在孔内分批填入碎石等坚硬材料,制成一根根桩体,碎石桩体和原地基构成碎石桩复合地基,以提高地基承载力,减小地基沉降。振冲密实法适用于颗粒含量小于 10% 的松砂地基;振冲置换法适用于不排水抗剪强度大于 20kPa 的黏性土,粉土和人工填土等地基;有时还可用来处理粉煤灰地基。

振冲法施工需要大量水,并在施工过程中排放泥浆、污染现场。为了克服这一缺点,干法振动加固地基技术得到应用。利用干法振动成孔器在软弱地基中设置碎石桩,干法振动加固地基技术主要适用于松散的非饱和黏土、杂填土和素填土,以及二级以上非自重湿陷性黄土。

另外,各地因地制宜应用沉管干夯挤密碎石桩、干振道渣石屑桩、钢渣桩加固地基。为了提高碎石桩桩体本身的刚度,发展了水泥粉煤灰碎石桩技术和低标号混凝土桩技术。这类低标号柔性桩形成的复合地基具有承载力提高幅度大、变形模量高的特点,是一种有发展潜力的地基处理技术。

4. 石灰桩、土桩、灰土桩法

石灰加固地基的传统方法受到了国内外岩土工程工作者的重视。1989 年 3 月我国在上海召开了一次石灰加固软弱地基的专题学术讨论会,交流论文 25 篇。1989 年 7 月第二届全国地基处理学术讨论会上又作了进一步的交流和讨论。会上对石灰桩法加固地基技术的现状和展望作了较全面的综述和总结。

石灰桩法工艺简单,不需复杂的施工机具,应用较广泛。其加固机理包括:打桩时挤密、石灰吸水、膨胀、升温、离子交换、胶凝、碳化和置换等,但基本加固作用则可归纳为打桩挤密、桩周土脱水挤密和桩身的置换作用。从提高承载能力看,在正常情况下置换作用占的份额最大。经验与实践证明只要填充石灰达到必要的密实度则不会出现软心现象。另外采用粉煤灰等适宜的掺合料也有助于避免发生软心现象。杭州和湖北两地挖出的工程桩桩身的抗压强度分别达到 750kPa 和 564kPa。桩土应力比是衡量置换作用的主要指标。要满足一般工程要求,不需追求过高的应力比。当需要提高应力比时除了要保证桩身具有较高强度外,桩还必须打穿软土层以免桩尖刺入降低应力比。

目前在实用概念上认为,若加固着眼点为石灰的吸水与膨胀作用,则必须采用新鲜生石灰且不加掺和料,最好采用细桩径小桩距。若放弃石灰熟化的吸水脱水作用(此作用提高地基承载力不超过 5%)则可用熟石灰亦能取得好的加固效果,掺入粉煤灰可节约石灰并可达到与石灰相近的效果,最高掺和量可达 80%~90%,此时称为二灰桩。

当被加固的渗透系数太小时不利于软土脱水固结,脱水加固效果很小;若被加固土的渗透性太大,孔中充水,石灰难予密实,效果不好;工程实例中发生过浓酸碱腐蚀损坏灰土的实例。在考虑采用石灰桩法加固地基时,应注意石灰桩法的适用条件,以及正确的施工方法。采用石灰桩加固地基有成功的经验,也有些达不到预期效果。

此外 Broms(1987)还指出,当用石灰桩处理软土时,如果遇有透水砂层或粉土层时则石灰的膨胀比黏土地基的固结来得快,桩体积增加将会产生软黏土地基的隆起而不是固结和含水量的减小。

砂桩法于 19 世纪 30 年代起源于欧洲,20 世纪 50 年代引进我国。起初砂桩法用于处理松散砂地基,视施工方法不同,又可分为挤密砂桩和振密砂桩。后来,也有用来加固软弱黏性土地基,通过砂桩的置换作用,形成砂桩复合地基,对其进行加载预压,也可加快地基固结。

土桩和灰土桩法在我国西北和华北地区得到广泛应用。土桩和灰土桩适用于地下水位以上的湿陷性黄土、杂填土和素填土等地基。

近几年在采用土桩和灰土桩加固地基时,已重视工业废料的利用。如采用石灰和粉煤灰二灰桩处理粉煤灰地基和杂填土地基等。为了利用城市渣土,北京地区发展了渣土桩专利技术。它不但消除了渣土对环境的污染,而且为地基处理提供了廉价的原材料。在挤密桩施工中,除了打管挤密、爆扩挤密和冲击锥挤密外,还发展了采用橄榄锤锤击挤密成桩法,该法具有设备简单、施工方便和不需要三材等优点。

5. 深层搅拌法和高压喷射注浆法

深层搅拌法是通过特制机械沿深度将固化剂与地基土强制搅拌,就地成桩加固地基的方法。当固化剂(水泥或石灰)为粉体时又称粉体喷射搅拌法。深层搅拌适用于处理淤泥、淤泥质土和含水量较高的地基承载力标准值不大于 120kPa 的黏性土、粉土等软土地基。当处理泥炭土或地下水具有侵蚀性时宜通过试验确定其适用性,冬季施工应注意负温对处理效果的影响。

深层搅拌法目前在国外特别是日本和美国应用很广,国内近些年发展较快,在房屋地基加固,开挖工程代替板桩支护,铁路软基加固等方面,有大量的工程实践,对整套技术已有一定经验。在机械设备上虽然分别由原冶金工业部的建筑研究总院和交通部规划设计研究院,天津机械化施工公司和交通部一航局料研所,浙江大学岩土工程研究所等单位研制成了双搅拌轴中心管输浆及单轴搅拌叶片输浆的浆体深层搅拌专用机械,铁四院和上海探矿机械厂研制成深层粉喷搅拌专用机械,但与国外同类型机械相比还有一定的差距,深层搅拌法可以根据工程需要作块状、格子状、壁状和圆柱状等形状的加强体,同时具有施工中无振动、无噪音、无地面隆起、不排污、对相邻建筑不会产生有害的影响等优点,该法较受工程界欢迎。深层搅拌桩地基的设计可按复合地基考虑。许多工程实测资料表明,在正确设计和施工的情况下,深层搅拌法处理的地基沉降较小。

高压喷射注浆法是将带有特殊喷嘴的注浆管置于土层预定深度,以高压喷射流使固化浆液与土体混合、凝固硬化加固地基土体的方法。它适用于淤泥、淤泥质土、黏性土、粉土、黄土、砂土、人工填土和碎石土等地基。当土中含有较多的大粒径块石、坚硬黏性土、大量植物根茎或有过多的有机质时,应根据现场试验结果确定其适用程度。遇地下水流速过大和已涌水的工程应慎重使用。注浆形式分旋喷、定喷和摆喷,施工分单管法、二重管法及三重管法。

高压喷射注浆法用于处理新建和原有建筑的地基处理的作为深基挡土结构、坑底加固、防止管涌与隆起、处理隧道坍方和修建地下防水帷幕等都有很多工程实例。例如 1989 年曾成功地应用高压喷射注浆法处理了 18 层近 68m 高的威海大厦软弱地基。经观测该建筑下沉均匀,沉降量仅 0.7~1.3cm。哈尔滨松花江江堤应用高压喷射注浆法修建板墙防渗工程 2km 多,深 25~30m,板墙面积达 5.1 万 m^2 。

为适应隧道、地下工程及深基开挖等施工的需要,水平高压喷射及灌浆加固技术在意大利、日本和西德得到较快的发展。意大利 Radio 公司还开发了可同时在钻进中检测地层土质、机器控