



书名：地基处理

ISBN：978-7-313-17337-9

作者：齐善忠

出版社：上海交通大学出版社

定价：42.80元

前言

我国地域辽阔、幅员广大、自然地理环境多样、土质各异、地基条件区域性较强,随着我国土木工程建设突飞猛进,建筑工程地基处理面临很多新的问题,因而如何选择既满足工程需求,又节省建设资金的地基处理方法,成为广大工程技术人员所关注的重大技术问题。

地基处理的主要目的是提高软土地基的强度,保证地基的稳定,降低软土地基的压缩性,减少基础的沉降和不均匀沉降,防止地基土的震动液化,岩土工程的防渗防漏,消除特殊土的湿陷性、胀缩性和冻胀性。

本书主要讲述各种地基处理方法的加固机理、适用范围、设计计算方法、施工要点与质量检验方法。包括换填法、排水固结法、强夯法和强夯置换法、砂石桩法、石灰桩法、灰土挤密桩法和土挤密桩法、水泥粉煤灰碎石桩法、水泥土搅拌法、高压喷射注浆法、土加筋法及其他地基处理方法。

本书建议教学学时数为 76 学时。在教学安排上,课堂教学结束后宜安排 1~2 周的课程设计,巩固所学理论知识;并且要安排一定时间的参观实习,最好是生产实习,以达到所学理论知识与实践的相结合。

本书编写特点:

(1) 本书主要依据《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—2012)、《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2011)、《地基处理手册》编写。

(2) 在编写过程中,作者总结了在公司工作时的工程经验、近几年在高校的教学经验,以及注册岩土工程师考试过程中的学习经验。

(3) 学习本书的基础课程为《工程地质勘察》《土力学》《岩石力学》《基础工程学》《岩土工程检测与监测》《建筑工程材料》等专业基础课。

(4) 鉴于《地基处理》出版后,除了高等院校将它作为教材外,还可作为工程技术人员、国家注册岩土工程师考试人员的参考资料,因此,编写过程中除对各种地基处理方法阐明其加固机理,设计、施工和质量检测方法外,每章还尽可能结合实践附以工程实例、算例、思考题与习题,并对各种地基处理方法进行比较和综合考虑。

本书适用于从事交通、水利、水电、房屋建筑等专业的在校本科生、专科生作为教材使用,也适用于从事地基处理行业的工程技术人员、参加注册岩土工程师考试的考生作为参考资料。

由于时间仓促,作者水平有限,书中存在的不足和错误之处,恳请广大读者批评指正。

目

录

CONTENTS

模块 0	绪 论	1
	◆ 0.1 地基处理的目的和意义	1
	◆ 0.2 地基处理的对象	1
	◆ 0.3 地基处理方法的选用原则	3
	◆ 0.4 地基处理方法综述	4
	◆ 0.5 地基处理方案设计	5
	◆ 0.6 地基处理技术的发展情况	6
	◆ 思考题	8
模块 1	换填法	9
	◆ 1.1 概述	9
	◆ 1.2 换填法的原理与适用范围	9
	◆ 1.3 换填法的设计与计算	10
	◆ 1.4 垫层的施工	15
	◆ 1.5 质量检测	19
	◆ 1.6 工程实例	20
	◆ 思考题	22
	◆ 习题	22
模块 2	排水固结法	23
	◆ 2.1 概述	23
	◆ 2.2 排水固结原理	24
	◆ 2.3 排水固结法的设计与计算	27
	◆ 2.4 施工方法	35
	◆ 2.5 质量检测	41
	◆ 2.6 工程实例	42
	◆ 思考题	44
	◆ 习题	44



模块 3	强夯法和强夯置换法	45
◆ 3.1	概述	45
◆ 3.2	加固原理与适用范围	45
◆ 3.3	设计与计算	47
◆ 3.4	施工方法	52
◆ 3.5	质量检测	54
◆ 3.6	工程实例	56
◆	思考题	58
◆	习题	58
模块 4	砂石桩法	59
◆ 4.1	概述	59
◆ 4.2	加固原理	59
◆ 4.3	设计与计算	62
◆ 4.4	施工方法	67
◆ 4.5	质量检测	71
◆ 4.6	工程实例	72
◆	思考题	75
◆	习题	75
模块 5	石灰桩法	76
◆ 5.1	概述	76
◆ 5.2	加固原理	77
◆ 5.3	设计与计算	79
◆ 5.4	施工方法	81
◆ 5.5	施工质量控制及质量检测	85
◆ 5.6	工程实例	86
◆	思考题	88
◆	习题	88
模块 6	灰土挤密桩法和土挤密桩法	89
◆ 6.1	概述	89
◆ 6.2	加固原理	90
◆ 6.3	设计与计算	94
◆ 6.4	施工工艺	97
◆ 6.5	质量检测	104
◆ 6.6	工程实例	105



◆ 思考题	109
◆ 习题	109
模块 7 水泥粉煤灰碎石桩法	110
◆ 7.1 概述	110
◆ 7.2 加固原理	111
◆ 7.3 设计与计算	113
◆ 7.4 施工方法	117
◆ 7.5 质量检测	121
◆ 7.6 工程实例	122
◆ 思考题	125
◆ 习题	125
模块 8 水泥土搅拌法	127
◆ 8.1 概述	127
◆ 8.2 适用范围及加固机理	128
◆ 8.3 水泥加固土的工程性质	129
◆ 8.4 设计与计算	133
◆ 8.5 施工方法	139
◆ 8.6 质量检测	143
◆ 8.7 工程实例	145
◆ 思考题	149
◆ 习题	149
模块 9 高压喷射注浆法	150
◆ 9.1 概述	150
◆ 9.2 适用范围及加固机理	153
◆ 9.3 设计与计算	157
◆ 9.4 施工方法	164
◆ 9.5 质量检测	169
◆ 9.6 工程实例	170
◆ 思考题	171
◆ 习题	171
模块 10 土加筋法	173
◆ 10.1 概述	173
◆ 10.2 加固原理	179



◆ 10.3	设计与计算	183
◆ 10.4	施工方法	186
◆ 10.5	施工质量控制及监测	189
◆ 10.6	工程实例	191
◆	思考题	193
模块 11 注浆加固法		194
◆ 11.1	概述	194
◆ 11.2	注浆材料与注浆原理	195
◆ 11.3	注浆设计	198
◆ 11.4	施工工艺	201
◆ 11.5	质量检验	208
◆ 11.6	工程实例	209
◆	思考题	210
参考文献		212

0.1 地基处理的目的和意义

在土木工程建设中，当天然地基不能满足建（构）筑物对地基的要求时，需要对天然地基进行地基处理，做成人工地基，以满足建（构）筑物对地基的要求，保证其安全与正常使用。

建（构）筑物所面临的地基问题，主要有以下四个方面：

（1）强度及稳定性问题。当地基的抗剪强度不足以支承上部结构的自重及外荷载时，地基就会产生局部或整体剪切破坏。

（2）压缩及不均匀沉降问题。当地基在上部结构的自重及外荷载作用下产生过大的变形时，会影响结构物的正常使用，特别是超过建筑物所能容许的不均匀沉降时，结构可能开裂破坏。湿陷性黄土遇水而发生剧烈的变形也包括在这一类地基问题中。

（3）渗漏问题。地基的渗漏量或水力坡降超过容许值时，会发生水量损失，或因潜蚀和管涌而导致事故的发生。

（4）震动及液化问题。地震、机器以及车辆的振动、波浪作用和爆破等动力荷载可能引起地基土特别是饱和无黏性土的液化、失稳和震陷等危害。

当建（构）筑物的天然地基存在以上问题时，则须采取地基处理措施以保证建筑物的安全与正常使用。

地基问题的处理恰当与否，关系到整个工程的质量，因此，其重要性已越来越多地被人们所认识。

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，因土的种类不同而存在很大差别。各种地基土中，不少为软弱土和不良土，主要包括：软黏土、人工填土（包括素填土、杂填土和冲填土）、饱和粉细砂（包括部分轻亚黏土）、湿陷性黄土、有机质土和泥炭土、膨胀土、多年冻土、岩溶和山区地基等。我国的新建设工程越来越多地遇到不良地基，因此地基处理的要求也就越来越迫切和广泛。

0.2 地基处理的对象

上部结构所引起的地基附加应力是随着深度增加而减小的，直至为零。所以，在一定深度内的土层即为结构物的主要受力层，在通常情况下，地基的稳定性与变形主要取决于该深度内土层的力学性能。若该土层的力学性能指标不能满足地基承载力的要求时，就必须对该地基进行处理。需要进行处理的地基一般可分为两大类：不良地基和软弱地基。

0.2.1 不良地基

不良地基主要指性质特殊而又对工程不利的土层所组成的地基，如湿陷性黄土、多年冻土、膨胀土、岩溶等地层。



1. 湿陷性黄土

湿陷性黄土广泛分布在我国西北和华北地区。天然黄土的强度较高，一般能陡立成壁，其承载能力也较高，压缩性比较低，但在上覆土的自重应力作用下，或在上覆土自重应力和附加应力共同作用下，受水浸湿后黄土的结构迅速破坏而发生显著的附加下沉，此类土称为湿陷性黄土。由于黄土湿陷而引起上部结构不均匀沉降是造成黄土地区发生事故的主要原因。当黄土作为建筑地基时，首先要判断黄土是否具有湿陷性，然后才考虑是否需要人工处理，以及如何处理。

2. 膨胀土

膨胀土是一种吸水膨胀、失水收缩，具有较大胀缩变形性能，且变形胀缩反复的高塑性黏土。利用膨胀土作为建筑地基时，如果没有采取必要措施进行人工处理，常会给建筑物造成危害。

3. 红黏土

红黏土是指石灰岩、白云岩等碳酸盐类岩石在亚热带温湿气候条件下经风化作用所形成的褐红色的黏性土。一般来说，红黏土是较好的地基土，但由于下卧岩层面起伏及存在软弱土层，容易引起地基不均匀变形，须引起重视。

4. 冻土

温度连续 3 年或 3 年以上保持在零摄氏度或以下，并含有冰块的土层，称为多年冻土。多年冻土的强度和变形有许多特殊性，例如，冻土中因有冰和未冻水存在，故在长期荷载作用下有强烈的流变性。多年冻土作为建筑物地基需谨慎考虑。

5. 岩溶

岩溶又称“喀斯特”，岩溶是石灰岩、白云岩、泥灰岩、大理石、岩盐、石膏等可溶性岩层受水的化学和机械作用而形成的溶洞、溶沟、裂隙，以及由于溶洞的顶板塌落使地表产生陷穴、洼地等现象和作用的总称。土洞是岩溶地区上覆土层被地下水冲蚀或被地下水溶蚀所形成的洞穴。岩溶和土洞对结构物的影响很大，可能造成地面变形、地基塌陷，发生渗漏和涌水现象。

6. 山区地基

山区地基地质条件比较复杂，主要表现在地基的不均匀性和场地稳定性两个方面。山区基岩表面起伏大，且可能有大块孤石，这些因素常会引起建筑物基础的不均匀沉降。另外，在山区可能有滑坡、崩塌和泥石流等不良地质现象，给结构物造成直接的或潜在的威胁。

0.2.2 软弱地基

软弱地基是指地基的主要受力层由高压缩性的软弱土所组成，这些软弱土一般是指软黏土、杂填土、冲填土等。

1. 软黏土

软黏土是软弱黏性土的简称，它是第四纪后期形成的黏性土沉积物或河流冲积物。这类土的特点是天然含水量高、孔隙比大、抗剪强度低、压缩系数高、渗透系数小。在荷载作用下，软黏土地基承载能力低，地基变形大，而且沉降固结时间较长。在较厚的软黏土层上，基础的沉降往往持续数年乃至数十年之久。



2. 杂填土

杂填土是人类活动所形成的无规则堆积物，其成分复杂、厚度不均，性质也不相同，且无规律性。在大多数情况下，杂填土是比较疏松和不均匀的，在同一场地的不同位置，其地基承载力和压缩性也有较大的差异。杂填土地基一般需要人工处理才能作为建筑物地基。

3. 冲填土

冲填土是由水力冲填形成的。冲填土的性质与所冲填泥砂的来源及淤填时的水力条件有密切关系。含黏土颗粒较多的冲填土往往是欠固结的，其强度和压缩性指标都比同类天然沉积土差。冲填土地基一般要经过人工处理才能作为建筑物地基。

4. 饱和粉细砂

饱和粉细砂地基虽然在静载作用下具有较高的强度，但在振动荷载作用下有可能产生液化或大量震陷变形，地基会因液化而丧失承载能力。如需要考虑动力荷载，这种地基也属于不良地基，需要进行处理。

另外，除了在上述各种软弱和不良地基上建造结构物时需要考虑地基处理外，当旧房改造、加高、工厂设备更新等造成荷载增大，原地基不能满足要求时，或者在开挖深基坑、建造地下铁道等工程中有土体稳定、变形或渗流问题时，也需要进行地基处理。

0.3 地基处理方法的选用原则

1. 选择地基处理方案前应完成的工作

- (1) 搜集详细的岩土工程勘察资料、上部结构及基础设计资料等。
- (2) 根据工程的要求和采用天然地基存在的主要问题，确定地基处理的目的、处理范围和处理后要求达到的各项技术经济指标等。
- (3) 结合工程情况，了解当地地基处理经验和施工条件，对于有特殊要求的工程，尚应了解其他地区相似场地上同类工程的地基处理经验和使用情况等。
- (4) 调查邻近建筑、地下工程和有关管线等情况。
- (5) 了解建筑场地的环境情况。

2. 选择地基处理方案

在选择地基处理方案时，应考虑上部结构、基础和地基的共同作用，并经过技术、经济比较，选用处理地基或加强上部结构 and 处理地基相结合的方案。

地基处理方法的选择一般按下列步骤进行：

- (1) 根据结构类型、荷载大小及使用要求，结合地形地貌、地层结构、土质条件、地下水特征、环境情况和对邻近建筑物的影响等因素进行综合分析，初步选出几种较优的地基处理方案，包括选择两种或多种地基处理措施组成的综合处理方案。
- (2) 对初步选出的各种地基处理方案，分别从加固原理、适用范围、预期处理效果、耗用材料、施工机械、工期要求和对环境的影响等方面进行技术、经济分析和对比，选择最佳的地基处理方案。
- (3) 对已选定的地基处理方案，宜按建筑物地基基础设计等级和场地复杂程度，在有代表性的场地上进行相应的现场试验，并进行必要的测试，以检验设计参数和处理效果。如达不到设计要求时，应修改设计参数或调整地基处理方案。



0.4 地基处理方法综述

当天然地基不能满足建（构）筑物对地基稳定、变形以及渗透方面的要求时，需要对天然地基进行处理。地基处理方法可以按地基处理原理、地基处理的目的、地基处理的性质、地基处理的时效、动机等进行分类。当前已经成熟的地基处理方法很多，新的地基处理方法还在不断发展，要对各种地基处理方法进行精确的分类是很困难的，下面作简要介绍，具体的地基处理方法详见本书其他各模块。

1. 置换法

置换法是用物理力学性能较好的岩土材料置换天然地基中部分或全部软弱土或不良土，形成双层地基或复合地基，以达到提高地基承载力、减少沉降的目的。它主要包括换土垫层法、挤淤置换法、褥垫法、振冲置换法（或称振冲碎石法）、沉管碎石桩法、强夯置换法、砂桩（置换）法、石灰桩法，以及 EPS 超轻质料填土法等。

2. 排水固结法

排水固结法的原理是：软黏土地基在荷载作用下，土中孔隙水慢慢排出，孔隙比减小，地基发生固结变形，同时，随着超静水压力逐渐消散，土的有效应力增大，地基土的强度逐步增大，以达到提高地基承载力，减少工后沉降的目的。它主要包括加载预压法、超载预压法、砂井法（包括普通砂井法、袋装砂井和塑料排水带法）、真空预压与堆载预压联合作用，以及降低地下水位等。

3. 振密、挤密法

振密、挤密法是采用振动或挤密的方法使未饱和土密实，使地基土体孔隙比减小，强度提高，达到提高地基承载力和减小沉降的目的。它主要包括表层原位压实法、强夯法、振冲密实法、挤密砂桩法、爆破挤密法、土桩和灰土桩法。

4. 灌入固化物法

灌入固化物法是指向土体中灌入或拌入水泥、石灰，或其他化学浆材，在地基中形成增强体，以达到地基处理目的。它主要包括深层搅拌法、高压喷射注浆法、渗入性灌浆法、劈裂灌浆法、挤密灌浆法和电动化学灌浆法等。

5. 加筋法

加筋法是指在地基中设置抗拉强度较高的土工聚合物、拉筋、受力杆件等模量大的筋材，以达到提高地基承载力、减少沉降的目的。强度高、弹性模量大的筋材可以是钢筋混凝土，也可以是土工格栅、土工织物等。它主要包括加筋法、土钉墙法、锚固法、树根桩法、低强度混凝土桩复合地基法和钢筋混凝土桩复合地基法等。

6. 冷热处理法

冷热处理法是指通过人工冷却，使地基温度低到孔隙水的冰点以下，使之冻结，从而具有理想的截水性能和较高的承载能力，或者焙烧、加热地基土体，改变土体物理力学性质，以达到地基处理目的，主要包括冻结法和烧结法两种。

7. 托换法

托换法是指需要修建地下工程以及邻近建筑物建造新工程而影响到原有建筑物的安全时，对原有建筑物地基和基础进行处理、加固或改建。它主要包括基础加宽法、墩式托换法、桩式托换法、地基加固法以及综合加固法等。



8. 纠偏法

纠偏法是指对由于沉降不均匀造成倾斜的建筑物进行矫正的手段。主要包括加载纠偏法、掏土纠偏法、顶升纠偏法和综合纠偏法等。

9. 其他方法

(1) 锚杆静压桩法。锚杆静压桩法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。

锚杆静压桩法一般适用于加固处理淤泥质土、黏性土、人工填土和松散粉土。

(2) 延缓固结法。延缓固结法是指对软土进行防渗处理，防止饱和土中的水渗出，延缓地基土的固结，使其沉降量在工程使用期内控制在允许的范围内，以此达到降低工后沉降的目的。

0.5 地基处理方案设计

各种地基处理方法都有它的适用范围、局限性和优缺点，没有一种方法是万能的。在具体的地基处理工程中，情况是非常复杂的，工程地质条件千变万化，具体的处理要求也各不相同，而且各施工单位的设备、技术、材料也不同。所以，对每一项具体地基处理工程要进行具体细致的分析，从地基条件、处理要求（包括经处理后地基应达到的各项指标、处理的范围、工程进度等）、工程费用以及材料、设备等各方面进行综合考虑，以确定合理的地基处理方法。合理的地基处理方法总的原则是技术先进可靠、经济合理、安全适用、确保质量，能满足施工进度要求。对于一个具体工程可以采用一种地基处理方法，也可采用两种或两种以上的地基处理方法。在确定地基处理方法时，还要注意节约能源，并注意环境保护，避免因为地基处理对地面水或地下水产生污染以及设备噪音对周围环境产生不良影响等。要因地制宜确定合适的地基处理方法，在引用外地或外单位某一方法时应该克服盲目性，注意地区特点。因地制宜是一项重要的选用原则。当天然地基不能满足建（构）筑物对地基要求时，不能只考虑加固地基，同时应考虑上部结构体型是否合理，整体刚度是否满足要求等。在考虑地基处理方案时，应同时参考上部结构、基础和地基的共同作用，决定选用地基处理方案或选用加强上部结构刚度和地基处理相结合的方案。

初步确定地基处理方案后，可视需要进行小型现场试验或进行补充调查，根据试验成果进行施工设计，然后进行施工。施工过程中通过监测、检验以及反分析，如需要还可对设计进行修改、补充。实践证明，这是比较好的地基处理程序。

这里强调的是要重视对天然地基工程地质条件的详细了解，许多由地基问题造成的工程事故，或地基处理达不到预期目的，往往是由于对工程地质条件了解不够全面造成的。详细的工程地质勘察是判断天然地基能否满足建（构）筑物对地基要求的重要依据之一。如果需要进行地基处理，详细的工程地质勘察资料也是确定合理的地基处理方法的主要资料之一。通过工程地质勘察，调查建筑物场地的地形地貌，查明地质条件，包括岩土的性质、成因、类型、地质年代、厚度和分布范围。对地基中是否存在明浜、暗浜、古河道、古井、古墓要了解清楚。对于岩层，还应查明风化程度及地层的接触关系，调查天然地层的地质构造，查明水文及工程地质条件，确定有无不良地质现象，如滑坡、崩塌、岩溶、土洞、冲沟、泥石流、岸边冲刷及地震等。测定地基土的物理力学性质指标，包括：天然重度、相对密度、颗粒分析、塑性指数、渗透系数、压缩系数、压缩模量、抗剪强度等。



最后，按照要求，对场地的稳定性和适宜性，地基的均匀性、承载力和变形特征等进行评价。

地基处理的设计顺序建议按如图 0-1 所示的进行。首先根据建（构）筑物对地基的各种要求和天然地基条件确定地基是否需要加固。若天然地基能够满足要求，尽量采用天然地基。在确定是否需要进行地基处理时，应将上部结构、基础和地基统一考虑。若天然地基不能满足建（构）筑物对地基要求，首先需要确定进行地基处理的天然地层的范围以及地基处理要求，然后根据天然地层条件、地基处理方法的原理、过去应用的经验和机具设备、材料条件，进行地基处理方案的可行性研究，提出多种可行方案，最后，对提出的多种方案进行技术、经济、进度等方面的比较分析，考虑环境保护要求，确定采用一种或几种地基处理方法，最后选出最优方案。

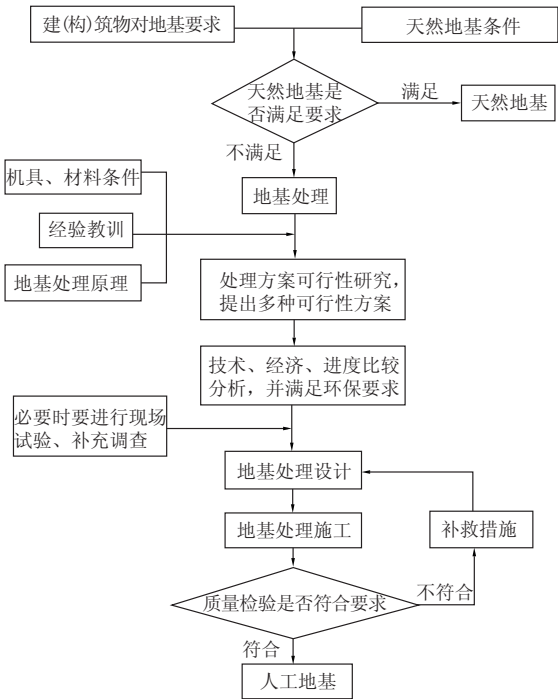


图 0-1 地基处理方法设计顺序

0.6 地基处理技术的发展情况

地基处理技术发展十分迅速，传统方法得到改进，新的技术不断涌现。如在 20 世纪 60 年代中期，从如何提高土的抗拉强度这一思路中，提出了土的“加筋法”；从如何提高土的排水固结这一观点出发，提出了土工聚合物、砂井预压和塑料排水带；从如何进行深层密实处理方法考虑，采用了加大击实功的“强夯法”和“振动水冲法”，等等。随着制造业的发展，给地基处理工程提供了先进的生产手段，如制造重达几千吨的专用起吊机械；潜水电机的出现，带来了振动水冲法；真空泵的问世，建立了真空预压法；生产了大于 20 MPa 的压缩空气机，从而产生了“高压喷射法”。为了适应工程建设的需要，地基处理技术在我国得到了飞速发展。



1.施工机械方面

近几年来,为了满足日益发展的地基处理工程的需要,地基处理机械发展很快。例如,深层搅拌机型号增加,除几年前生产的单轴深层搅拌机和固定双轴搅拌机、浆液喷射和粉体喷射深层搅拌机外,近年来研制成功可变距双轴深层搅拌机和可同时适用浆液喷射和粉体喷射的深层搅拌机,搅拌深度和成桩直径也在扩大,海上深层搅拌机也已投入使用。我国深层搅拌机拥有量近年来大幅度增加。高压喷射注浆机械发展很快,出现了不少新的高压喷射设备,如井口传动由液压代替机械,改进了气、水、浆液的输送装置,提高了喷射压力,增加了对地层的冲切搅拌能力。水平旋喷机械的成功应用,使高压喷射注浆法进一步扩大了应用范围。应用于排水固结法的塑料排水带插带机的出现,大大提高了工作效率。振冲器的生产也走向系列化、标准化。为了克服振冲过程中排放泥浆污染现场,干法振动成孔器研制成功,使干法振动碎石桩技术得到应用。地基处理机械的发展又反过来推动了地基处理能力的提高。

2.地基处理材料方面

地基处理材料的发展也促进了地基处理技术水平的提高。新材料的应用,不仅使一些原有的地基处理方法能力提高,而且又产生了一些新的方法。如土工合成加筋材料的发展促进了加筋土法的发展;轻质土工合成材料 EPS 作为填土材料形成 EPS 超轻质料填土法;塑料排水带的应用提高了排水固结法施工质量和工效,且便于施工管理。灌浆材料如超细水泥、粉煤灰水泥浆材、硅粉水泥浆材等水泥系浆材和化学浆材在品种、质量上发展都很快,灌浆材料的发展有效地扩大了灌浆法的应用范围,满足了工程需要。并且近年来还将工业废料作为地基处理材料进行利用,如粉煤灰垫层、粉煤灰石灰二灰桩复合地基、钢渣桩复合地基、渣土桩复合地基、二灰混凝土桩复合地基等的应用。

3.理论计算方面

地基处理技术的发展同时也促进了地基处理理论计算的发展。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,复合地基在土木工程中得到愈来愈多的应用,复合地基理论得到发展,逐步形成复合地基承载力和沉降计算理论。除复合地基理论外,在强夯法加固地基的机理、强夯法加固深度、砂井法非理想井计算理论、真空预压法计算理论方面都有不少新的研究成果。地基处理理论的发展又反过来推动地基处理技术新的进步。到现在为止,《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)上所列的十多种地基处理方式,不管是实践方面还是理论计算方面都已比较成熟。

4.施工工艺方面

各项地基处理方法的施工工艺近年来也得到不断改善和提高,不仅有效地保证和提高施工质量,提高了工效,而且扩大了应用范围。例如真空预压法施工工艺的改进使这项技术应用得到推广;高压喷射注浆法施工工艺的改进使之可用于第四纪冲积层的防渗;石灰桩施工工艺改进使石灰桩法走向成熟;边填碎石边强夯施工工艺扩大了强夯法的应用范围。

5.检验与监测方面

地基处理的检验与监测日益得到人们重视。在地基处理施工过程中和施工后进行检验与监测,用以指导施工、检查处理效果、检验设计参数。随着计算机的发展和检测仪器的研发,检测手段愈来愈多,检测精度也日益提高。地基处理逐步实现信息化施工,有效地保证了施工质量,取得了较好的社会效益和经济效益。



6.新的地基处理技术研发

近年来,各地因地制宜发展了许多新的地基处理方法。

(1) 在传统地基处理方式基础上研发的新技术。例如:将强夯法用于处理较软弱土层,边填边夯形成强夯碎石墩或桩复合地基以提高地基承载力、减少沉降;采用沉管法在软土地基中设置由碎石、粉煤灰、水泥或由砂石、水泥搅拌形成的低强度混凝土桩,与桩间土形成复合地基;疏桩基础,或称钢筋混凝土桩复合地基也可较好地发挥桩间土的效用,减少用桩数量,取得较好的经济效益。

(2) 多种地基处理方法的综合应用。例如:真空预压法和堆载预压法的综合应用可以克服真空预压法预压荷载小于 80 kPa 的缺点,扩大了该方法的应用范围;真空预压法与高压喷射注浆法结合可应用于水平渗透性较大的土层;高压喷射注浆法与灌浆法相结合可提高纠偏加固效果;锚杆静压法与掏土法结合,锚杆静压法与顶升法结合使纠偏加固技术提高到一个新的水平。重视多种地基处理方法的综合应用可取得较好的社会、经济效益。

(3) 针对特厚软土地区传统的地基处理方法效果差和费用高的缺陷,现在又提出了新的研究课题:地基延缓固结处理法和地基孔隙压力调节处理法。新的地基处理方法的不断发展提高了地基处理技术的整体水平和能力。

近些年来,我国的建筑行业十分繁荣,大量的房屋、道路、堤坝、堆场、水利水电、港口码头等工程不断开工建设,同时复杂的工程地质情况,以及现代土木工程对地基日益严格的要求,给我们提出了一个又一个新的难题,在解决这些难题的过程中又促进地基处理新技术的更快发展。



思考题

- 0.1 一般建筑物地基所面临的问题有哪些?
- 0.2 试述地基处理的目的是其方法的分类。
- 0.3 选用地基处理方法时应遵循什么原则?
- 0.4 针对湿陷性黄土地基可采用哪几种地基处理方法?
- 0.5 对防止地基液化,一般可采用哪几种地基处理方法?
- 0.6 如何确定地基处理方案步骤?
- 0.7 如何对地基进行效果检验?为什么地基处理必须检验?
- 0.8 试述地基处理的监测和监测的重要性。
- 0.9 简述地基处理技术的发展。

模块 1

换 填 法



学习能力要求

学习能力要求

- ◆ (1) 了解换填法的基本原理及适用范围。
- ◆ (2) 掌握换填法垫层厚度、宽度的确定方法，并能够进行承载力和沉降量的验算，能够进行砂石、粉煤灰、矿渣、土（灰土）等垫层的设计、施工与施工质量控制，并进行质量检测。

1.1 概述

换填法是针对浅层软弱土地基及不均匀地基采用的一种处理方法。当软弱土地基的承载力或变形满足不了建筑物的要求，而软弱土层的厚度又不太大时，可将基础底面下的软弱土层挖至一定深度，然后分层换填抗剪强度较高、压缩性较小的岩土材料，如砂、碎石、卵石、素土、灰土、粉煤灰、矿渣等，并压（夯、振）实至要求的密实度为止，形成双层地基，这种地基处理方法称为换填法，换填法还包括低洼地域筑高（平整场地）或堆填筑高（道路路基）。

换填法可提高持力层的承载力，减少沉降量，全部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、平板振动和重锤进行施工。

采用换填法进行地基处理时，应根据建筑体型结构特点、荷载性质、岩土工程条件、施工机械设备及填料性质和来源等进行综合分析，合理进行换填垫层设计和施工方法的选择。

1.2 换填法的原理与适用范围

换填法就是将基础底面以下不太深的一定范围内的软弱土层挖去，然后以质地坚硬、强度较高、性能稳定，具有抗侵蚀性的砂、碎石、卵石、素土、灰土、粉煤灰、矿渣等材料以及土工合成材料分层充填，同时以人工或机械方法分层压、夯、振动，使之达到要求的密实度，成为良好的人工地基。当地基软弱土层较薄，而且上部荷载不大时，也可直接以人工或机械方法（填料或不填料）进行表层压、夯、振动等密实处理，同样可取得换填加固地基的效果。

经过换填法处理的人工地基或垫层，可以把上部荷载扩散传至下面的下卧层，以满足上部建筑所需的地基承载力和减少沉降量的要求。当垫层下面有较软土层时，也可以加速软弱土层的排水固结和强度的提高。

换填法适用于浅层地基处理，包括淤泥、淤泥质土、松散素填土、杂填土、已完成自重固结的冲填土等地基处理，以及暗塘、暗浜、暗沟等浅层处理和低洼区域的填筑。换填法还适用于一些地域性特殊土的处理：用于膨胀土地基可消除地基土的胀缩作用；



用于湿陷性黄土地基可消除黄土的湿陷性；用于山区地基可处理岩面倾斜、破碎、高低差、软硬不均以及岩溶与土洞等；用于季节性冻土地基可消除冻胀力和防止冻胀损坏等。

当采用换填法进行地基处理时，应根据建筑体型、结构特点、荷载性质和量级、场地工程地质资料及环境条件并结合施工机械设备与当地材料来源等进行综合分析，进行换填设计，合理选择换填材料和相应的施工方法。

1.3 换填法的设计与计算

垫层设计应满足建筑地基的承载力、变形及稳定的需求。垫层设计的主要内容是确定垫层的合理厚度和密度。垫层应有足够的厚度，又要求有足够的宽度以防止向两侧挤出。

1.3.1 垫层厚度的确定

垫层断面土示意如图 1-1 所示。

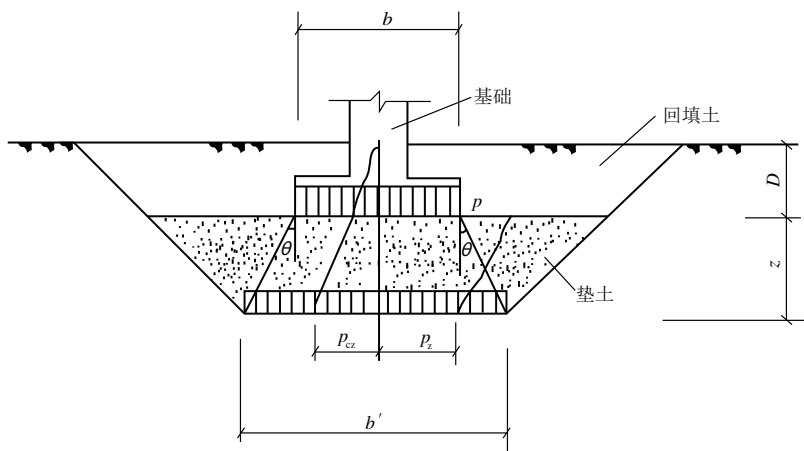


图 1-1 垫层断面土

首先垫层的厚度应达到能够置换基础下可能被剪切破坏的软弱土层；其次，荷载通过垫层的应力扩散，使下卧层顶面受到的压力小于或等于下卧层承载能力，计算公式为

$$p_z + p_{cz} \leq f_{az} \quad (1-1)$$

式中， p_z ——相应于荷载效应标准组合时，垫层底面处的附加压力值（kPa）；

p_{cz} ——垫层底面处土的自重压力值（kPa）；

f_{az} ——垫层底面处经深度修正后的地基承载力特征值（kPa）。

计算时，首先应根据垫层的承载力确定基础的宽度和基底压力，再根据下卧层的承载力，设计垫层的厚度，按式（1-1）进行验算。若不满足要求，重新设一个厚度值，再验算，直至满足要求为止。垫层厚度一般宜为 0.5~3 m。

垫层底面处的附加压力值 p_z ，根据基础形式不同分别按式（1-2a）和式（1-2b）计算。

条形基础：

$$p_z = \frac{(p_k - p_c) b}{b + 2z \tan \theta} \quad (1-2a)$$



矩形基础：

$$p_z = \frac{bl(p_k - p_c)}{(b + 2z \tan \theta)(1 + 2z \tan \theta)} \quad (1-2b)$$

式中 b ——矩形基础或条形基础底面的宽度 (m)；

l ——矩形基础底面的长度 (m)；

p_k ——相应于荷载效应标准组合时，基础底面处的平均压力值 (kPa)；

p_c ——基础底面处土的自重应力标准值 (kPa)；

z ——基础底面下垫层的厚度 (m)；

θ ——垫层的压力扩散角 ($^\circ$)，取值如表 1-1 所示。

表 1-1 垫层压力扩散角 θ

换填材料 z/b	中砂、粗砂、砾砂、圆砾、角砾、卵石、碎石、石屑、矿渣	粉质黏土、粉煤灰	灰 土
0.25	20 $^\circ$	6 $^\circ$	28 $^\circ$
≥ 0.50	30 $^\circ$	23 $^\circ$	

注：①当 $z/b < 0.25$ 时，除灰土仍取 $\theta = 28^\circ$ 外，其余材料均取 $\theta = 0^\circ$ 。必要时，宜由实验确定。

②当 $0.25 < z/b < 0.50$ 时， θ 值可由内插法求得。

③土工合成材料加筋垫层其压力扩散角宜由现场静载荷试验确定。

1.3.2 垫层宽度的确定

垫层应有足够的宽度以防止材料向侧边挤出而增大垫层的竖向变形量，其宽度应满足基础底面应力扩散的要求，按下式确定：

$$b' \geq b + 2z \tan \theta \quad (1-3)$$

式中， b' ——垫层底面宽度 (m)；

θ ——垫层压力扩散角，可按表 1-1 取值，当 $z/b < 0.25$ 时，仍按表 1-1 中 $z/b = 0.25$ 取值。

当基础荷载较大，或对沉降要求较高，或垫层侧边土的承载力较差时，垫层底面的宽度可适当加宽。

垫层顶面宽度可从垫层底面两侧向上，按基坑开挖期间保持边坡稳定的当地经验放坡确定。垫层顶面每边超出基础底边不宜小于 300 mm。

1.3.3 垫层承载力的确定

经换填处理后的地基，由于理论计算方法尚不够完善，难以通过计算准确确定地基承载力。因此，有关规范规定宜通过现场荷载试验确定，亦可通过取土分析、标准贯入试验、动力触探试验等方法综合分析确定。对于《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011) 划分安全等级为三级的建筑物及一般不太重要的及小型、轻型或对沉降要求不高的工程，在无试验资料或经验数据时，当施工达到本规范要求的压实标准后，可以按表 1-2 所列的承载力特征值选用。



表 1-2 各种垫层的承载力特征值

换填材料类别	承载力标准值/kPa
碎石、卵石	200~300
砂夹石（其中碎石、卵石占全重的 30% ~50%）	200~250
土夹石（其中碎石、卵石占全重的 30%~50%）	150~200
中砂、粗砂、砾砂	150~200
粉质黏土	130~180
石屑	120~150
灰土	200~250
粉煤灰	120~150
矿渣	200~300

注：压实系数小的垫层，承载力标准值取低值，反之取高值。

1.3.4 沉降计算

采用换填垫层进行局部处理后，往往由于软弱下卧层的变形，建筑物地基仍将产生过大的沉降量及差异沉降量。为保证地基处理效果及建筑物的安全使用，需对建筑物进行沉降计算。

垫层地基的变形由垫层自身变形和下卧层变形组成，计算公式为

$$S=S_1+S_2 \tag{1-4}$$

式中，S——地基计算的最终总沉降（mm）；

S_1 ——垫层自身沉降量（mm）；

S_2 ——垫层下计算深度范围内的沉降量（mm）。

对于碎石、卵石、砂夹石、砂和矿渣等粗粒换填材料的垫层，在施工期间垫层自身的压缩变形已基本完成，且量值很小，在地基变形计算中，可以忽略垫层自身部分的变形值；但对于细粒材料的垫层尤其是厚度较大的换填垫层，以及对沉降要求严格的建筑，则应计入垫层自身的变形。

有关垫层的模量应根据试验或当地经验确定。在无试验资料或经验时，可参照表 1-3 选用。

表 1-3 垫层模量（MPa）

模量 垫层材料	压缩模量 E_s	变形模量 E_0
粉煤灰	8~20	
砂	20~30	
碎石、卵石	30~50	
矿渣		35~70

注：压实矿渣的 E_0/E_s 比值可按 1.5~3.0 取用。

垫层下卧层的沉降可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》（GB 50007—2011）有关规定计算。

下卧层顶面承受换填材料本身的压力超过原天然土层压力较多的工程，地基下卧层将产生较大的变形。如工程条件许可，宜尽早换填，以便由此引起的大部分地基变形在上部



结构施工之前完成。

1.3.5 例题

【例题 1】

某独立基础尺寸为 $1.5\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ ，基底埋深为 1.0 m ，荷载效应标准组合时，上部结构传至基础顶面的荷载为 252 kN ，其他资料如图 1-2 所示，现拟采用 1.0 m 厚的灰土垫层进行处理，灰土重度为 19.3 kN/m^3 ，试进行地基承载力验算，并确定垫层底面尺寸。

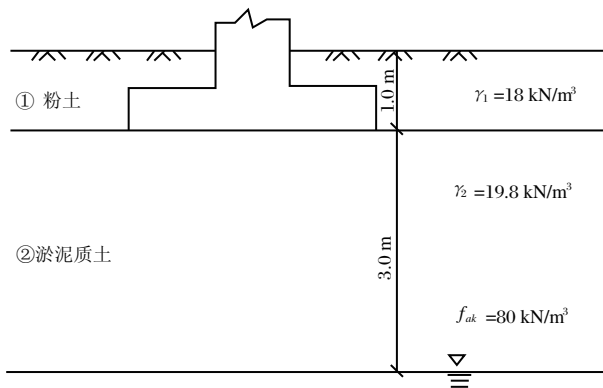


图 1-2 资料

【解】

① 垫层底面处 (2.0 m) 自重应力

$$p_{cz} = \sum \gamma_i h_i = 18 \times 1 + 19.8 \times 1 = 37.8\text{ kPa}$$

② 基础底面处的自重应力

$$p_c = \sum \gamma_i h_i = 18 \times 1 = 18\text{ kPa}$$

荷载效应标准组合时，基础底面处的平均压力

$$p_k = \frac{F}{A} + \gamma'_{cd} = \frac{252}{1.5 \times 1.2} + 20 \times 1 = 160\text{ kPa}$$

灰土垫层厚度 z 为 1.0 m ，基础宽度 $b = 1.2\text{ m}$ ， $z/b = \frac{1}{1.2} = 0.83 > 0.5$ ，取压力扩散角 $\theta = 28^\circ$ 。

垫层底面处的附加应力

$$\begin{aligned} p_z &= \frac{bl(p_k - p_c)}{(b + 2z \tan \theta)(l + 2z \tan \theta)} \\ &= \frac{1.2 \times 1.5 \times (160 - 18)}{(1.2 + 2 \times 1 \times \tan 28^\circ) \times (1.5 + 2 \times 1 \times \tan 28^\circ)} = 44.1\text{ kPa} \end{aligned}$$

③ 垫层底面处经深度修正后的地基承载力特征值

根据规范，取 $\eta_b = 0$ ， $\eta_d = 1.0$

$$\begin{aligned} f_{az} &= f_{ak} + \eta_b \gamma (b - 3) + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) \\ &= 80 + 0 + 1 \times \frac{18 + 19.8}{2} \times (2 - 0.5) \\ &= 108.35\text{ kPa} \end{aligned}$$



④下卧层承载力验算

$$p_z + p_{cz} = 44.1 + 37.8 = 81.9 \text{ kPa} < f_{az}$$

因此,下卧层承载力满足要求。

⑤垫层底面宽度

$$b' = b + 2z \tan \theta = 1.2 + 2 \times 1 \times \tan 28^\circ = 2.263 \text{ m} \approx 2.3 \text{ m}$$

垫层底面长度

$$l' \geq l + 2z \tan \theta = 1.5 + 2 \times 1 \times \tan 28^\circ = 2.563 \text{ m} \approx 2.6 \text{ m}$$

垫层底面尺寸可取 $2.6 \text{ m} \times 2.3 \text{ m}$ 。

【例题解析】

①确定垫层厚度 z 时可分两种情况: a.当软弱层厚度较小时,应全部换垫, z 应取基础底面至软弱土层底面的深度; b.当软弱下卧层较厚时,应根据 $p_z + p_{cz} \leq f_{az}$ 的原则确定 z 。一般情况下, z 不宜小于 0.5 m , 也不宜大于 3.0 m 。

②计算垫层底面处的附加应力时,采用应力扩散法计算,对条形基础,只考虑宽度方向的应力扩散,扩散后的应力分布宽度为 $b + 2z \tan \theta$; 对于矩形基础,在长度及宽度两个方向的应力扩散均应考虑,扩散后的应力分布面积为 $(b + 2z \tan \theta)(l + 2z \tan \theta)$ 。

③附加应力在垫层中的扩散角与垫层材料的性质及垫层厚度 z 与基础短边宽度 b 的比值有关。a.当 $z/b < 0.25$ 时,除灰土 $\theta = 28^\circ$ 外,其余材料均取 $\theta = 0^\circ$ (必要时由试验确定); b.当 $z/b > 0.5$ 时, θ 按 $z/b = 0.5$ 取值; c.当 $0.25 < z/b < 0.5$ 时, θ 值可按线性内插法取值。

④垫层底面宽度 b' 应满足基础底面应力扩散的要求, $b' \geq b + 2z \tan \theta$ 。

⑤当垫层标高超出原地面,或垫层材料的重度高于天然土层重度时,应考虑其附加荷载的影响。

【例题 2】

某匀质粉土地场,土层重度 $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$,承载力特征值 $f_{ak} = 110 \text{ kPa}$,地下水位 5.0 m ,场地中有一建筑物采用条形基础,底面宽度为 2.0 m ,埋深 1.5 m ,荷载为 400 kN/m ,采用矿渣垫层处理地基,垫层厚度为 2.0 m ,垫层材料重度为 20 kN/m^3 ,试进行地基强度验算,并确定垫层底面宽度。

【解】

①垫层底面处自重应力

$$p_{cz} = \sum \gamma_i h_i = 18 \times (1.5 + 2) = 63 \text{ kPa}$$

②基础底面处的自重应力

$$p_c = \sum \gamma_i h_i = 18 \times 1.5 = 27 \text{ kPa}$$

基础底面处的平均压力 p_k

$$p_k = \frac{F + G}{A} = \frac{400 \times 1 + 2 \times 1 \times 1.5 \times 20}{2 \times 1} = 230 \text{ kPa}$$

基底平均附加应力

$$p_0 = p_k - p_c = 230 - 27 = 203 \text{ kPa}$$

③矿渣垫层, $z/b = \frac{2}{2} = 1.0 > 0.5$, 取 $\theta = 30^\circ$ 。

由基底附加应力引起的垫层底面处附加应力



$$p'_z = \frac{b(p_k - p_c)}{b + 2z \tan \theta} = \frac{2 \times (230 - 27)}{2 + 2 \times 2 \times \tan 30^\circ} = 94.2 \text{ kPa}$$

由于换填垫层材料的重度大于地基土的重度而引起的垫层底面的附加应力

$$p''_z = (\gamma_{\text{垫}} - \gamma_{\text{土}})z = (20 - 18) \times 2 = 4 \text{ kPa}$$

垫层底面处附加应力值

$$p_z = p'_z + p''_z = 94.2 + 4 = 98.2 \text{ kPa}$$

④垫层底面处经深度修正后的地基承载力特征值

$$\begin{aligned} f_{az} &= f_{ak} + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) \\ &= 110 + 1 \times 18 \times (3.5 - 0.5) = 164 \text{ kPa} \end{aligned}$$

⑤下卧层承载力验算

$$p_z + p_{cz} = 98.2 + 63 = 161.2 \text{ kPa} < f_{az}$$

因此，下卧层承载力满足要求。

⑥垫层底面宽度计算

$$b' = b + 2z \tan \theta = 2 + 2 \times 2 \times \tan 30^\circ = 4.31 \text{ m}$$

【例题解析】

①该例题中垫层重度高于地基土重度，计算垫层底面处附加应力时应考虑其影响，另外，如果垫层标高超出原地面，亦应考虑其附加荷载的影响。

②大面积压实填土地基，基础宽度的地基承载力修正系数应取零；基础埋深的地基承载力修正系数，对于压实系数大于 0.95、黏粒含量 $\rho_c \geq 10\%$ 的粉土，可取 1.5，对于干密度大于 2.1 t/m^3 的级配砂石可取 2.0。

③其他处理地基，基础宽度的地基承载力修正系数应取零，基础埋深的地基承载力修正系数应取 1.0。

1.4 垫层的施工

1.4.1 砂、砂石垫层的施工

砂和砂石垫层，适用于除湿陷性黄土地基以外的各类软弱土地基的换填处理。

1. 对材料的要求

砂、砂石垫层的材料，宜采用级配良好，质地坚硬的粒料，其颗粒的不均匀系数最好不能小于 10，以中、粗砂为好，可掺入一定数量的碎（卵）石，但要分布均匀。细砂也可作为垫层材料，但不易压实，而且强度也不高，使用时也宜掺入不少于总质量 30% 的碎（卵）石。砂垫层的用料要求虽然不是很严格，但含泥量不应超过 5%，也不得含有草根、垃圾等有机杂物。如用作排水固结地基的砂石材料，含泥量不宜超过 3%，并且不应夹有过大的石块或碎石，因为碎石过大会导致垫层本身的不均匀压缩，一般要求碎（卵）石最大粒径不宜大于 50 mm。

2. 施工要点

(1) 砂垫层施工中的关键是将垫层加密到设计要求的密实度。加密的方法常用的有振动法（包括平振、插振、夯实）、水撼法、碾压法等。这些方法要求在基坑内分层铺砂，然后逐层振密或压实，分层的厚度视振动力的大小而定，一般为 15~20 cm。施工时下层的密实度经检验合格后，方可进行上层施工。



(2) 铺筑前, 应先行验槽。浮土应清除, 边坡必须稳定, 防止塌土。基坑(槽)两侧附近如有低于地基的孔洞、沟、井和墓穴等, 应在未做垫层前加以填实。

(3) 开挖基坑铺设砂垫层时, 必须避免扰动软弱土层的表面, 否则坑底土的结构在施工时遭到破坏后, 其强度就会显著降低, 以致在建筑物荷载的作用下, 将产生很大的附加沉降。因此, 基坑开挖后应及时回填, 不应暴露过久或浸水, 并防止践踏坑底。

(4) 砂、砂石垫层底面应铺设在同一标高上, 如深度不同时, 基坑地基土面应挖成踏步或斜坡搭接, 各分层搭接位置应错开 0.5~1.0 m 距离, 搭接处应注意捣实, 施工应按先深后浅的顺序进行。

(5) 人工级配的砂石垫层, 应将砂石拌和均匀后, 再进行铺填捣实。

(6) 捣实砂石垫层时, 应注意不要破坏基坑底面和侧面土的强度。因此, 对基坑下灵敏度大的地基土, 在垫层最下面宜先铺设一层 15~20 cm 的松砂, 只用木夯夯实, 不得使用振动器, 以免破坏基底土的结构。

(7) 采用细砂作为垫层的填料时, 应注意地下水的影响, 且不宜使用平振法、插振法和水撼法。

(8) 水撼法施工时, 在基槽两侧设置样桩, 控制铺砂厚度, 每层为 25 cm。铺砂后, 灌水与砂面齐平, 然后用钢叉插入砂中摇撼十几次, 如砂已沉实, 便将钢叉拔出, 在相距 10 cm 处重新插入摇撼, 直至这一层全部结束, 经验查合格后铺第二层(不合格时需再插撼)。每铺一层, 灌水一次进行摇撼, 直至达到设计标高为止。

1.4.2 灰土垫层的施工

灰土是一种传统的建筑用料。用灰土作为垫层, 在我国已有千余年历史, 全国各地都积累了丰富的经验。灰土垫层是将基础底面下一定范围内的软弱土层挖去, 用按一定体积比配合的灰土在最优含水量情况下分层回填夯实或压实。适用于处理 1~4 m 厚的软弱土层。

1. 灰土垫层的材料

(1) 石灰。石灰是一种无机(矿物的)胶结材料, 石灰不但能在空气中硬化, 而且还能更好地在水中硬化。

在施工现场用作灰土垫层的熟石灰应予过筛, 其粒径不得大于 5 mm。熟石灰中不得夹有未熟化的生石灰块, 也不得含有过多的水分。

石灰的性质决定于其活性物质的含量, 即 CaO 与 MgO 的含量百分率, 其含量越高, 则活性越大, 胶结力越强。一般常用的熟石灰粉末应符合“Ⅲ”级以上的标准, 活性 $\text{CaO} + \text{MgO}$ 含量不低于 50%, 如要拌制强度较高的灰土, 宜选用Ⅰ级或Ⅱ级石灰。当活性氧化物含量不高时, 应相应增加石灰的用量。石灰的贮存时间不宜超过三个月, 长期存放将会使其活性降低。

(2) 土料。灰土中的土不仅作为填料, 而且参与化学作用, 尤其是土中的黏粒($<0.005 \text{ mm}$)或胶粒($<0.002 \text{ mm}$)具有一定活性和胶结性, 其含量越多(即土的塑性指数越高), 则灰土的强度也越高。

在施工现场常采用就地基坑(槽)中挖出的黏性土(塑性指数大于 4 的)拌制灰土。淤泥、耕土、冻土、膨胀土以及有机物含量超过 8% 的土料, 都不得使用。土料应过筛, 其粒径不得大于 15 mm。

(3) 石灰用量对灰土强度的影响。灰土中石灰的用量在一定范围内, 其强度随用灰量



的增大而提高,但当超过一定限值后,则强度增加很小,并有逐渐减小的趋势。如 1 : 9 的灰土,强度很低,只能改善土的压实性能; 2 : 8 和 3 : 7 的灰土,一般为最佳含灰率,但与石灰的等级有关,通常应以 $\text{CaO}+\text{MgO}$ 所含总量达到 8% 左右为佳。

石灰应以生石灰块消解(闷透) 3~4 d 后过筛使用。

(4) 采用石灰、粉煤灰按适当比例加水拌和,分层夯实的垫层,称“二灰垫层”。它和灰土垫层相似,但强度较灰土垫层高,最优含水量较灰土大,干土重度较灰土小。压实系数为 0.94~0.97 时,干土重度为 9.4~9.7 kN/m^3 ,施工最优含水量为 50% 左右,石灰掺入量以 15%~20% 为宜。

2. 灰土垫层施工要点

(1) 灰土垫层施工前必须验槽,如发现坑(槽)内有局部软弱土层或孔穴,应挖出后用素土或灰土分层填实。

(2) 施工时,应将灰土拌和均匀,控制含水量,如土料水分过多或不足时,应晾干或洒水润湿,一般可按经验在现场直接判断,其方法为手握灰土成团,两指轻捏即碎。这时,灰土基本上接近最优含水量。

(3) 分段施工时,不得在墙角、柱基及承重窗间墙下接缝。上下两层灰土的接缝距离不得小于 500 mm。接缝处的灰土应夯实。

(4) 掌握分层虚铺厚度,必须按所使用夯实机具来确定,如表 1-4 所示。每层灰土的夯打遍数应根据设计要求的干土重度在现场试验确定。

表 1-4 灰土最大虚铺厚度

夯实机具种类	质量/t	虚铺厚度/mm	备注
石夯、木夯	0.04~0.08	200~250	人力送夯、落距 400~500 mm、一夯压半夯
轻型击实机械	—	200~250	蛙式打夯机、柴油打夯机
压路机	6~10	200~300	双轮

(5) 在地下水位以下的基坑(槽)内施工时,应采取排水措施。夯实后的灰土在 3 d 内不得受水浸泡。

(6) 灰土垫层筑完后,应及时修建基础和回填基坑,或做临时遮盖,防止日晒雨淋。刚筑完毕或尚未夯实的灰土如遭受雨淋浸泡,则应将积水及松软灰土除去并补填夯实,受浸湿的灰土,应在晾干后再夯打密实。

1.4.3 碎石和矿渣垫层的施工

采用碎石或矿渣作垫层来处理软弱地基是目前国内常用的一种地基加固方法。实践证明,碎石和矿渣有足够的强度,变形模量大,稳定性好;而且垫层本身还可以起排水层的作用,并加速下部软弱土层的固结。垫层使用的矿渣是指高炉重矿渣,可分为分级矿渣、混合矿渣及原状矿渣。矿渣垫层主要用于堆场、道路和地坪,也可用于小型建筑、构筑物地基。

1. 对材料及垫层构造的要求

碎石垫层用的碎石粒径,一般为 5~40 mm 的自然级配碎石,含泥量不大于 5%。矿渣垫层选用矿渣的松散重度不小于 11 kN/m^3 ,有机质及含泥总量不超过 5%。当大面积铺填时,多采用高炉混合渣(即破碎后不经筛分的不分级矿渣),粒径最大不超过 200 mm;小面积垫层用粒径 20~60 mm 的分级渣。在碎石和矿渣垫层的底部,为防止基坑表层软弱土



发生局部破坏而使建筑物基础产生附加沉降，一般应设置一层 15~30 mm 厚的砂垫层，砂料应采用中、粗砂，然后再铺筑碎石或矿渣垫层，如图 1-3 (a) 所示。当软弱土层厚度不同时，垫层应做成阶梯形，如图 1-3 (b) 所示，但两层垫层的高差不得大于 1 m，同时阶梯需符合 $b > 2h$ 的要求。

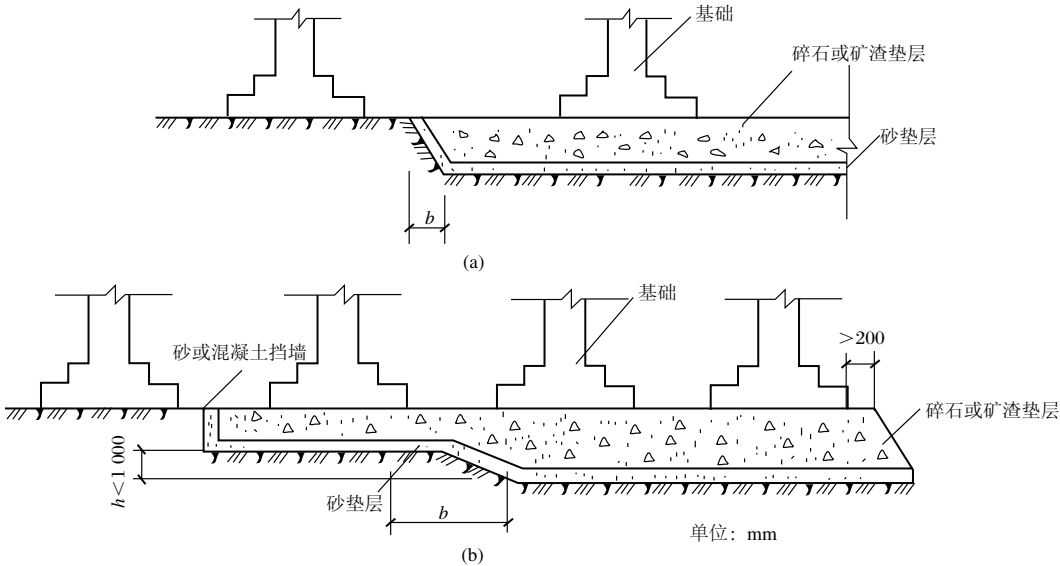


图 1-3 碎石或矿渣垫层

(a) 碎石或矿渣垫层 (b) 阶梯式碎石或矿渣垫层

当采用矿渣垫层时，需要特别指出的是设计、施工前必须对选用的矿渣化学成分、物理力学性质进行试验，在确认其性能稳定并符合安全规定后方可使用。作为建筑物垫层的矿渣应符合对放射性安全标准的要求。易受酸、碱影响的基础或地下管网不得采用矿渣垫层。大量填筑矿渣时，应考虑对地下水和土壤的环境影响。

在有可靠试验结果或成功工程经验时，对质地坚硬、性能稳定、无腐蚀性和放射性危害的工业废渣等均可用于填筑换填垫层。被选用工业废渣的粒径、级配和施工工艺等应通过试验确定。

2. 施工要点

碎石或矿渣垫层施工，一般是将软弱土层挖至需要深度，先作砂垫层，用平板式振捣器振实，然后再将碎石或矿渣分层铺设和压实。压实方法可用碾压法或平振法。碾压法系采用重 6~10 t 压路机或拖拉机牵引重 50 kN 平碾分层碾压。每层铺设厚度为 30 cm，用人工或推土机推平后，往返碾压 4 遍以上。每次碾压均与前次碾压轮迹宽度重合一半。碾压时宜浇水湿润以利于密实。平振法适用于小面积的施工，系用功率大于 1.5 kW，频率为 2 000 r/min 以上的平板式振捣器往复振捣，每次铺设厚度为 20~25 cm，振捣时间不少于 60 s，振捣遍数由试验确定，一般振捣 3~4 遍，做到交叉、错开、重叠。施工时，按铺设面积大小，以总的振捣时间来控制碎石或矿渣分层捣实的质量。

1.4.4 粉煤灰垫层的施工

粉煤灰垫层可用于道路、堆场和小型建筑、构筑物等的换填垫层。

(1) 粉煤灰垫层可采用分层压实法，压实可采用平板振动器、蛙式打夯机、压路机和



振动压路机等。机具选用应按工程性质、设计要求和工程地质条件等确定。粉煤灰垫层不应采用水沉法和浸水饱和法施工。

(2) 施工压实参数(最大干密度、最优含水量)可由室内轻型击实试验确定。压实系数根据工程性质、施工机具、地质条件等因素选定,一般可取 0.90~0.95。

(3) 虚铺厚度和碾压遍数应通过现场小型试验确定。若无试验资料时,可选用铺筑厚度 200~300 mm,压实厚度 150~200 mm。

(4) 小型工程可采用人工分层摊铺,在整平后用平板振动器或蛙式打夯机进行压实。施工时须一板压 1/3~1/2 板往复压实,由外围向中间进行,直至达到设计密实度要求。

(5) 大中型工程可采用机械摊铺,在整平后用履带式机具初压两遍,然后用中、重型压路机碾压。施工时须一轮压 1/3~1/2 轮往复碾压,后轮必须超过两施工段的接缝。一般碾压 4~6 遍,碾压至达到设计密实度要求。

(6) 施工时宜当天铺筑、当天压实。若压实时呈松散状,则应洒水湿润后再压实,洒水的水质应不含油, pH=6~9;若出现“橡皮”土现象,则应采取开槽、翻开晾晒或换灰等方法处理。

(7) 施工压实含水量应控制在最优含水量区间 $\omega_{op} \pm 4\%$ 范围内。

(8) 施工最低气温不得低于 0℃,以防粉煤灰含水冻胀。

(9) 每一层粉煤灰垫层验收合格后,应及时铺筑上层或采用封层,以防止干燥、松散、起尘污染环境,并禁止车辆在其上行驶通行。

(10) 作为建筑物垫层的粉煤灰应符合有关放射性安全标准的要求。粉煤灰垫层中的金属构件、管网宜采取适当防腐措施。大量填筑粉煤灰时,应考虑对地下水和土壤的环境影响。

1.5 质量检测

(1) 垫层质量检验包括:分层施工质量检查和工程质量验收。

(2) 分层施工的质量标准应使垫层达到设计要求的密实度,各类垫层压实标准如表 1-5 所示。

表 1-5 各种垫层的压实标准

施工方法	换填材料类别	压实系数 λ_c
碾压、振密或夯实	碎石、卵石	≥ 0.97
	砂夹石(其中碎石、卵石占全重的 30%~50%)	
	土夹石(其中碎石、卵石占全重的 30%~50%)	
	中砂、粗砂、砾砂、角砾、圆砾、石屑	
	粉质黏土	≥ 0.95
	灰土	
	粉煤灰	≥ 0.94

注:①压实系数 λ_c 为土的控制干密度 ρ_d 与最大干密度 ρ_{dmax} 的比值;土的最大干密度宜采用击实试验确定,碎石或卵石的最大干密度可取 2.1~2.2 t/m³;

②表中压实系数 λ_c 系使用轻型击实试验测定土的最大干密度 ρ_{dmax} 时给出的压实控制标准,采用重型击实试验时,对粉质黏土、灰土、粉煤灰及其他材料压实标准应为压实系数 $\lambda_c \geq 0.94$ 。



- (3) 对于工程量较大的换填垫层, 应按所选用的施工机械、换填材料及场地的土质条件进行现场试验, 以确定压实效果。
- (4) 对粉质黏土、灰土、粉煤灰和砂石垫层的施工质量可用环刀法、贯入仪、静力触探、轻型动力触探或标准贯入试验检验, 对砂石、矿渣垫层可用重型动力触探检验, 并均应通过现场试验 (以设计压实系数所对应的贯入度为标准) 检验垫层的施工质量。压实系数也可采用环刀法、灌砂法、灌水法或其他方法检验。
- (5) 垫层的施工质量检验必须分层进行。应在每层的压实系数符合设计要求后铺填上层土。
- (6) 采用环刀法检验垫层的施工质量时, 取样点应位于每层厚度的 $2/3$ 深度处。检验点数量, 对大基坑每 $50\sim 100\text{ m}^2$ 不应少于 1 个检验点; 对基槽每 $10\sim 20\text{ m}$ 不应少于 1 个点; 每个独立柱基不应少于 1 个点。采用贯入仪或动力触探检验垫层的施工质量时, 每分层检验点的间距应小于 4 m 。
- (7) 竣工验收采用载荷试验检验垫层承载力时, 每个单体工程不宜少于 3 点; 对于大型工程则应按单位工程数量或工程的面积确定检验点数。
- (8) 当有成熟试验表明通过分层施工质量检查能满足工程要求时, 经现场设计、监理、业主同意, 也可不进行工程质量的整体验收。

1.6 工程实例

1.6.1 工程概况

上海理工大学动力馆乙段系三层混合结构, 建在冲填土的暗浜范围内, 经砂垫层换土处理, 建成后 40 余年来, 使用情况良好。基础平面图与剖面图如图 1-4 所示。

1.6.2 工程地质概况

建筑场地由于塘底淤泥未挖除, 地下水位较高, 致使冲填龄期达 40 余年的土仍不能充分固结, 经勘察证实土质软弱且不均匀, 如表 1-6 所示。并在基础平面外的灰色冲填土层上进行了两个载荷试验, 荷载值为 50 kPa 及 70 kPa , 此值代表 $N_{63.5} > 3$ 的较好地段, 它比基础平面内的地基土承载力要大, 故不宜作为天然地基持力层。

表 1-6 地基土分层及主要物理力学指标

土层名称	土层厚度 /m	层底标高 /m	ω / (%)	γ / (kN/m^3)	I_p	e	c /kPa	φ / ($^\circ$)	a_{1-2} / (kPa^{-1})	$N_{63.5}$	[R] /kPa
褐黄色冲填土	1.0	+3.38									
灰色冲填土	2.3	+1.08	35.6	17.74	11.3	1.04	8.8	22.5	0.029	<2	
塘底淤泥	0.5	+0.58	43.9	16.95	14.5	1.30	8.8	16	0.061	0	
淤泥质亚黏土	7	-6.42	34.2	18.23	11.3	1.00	8.8	21	0.043		98
淤泥质黏土	未穿		53	16.66	20	1.47	8.8	11.5	0.013		58.8

注: 灰色冲填土及浜底淤泥在轻微振动下常产生触变液化现象, 其数据一般偏好 (土样运回实验室做实验)。灰色冲填土经颗分试验得知, 黏粒 ($<0.005\text{ mm}$) 含量小于 10% , 粉粒 ($0.05\sim 0.005\text{ mm}$) 加砂粒 ($0.01\sim 0.05\text{ mm}$) 含量大于 90% , 属于粉性土。

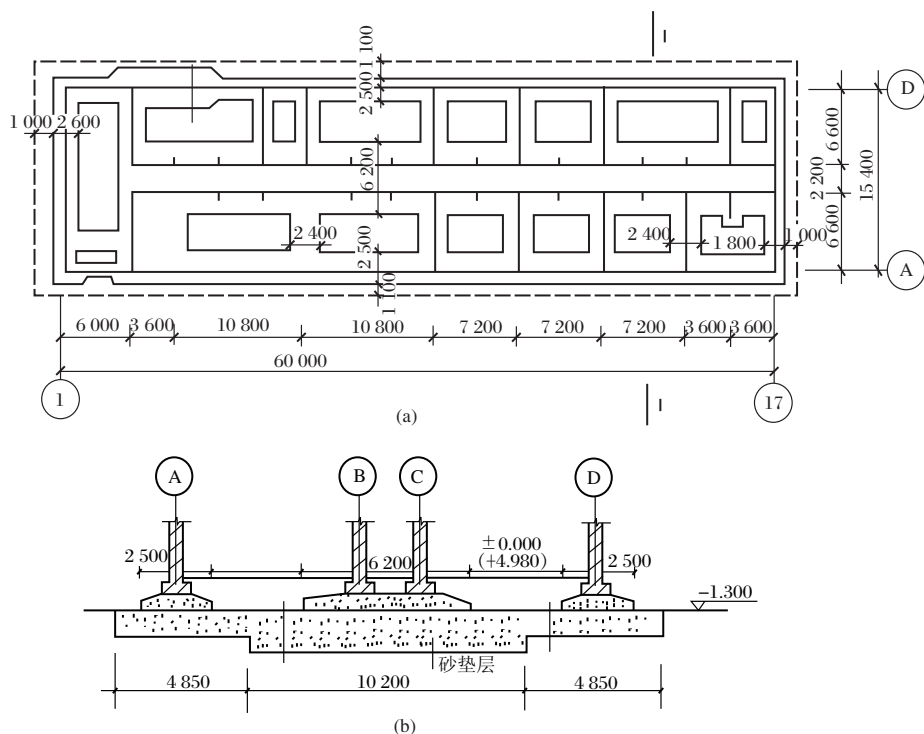


图 1-4 基础平面图与剖面图 (单位: mm)

(a) 平面图 (b) 剖面图

1.6.3 设计与施工概况

1. 设计方案比较

(1) 如采用深基础至淤泥质亚黏土层内, 需挖土 4 m, 因地下水位高, 且浜底淤泥渗透性差, 采用井点降水效果不佳, 施工困难。

(2) 不挖土, 打 20 cm×20 cm 的钢筋混凝土短桩, 桩长 5~8 m, 单桩承载力只有 50~80 kN。冲填土尚未完全固结, 需做架空室内地板, 增加了造价。

(3) 如采用表面压实法处理, 可使地下水位高的砂性冲填土发生液化。

(4) 用砂垫层置换部分冲填土, 辅以井点降水, 并适当降低基底压力。

最后设计采用第 (4) 种方案, 并控制基底压力为 74 kPa。

2. 施工情况

(1) 砂垫层材料为中砂, 用平板式振捣器分层捣实, 控制土的干重度大于 16 kN/m³。

(2) 沿建筑物四周布置井点, 井管滤头进入淤泥质亚黏土层内, 但因浜底淤泥的渗透性差, 降水效果不好, 补打井点, 将滤头提高至填土层底。

(3) 吊装三层楼板时停止井点抽水。

1.6.4 效果及评价

(1) 建成 20 余年后, 实测沉降量约 20 cm, 纵向相对弯曲值 0.000 8, 均未超过当时执行的《上海市地基基础设计规范》(1975) 规定的容许沉降量和实测相对弯曲最大值。

(2) 由于十字条形基础和砂垫层处理都起到了均匀传递和扩散压力的作用, 还改善了



暗浜（浜底淤泥未挖除）内冲填土的排水固结条件。冲填土和淤泥在承受上部结构荷载后，孔隙水压力增大，并通过砂垫层排水，同时将应力传递给土粒。当颗粒间应力大于土的抗剪强度时，土粒发生相对运动，土层逐渐固结，强度随之提高。

(3) 浜底淤泥的存在，致使井点降水效果受到限制，影响冲填土的固结和天然地基承载力的提高，并给地基处理带来不少困难。



思考题

- 1.1 换填法适用于哪些地基土？
- 1.2 采用换填法处理地基时，确定垫层厚度的依据是什么？
- 1.3 换土垫层后的建筑物地基沉降由哪些部分组成？
- 1.4 换填法处理软土或杂填土的主要目的是什么？
- 1.5 在换填法中，当仅要求消除基底下处理土层的湿陷性时，宜采用哪种垫层？
- 1.6 在换填法施工时，一般情况下，垫层的分层铺填厚度应取多少？
- 1.7 素土和灰土垫层土料的施工含水量宜控制在什么范围内？
- 1.8 何谓“虚铺厚度”“最大干密度”“最优含水量”和“压实系数”？
- 1.9 对机械碾压法如何进行施工质量和效果检验？



习题

1.1 某匀质黏性土场地中建筑物采用条形基础，基础底面宽度为 2.0 m，埋深为 1.5 m，基础线荷载为 500 kN/m，土层天然重度为 19 kN/m³，承载力特征值 $f_{ak} = 130$ kPa，采用 2.0 m 厚的粗砂垫层，垫层重度 18 kN/m³，场地中地下水埋深为 4.0 m。

(1) 试计算垫层底面处经深度修正后的地基承载力特征值，并判断其承载力是否满足要求；

(2) 垫层底面宽度至少应为多少，如基坑边坡放坡坡度为 1 : 0.5，垫层顶面宽度应为多少？

1.2 某匀质淤泥质土场地中有一独立基础，基础底面尺寸为 2.0 m × 2.0 m，埋深为 1.5 m，荷载作用效应标准组合时基础顶面受到上部结构的荷载为 800 kN，基础与地基土的平均重度为 20 kN/m³，土层重度为 19 kN/m³，承载力特征值为 45 kPa，地下水埋深为 4.5 m，如采用砾砂土做垫层，则垫层厚度应为多少？

1.3 某匀质细砂土场地，土层重度为 18 kN/m³，承载力特征值 $f_{ak} = 105$ kPa，地下水埋深为 4.0 m，建筑物采用独立基础，埋深为 1.0 m，底面尺寸为 2.5 m × 2.5 m，荷载为 $F = 1\ 800$ kN，采用换土垫层法进行地基处理，垫层厚度为 2.0 m，垫层为碎石，重度为 20 kN/m³。

(1) 试计算垫层底面处经深度修正后的地基承载力特征值，并判断其承载力是否满足要求；

(2) 垫层底面尺寸应为多少，如基坑开挖时放坡坡度为 1 : 0.75，垫层顶面尺寸应为多少？