

地基基础设计与施工丛书

高大钊 主编

叶观宝 叶书麟 编著

地基加固新技术

机械工业出版社

地基基础设计与施工丛书

高大创 主编

地基加固新技术

叶观宝 叶书麟 编著



机械工业出版社

2469/13

本书结合《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—91)的技术要求,详细介绍了当前国内外地基加固的新技术,如砂(或砂石、碎石)垫层、素土(或灰土、二灰)垫层、粉煤灰垫层、干渣垫层、强夯、碎(砂)石桩、石灰桩、土(或灰土、双灰)桩、水泥粉煤灰碎石桩、堆载预压、真空预压、灌浆、水泥土搅拌桩、高压喷射注浆、加筋土挡墙、土工合成材料和土钉墙等技术,并阐明以上各种地基加固方法的加固机理、设计计算、施工工艺和质量检验等内容。

本书可供土木工程范围内从事勘察、设计、施工的技术人员使用,也可供建筑工程专业学生作参考资料;也可作为全国注册岩土工程师考试参考书。

图书在版编目(CIP)数据

地基加固新技术/叶观宝等编著. —北京:机械工业出版社, 1999.12
(地基基础设计与施工丛书/高大钊主编)
ISBN 7-111-07499-8

I. 地… II. 祝… III. 地基处理-技术 IV. TU753.8
中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第43569号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:劳瑞芬 刘彩英

封面设计:姚毅 责任印制:何全君

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1999年9月第1版第1次印刷

787mm×1092mm1/16·16印张·381千字

0 001—4 000册

定价:26.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页、由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、68326677-2527

序

地基基础的设计与施工是一门实用性很强的工程技术学科，对于提高工程质量与降低工程造价关系极大。近 20 年来，随着我国城市建设的发展，大量高层建筑和高等级道路以及一些城市地下铁道的兴建，地基基础工程技术队伍不断扩大，有力地促进了地基设计、桩基技术、地基处理、基坑工程和地基基础测试技术等领域的技术进步，出现了许多新的设计计算方法和新的施工技术，形成了新的技术热点，获得不少的技术成果，亟需加以归纳总结和提高，以适应进一步发展的要求。

同济大学地基基础教研室是我国建制较早的地基基础教学与研究单位，在我国土力学前辈俞调梅、张问清和郑大同教授等的开拓下已形成了一支有特色的学术队伍，参与了许多重大建设工程项目和一系列地基基础技术规范的编制工作，积累了比较丰富的工程经验。这套丛书的作者大多是几十年来长期从事地基基础教学科研工作的教授，在丛书中反映了他们的学术见解和工程经验。是一套融设计方法与施工技术于一体，既有基本原理阐述又有技术进展的综合、全面系统的技术专著。本书的问世相信对广大土木工程、岩土工程工作者都会有所助益，故乐意为之作序。

孙 钧

同济大学岩土工程研究所

1999 年 2 月

孙钧教授系中国科学院院士，国际岩石力学与工程学会副主席，同济大学校务委员、岩土工程系名誉系主任。

《地基基础设计与施工丛书》

前 言

任何建筑物都离不开地球，建筑物的全部荷载都由地球的表面地层来承担，承受这些建筑物荷载的地层称为地基，与地基接触并传递荷载给地基的结构物称为基础。关于地基和基础的设计与施工的工程技术领域简称为地基基础领域，亦可称为基础工程。

正确解决工程中的地基基础问题，其根本目的在于保证工程的质量，使工程结构物能安全、正常地使用。“万丈高楼平地起”，基础的质量是整个建筑物安全的根本所在。基础工程的质量包括在建筑物荷载作用下地基应当是足够稳定的；地基的沉降对于建筑物的变形和正常使用是可以允许的；在各种不利因素的影响下基础的耐久性可靠的；所使用的施工工艺和施工方法适合场地的工程地质条件、符合工程特点的要求，并且有利于实现上述有关地基稳定、沉降和耐久性的要求。这是地基基础设计与施工的目标，也是这门学科研究的主要内容。

地基与基础的勘察、设计与施工是整个工程建设的关键性阶段，工程建设的成败很大程度上取决于基础工程的质量与水平；同时，地基基础又是隐蔽工程，施工条件极为复杂，影响工程质量的因素很多，除了技术因素以外，还有管理的因素，稍有不慎轻则留下隐患，重则造成事故；基础工程的造价占工程造价的很大比例，在地质条件复杂地区，一般可高达20%~30%。在基础工程中节约建设资金的潜力很大，如果盲目提高安全度，有时虽然多花了建设资金，但仍不能收到良好的效果。因此，具有丰富工程经验的工程技术人员都十分重视地基与基础的勘察、设计与施工阶段的工作；要求从事土木、水利工程技术工作的人员必须掌握土力学基础工程的理论知识和实际技能，才能正确地解决工程中的地基基础技术问题。

地基基础设计与施工的工作对象主要是岩石或土，与上部结构的设计施工之间的主要差别也在于此。几十年前，有一位从事基础工程的教授曾经说过，钢筋混凝土结构加土力学就是基础工程。这是一种简明扼要的概括，虽然不很全面，但却说明了问题的关键。基础工程的困难和复杂全在于岩土的工程性质极其复杂多变，而人们对于岩土的认识和理解却又比较肤浅。如果忽视这个事实，对岩土的特点不甚了解而又不想去深入研究，全凭处理上部结构的经验来解决地基基础的问题，那很容易碰壁，许多工程事故的主要原因就在这里。那么，地基基础工程与结构工程相比较又有哪些特点呢？地基基础主要有三个特点，即不确定性、地区性和经验性。

岩土是在漫长的历史年代中，经过各种不同的物理环境和化学环境的作用，随机形成的以无机矿物为主的自然结构体。不像钢材和混凝土那样的人工材料，可以进行材料性能的设计和制造质量的控制，这些材料的技术数据虽然也有一定离散性，但范围极小。但在基础工程中，只要场地一定，自然界所赋与的地质条件就无法选择了，只能“随遇而安”。虽然采用钻探取土试验的方法可以得到一些抽样的结果，但是通过数量很少的试验数据，

不太可能对自然结构体的全部性能都了解清楚。此外,某些岩石的结构及性能又容易随环境条件而改变,特别是水对岩土性质有非常不利的影响,而施工时又常改变了岩土的环境条件,施工对岩土性质的影响也是不容忽视的。所有这一切都不可能在事先估计得非常清楚,地基基础的设计和施工是在对岩土体的了解不太多的情况下进行的,作为设计和施工依据的技术数据以及设计的结果就具有很大的不确定性。所谓不确定性是指客观存在的岩土体的性状以及施工结束以后的建筑物的工作状况不一定完全符合设计时的估计,这是无法回避的事实,是从事基础工程工作的人员必须重视的现实。

从岩土是自然历史产物这一事实出发,就不难理解岩土具有地区性的特点。由于各地的自然条件不同,所形成的岩石或土的性质也就存在很大的差异,不仅西北的黄土,东南沿海的软土和云贵高原的红粘土性质完全不同,即使是一般粘性土或砂土,不同地区的土也有明显的差别。不同的土,应力应变关系不一样,压缩性指标和抗剪强度指标也不同,不仅设计参数不同,工程处理措施的目的不同,而且施工的方法也不相同。例如黄土要考虑消除湿陷性,膨胀土要研究胀缩性规律,甚至变形计算也与一般土的方法完全不同。不同地区的土,具有不同的特点,人们积累了不同的工程经验,使基础工程具有很强烈的地区性,形成了许多各具特色的地方规范,例如上海规范的特点是平原的软土,重庆规范的特点是山区的岩石,这种情况是上部结构所没有的。在上部结构中,混凝土和钢筋的弹性模量和强度都能在规范中给出可用于设计的数值,但不可能从规范中找到指定工程场地地基基础的设计参数,对每一个项目都必须进行工程勘察,根据工程勘察报告中的工程地质条件和土层的物理力学性质指标,才能进行设计和施工,“因地制宜”在地基基础的设计和施工中体现得更为突出。

工程都具有经验性的特点,但地基基础的经验性比上部结构强得多,这是由不确定性和地区性决定的。太沙基曾经说过,与其说土力学是一门技术,不如说它是一门艺术。他的意思是说,处理地基基础问题,不仅需要定量的计算,而更需要经验来判断计算的正确与否;不仅需要数学力学的方法来分析,而更需要用工程地质的观点来估计计算参数、设计方法、施工方法的可靠性如何;用实测的数据来验证,并作为采取进一步工程措施的依据。在这种思想的指导下,形成了著名的“观察法”,即信息化施工的系统方法。地基基础设计与施工应当特别重视原型观测,即对建筑物及地基基础的变形和应力状态进行全过程的观测,在观测资料的基础上形成工程实录。地基基础工作者要善于从以往的工程经验和教训中学习、积累知识,采用工程类比的方法,选择设计参数,处理工程中的问题,并在工程实践中不断地总结经验。

由于地基基础具有上述明显的特点,从事地基基础工作的技术人员更需要不断地学习,更新自己的知识,丰富自己的经验。编写这一套《地基基础设计与施工丛书》的目的就是为从事地基基础设计与施工的同行提供系统的参考资料,为新参加地基基础工作的同志提供继续教育的教材,也可作为高等学校有关专业的参考书。丛书由《天然地基上的浅基础》、《桩基础的设计方法与施工》、《地基加固新技术》、《深基坑工程》和《地基基础测试新技术》等五本组成。这些内容概括了地基基础最基本的常用技术和最新发展的技术领域,在第一本书中还包括了土力学的基本理论和工程勘察的方法,在第二本书中还包括了地基基础施工监理的方法,从而形成了一个理论—试验—设计计算—施工—监理的完整体系,提

供比较全面的勘察、设计与施工全过程的系统知识。

参加这套丛书编写的我的同事们都是在这一领域中长期从事土力学地基基础的教学、科研、设计和施工监测、监理等工作的教授、副教授。在这套丛书中，注入了长期积累的经验 and 学术见解，也引用了同济大学其他老师的许多宝贵资料，希望能为读者提供一套“开卷有益”的读物，这是编者的最大愿望。但由于编者水平的限制，书中还会有疏漏甚至错误的地方，恳请读者指正。

在丛书的编写过程中得到了中国科学院院士孙钧教授的鼓励和支持，并为丛书作序，这是编者莫大的荣幸。

主编 高大钊

1999年2月于同济大学

前 言

我国地域辽阔，从沿海到内地，由山区到平原，分布着多种多样的地基土，其抗剪强度、压缩性以及透水性等因土的种类不同而可能有很大的差别，地基条件区域性较强。因而使地基基础这门学科特别复杂。随着我国国民经济的发展，不仅事先要选择在地质条件良好的场地上从事建设，而且有时也不得不在地质条件不良的地基上进行修建；另外，随着科学技术的日新月异，结构物的荷载日益增大，对变形的要求也越来越严，因而原来一般可被评价为良好的地基，也可能在特定条件下非进行地基处理不可。所以不仅要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，而且要善于选取最恰当的地基加固方法。

地基加固的目的是利用换填、夯实、挤密、排水、胶结、加筋和热学等方法对地基土进行加固，用以改造地基土的剪切性、压缩性和特殊地基的特性。

目前国内外的地基加固方法很多，很多方法尚在不断发展之中。每一种地基加固方法都有它的适用范围和局限性，因而针对各种地基土其地基加固方法各异。本书编写的原则是尽量反映国内地基加固的新技术和新经验，并对各种常用的地基加固方法阐明其加固机理、设计计算、施工工艺和质量检验。

本书共分六章，各章节安排乃按地基处理的作用机理进行分章列节，包括砂（或砂石、碎石）垫层、素土（或灰土、二灰）垫层、粉煤灰垫层、干渣垫层、强夯、碎（砂）石桩、石灰桩、土（或灰土、双灰）桩、水泥粉煤灰碎石桩、堆载预压、真空预压、灌浆、水泥土搅拌桩、高压喷射注浆、加筋土挡墙、土工合成材料和土钉墙等技术。

本书引用了许多科研和工程单位的一些科研成果和技术总结，谨向这些同志致以衷心的感谢。

限于编者水平，本书不足和错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

1999年2月

目 录

序

《地基基础设计与施工丛书》前言

前言

第1章 绪 言	1
1.1 地基处理的目的和意义	1
1.2 地基处理方法分类及应用范围	2
1.3 地基处理的基本原则	6
1.4 地基处理工程的施工管理与效果检验	7
1.5 地基处理技术的国内外发展情况	8
第2章 换 填	9
2.1 概 述	9
2.2 压实原理	10
2.3 垫层设计	12
2.3.1 砂（或砂石、碎石）垫层设计	12
2.3.2 素土（或灰土、二灰）垫层设计	14
2.3.3 粉煤灰垫层设计	14
2.3.4 干渣垫层设计	15
2.4 垫层施工	16
2.4.1 按密实方法分类	16
2.4.2 按垫层材料分类	18
第3章 深层密实	20
3.1 强夯	21
3.1.1 概述	21
3.1.2 加固机理	22
3.1.3 设计计算	25
3.1.4 施工方法	28
3.1.5 质量检验	29
3.2 碎（砂）石桩	31
3.2.1 概述	31
3.2.2 加固原理	33
3.2.3 设计计算	34
3.2.4 施工方法	44
3.2.5 单桩和复合地基载荷试验	53
3.2.6 质量检验	54
3.3 石灰桩	54

3.3.1	概述	54
3.3.2	加固机理	55
3.3.3	设计计算	56
3.3.4	施工方法	57
3.3.5	质量检验	58
3.4	土(或灰土、双灰)桩	59
3.4.1	概述	59
3.4.2	加固机理	59
3.4.3	设计计算	60
3.4.4	施工方法	63
3.4.5	质量检验	64
3.5	水泥粉煤灰碎石桩	65
3.5.1	概述	65
3.5.2	材料配合比及其力学性能	65
3.5.3	加固机理	66
3.5.4	设计计算	68
3.5.5	施工方法	71
3.5.6	质量检验	72
第4章	排水固结	74
4.1	概述	74
4.2	加固机理	75
4.2.1	堆载预压加固机理	75
4.2.2	真空预压加固机理	77
4.3	设计与计算	78
4.3.1	预压排水固结法设计计算	78
4.3.2	真空预压设计计算	98
4.4	施工方法	99
4.4.1	堆载预压施工方法	99
4.4.2	真空预压施工方法	108
4.5	质量检验	113
4.5.1	现场观测	113
4.5.2	加荷速率控制	115
4.5.3	质量检验	117
第5章	化学加固	118
5.1	灌浆法	118
5.1.1	概述	118
5.1.2	加固机理	119
5.1.3	设计计算	134

5.1.4	施工方法.....	141
5.1.5	质量检验.....	148
5.2	水泥土搅拌法.....	149
5.2.1	概述.....	149
5.2.2	加固机理.....	150
5.2.3	水泥加固土的室内外试验.....	151
5.2.4	设计计算.....	160
5.2.5	施工工艺.....	170
5.2.6	质量检验.....	178
5.3	高压喷射注浆.....	181
5.3.1	概述.....	181
5.3.2	加固机理.....	186
5.3.3	设计计算.....	191
5.3.4	施工方法.....	198
5.3.5	质量检验.....	205
第 6 章	土的加筋	207
6.1	加筋土挡墙.....	208
6.1.1	概述.....	208
6.1.2	加固机理.....	209
6.1.3	设计计算.....	211
6.1.4	施工技术.....	219
6.1.5	质量检查.....	220
6.2	土工合成材料.....	221
6.2.1	概述.....	221
6.2.2	土工合成材料产品类型.....	221
6.2.3	土工合成材料特性.....	222
6.2.4	土工合成材料的主要功能.....	225
6.2.5	设计计算.....	227
6.2.6	施工技术.....	230
6.3	土钉墙技术.....	231
6.3.1	概述.....	231
6.3.2	土钉墙的特点与适用性.....	232
6.3.3	土钉与加筋土挡墙、土层锚杆的比较.....	233
6.3.4	加固机理.....	235
6.3.5	设计计算.....	236
6.3.6	施工技术.....	241
6.3.7	检验和监测.....	243
	参考文献.....	244

第1章 绪 言

1.1 地基处理的目的和意义

场地是指工程建设所直接占有并直接使用的有限面积的土地。场地范围内及其邻近的地质环境都会直接影响着场地的稳定性。场地的概念是宏观的，它不仅代表着所划定的土地范围，还应扩大涉及某种地质现象或工程地质问题所概括的地区。所以场地的概念不能机械地理解为建筑占地面积，在地质条件复杂的地区，还应包括该面积在内的某个微地貌、地形和地质单元。场地的评价对工程的总体规划具有深远的实际意义，关系到工程的安全性和工程造价。

地基是指承托建筑物基础的这一部分范围很小的场地。建筑物的地基所面临的问题有以下四方面：①强度及稳定性问题；②压缩及不均匀沉降问题；③渗漏问题；④液化问题。当建筑物的天然地基存在上述四类问题之一或其中几个时，即须采用地基处理措施以保证建筑物的安全与正常使用。地基与建筑物的关系极为密切，而地基问题常常是造成工程事故的主要原因。

基础是指建筑物向地基传递荷载的下部结构，它具有承上启下的作用。它处于上部结构的荷载及地基反力的相互作用下，承受由此而产生的内力（轴力、剪力和弯矩）。另外，基础底面的反力反过来又作为地基上的荷载，使地基土产生应力和变形。地基和基础的设计往往是不可截然分割的，基础设计时，除需保证基础结构本身具有足够刚度和强度外，同时还需选择合理的基础尺寸和布置方案，使地基的强度和变形满足规范的要求。

凡是基础直接建造在未经加固的天然土层上时，这种地基称之为天然地基。若天然地基很软弱，不能满足地基强度和变形等要求，则事先要经过人工处理后再建造基础，这种地基加固称为地基处理。

我国地域辽阔，从沿海到内地，由山区到平原，分布着多种多样的地基土，其抗剪强度、压缩性以及透水性等因土的种类不同而可能有很大的差别，地基条件区域性较强。因而使地基基础这门学科特别复杂。随着我国国民经济的发展，不仅事先要选择在地质条件良好的场地上从事建设，而有时也不得不在地质条件不良的地基上进行修建；另外，随着科学技术的日新月异，结构物的荷载日益增大，对变形的要求也越来越严，因而原来一般可被评价为良好的地基，也可能在特定条件下非进行地基处理不可。所以不仅要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，而且要善于选取最恰当的地基处理方法。

地基处理的目的是利用换填、夯实、挤密、排水、胶结、加筋和热学等方法对地基土进行加固，用以改良地基土的工程特性。

1) 提高地基的抗剪强度 地基的剪切破坏表现在: 建筑物的地基承载力不够; 由于偏心荷载及侧向土压力的作用使结构物失稳; 由于填土或建筑物荷载, 使邻近地基产生隆起; 土方开挖时边坡失稳; 基坑开挖时坑底隆起。地基的剪切破坏反映在地基土的抗剪强度不足, 因此, 为了防止剪切破坏, 就需要采取一定措施以增加地基土的抗剪强度。

2) 降低地基的压缩性 地基的压缩性表现在建筑物的沉降和差异沉降大; 由于有填土或建筑物荷载, 使地基产生固结沉降; 作用于建筑物基础的负摩擦力引起建筑物的沉降; 大范围地基的沉降和不均匀沉降; 基坑开挖引起邻近地面沉降; 由于降水地基产生固结沉降。地基的压缩性反映在地基土的压缩模量指标的大小。因此, 需要采取措施以提高地基土的压缩模量, 借以减少地基的沉降或不均匀沉降。

3) 改善地基的透水特性 地基的透水性表现在堤坝等基础产生的地基渗漏; 基坑开挖工程中, 因土层内夹薄层粉砂或粉土而产生流砂和管涌。以上都是在地下水的运动中所出现的问题。为此, 必须采取措施使地基土降低透水性或减少其水压力。

4) 改善地基的动力特性 地基的动力特性表现在地震时饱和松散粉细砂(包括部分粉土)将产生液化; 由于交通荷载或打桩等原因, 使邻近地基产生振动下沉。为此, 需要采取措施防止地基液化, 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特性 主要是消除或减少黄土的湿陷性和膨胀土的胀缩性等。

地基处理的对象是软弱地基和特殊土地基。我国《建筑地基基础设计规范》(GBJ7—89)中规定: “软弱地基系指主要由淤泥、淤泥质土、冲填土、杂填土或其它高压缩性土层构成的地基”。

特殊土地基大部分带有地区特点, 它包括软土、湿陷性黄土、膨胀土、红粘土、冻土和岩溶等。

1.2 地基处理方法分类及应用范围

地基处理的历史可追溯到古代, 许多现代的地基处理技术都可在古代找到它的雏形。我国劳动人民在处理地基方面有着极其宝贵的丰富经验, 根据历史记载, 早在两千年前就已采用了软土中夯入碎石等压密土层的夯实法; 灰土和三合土的换土垫层法也是我国传统的建筑技术之一。

地基处理方法的分类可有多种多样。如按时间可分临时处理和永久处理; 按处理深度可分为浅层处理和深层处理; 按土性对象可分为砂性土处理和粘性土处理, 饱和土处理和非饱和土处理; 也可按照地基处理的作用机理进行分类。作者认为按地基处理的作用机理进行的分类方法较为妥当, 它体现了各种处理方法的主要特点。

地基处理的基本方法, 无非是置换、夯实、挤密、排水、胶结、加筋和热学等方法。这些方法是千百年以前以至迄今仍然是有效的方法。值得注意的是, 很多地基处理的方法具有多种处理的效果。如碎石桩具有置换、挤密、排水和加筋的多重作用; 石灰桩又挤密又吸水, 吸水后又进一步挤密等, 因而一种处理方法可能具有多种处理效果。

常用地基处理方法的原理、作用及适用范围如下。

1. 换土垫层法

(1) 垫层法 其基本原理是挖除浅层软弱土或不良土, 分层碾压或夯实土, 按回填的材料可分为砂(或砂石)垫层、碎石垫层、粉煤灰垫层、干渣垫层、土(灰土、二灰)垫层等。干渣分为分级干渣、混合干渣和原状干渣; 粉煤灰分为湿排灰和调湿灰。换土垫层法可提高持力层的承载力, 减少沉降量; 消除或部分消除土的湿陷性和胀缩性; 防止土的冻胀作用及改善土的抗液化性。常用机械碾压、平板振动和重锤夯实进行施工。

该法常用于基坑面积宽大和开挖土方量较大的回填土方工程, 一般适用于处理浅层软弱土层(淤泥质土、松散素填土、杂填土、浜填土以及已完成自重固结的冲填土等)与低洼区域的填筑。一般处理深度为 2~3m。适用于处理浅层非饱和软弱土层、湿陷性黄土、膨胀土、季节性冻土、素填土和杂填土。

(2) 强夯挤淤法 采用边强夯、边填碎石、边挤淤的方法, 在地基中形成碎石墩体。可提高地基承载力和减小变形。

适用于厚度较小的淤泥和淤泥质土地基, 一般应通过现场试验才能确定其适应性。

2. 振密、挤密法 振密、挤密法的原理是采用一定的手段, 通过振动、挤压使地基土体孔隙比减小, 强度提高, 达到地基处理的目的。

(1) 表层压实法 采用人工或机械夯实、机械碾压或振动对填土、湿陷性黄土、松散无粘性土等软弱或原来比较疏松表层土进行压实。也可采用分层回填压实加固。

适用于含水量接近于最佳含水量的浅层疏松粘性土; 松散砂性土; 湿陷性黄土及杂填土等。

(2) 重锤夯实法 利用重锤自由下落时的冲击能来夯击浅层土, 使其表面形成一层较为均匀的硬壳层。

适用于无粘性土、杂填土、非饱和粘性土及湿陷性黄土。

(3) 强夯法 利用强大的夯击能, 迫使深层土液化和动力固结, 使土体密实, 用以提高地基土的强度并降低其压缩性, 消除土的湿陷性、胀缩性和液化性。

适用于碎石土、砂土、素填土、杂填土、低饱和度的粉土与粘性土及湿陷性黄土。

(4) 振冲挤密法 振冲挤密法一方面依靠振冲器的强力振动使饱和砂层发生液化, 颗粒重新排列, 孔隙比减少; 另一方面依靠振冲器的水平振动力, 形成垂直孔洞, 在其中加入回填料, 使砂层挤压密实。

适用于砂性土和小于 0.005mm 的粘粒含量[⊙] 低于 10% 的粘性土。

(5) 土(或灰土、粉煤灰加石灰)桩法 是利用打入钢套管(或振动沉管、炸药爆破)在地基中成孔, 通过“挤”压作用, 使地基土得到加“密”, 然后在孔中分层填入素土(或灰土、粉煤灰加石灰)后夯实而成土桩(或灰土桩、二灰桩)。

适用于处理地下水位以上湿陷性黄土、新近堆积黄土、素填土和杂填土。

(6) 砂桩 在松散砂土或人工填土中设置砂桩, 能对周围土体或产生挤密作用, 或同时产生振密作用。可以显著提高地基强度, 改善地基的整体稳定性, 并减少地基沉降量。

适用于处理松砂地基和杂填土地基。

(7) 爆破法 利用爆破产生振动使土体产生液化和变形, 从而获得较大密实度, 用以

⊙ 一般为质量分数, 后同。——编者注

提高地基承载力和减小沉降。

适用于饱和净砂、非饱和但经灌水饱和的砂、粉土和湿陷性黄土。

3. 排水固结法 其基本原理是软土地基在附加荷载的作用下，逐渐排出孔隙水，使孔隙比减小，产生固结变形。在这个过程中，随着土体超静孔隙水压力的逐渐消散，土的有效应力增加，地基抗剪强度相应增加，并使沉降提前完成或提高沉降速率。

排水固结法主要由排水和加压两个系统组成。排水可以利用天然土层本身的透水性，尤其是上海地区多夹砂薄层的特点，也可设置砂井、袋装砂井和塑料排水板之类的竖向排水体。加压主要是地面堆载法、真空预压法和井点降水法。为加固软弱的粘土，在一定条件下，采用电渗排水井点也是合理而有效的。

(1) **堆载预压法** 在建造建筑物以前，通过临时堆填土石等方法对地基加载预压，达到预先完成部分或大部分地基沉降，并通过地基土固结提高地基承载力，然后撤除荷载，再建造建筑物。

临时的预压堆载一般等于建筑物的荷载，但为了减少由于次固结而产生的沉降，预压荷载也可大于建筑物荷载，称为超载预压。

为了加速堆载预压地基固结速度，常可与砂井法或塑料排水带法等同时应用。如粘土层较薄，透水性较好，也可单独采用堆载预压法。

适用于软粘土地基。

(2) **砂井法**（包括袋装砂井、塑料排水带等）在软粘土地基中，设置一系列砂井，在砂井之上铺设砂垫层或砂沟，人为地增加土层固结排水通道，缩短排水距离，从而加速固结，并加速强度增长。砂井法通常辅以堆载预压，称为砂井堆载预压法。

适用于透水性低的软弱粘性土，但对于泥炭土等有机质沉积物不适用。

(3) **真空预压法** 在粘土层上铺设砂垫层，然后用薄膜密封砂垫层，用真空泵对砂垫层及砂井抽气和抽水，使地下水位降低，同时在大气压力作用下加速地基固结。

适用于能在加固区形成（包括采取措施后形成）稳定负压边界条件的软土地基。

(4) **降低地下水位法** 通过降低地下水位使土体中的孔隙水压力减小，从而增大有效应力，促进地基固结。

适用于地下水位接近地面而开挖深度不大的工程，特别适用于饱和粉、细砂地基。

(5) **电渗排水法** 在土中插入金属电极并通以直流电，由于直流电场作用，土中的水从阳极流向阴极，然后将水从阴极排除，且不让水在阳极附近补充，借助电渗作用可逐渐排除土中水。在工程上常利用它降低粘性土中的含水量或降低地下水位来提高地基承载力或边坡的稳定性。

适用于饱和软粘土地基。

4. 置换法 其原理是以砂、碎石等材料置换软土，与未加固部分形成复合地基，达到提高地基强度的目的。

(1) **振冲置换法**（或称碎石桩法）碎石桩法是利用一种单向或双向振动的冲头，边喷高压水流边下沉成孔，然后边填入碎石边振实，形成碎石桩。桩体和原来的粘性土构成复合地基，以提高地基承载力和减小沉降。

适用于地基土的不排水抗剪强度大于 20kPa 的淤泥、淤泥质土、砂土、粉土、粘性土

和人工填土等地基。对不排水抗剪强度小于 20kPa 的软土地基，采用碎石桩时须慎重。

(2) 石灰桩法 在软弱地基中用机械成孔，填入作为固化剂的生石灰并压实形成桩体，利用生石灰的吸水、膨胀、放热作用以及土与石灰的物理化学作用，改善桩体周围土体的物理力学性质，同时桩与土形成复合地基，达到地基加固的目的。

适用于软弱粘性土地基。

(3) 强夯置换法 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 左右的碎石柱体，与周围土体形成复合地基。

适用于软粘土。

(4) 水泥粉煤灰碎石桩 (CFG 桩) 是在碎石桩基础上加进一些石屑、粉煤灰和少量水泥，加水拌和，用振动沉管打桩机或其它成桩机具制成的一种具有一定粘结强度的桩。桩和桩间土通过褥垫层形成复合地基。

适用于填土、饱和及非饱和粘性土、砂土、粉土等地基。

5. 加筋法 通过在土层中埋设强度较大的土工聚合物、拉筋、受力杆件等提高地基承载力、减小沉降或维持建筑物稳定。

(1) 土工聚合物 利用土工聚合物的高强度、韧性等力学性能，扩散土中应力，增大土体的抗拉强度，改善土体或构成加筋土以及各种复合土工结构。

适用于砂土、粘性土和软土，或用作反滤、排水和隔离材料。

(2) 加筋土 把抗拉能力很强的拉筋埋置在土层中，通过土颗粒和拉筋之间的摩擦力形成一个整体，用以提高土体的稳定性。

适用于人工填土的路堤和挡墙结构。

(3) 土层锚杆 土层锚杆是依赖于土层与锚固体之间的粘结强度来提供承载力的，它使用在一切需要将拉应力传递到稳定土体中去的工程结构，如边坡稳定、基坑围护结构的支护、地下结构抗浮、高耸结构抗倾覆等。

适用于一切需要将拉应力传递到稳定土体中去的工程。

(4) 土钉 土钉技术是在土体内放置一定长度和分布密度的土钉体，与土共同作用，用以弥补土体自身强度的不足。不仅提高了土体整体刚度，又弥补了土体的抗拉和抗剪强度低的弱点，显著提高了整体稳定性。

适用于开挖支护和天然边坡的加固。

(5) 树根桩法 在地基中沿不同方向，设置直径为 75~250mm 的细桩，可以是竖直桩，也可以是斜桩，形成如树根状的群桩，以支撑结构物，或用以挡土，稳定边坡。

适用于软弱粘性土和杂填土地基。

6. 胶结法 在软弱地基中部分土体内掺入水泥、水泥砂浆以及石灰等物，形成加固体，与未加固部分形成复合地基，以提高地基承载力和减小沉降。

(1) 注浆法 其原理是用压力泵把水泥或其它化学浆液注入土体，以达到提高地基承载力、减小沉降、防渗、堵漏等目的。

适用于处理岩基、砂土、粉土、淤泥质粘土、粉质粘土、粘土和一般人工填土，也可加固暗浜和使用在托换工程中。

(2) 高压喷射注浆法 将带有特殊喷嘴的注浆管，通过钻孔置入要处理土层的预定深

度,然后将水泥浆液以高压冲切土体,在喷射浆液的同时,以一定速度旋转、提升,形成水泥土圆柱体;若喷嘴提升而不旋转,则形成墙状固结体。可以提高地基承载力、减少沉降、防止砂土液化、管涌和基坑隆起。

适用于淤泥、淤泥质土、粘性土、粉土、黄土、砂土、人工填土等地基。对既有建筑物可进行托换加固。

(3) 水泥土搅拌法 利用水泥、石灰或其它材料作为固化剂的主剂,通过特别的深层搅拌机械,在地基深处就地将软土和固化剂(水泥或石灰的浆液或粉体)强制搅拌,形成坚硬的拌和柱体,与原地层共同形成复合地基。

适用于淤泥、淤泥质土、粉土和含水量较高且地基承载力标准值不大于 120kPa 的粘性土地基。

7. 冷热处理法

(1) 冻结法 通过人工冷却,使地基温度低到孔隙水的冰点以下,使之冷却,从而具有理想的截水性能和较高的承载力。

适用于饱和的砂土或软粘土地层中的临时措施。

(2) 烧结法 通过渗入压缩的热空气和燃烧物,并依靠热传导,而将细颗粒土加热到 100℃ 以上,从而增加土的强度,减小变形。

适用于非饱和粘性土、粉土和湿陷性黄土。

8. 其它

(1) 锚杆静压桩 是结合锚杆和静压桩技术而发展起来的,它是利用建筑物的自重作为反力架的支承,用千斤顶把小直径的预制桩逐段压入地基,在将桩顶和基础紧固成一体后卸荷,以达到减少建筑物沉降的目的。

主要适用于加固处理淤泥质土、粘性土、人工填土和松散粉土。

(2) 沉降控制复合桩基 是指桩与承台共同承担外荷载,按沉降要求确定用桩数量的低承台摩擦桩基。目前上海地区沉降控制复合桩基中的桩,宜采用桩身截面边长 250mm、长细比在 80 左右的预制混凝土小桩,同时工程中实际应用的平均桩距一般在 5~6 倍桩径以上。

主要适用于较深厚软弱地基上,以沉降控制为主的八层以下多层建筑物。

综上所述,地基加固方法种类繁多,而且还在不断发展。这里不可能对所有的处理方法加以介绍。

1.3 地基处理的基本原则

地基处理的核心是处理方法的正确选择与实施。而对某一具体工程来讲,在选择处理方法时需要综合考虑各种影响因素,如建筑物的体型、刚度、结构受力体系、建筑材料和使用要求,荷载大小、分布和种类,基础类型、布置和埋深,基底压力、天然地基承载力、稳定安全系数、变形容许值;地基土的类别、加固深度、上部结构要求、周围环境条件、材料来源、施工工期、施工队伍技术素质与施工技术条件、设备状况和经济指标等。对地基条件复杂、需要应用多种处理方法的重大项目还要详细调查施工区内地形及地质成因、