



普通高等教育“十二五”规划教材



地基处理

张振营 编著
蔡袁强 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

013031624

TU472-43

14



普通高等教育“十二五”规划教材



地基处理

编 著 张振营
主 审 蔡袁强



TU472-43
14



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



北航

C1636540

13031834

内 容 提 要

本书是普通高等教育“十二五”规划教材，是浙江省重点教材。全书共分为11章，简明叙述了地基处理的各种方法，详细阐明了不同地基处理方法的适用条件、处理的目的、加固机理、设计理论与方法、施工要点、质量检测与质量控制等，分析了典型软土及山区填土——浙江山区地基处理的工程实例，每章后附有练习题供学生使用。书中突出基本知识、基本理论和方法的阐述，同时注重工程实践应用性及学科前沿知识的内容，体现了国家培养学术与工程实践复合型人才的思想。

本书可作为高等院校土木工程及水利工程专业的本科生教材，也可作为工程管理专业、电力工程专业及交通工程等专业的教材，还可供成人教育、函授大专学生以及与土木工程相关专业的专业技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

地基处理/张振营编著. —北京: 中国电力出版社, 2012. 12

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-3844-9

I. ①地… II. ①张… III. ①地基处理—高等学校—教材
IV. ①TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 298293 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 3 月第一版 2013 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.75 印张 383 千字

定价 30.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前 言

地基处理是土木工程专业的重要专业课,本书是按照全国土建与水利学科教学指导委员会对本课程的基本要求编写而成,书中十分注重工程实践与土力学基本理论的有机结合,内容充分体现了本学科所固有的理论性、计算性、试验性及实践应用性的特点。

浙江理工大学张振营教授于2006年9月主编了《地基处理》讲义,参加本讲义编写的有浙江理工大学孙树魁教授(第2章)、马海龙教授(第8章)、吴大志博士(第6、7章)和吴长富博士(副主编,第4、5、9章)。该讲义在浙江理工大学土木工程专业试用了5年,本书2011年列为浙江省的重点教材。编者在该讲义试用的基础上,修改了讲义中的错误和不合理的内容,根据教育部和住建部高等学校土建学科及水利学科教学指导委员会对地基处理课程教学的基本要求,对讲义进行了重新编排,补充、修改及完善了教学内容,吸收了目前国内外比较成熟的地基处理基本知识,在阐明基本理论、基本计算及基本的地基加固机理的同时,又注重了工程实践应用性的特点,使本书能较好地满足各高等学校的教学要求。为了使學生充分掌握地基处理的基本知识,我们还编写了练习题供学生使用。

本书共分为11章,介绍了9种地基处理的方法,分别是机械碾压法、夯实法、换土垫层法、挤密法、排水固结法、化学加固法、托换与纠倾法、土的加筋技术、特殊土地基处理的方法,介绍了浙江地区典型软土与山区地基的处理方法。

感谢浙江理工大学教务处对本书的关心与支持,感谢浙江理工大学岩土工程研究所的同事们的大力帮助,感谢温州大学的蔡袁强教授、浙江大学詹良通教授为本书提供了很好的教学素材!

温州大学校长、博士生导师蔡袁强教授审阅了本书,提出了宝贵的建议。同时,本书得到浙江省教育厅的资助,在此一并深表感谢!

由于时间仓促及编写人员水平所限,书中错误及不当之处恳请批评指正。

编 者

2012年9月于杭州



目 录

前言

1 概论	1
1.1 地基处理的意义及目的	1
1.2 软土的分类及其特性	4
1.3 特殊土的分类及其特性	7
1.4 地基处理方法	8
练习题	9
2 碾压法	10
2.1 机械碾压法	10
2.2 振动压实法	12
练习题	13
3 夯实法	14
3.1 重锤夯实法	14
3.2 强夯法	15
练习题	27
4 换土垫层法 (换填法)	29
4.1 概述	29
4.2 砂和砂石垫层	29
4.3 灰土和素土垫层	33
4.4 碎石和矿渣垫层	36
4.5 粉煤灰垫层	38
4.6 工程实例	38
练习题	43
5 挤密法	44
5.1 概述	44
5.2 土或灰土挤密桩法	44
5.3 砂石桩法	54
5.4 石灰桩法	63
5.5 水泥粉煤灰碎石桩 (CFG 桩) 法	68
5.6 工程实例	70
练习题	77
6 排水固结法	79
6.1 概述	79

6.2	排水固结法的原理	79
6.3	排水固结法设计与计算	81
6.4	施工方法	95
6.5	质量检验	98
6.6	值得进一步研究的问题	99
6.7	工程实例	100
	练习题	105
7	化学加固法	107
7.1	概述	107
7.2	灌浆法	107
7.3	高压喷射注浆法	118
7.4	深层搅拌法	122
7.5	工程实例	127
	练习题	135
8	托换与纠倾	137
8.1	概述	137
8.2	托换和加固技术	140
8.3	纠倾技术	146
8.4	树根桩简介	150
	练习题	152
9	土的加筋技术	153
9.1	概述	153
9.2	土工聚合物	154
9.3	加筋土挡墙	164
9.4	土钉	183
9.5	工程实例	195
	练习题	202
10	浙江山区典型地基处理方法	204
10.1	概述	204
10.2	某山区地基处理方法简介	205
11	特殊土地基处理简介	231
11.1	概述	231
11.2	湿陷性黄土地基	231
11.3	膨胀土地基	235
11.4	山区地基	239
11.5	冻土地基	241
	练习题	243
	参考文献	244

1 概 论

1.1 地基处理的意义及目的

地基是指基础直接搁置的岩土层。从力学的角度上讲,地基是指由于建筑物(构筑物)荷载作用产生应力、应变所不能忽略的岩土层。地基必须有足够的强度、稳定性、较低的压缩性,才能满足上部结构荷载的要求。某些场地,工程地质及水文地质条件良好,建筑物的基础可以直接建造在未经加固处理的天然土层上,这种地基称为天然地基。相反,如果场地的工程地质条件很差,土质松软,不能将基础直接建造在这种场地上,而必须进行人工处理,这种地基称为人工地基,欧美一些国家称为“地基处理”或“地基加固”(Ground Treatment 或 Ground Improvement)。

要选择在工程地质条件良好的场地进行工程建设,从而使建筑设计既满足经济又满足安全的需要。我国三十多年来经济的快速发展,带动了城市建筑业的大发展,好的建筑场地已经用完,有时也不得不在工程地质条件不好的场地上进行工程建设,这就需要对不良地基进行地基处理。特别是这十几年以来,随着城市化的快速发展,高楼大厦的兴建,上部结构荷载日益增大并且复杂,原来一些被认为是良好的天然地基的场地,由于地基的承载力和压缩性不能满足上部结构荷载的要求而不得不进行地基加固处理。例如:杭州某高校学生宿舍楼工程,初步设计为5层,原地基承载力的特征值为120kPa,由于招生规模扩大,需增加2层,设计部门通过各方案比较后,决定对地基进行加固处理,使地基承载力特征值提高到180kPa以上,满足了设计要求。

从近年来地基处理的工程实践和理论研究来看,地基处理在应用上从解决一般工程地基加固问题向着解决各种超软弱、深厚、深挖等大型工程地基加固方向发展,如在深厚超软地基上建造高速公路、大型油罐的埋设及深基坑的开挖等。从以提高地基承载力与稳定性为目的的向着以解决基础过大沉降和不均匀沉降为目的的方向发展,如高速公路的工后沉降、基坑开挖的侧向变形及大型油罐的不均匀沉降等。从加固技术方面来看,各种施工方法不断涌现,以现代新技术、新材料充实和改进常规的施工工艺,向着实用、有效及可靠和可控的方向发展,如砂石垫层、加筋土垫层,砂井、袋装砂井、塑料排水板,水泥搅拌法的质量监控等。在设计理论与技术方法方面,由于大量工程实践的应用,修正了现有的地基处理设计规范和设计手册中的部分内容,推动了地基处理方法的发展,使其在工程中广泛应用;扩大了工程实践的应用范围。大量的现场监测技术的应用,使信息施工和信息设计成为今后重大工程设计和施工的发展方向。根据工程实践的需要,地基处理已经不限于单一方法,经常采用多种地基处理的方法来联合处理,如土工织物垫层和排水板联合处理软土地基,真空预压与堆载预压联合处理饱和软土地基,加筋垫层与深层搅拌法联合处理等。

地基处理的目的是利用各种地基处理的方法对地基土进行加固处理,用以改善地基土的工程性质,提高地基土的承载力,增强地基土的稳定性,降低地基土的压缩性,改善地基土的渗透性能,提高地基的抗震特性,减小地基土的沉降和不均匀沉降,使其在上部结构荷载

作用下不致发生破坏或出现过大大变形,以保证建筑物的安全和正常使用。对砂性土及粉土地基,还要消除可液化土层,防止地震时地基土的液化;对特殊土地基,要采取有效措施,消除或部分消除湿陷性黄土的湿陷性、膨胀土的胀缩性等特殊性,使之满足设计要求。地基处理后,还要选择合理的基础型式和基础尺寸,使整个工程的稳定性、各种变形指标等控制在容许的范围之内。从某种意义上讲,地基处理与基础选择是统一的,不可分开来考虑。实际工程中,应从地基、基础及上部结构共同工作的概念出发进行地基与基础设计。

下面是几个没有经过地基处理的典型工程实例:

上海展览中心(上海工业展览馆)(图 1-1)坐落在上海市延安中路 1000 号,是 50 年代上海规模最大、气势最雄伟的俄式建筑群。展览中心中央大厅为框架结构,箱形基础,展览馆两翼采用条形基础。地基为高压缩性淤泥质软土。

展览馆于 1954 年 5 月开工,当年年底实测地基平均沉降量为 600mm,1957 年 6 月,中央大厅四周的沉降量最大达 1466mm,最小为 1228mm,到 1979 年,累计平均沉降量为 1600mm。由于中央大厅基础工程首次采用了当时先进的箱形基础,使整个建筑物上下成为一体,所以整体沉降相对比较均匀。



图 1-1 上海展览中心

苏州虎丘塔(图 1-2)位于苏州市虎丘公园山顶,落成于宋太祖建隆二年(公元 961 年),距今已有 1052 年的历史。全塔 7 层,塔底直径为 13.66m,高 47.5m,重 63 000kN,整个塔支承在内外 12 个砖墩上。塔的平面呈八角形,由外壁、回廊与塔心三部分组成。1961 年 3 月 4 日,国务院将此塔列为全国重点保护文物。地基为不均匀的粉质黏土层,塔身产生了不均匀沉降,1957 年塔顶偏移轴线 1.7m,1978 年达到 2.3m,塔的重心偏离轴线 0.924m,塔体向东北方向倾斜,东北侧塔身受压,而相反的西南侧塔身受拉,因此出现了典型的拉压裂缝,东北方向为竖向裂缝,西南方向为水平裂缝。

苏州虎丘塔地基土的剖面如图 1-3 所示。从地基方面看,主要有两个原因导致倾斜:

一是由于基岩顶面呈南高北低起伏状,塔基下面的填土层分布呈南薄北厚,地基土分布不均匀,引起了差异沉降,当沉降差过大时,就导致塔身倾斜。

二是因地表水渗透到地基土内,由于南高北低基岩面的存在,形成地下水由南向北渗

流。在渗透过程中，水流将大颗粒间的小颗粒土带走，加剧了塔基北侧土的压缩，差异沉降进一步加大。

处理方法：在塔四周建造一圈桩排式地下连续墙，并对塔周围与塔基进行钻孔注浆和打设树根桩加固塔身，效果良好。

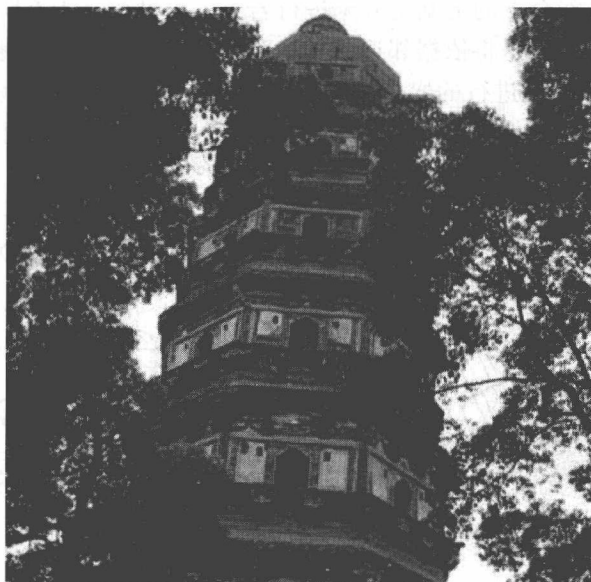


图 1-2 苏州虎丘塔

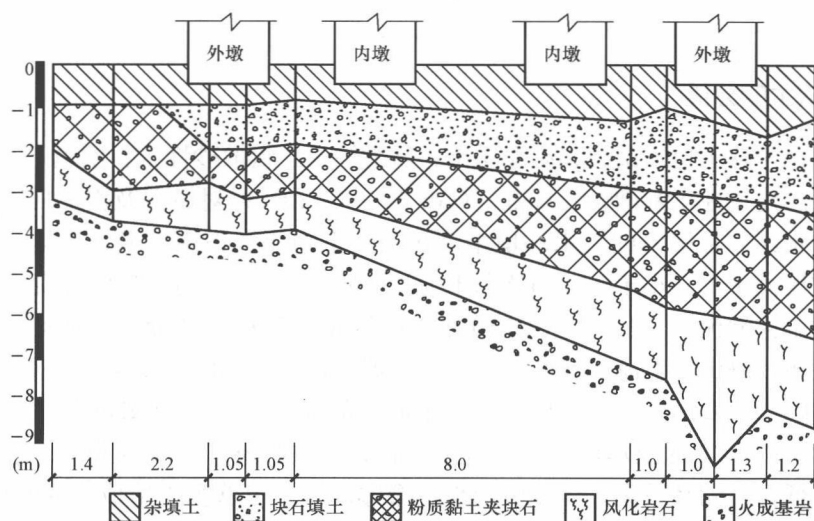


图 1-3 虎丘塔地基剖面图

加拿大特朗斯康谷仓 (Transcona Grain Elevator) (图 1-4)，每排 13 个圆柱形筒仓，5 排共计 65 个筒仓，南北向长 59.44m，东西向宽 23.47m，筒高 31.00m，其下为筏板基础，筏板厚 610mm，埋深 3.66m。

谷仓于 1911 年动工，1913 年秋竣工。谷仓自重 200 000kN，此时的基底压力约为

143kPa, 而设计满载时的基底压力(工作荷载)为 337kPa。1913 年 9 月初开始陆续贮存谷物, 10 月 17 日当谷仓装至 $31\,822\text{m}^3$ 谷物时, 谷仓西侧突然陷入土中 8.8m, 东侧则抬高 1.5m, 结构物向西倾斜, 并在 2h 内谷仓倾倒, 倾斜度离垂线达 $26^\circ 53'$ 。

谷仓基础下有厚达 16m 的可塑黏土层, 该层是引起倾覆事故的直接原因。后来查明, 在进行谷仓的设计前, 谷仓下的地基土并未进行岩土工程勘察, 未查明地层分布及获得土体的相应物理力学指标, 而只是将依据邻近结构物基槽开挖试验获得的地基承载力 352kPa 应用到谷仓。1952 年对该场地进行的岩土工程勘察得知, 谷仓地基实际承载力仅为 200kPa 左右, 远小于谷仓满载时的压力 337kPa。谷仓的荷载过大, 谷仓地基因承受不了如此大的荷载而发生强度破坏, 造成地基土整体剪切滑动。

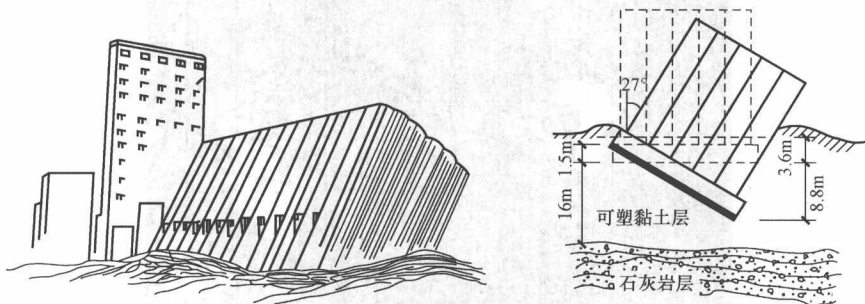


图 1-4 加拿大特朗斯康谷仓

1.2 软土的分类及其特性

1.2.1 软土的分类

从广义上说, 软土包括淤泥、淤泥质土、软黏性土、松散砂性土、素填土、冲填土和杂填土等。我国《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011) 对淤泥及淤泥质土的定义进行了规定: 在静水或非常缓慢的流水环境中沉积, 经生物化学作用形成, 天然含水量大于液限, 天然孔隙比大于 1.0 小于 1.5 的软黏土为淤泥质土; 天然含水量大于液限, 天然孔隙比大于 1.5 的软黏土为淤泥土。这些土大多分布在我国东南沿海及环渤海湾地区(如浙江的杭州、宁波、温州、舟山, 上海, 南京, 广州, 深圳, 福州, 厦门, 珠海, 天津, 连云港等), 局部分布在内陆平原及山区。该区域只占国土面积的 5%, 但 GDP 却占全国的 40%, 出口占全国的 70%, 约 1/3 的土建投资用于岩土工程, 严重影响了大规模土木工程建设。软土的抗剪强度很低, 压缩系数大, 压缩模量小, 渗透性差。由软黏土组成的地基的承载力低, 所以地基的沉降量大、不均匀沉降也大, 并且由于软黏土具有流变特性, 土体变形稳定所需要的时间很长, 一般沉降稳定需要几年、十几年甚至几十年的时间。软土地基是指压缩层主要由淤泥、淤泥质土、吹填土(图 1-5、图 1-6)、杂填土、松砂或其他高压缩性土层组成的地基。这种地基的主要特点是强度低、压缩性大。一般来说, 砂性土地基的渗透性好, 在建筑物荷载作用下产生的沉降在短时间内即可完成, 对工程使用后的影响较小, 但应注意到松砂特别是松散的粉、细砂, 会在机械振动或地震力作用下发生液化, 导致地基的失稳或变

形过大而发生破坏。而黏性土地基渗透性很差,地基的沉降需要几年甚至几十年才能完成,所以需要考虑地基变形对工程使用后的影响。砂土相对于黏性土而言,加固处理较容易。



图 1-5 吹填淤泥



图 1-6 吹填砂土

1.2.2 软土的特性

一、淤泥和淤泥质土

淤泥和淤泥质土(图 1-7)的特性与一般黏性土不同,我国部分地区淤泥和淤泥质土的物理力学性质指标的统计值见表 1-1,我国沿海地区典型软黏土的物理力学指标见表 1-2。



图 1-7 淤泥和淤泥质土

表 1-1 我国部分地区软土的物理力学性质指标

地区	土层埋深 /m	含水量 W /%	孔隙比 e	液 限 W_L /%	塑限 W_P /%	渗透系数 K /(cm/s)	压缩系数 a_{1-2} /MPa ⁻¹	黏聚力 /kPa	内摩擦角 ϕ /(°)
上海	1.5~6.0	37	1.05	34	21	2×10^{-6}	0.72		
	6.0~7.0	50	1.37	43	23	6×10^{-7}	1.24		
杭州	3.0~9.0	47	1.34	41	22				
	9.0~19.0	35	1.02	33	18		1.17		
宁波	2.0~12.0	50	1.42	39	22	3×10^{-8}	0.95		
	12.0~28.0	38	1.08	36	21	7×10^{-8}	0.72		
舟山	2.0~14.0	45	1.32	37	19	7×10^{-6}	1.10		
	17.0~32.0	36	1.07	34	20	3×10^{-7}	0.65		
温州	1.0~35.0	63	1.79	53	23		1.93		
广州	0.5~10	73	1.82	46	27	3×10^{-6}	1.18		

续表

地区	土层埋深 /m	含水量 W /%	孔隙比 e	液 限 W_L /%	塑限 W_P /%	渗透系数 K /(cm/s)	压缩系数 a_{1-2} /MPa ⁻¹	黏聚力 /kPa	内摩擦角 ϕ /(°)
福州	3.0~19.0	68	1.87	54	25	8×10^{-8}	2.03	1.0~1.5	10~15
	19.0~25.0	42	1.17	41	20	5×10^{-5}	0.70		
贵州	软黏土	53~93	1.42~2.38	56~71	26~34	$10^{-4} \sim 10^{-7}$	0.6~2.6	6.0~6.3	3~21
	泥 炭	139~563	1.60~10.92	77~263	48~236	$10^{-3} \sim 10^{-7}$	2.1~12.9	2.0~4.2	9~23
昆明	软黏土 泥 炭	41~299	1.10~7.0						
天津	7.0~14.0	34	0.97	34	19	1×10^{-7}	0.51		
塘沽	3.0~8.0	65.7	1.82	58	31	1×10^{-8}	1.53	7.0	14.3
	8.0~24.0	42.5	1.13	38	19	1×10^{-7}	0.75	13.0	16.9

表 1-2 我国沿海地区典型软黏土的物理力学指标

土类	地区	天然含水量 /%	天然密度 /(t/m ⁻³)	天然 孔隙比	液限 /%	塑限 /%	渗透系数 /(10 ⁻⁷ cm/s)	压缩系数 /MPa ⁻¹
淤泥	天津	71	1.59	1.98	58	31	0.1	1.53
	连云港	72	1.57	2.03	53	25		1.83
	温州	63	1.62	1.79	53	23		1.93
	福州	68	1.50	1.87	54	25	0.8	2.03
	厦门	87	1.48	2.42	60	32		1.90
	深圳	83	1.52	2.23	54	30	0.4	2.19
	湛江	88	1.49	2.39	55	28	0.4	2.09
淤泥质土	天津	46	1.76	1.30	42	21	1	0.91
	连云港	45	1.74	1.29	47	23		
	上海	59	1.73	1.40	42	22	6	1.24
	杭州	47	1.73	1.34	41	22		
	舟山	51	1.73	1.38	40	21	3	0.86
	宁波	50	1.70	1.42	45	25	1	0.95
	镇海	47	1.75	1.31	40	20		0.97
	温岭	50	1.73	1.28	40	21		1.16
	福州	42	1.71	1.17	41	20	5	
	湛江	51	1.72	1.34	55	27		

从表中所列数据并根据工程实践，对沿海地区软黏土的主要物理、力学性质特点分析如下：

(1) 含水量为 34%~72%，液限为 34%~58%，大部分为 34%~43%，处于流动状态，天然孔隙比为 1.0~1.9，全部属于淤泥和淤泥质土，而淤泥质土占多数。

(2) 抗剪强度低。快剪黏聚力一般为 8~15kPa，只能承载 3m 厚的填土。内摩擦角为 0~5°，固结快剪的黏聚力与快剪差别不大，内摩擦角一般为 15°~20°。

(3) 压缩性高。压缩系数为 0.5~1.5MPa⁻¹， $C_c=0.3 \sim 0.7$ ，3m 厚填土的荷载可以造成 1m 沉降，属高压缩性土。第四纪后期的软土，通常属于正常固结的，性质较好，而某些

近期沉积的软土（如近期围垦的海滩），则是欠固结的，在自重作用下还会继续下沉。

（4）渗透性差。渗透系数大多为 $10^{-8} \sim 10^{-6} \text{ cm/s}$ ，所以在荷载作用下固结慢，强度不易提高，当土中有机质含量较大时，则渗透性会更差，其固结沉降一般需要 10~20 年才能完成。

（5）具有显著的流变性。在剪应力作用下，土体产生缓慢的剪切变形，剪应力愈大，此变形愈明显，当剪应力大到一定数值，土体在长期荷载作用下可能被剪坏，此时土体的抗剪强度称为长期抗剪强度，它只有一般试验方法的 40%~80%。

（6）具有显著的结构性。软黏土一旦受到扰动，其结构就会受到破坏，土强度明显下降，处于流动状态。我国东南沿海的滨海相软土的灵敏度一般为 4~10。

二、素填土

素填土是人工填土的一种，它是由碎石土、砂土、粉土、黏性土等一种或几种材料混合组成的填土。素填土的工程性质主要取决于填土的性质、堆填的时间、压实或夯实的程度。一般地，粗颗粒组成的素填土，在同样压实能量的情况下，其工程性质要比细颗粒组成的素填土的工程性质要好。

三、杂填土

杂填土是由于人类的活动而形成的无规则的填土，它由大量的无机物和有机物组成。一般地，杂填土由建筑垃圾、工业废料、生活垃圾等固体废弃物组成，它具有如下的性质。

（1）均质性差。杂填土分布极不均匀，结构松散，有软有硬，颗粒和孔隙有大有小，一般还具有浸水湿陷性。

（2）成分复杂。杂填土如以生活垃圾为主，则废纸、塑料、肉骨、菜类等有机质含量多；如以工业废料为主，则炉渣、粉煤灰等含量较多；如以建筑垃圾为主，则砖瓦、石块、混凝土块等含量多。不论以哪种垃圾填料为主，其成分都复杂多样。

（3）性质随埋龄变化。新近埋填的杂填土是欠固结的，随着时间的延长会逐渐沉陷。一般认为，堆填埋龄超过 5 年后，沉降才会逐渐稳定下来。

四、冲填土

冲填土是在整治和疏通河道时，用挖泥船或泥浆泵将河底部的泥砂用水力吹填形成的沉积土。冲填土的性质与泥沙的来源以及冲填的水利条件有关，其物质成分比较复杂，一般为黏性土、粉土及粉细砂等，由于吹填土的来源不同，从而造成在垂直和水平向的不均匀性。如果吹填土中含黏粒多，则往往属于欠固结土；如含砂粒较多，则其物理、力学性质往往较好。

1.3 特殊土的分类及其特性

1.3.1 特殊土的分类

特殊土一般是指具有特殊性质的土，其工程特性不同于一般意义的砂土、粉土、黏性土。特殊土包括有机质土和泥炭土、膨胀土、红黏土、湿陷性土、盐渍土、多年冻土、垃圾填埋土、岩溶土洞和山区地基土等。

1.3.2 特殊土的特性

特殊土的特性主要有以下几方面：

(1) 有机质土和泥炭土：有机质含量大于 5% 的土定义为有机质土，有机质含量大于 60% 的土定义为泥炭土。有机质含量高的土，其压缩性往往很大，强度低，特别是泥炭土的含水量非常高，不适合作为天然地基，需要进行人工处理。

(2) 膨胀土：膨胀土的主要成分是蒙脱土和伊利土，它是一种高塑性黏土。当该土湿水时，体积显著增加而发生膨胀现象；当干燥失水时，体积明显减少而发生收缩现象，故称为膨胀土。膨胀土在我国主要分布在云南、广西、贵州及湖北等省区。

(3) 红黏土：红黏土一般是指碳酸盐类岩石经过化学风化作用而形成的高塑性黏土。一般分布在山坡、山麓、盆地或洼地中，其厚度变化很大，广泛分布在我国湖南、湖北、广西、广东、四川东部、云贵高原等地区。红黏土的颗粒很细，黏粒含量高，矿物成分以高岭石和伊利石为主。其含水量一般为 30%~60%；液限一般为 60%~80%，最高可达 110%；塑限一般为 20%~50%；塑性指数一般为 20~50；红黏土的抗剪强度高，压缩性低，其黏聚力一般为 40~90kPa，内摩擦角一般为 8° ~ 18° ；压缩模量一般为 6~16MPa；它具有明显的收缩性，失水后原状土的收缩率一般为 7%~22%；浸水后的膨胀率较小，一般小于 2%。

(4) 湿陷性黄土：湿陷性黄土是指受水浸湿后，土的结构发生破坏，在上部土层自重应力或在上部土层自重应力和附加应力的共同作用下而发生显著沉降的土。如果没有发生下沉，则此黄土为非湿陷性黄土。湿陷性黄土一般分为自重湿陷性黄土和非自重湿陷性黄土。自重湿陷性黄土是指受水浸湿后在土层自重应力作用下发生湿陷，而非自重湿陷性黄土是指受水浸湿后在土层自重应力作用不发生湿陷。湿陷性黄土在我国主要分布在西北、华北和东北等干旱少雨地区。

(5) 多年冻土：土层温度小于或等于 0°C 时，土中的水结成冰，一般地，含有冰的土层称为冻土。冻结状态持续多年而不融化的土，称为多年冻土。冻土由四部分组成：固体颗粒、冰、水和气体。

(6) 垃圾填埋土：城市生活垃圾是人们日常生活的产物，产生量很大，目前一般主要采用填埋来处理，少量采用堆肥和焚烧处理。生活垃圾的成分很不均匀、压缩性大、容易降解、力学参数变化很大。填埋过程中产生大量的渗滤液，填埋边坡容易失稳。

(7) 山区地基土：山区地基土的显著特性是它的不均匀性，其承载力、压缩性差别很大。产生不均匀的主要原因是山区岩层一般埋藏较浅（有的露出地面，有的被土层覆盖，基础一部分在岩石上，而另一部分在土层上）、山区地表高差大（当平整场地后，基础一部分在挖方区，而另一部分在填方区）、山区岩溶（溶沟、溶槽、石芽、石林、溶洞、暗河、大块孤石、局部软土等）现象等。

1.4 地基处理方法

我国历史悠久，早在两千多年前，我国劳动人民就在万里长城、古塔等工程中采用了今天仍然采用的地基处理方法，如灰土、三合土垫层法，碾压夯实法，在软土中加“筋”等方法。随着社会的蓬勃发展，工程实践的不断深入，地基处理技术得到了迅速发展，特别是近二、三十年以来，发展十分迅速，老方法、老工艺得到改进，新方法、新工艺不断涌现，如动力固结法、高压喷射注浆法、加筋法等。目前，地基处理方法的分类多种多样，一般来说，较为妥当的分类方法是按地基处理的作用机理进行分类（表 1-3）。

表 1-3

地基处理方法分类

处 理 方 法	作 用 机 理	适 用 范 围
碾压、夯实法	将具有最佳含水量、级配良好的土料搅拌均匀，分层回填，分层夯实，压实到设计的密实度，从而提高地基承载力，减小沉降量。也可原地压（夯）实	碾压法常用于基坑面积大和开挖土方量较大的回填土工程。可用于处理浅层软土地基、湿陷性黄土地基、膨胀土地基和季节性冻土地基。重锤夯实法适用于地下水位以上稍湿的黏性土、砂土、湿陷性黄土、杂填土及填土地基
换土垫层法	将基底以下一定深度范围内的软弱土层挖除，换填无侵蚀性的低压缩性散体材料（如中砂、粗砂、砾石、碎石、卵石、矿渣、灰土、素土或其混合料等），分层压实（夯实）作为基础的持力层	适用于淤泥、淤泥质土、湿陷性黄土、素填土、杂填土地基及暗沟、暗塘等的浅层地基处理。常用于轻型建筑、地坪、堆料场和道路等的地基处理
动力固结法 (强夯法)	强夯法可利用强大的夯击能量，迫使深层土液化和动力固结从而使地基土密实，它可大大提高地基的承载力，大幅降低土的压缩性	一般适用于碎石土、砂土、杂填土、黏性土、湿陷性黄土及人工填土。对淤泥及淤泥质土慎用。如试验证明施工有效时，也可使用
挤密法	挤密法指利用沉管或水力等成孔，并向孔中回填砾石、砂、灰土、石灰、土等形成碎石桩、砂桩、灰土桩、石灰桩、土桩等，桩与桩间土共同工作构成复合地基，从而可以提高地基承载力、减小沉降量、消除或部分消除土的湿陷性，改善土的抗液化性等	碎石桩、砂桩一般适用于松散砂土、杂填土地基，有时也可用于软土地基。灰土、石灰或土桩等一般适用于地下水位以上，深度为 5~10m 的湿陷性黄土和人工填土
排水固结法	排水固结法系指在软土中设置竖向排水井，在软土顶面设砂垫层，改善地基的排水条件，通过堆载预压、抽气、抽水 and 电渗等措施，加速软土的固结，使地基土的强度得以增长并使沉降提前完成	此法适用于处理厚度较大的饱和软黏性土和冲填土地基。对厚泥炭层要慎重采用
化学加固法	化学加固法是指向地基土中注入水泥、生石灰粉或化学浆液，或将水泥等进行喷射或机械搅拌等措施，使土粒胶结起来，用以改善土的性质，从而提高地基承载力，增加稳定性，减少沉降，防止渗漏等	此法适用于处理黏性土、砂土、湿陷性黄土及人工填土地基。尤其适用于已建成而出现工程事故的地基处理
加筋法	加筋法是指在软土中建筑碎石桩和树根桩，或在人工填土的路堤、挡墙内铺设土工织物、钢条、钢带、玻璃纤维或尼龙绳等拉筋，使土体可承受抗压、抗拉、抗剪和抗弯作用，从而可提高地基承载力，增强地基的稳定性，减小沉降	碎石桩（砂桩）适用于黏性土，对软黏土要慎用。 树根桩适用于各类土。 土工织物适用于砂土、黏性土和软土。 加筋土适用于人工填土的路堤和挡墙结构

练 习 题

1. 简述合理选择地基与基础设计方案的重要性。
2. 简述软土地基的特性及分类。
3. 简述在哪些地质条件及上部结构条件下需进行地基处理。

2 碾 压 法

机械碾压法是采用碾压、振动压实机械,如压路机、振动压路机、推土机、羊足碾等机械,来回反复碾压、震动使地基土密实、强度提高、压缩性降低,从而使地基得到处理的一种密实方法。此法常用于基坑面积大及开挖土方量大的工程,特别适用于处理大面积素填土地基,如大面积垫层、大面积回填土地基、公路路基等,是一种常用的浅层地基处理方法。为保证填土或垫层的压实质量,经常考虑以下因素:①填土料的质量及颗粒级配,②填土料的最佳含水量,③土的压实系数($\lambda_c = \rho_d / \rho_{dmax}$)满足设计要求。

2.1 机械碾压法

对堤坝、道路及面积较大的建筑工程地基经常采用机械碾压法处理。为确保工程的碾压质量,施工前应对以下施工参数进行选择:①碾压能量,即选择压实机械的吨位。碾压能量的选择应根据上部结构及上部结构对欲处理地基的要求(承载力及变形等)、本地区的机械设备能力来确定,如选择能量过小,即使碾压很多遍也可能达不到设计要求。②土的质量、颗粒级配及最佳含水量。对填土地基,应严格控制填土的质量,应选择良好的填土料,如砂性土、粉土及粉质黏土等,土料中不得含动植物残体、垃圾、冻土、膨胀土、木屑等杂物,有机质含量 $\leq 5\%$,填土料要有好的颗粒级配,颗粒级配应通过室内筛分试验确定。填土料还应达到最佳的含水量,达到最佳含水量的填土料才最容易压实并获得最好的密实度,最佳含水量一般由室内击实试验确定。对一般工程地基,如室内试验有困难,也可凭工程经验现场估计土的最佳含水量,即用手抓起现场配制好的土料,握紧能成团,松手用手指轻弹或掉到地上能散开,即为最佳含水量。③填土的虚铺厚度。虚铺厚度应根据填土料及所选择的压实能量来确定,如压实能量较大,则可虚铺的厚一点;否则,可铺的薄一点。分层虚铺厚度一般可取200~300mm。④压实遍数。压实遍数是指使填土碾压密实达到设计要求所需的最少遍数,一般通过现场试验确定。

工程施工应根据不同的土料选择施工机械,粉质黏土、灰土宜采用平碾、震动碾或羊足碾,对中小型工程也可采用蛙式夯、柴油夯。砂石等宜采用震动碾,粉煤灰宜采用平碾、震动碾、平板震动器、蛙式夯,矿渣宜采用平板震动器、平碾,也可采用震动碾。当碾压土层的底部存在古井、古墓、洞穴、旧基础、暗塘等软硬不均的部位时,应首先进行处理,并经过验收合格后,再进行机械碾压施工。

分层填土压密需要较好的土料,有时可适量添加石灰、水泥、碎砖、碎石等,以提高地基强度。碾压法施工时应根据压实机械的压实能量,控制碾压土的含水量(符合最优含水量),选择适当的碾压分层厚度和碾压的遍数。对一般黏性土,通常用8~10t的碾或12t的羊足碾,每层铺土厚度30cm左右,碾压8~12遍。对饱和黏性土进行表面压实,要考虑适当的排水措施以加快土体的固结。对于淤泥和淤泥质土,一般应予以挖除或者结合碾压进行挤淤充填,先在土面上堆土、块石、片石等,然后用机械压入以置换和挤出淤泥,堆积碾压

分层进行，直到把淤泥全部挤出、置换完毕为止。碾压法对表层地基加固的深度一般可达2~3m。

施工时先按设计挖掉要处理的软弱土层，把基础底部土碾压密实后，再分层填土，逐层压密填土。压实效果取决于被压实土料的含水量和压实机械的能量。

碾压工程质量常用压实系数 λ_c 来控制，每分层的压实系数均应满足设计要求。现场检验可采用环刀法、界入仪（或钢筋）法，也可采用其他方法，如静力触探、轻型动力触探、标准贯入试验及重型动力触探等。压实系数的大小与上部结构及碾压地基的用途有关，如用作建筑地基，则地基持力层范围内的填土要求 $\lambda_c \geq 0.96$ ；如用作散水、房心回填等非持力层时，可适当降低压实系数 λ_c 。实际工程中可通过表2-1选择压实系数和最优含水量，按表2-2和表2-3选择合适的分层碾压厚度和次数，填土压实后的指标参见表2-4。

表 2-1 压实填土地基质量控制值

结 构 类 型	填 土 部 位	压实系数 λ_c	控制含水量/%
砌体承重结构和框架结构	在地基主要受力层范围内	≥ 0.97	$\omega_{op} \pm 2$
	在地基主要受力层范围以下	≥ 0.95	
排架结构	在地基主要受力层范围内	≥ 0.96	
	在地基主要受力层范围以下	≥ 0.94	

表 2-2 垫层的每层铺填厚度及压实遍数

碾 压 设 备	每层虚铺厚度/mm	每层压实遍数	土 质 环 境
平碾（8~12t）	200~300	6~8	软弱土、素填土
羊足碾（5~6t）	200~350	8~16	软弱土
蛙式夯（200kg）	200~250	3~4	狭窄场地
振动碾（8~15t）	600~1300	6~8	砂土、湿陷性黄土、 碎石土等
振动压实机	1200~1500	10	
插入式振动器	200~500		
平板式振动器	150~250		

表 2-3 各种压实机械铺土厚度及压实遍数

压 实 机 械	黏 土		粉 质 黏 土	
	铺土厚度/cm	压实次数	铺土厚度/cm	压实次数
重型平碾（12t）	25~30	4~6	30~40	4~6
中型平碾（8~12t）	20~25	8~10	20~30	4~6
轻型平碾（8t）	15	8~12	20	6~10
铲运机			30~50	8~16
轻型羊足碾（5t）	25~30	12~22		
双联羊足碾（12t）	30~35	8~12		
羊足碾（13~16t）	30~40	18~24		
蛙式夯（200kg）	25	3~4	30~40	8~10
人工夯（50~60kg，落距50cm）	18~22	4~5		
重锤夯（1000kg，落距3~4m）	120~150	7~12		