

SHIYONG DIJI CHULI

实用地基处理

王恩远 吴 迈 编著

中国建筑工业出版社

实 用 地 基 处 理

王恩远 吴 迈 编著

中 国 建 筑 工 业 出 版 社

图书在版编目(CIP)数据

实用地基处理/王恩远, 吴迈编著. — 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. 8

ISBN 978-7-112-16774-6

I. ①实… II. ①王…②吴… III. ①地基处理 IV. ①TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 080892 号

本书按新颁布的中华人民共和国行业标准《建筑地基处理技术规范》JGJ 79—2012 及《复合地基技术规范》GB/T 50783—2012 基本原则和框架编写。内容包括: 总论、换填垫层法、机械压(夯)实法(重锤夯实、振动压密、小能量强夯、强夯、振冲加密、大面积填土压实)、预压法、复合地基加固法(包括复合地基基本理论、振冲桩法、砂石桩法、柱锤冲扩桩法、强夯置换碎石墩、生石灰桩、灰土(土)桩、水泥土搅拌桩、旋喷桩、夯实水泥土桩、刚性桩、多桩型复合地基)、其他地基处理方法(土工合成材料、注浆法、微型桩、桩网复合地基)、地基处理新技术(劲芯水泥土桩、柱锤冲扩水泥粒料桩、柱锤夯实扩底灌注桩)、地基处理检验与监测等共八章二十八种地基处理方法。为了适应农村城镇化中、低层建筑的要求, 书中保留了目前已应用不多的处理深度较浅的工法。

本书可供从事工程地基处理的设计、施工、检测及监理等技术人员使用, 也可供从事工程勘察、建筑结构设计人员及大专院校有关专业师生以及公路、交通、水利等方面技术人员参考。

责任编辑: 李 明 田立平

责任设计: 李志立

责任校对: 张 颖 刘梦然

实 用 地 基 处 理

王恩远 吴 迈 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 42¼ 字数: 1048 千字

2014 年 10 月第一版 2014 年 10 月第一次印刷

定价: 98.00 元

ISBN 978-7-112-16774-6

(25578)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

我国地域辽阔、幅员广大，自然地理环境各异。从内陆到沿海，从山区到平原，分布着多种多样的地基土层，其抗剪强度、压缩性、透水性等因土的种类不同而可能有较大差别。在各种地基土层中，不少为软弱土和不良土层，如淤泥和淤泥质土、软黏土、杂填土、冲填土、松散饱和粉细砂及粉土、湿陷性黄土、膨胀土、泥炭土、红黏土、多年冻土、岩溶土洞等。在这些土层上进行工程建设时，往往需要对地基进行加固处理。

除上述外，当既有建筑增层改造、加高、纠倾加固、工厂设备更新等造成荷载增大，对原地基提出更高要求，而原地基不能满足新的要求时，或者在开挖深基坑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。

随着基本建设的发展，其规模及荷载越来越大，对地基的要求也越来越高。加之为了节约和少占耕地，过去的沟、坑、洼地等不良土层，也不得不被用作建设用地，于是，越来越多的工程需要采用人工加固地基以满足结构对地基的要求，从而使软弱地基的涵盖面更广了，对于中低层建筑尚可直接利用的天然土层，对于高层建筑来说未必可行。因此，对于地基工程而言，当前已由天然地基转向人工地基的年代，在概念上对软弱地基要有新的认识。

由于不同结构物对地基的要求是不同的，各地区的土质条件也是千变万化的，目前国内外地基处理方法很多，每种方法都有它的适用范围和局限性。因此，在实际工程中，首先要判断是否需要采用人工加固地基；如果需要采用，又将采用什么处理方法，以及如何正确地进行设计、施工及检验。这些都已成为日益突出的问题。这不仅影响建筑物的安全和正常使用，而且对建设工期、工程造价等都有不小影响，有时甚至成为工程建设中的关键。

为了普及和推广地基处理技术，贯彻执行国家颁布的有关技术标准，作者结合个人学习的体会和多年从事地基处理工作实践和研究成果，编写了本书。本书按新颁布的中华人民共和国行业标准《建筑地基处理技术规范》JGJ 79—2012 及《复合地基技术规范》GB/T 50783—2012 基本原则和框架编写，同时遵照《建筑地基基础设计规范》GB 50007—2011、《岩土工程勘察规范》GB 50021—2001（2009 年版）、《建筑地基基础工程施工质量验收规范》GB 50202—2002 等标准，并参考其他专著和文献进行了详释和补充。

本书重点介绍了工程地基处理应遵循的基本原则，地基处理方法选择的依据以及《建筑地基处理技术规范》JGJ 79—2012 及《复合地基技术规范》GB/T 50783—2012 所推荐的各种地基处理方法的适用范围、设计、施工及检验要求。为了给广大从事地基处理工作的工程技术人员提供更多选择，本书对《建筑地基处理技术规范》JGJ 79—2012 及《复合地基技术规范》GB/T 50783—2012 未包括的其他地基处理技术及作者主持或参与开发的三种地基处理技术（劲芯水泥土桩复合地基、柱锤冲扩水泥粒料桩复合地基、柱锤夯实扩底灌注桩）进行了专门介绍。为了推动地基处理技术不断发展，本书还对各种常用地基

处理方法的最新发展和存在的不足进行了综述和介绍,供设计、施工及研究参考,但在工程实践中尚应严格遵守规范的有关规定。

本书突出了实用的特点,对有关理论未作过多探讨。为方便广大设计者阅读使用,本书对地基处理设计作了较详尽的介绍,编制了各工法的设计流程图,补充了设计、施工所需要的有关技术参数和经验数据。各章编制的简化计算图表也是本书的特色之一,在计算机日益普及的今天,利用这些图表进行初步设计和方案选择,简便直观,无疑也是一种不错的选择。本书各章节均增加了计算实例和工程实录,可供读者参考。

本书内容包括:总论、换填垫层法、机械压(夯)实法(重锤夯实、振动压密、小能量强夯、强夯、振冲加密、大面积填土压实)、预压法、复合地基加固法(包括复合地基基本理论、振冲桩法、砂石桩法、柱锤冲扩桩法、强夯置换碎石墩、生石灰桩、灰土(土)桩、水泥土搅拌桩、旋喷桩、夯实水泥土桩、刚性桩、多桩型复合地基)、其他地基处理方法(土工合成材料、注浆法、微型桩、桩网复合地基)、地基处理新技术(劲芯水泥土桩、柱锤冲扩水泥粒料桩、柱锤夯实扩底灌注桩)、地基处理检验与监测共八章二十八种地基处理方法。为了适应农村城镇化中、低层建筑的要求,书中保留了目前已应用不多的处理深度较浅的工法。

本书可供从事工程地基处理的设计、施工、检测及监理等技术人员使用,也可供从事工程勘察、建筑设计人员及大专院校有关专业师生以及公路、交通、水利等方面技术人员参考。

本书编写过程中,除引用了有关技术标准外,尚参考了有关专著和文献资料。重点之处作了标注,并附有参考文献及有关技术标准的目录,可供读者查阅。在此谨向原著作者表示感谢。本书中工程实录除作者参与设计的,其他均摘自公开发表的专著及文献资料,限于篇幅及为了方便初学者阅读,大多均进行了缩编改写,有关参数也近似按现行规范进行了标注,敬请原著作者谅解。

本书由王恩远、吴迈编著。在编著本书过程中,河北工业大学的邱峰、赵龙、许鹏、刘晓、侯伟明、邢旗等为本书的最后成稿作了大量的文字编辑工作,在此一并表示衷心的感谢。

目 录

第一章 总论	1
第一节 地基及基础的概念	1
第二节 地基土的分类及工程特性指标	2
第三节 地基基础设计原则	11
第四节 地基处理的对象及其特征	22
第五节 地基处理方案选择	38
第六节 地基处理设计基本要求	51
本章附录 地基承载力特征值 f_{ak} 参考用表	61
本章参考文献	63
第二章 换填垫层法	65
第一节 概述	65
第二节 设计	66
第三节 施工	87
第四节 质量检验及工程验收	90
第五节 工程实录	92
本章参考文献	98
第三章 机械压(夯)实法	99
第一节 重锤夯实法	99
第二节 振动压密法	101
第三节 小能量强夯法	102
第四节 强夯法	104
第五节 不加填料振冲加密法	120
第六节 大面积填土压实	121
第七节 工程实录	134
本章参考文献	142
第四章 预压法	143
第一节 概述	143
第二节 设计	151
第三节 施工	175
第四节 质量检验	189
第五节 工程实录	191

本章参考文献·····	204
第五章 复合地基加固法 ·····	206
第一节 复合地基基本理论·····	206
第二节 振冲桩复合地基·····	234
第三节 砂石桩复合地基·····	262
第四节 柱锤冲扩桩复合地基·····	289
第五节 强夯置换碎石墩复合地基·····	320
第六节 石灰桩复合地基·····	335
第七节 灰土(土)挤密桩复合地基·····	355
第八节 水泥土搅拌桩复合地基·····	378
第九节 高压喷射注浆法(旋喷桩复合地基)·····	420
第十节 夯实水泥土桩复合地基·····	440
第十一节 刚性桩复合地基·····	452
第十二节 多桩型复合地基·····	478
本章参考文献·····	495
第六章 其他地基处理方法简介 ·····	497
第一节 土工合成材料·····	497
第二节 注浆法·····	504
第三节 微型桩加固·····	522
第四节 桩网复合地基·····	532
第五节 基槽检验和地基的局部处理·····	540
本章参考文献·····	553
第七章 地基处理新技术 ·····	554
第一节 劲芯水泥土桩复合地基·····	554
第二节 柱锤冲扩水泥粒料桩复合地基·····	570
第三节 柱锤夯实扩底灌注桩·····	588
本章参考文献·····	610
第八章 地基处理检验与监测 ·····	611
第一节 概述·····	611
第二节 载荷试验·····	617
第三节 静力触探·····	628
第四节 动力触探·····	632
第五节 标准贯入·····	635
第六节 十字板剪切试验·····	637
第七节 现场原位取样试验·····	639
第八节 地基处理工程监测项目及仪器·····	641
本章参考文献·····	642

附录..... 643

附录 A 复合地基常用计算公式 643

附录 B 通用计算参数汇总 645

附录 C 散体材料桩及柔性桩复合地基设计流程图 647

附录 D 刚性桩、半刚性桩复合地基设计流程图 648

附录 E 复合地基简化计算通用图表 649

附录 F 混凝土刚性桩桩侧阻力 (q_s) 及桩端土阻力 (q_p) 参考值 658

附录 G 水泥土搅拌桩抽芯检测试验要点 660

附录 H 室内水泥土抗压强度试验要点 661

附录 J 水泥土搅拌桩 (湿法) 成桩工艺试验程序图 663

第一章 总 论

第一节 地基及基础的概念

一、地基及基础的定义

房屋建筑皆由上部结构与基础两大部分组成，通常以室外地面标高为划分标准，地面标高以上的部分为上部结构，地面标高以下的部分为基础。

基础是承受上部结构荷载，并将荷载传递到地基土层上的结构；地基为基础底面以下受力土层，其深度范围通常取压缩层深度或以土的附加应力与自重应力的比值，即 $\sigma_z/\sigma_{cz}=0.1\sim0.2$ 为界。依其层位及受力大小，可分为持力层及下卧层，如图 1-1 所示。

二、地基的分类

当基础直接建造在未经加固的天然土层上时，这种地基称为天然地基。当天然地基不能满足建（构）筑物对地基承载力和变形的要求时，可采用桩基础或对地基进行处理，经过加固处理形成的地基称为人工地基。人工地基依其性状大致可分为三类：均质地基、双层地基和复合地基，如图 1-2 所示。

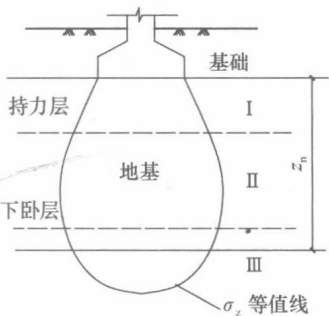


图 1-1 地基与基础示意
(I、II、III 为土层顺序号， z_n 为压缩层厚度)

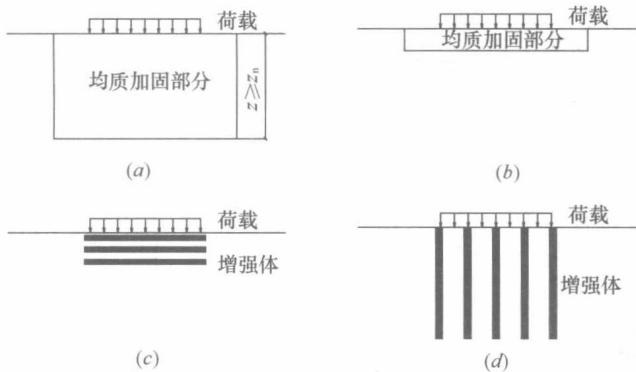


图 1-2 人工地基的分类

(a) 均质人工地基；(b) 双层地基；(c) 水平向增强体复合地基；(d) 竖向增强体复合地基

人工地基中的均质地基是指天然地基在地基处理过程中压缩层 (z_n) 范围内土体性质得到全面改良，加固区土体的物理力学性质基本上是相同的，所加固的区域，无论是平面范围与深度上都已满足一定的要求，如图 1-2 (a) 所示。例如天然地基采用预压法进行处

理。在预压排水固结过程中,加固区范围内地基土体孔隙比减小、抗剪强度提高、压缩性减小,加固区内土体性质比较均匀;且加固区域的平面范围与荷载作用面积相应的平面范围相比较及加固深度与压缩层厚度相比较均已满足一定要求,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。

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以及与压缩层厚度相比较小时,在荷载作用影响深度内,地基由两层性质相差较大的土体组成,双层地基示意图如图 1-2 (b)所示。采用换填垫层法或表层压(夯)实法处理形成的人工地基,通常可归属于双层地基。双层人工地基承载力和变形计算方法基本上与天然双层地基的计算方法相同。

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(天然地基土体或被改良的天然地基土体)和增强体两部分组成的人工地基。在复合地基中,基体和增强体共同承担荷载的作用。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 1-2 (c)和(d)所示。目前在建筑工程中,竖向增强体复合地基应用较广泛。为满足工程需要,竖向增强体也可斜向布置。

三、地基基础及地基处理的重要性

(一) 地基基础的重要性

地基和基础是建筑物的根本,又属于地下隐蔽工程,它的勘察、设计和施工质量直接关系到建筑物的安全。实践表明,建筑物事故的发生,很多与地基基础问题有关,而且地基基础事故一旦发生,补救十分困难。此外,基础工程费用与建筑物总造价的比例,视其复杂程度和设计、施工的合理与否,可以变动于百分之几到几十之间。因此,地基基础在建筑工程中的重要性是显而易见的。

(二) 地基处理的重要地位

与采用桩基础比较,地基处理更加方便灵活,且造价较低。随着地基处理设计水平的提高、施工工艺的改进和施工设备的更新,我国地基处理技术发展很快,对于各种软弱地基及特殊土地基,经过地基处理后,一般均能满足建造大型、重型或高层建筑的要求。由于地基处理的适用范围进一步扩大,地基处理项目的增多,用于地基处理的费用在工程建设投资中所占比重不断增大。因而,地基处理在工程建设中的作用日益突出。地基处理的设计和施工必须认真贯彻执行国家的技术经济政策,做到安全适用、技术先进、经济合理、确保质量、保护环境。

第二节 地基土的分类及工程特性指标

作为建筑地基的岩土,可分为岩石、碎石土、砂土、粉土、黏性土及人工填土等。

一、岩石按坚硬程度及完整程度划分

作为建筑物地基的岩石,除应确定岩石的地质名称外,还应按表 1-1~表 1-3 划分其坚硬程度、风化程度及完整程度。

岩石坚硬程度划分

表 1-1

类 别		饱和单轴抗压 强度标准值 f_{rk} (MPa)	定性鉴定	代表性岩石
硬 质 岩	坚硬岩	$f_{rk} > 60$	锤击声清脆，有回弹，振手，难击碎；基本无吸水反应	未风化～微风化的花岗岩、正长岩、闪长岩、辉绿岩、玄武岩、安山岩、片麻岩、石英岩、硅质砾岩、石英砂岩、硅质石灰岩等
	较硬岩	$60 \geq f_{rk} > 30$	锤击声较清脆，有轻微回弹，稍振手，较难击碎；有轻微吸水反应	1. 微风化的坚硬岩； 2. 未风化～微风化的大理岩、板岩、石灰岩、白云岩、钙质砂岩等
软 质 岩	较软岩	$30 \geq f_{rk} > 15$	锤击不清脆，无回弹，较易击碎；浸水后指甲可刻出印痕	1. 中风化～强风化的坚硬岩和较硬岩； 2 未风化～微风化的凝灰岩、千枚岩、砂质泥岩、泥灰岩等
	软岩	$15 \geq f_{rk} > 5$	锤击声哑，无回弹，有凹痕，易击碎；浸水后手可掰开	1. 强风化的坚硬岩和较硬岩； 2. 中风化～强风化的较软岩； 3. 未风化～微风化的泥质砂岩、泥岩页岩等
极软岩		$f_{rk} \leq 5$	锤击声哑，无回弹，有较深凹痕，手可捏碎；浸水后可捏成团	1. 全风化的各种岩石； 2. 各种半成岩

岩石风化程度划分

表 1-2

名 称	风 化 特 征
未风化	结构构造未变化，岩质新鲜
微风化	结构构造、矿物色泽基本未变，部分裂隙面有铁锰质渲染
弱风化（中等风化）	结构构造部分破坏，矿物色泽较明显变化，裂隙面出现风化矿物或存在风化夹层
强风化	结构构造大部分破坏，矿物色泽明显变化，长石、云母等多风化成次生矿物
全风化	结构构造全部破坏，矿物成分除石英外，大部分风化成土块

注：本表录自《工程岩体分级标准》GB 50218。

岩体完整程度划分

表 1-3

类 别	完整性指数	结构面组数	控制性结构面平均间距（m）	代表性结构类型
完 整	> 0.75	1~2	> 1.0	整状结构
较完整	$0.75 \sim 0.55$	2~3	$0.4 \sim 1.0$	块状结构
较破碎	$0.55 \sim 0.35$	> 3	$0.2 \sim 0.4$	镶嵌状结构
破 碎	$0.35 \sim 0.15$	> 3	< 0.2	碎裂状结构
极破碎	< 0.15	无序	—	散体状结构

注：完整性指数为岩体纵波波速与岩块纵波波速之比的二次方。选定岩体、岩块测定波速时应具有代表性。

二、碎石土分类及密实度

碎石土为粒径大于 2mm 的颗粒含量超过全重 50% 的土，具体分类见表 1-4。

碎石土的分类^[1] 表 1-4

土的名称	颗 粒 形 状	粒 组 含 量
漂石 块石	圆形及亚圆形为主 棱角形为主	粒径大于 200mm 的颗粒含量超过全重的 50%
卵石 碎石	圆形及亚圆形为主 棱角形为主	粒径大于 20mm 的颗粒含量超过全重的 50%
圆砾 角砾	圆形及亚圆形为主 棱角形为主	粒径大于 2mm 的颗粒含量超过全重的 50%

注：分类时应根据粒组含量栏从上到下以最先符合者确定。

碎石土的密实度^[1] 表 1-5

重型圆锥动力触 探锤击数 $N_{63.5}$	密实度	重型圆锥动力触 探锤击数 $N_{63.5}$	密实度
$N_{63.5} \leq 5$	松散	$10 < N_{63.5} \leq 20$	中密
$5 < N_{63.5} \leq 10$	稍密	$N_{63.5} > 20$	密实

- 注：1. 本表适用于平均粒径小于等于 50mm，且最大粒径不超过 100mm 的卵石、碎石、圆砾、角砾。对于平均粒径大于 50mm 或最大粒径大于 100mm 的碎石土，可按表 1-6 鉴别其密实度；
2. 表内 $N_{63.5}$ 为经综合修正后的平均值。

碎石土密实度野外鉴别方法 表 1-6

密实度	骨架颗粒含量和排列	可 挖 性	可 钻 性
密实	骨架颗粒含量大于总重的 70%，呈交错排列，连续接触	锹镐挖掘困难，用撬棍方能松动，井壁一般较稳定	钻进极困难，冲击钻探时，钻杆、吊锤跳动剧烈，孔壁较稳定
中密	骨架颗粒含量等于总重的 60%~70%，呈交错排列，大部分接触	锹镐可挖掘，井壁有掉块现象，从井壁取出大颗粒处，能保持颗粒凹面形状	钻进较困难，冲击钻探时，钻杆、吊锤跳动不剧烈，孔壁有坍塌现象
稍密	骨架颗粒含量等于总重的 55%~60%，排列混乱，大部分不接触	锹可以挖掘，井壁易坍塌，从井壁取出大颗粒后，砂土立即坍落	钻进较容易，冲击钻探时，钻杆稍有跳动，孔壁易坍塌
松散	骨架颗粒含量小于总重 55%，排列十分混乱，绝大部分不接触	锹易挖掘，井壁极易坍塌	钻进很容易，冲击钻探时，钻杆无跳动，孔壁极易坍塌

- 注：1. 骨架颗粒系指与表 1-4 相对应粒径的颗粒；
2. 碎石土的密实度应按表列各项要求综合确定。

三、砂土的分类及密实度

砂土为粒径大于 2mm 的颗粒含量不超过全重 50%、粒径大于 0.075mm 的颗粒超过全重 50% 的土，具体分类见表 1-7。

砂土的分类^[1]表 1-7

土的名称	粒组含量	土的名称	粒组含量
砾砂	粒径大于 2mm 的颗粒含量占全重的 25%~50%	细砂	粒径大于 0.075mm 的颗粒含量超过全重的 85%
粗砂	粒径大于 0.5mm 的颗粒含量超过全重的 50%		
中砂	粒径大于 0.25mm 的颗粒含量超过全重的 50%	粉砂	粒径大于 0.075mm 的颗粒含量超过全重的 50%

注：分类时应根据粒组含量栏从上到下以最先符合者确定。

砂土的密实度^[1]表 1-8

标准贯入试验锤击数 N	密实度	标准贯入试验锤击数 N	密实度
$N \leq 10$	松 散	$15 < N \leq 30$	中 密
$10 < N \leq 15$	稍 密	$N > 30$	密 实

注：当用静力触探探头阻力判定砂土的密实度时，可根据当地经验确定。

四、黏性土分类及状态指标

黏性土的分类^[1]表 1-9

塑性指数 I_p	土 的 名 称
$I_p > 17$	黏 土
$10 < I_p \leq 17$	粉质黏土

注：塑性指数由相应于 76g 圆锥体沉入土样中深度为 10mm 时测定的液限计算而得。

黏性土的状态^[1]表 1-10

液性指数 I_L	状 态	液性指数 I_L	状 态
$I_L \leq 0$	坚 硬	$0.75 < I_L \leq 1$	软 塑
$0 < I_L \leq 0.25$	硬 塑	$I_L > 1$	流 塑
$0.25 < I_L \leq 0.75$	可 塑		

注：当用静力触探探头阻力或标准贯入试验锤击数判定黏性土的状态时，可根据当地经验确定。

五、其他土的分类

其他土的分类表 1-11

名 称	说 明
粉 土	介于砂土与黏性土之间，塑性指数 $I_p \leq 10$ 且粒径大于 0.075mm 的粒径含量不超全重的 50% 的土
淤泥、淤泥质土	在静水或缓慢的流水环境中沉积，并经过生物化学作用形成，其天然含水量大于液限、天然孔隙比大于或等于 1.5 的黏性土为淤泥；
泥炭、泥炭质土	当天然含水量大于液限而天然孔隙比小于 1.5 但大于或等于 1.0 的黏性土或粉土为淤泥质土；含有大量未分解的腐殖质，有机质含量大于 60% 的土为泥炭；有机质含量大于等于 10% 且小于等于 60% 的土为泥炭质土

续表

名 称	说 明
红黏土和次生红黏土	红黏土为碳酸盐系的岩石经红化作用形成的高塑性黏土，其液限一般大于 50。红黏土经再搬运后仍保留其基本特征，其液限大于 45 的土为次生红黏土
素填土、压实填土、杂填土和冲填土	素填土为由碎石土、砂土、粉土、黏性土等组成的填土。经过压实或夯实的素填土为压实填土。杂填土为含有建筑垃圾、工业废料、生活垃圾等杂物的填土。冲填土为由水力冲填泥砂形成的填土
膨胀土	膨胀土为土中黏粒成分主要有亲水性矿物组成，同时具有显著的吸水膨胀和失水收缩特性，其自由膨胀率大于或等于 40% 的黏性土
湿陷性土	湿陷性土为浸水后产生附加沉降，其湿陷系数大于或等于 0.015 的土

六、土的基本物理性质指标

土的基本物理性质指标 表 1-12

指标名称	符号	单位	物理意义	表达式或计算式	附 注
密 度	ρ	g/cm ³	单位体积土的质量，又称质量密度	$\rho = \frac{m}{V}$	由试验方法（一般用环刀法）直接测定。经验值 1.6~2.0g/cm ³
重 度	γ	kN/m ³	单位体积土所受的重力，又称重力密度	$\gamma = \frac{W}{V}$ 或 $\gamma = \rho \cdot g$	由试验方法测定后计算求得。经验值 16~20kN/m ³
相对密度	d_s		土粒单位体积的质量与 4℃ 时蒸馏水的密度之比	$d_s = \frac{m_s}{V_s \cdot \rho_w}$	由试验方法（用比重瓶法）测定。 经验数值： 黏性土 2.72~2.75； 粉 土 2.70~2.71； 砂 土 2.65~2.69
干密度	ρ_d	g/cm ³	土的单位体积内颗粒的质量	$\rho_d = \frac{m_s}{V}$ 或 $\rho_d = \frac{\rho}{1+w}$	由试验方法测定后计算求得。经验值 1.3~1.8g/cm ³
干重度	γ_d	kN/m ³	土的单位体积内颗粒的重力	$r_d = \frac{W_s}{V}$ 或 $\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w}$	由试验方法直接测定。经验值 13~18kN/m ³
含水量	w	%	土中水的质量与颗粒质量之比	$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100$	由试验方法（烘干法）测定。经验数值 20~60%
饱和密度	ρ_{sat}	g/cm ³	土中孔隙完全被水充满时土的密度	$\rho_{sat} = \frac{m_s + V_v \cdot \rho_w}{V}$ 或 $\rho_{sat} = \frac{d_s + e}{1 + e} \cdot \rho_w$	经验值 1.8~2.3g/cm ³
饱和重度	γ_{sat}	kN/m ³	土中孔隙完全被水充满时土的重度	$\gamma_{sat} = \rho_{sat} \cdot g$ 或 $\gamma_{sat} = \frac{d_s + e}{1 + e} \cdot \gamma_w$	经验值 18~23kN/m ³

续表

指标名称	符号	单位	物理意义	表达式或计算式	附 注
有效重度	γ'	kN/m^3	在地下水位以下, 土体受到水的浮力作用时土的重度, 又称浮重度	$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w$ 或 $\gamma' = \frac{(d_s - 1)\gamma_w}{1 + e}$	经验值 $8 \sim 13 \text{kN/m}^3$
孔隙比	e		土中孔隙体积与土粒体积之比	$e = \frac{V_v}{V_s}$ 或 $e = \frac{d_s \gamma_w (1 + w)}{\gamma} - 1$	经验值: 黏性土、粉土 $0.4 \sim 1.2$; 砂土 $0.3 \sim 0.9$
孔隙率	n	%	土中孔隙体积与土的体积之比	$n = \frac{V_v}{V} \times 100$ 或 $n = \frac{e}{1 + e} \times 100\%$	经验值: 黏性土、粉土 $30 \sim 60\%$; 砂土 $25 \sim 45\%$
饱和度	S_r	%	土中水体积与孔隙体积之比	$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100$ 或 $S_r = \frac{w \cdot d_s}{e}$	经验值 $0 \sim 100\%$

注: 表中, W ——土的总重力 (量); W_s ——土的固体颗粒重力 (量); ρ_w ——蒸馏水的密度, 一般取 $\rho_w = 1 \text{g/cm}^3$; γ_w ——水的重度, 近似取 $\gamma_w = 10 \text{kN/m}^3$; g ——重力加速度, 取 $g = 10 \text{m/s}^2$, 其余符号意义见表。

七、土的力学性能指标

(一) 压缩系数

土的压缩性通常用压缩系数表示, 其值由原状土的压缩试验确定, 其公式如下:

$$a = 1000 \times \frac{e_1 - e_2}{p_2 - p_1} \tag{1-1}$$

式中 a ——压缩系数 (MPa^{-1});
 p_1 ——地基中某深度处土的自重应力 (kPa);
 p_2 ——地基中某深度处土的自重应力和附加应力之和 (kPa);
 e_1 、 e_2 ——相对于 p_1 、 p_2 时的孔隙比。

评价地基土压缩性时, 按 p_1 为 100kPa , p_2 为 200kPa , 相应的压缩系数值以 a_{1-2} 划分为低、中、高三种, 并按以下规定进行评价:

- 1. 当 $a_{1-2} < 0.1 \text{MPa}^{-1}$ 时, 为低压缩性土;
- 2. 当 $0.1 \text{MPa}^{-1} \leq a_{1-2} < 0.5 \text{MPa}^{-1}$ 时, 为中压缩性土;
- 3. 当 $a_{1-2} \geq 0.5 \text{MPa}^{-1}$ 时, 为高压缩性土。

(二) 压缩模量

在工程上, 也可用室内实验测定的压缩模量作为土的压缩性指标, 压缩模量可按下式计算:

$$E_s = \frac{1 + e_1}{a} \tag{1-2}$$

式中 E_s ——土的压缩模量 (MPa);
 a ——从土的自重应力至土的自重加附加应力段的压缩系数 (MPa^{-1});

e_1 ——自重应力 p_1 对应的孔隙比。

用压缩模量划分压缩性等级和评价土的压缩性见表 1-13。

地基土按 E_s 值划分压缩性等级的规定 表 1-13

室内压缩模量 E_s /MPa	压 缩 等 级
$E_s \leq 5$	高压缩性
$5 < E_s \leq 15$	中压缩性
$E_s > 15$	低压缩性

(三) 抗剪强度

土的抗剪强度是指土在外力作用下抵抗剪切滑动的极限强度，其测定方法有室内直剪、三轴剪切、原位直剪、十字板剪切等方法，它是评价地基承载力、边坡稳定性、计算土压力的重要指标。

1. 抗剪强度计算

土的抗剪强度一般按下式计算：

$$\tau_f = \sigma \cdot \tan\varphi + c \tag{1-3}$$

式中 τ_f ——土的抗剪强度 (kPa)；
 σ ——作用于剪切面上的法向应力 (kPa)；
 φ ——土的内摩擦角 ($^\circ$)，剪切试验法向应力与剪应力曲线的切线倾斜角；
 c ——土的黏聚力 (kPa)，剪切试验中土的法向应力为零时的抗剪强度，砂类土 $c=0$ 。

砂土的内摩擦角一般随其颗粒度变细而逐渐降低。砾砂、粗砂、中砂的 φ 值约为 $32^\circ \sim 40^\circ$ ；细砂、粉砂的 φ 值约为 $28^\circ \sim 36^\circ$ ；黏性土的抗剪强度指标变化范围较大。黏性土内摩擦角的 φ 变化范围大致为 $4^\circ \sim 30^\circ$ ；黏聚力 c 一般为 $10 \sim 50\text{kPa}$ ，坚硬黏土则更高。土的抗剪强度指标大小不仅与土的类别、测定方法有关，而且与土的排水固结条件有关，特别是黏性土。依试样的固结排水情况可分为：①不固结不排水剪切试验（快剪）；②固结不排水剪切试验（固结快剪）；③固结排水剪切试验（慢剪）。其中快剪指标（ φ_u 、 c_u ）最小，慢剪指标（ φ_d 、 c_d ）最大，工程应用时，应根据土体的固结排水情况选用。

2. 确定土的内摩擦角和黏聚力

采用直剪试验时，同一土样切取不少于 4 个土样进行不同垂直压力作用下的剪切试验后，用相同的比例尺在坐标纸上绘制抗剪强度 τ_f 与法向应力 σ 的相关直线，直线在 τ_f 轴上的截距即为土的黏聚力 c ，砂土的 $c=0$ ，直线的倾斜角即为土的内摩擦角，如图 1-3 所示。

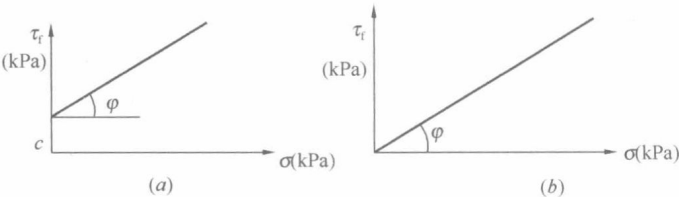


图 1-3 抗剪强度与法向应力关系曲线
(a) 黏性土；(b) 砂土

(四) 土的物理力学性质指标经验值

黏性土物理力学性质指标的经验数据 表 1-14

土 类		孔隙比 e	液性指数 I_L	含水量 w (%)	液限 w_L (%)	塑性指数 I_p	承载力 特征值 f_{ak} (kPa)	压缩模量 E_s (MPa)	黏聚力 c (kPa)	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
一般黏性土		0.55~1.0	0~1.0	15~30	25~45	10~20	100~450	4~15	10~50	15~22
新近代黏性土		0.7~1.2	0.25~1.2	24~36	30~45	10~18	80~140	2~7.5	10~20	7~15
淤泥或 淤泥质土	沿海	1~2.0	>1.0	36~70	30~65	10~25	40~100	1.0~5.0	5~15	4~10
	内陆						50~110	2.0~5.0		
	山区						30~80	1.0~6.0		
红黏土		1.0~1.9	0~0.4	30~50	50~90	>17	100~320	5.0~16.0	30~80	5~10

土的力学指标经验数据参考范围值 表 1-15

土 类		孔隙比 e	天然含 水量 w (%)	塑限含水量 w_p (%)	重 度 γ (kN/m ³)	黏聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ (°)	变形模量 E_0 (MPa)
砂 土	粗砂	0.4~0.5	15~18		20.5	0	42	46
		0.5~0.6	19~22		19.5	0	40	40
		0.6~0.7	23~25		19.0	0	38	33
	中砂	0.4~0.5	15~18		20.5	0	40	46
		0.5~0.6	19~22		19.5	0	38	40
		0.6~0.7	23~25		19.0	0	35	33
	细砂	0.4~0.5	15~18		20.5	0	38	37
		0.5~0.6	19~22		19.5	0	36	28
		0.6~0.7	23~25		19.0	0	32	24
	粉砂	0.4~0.5	15~18		20.5	5	36	14
		0.5~0.6	19~22		19.5	3	34	12
		0.6~0.7	23~25		19.0	2	28	10
粉 土		0.4~0.5	15~18	<9.4	21.0	6	30	18
		0.5~0.6	19~22		20.0	5	28	14
		0.6~0.7	23~25		19.5	2	27	11
		0.4~0.5	15~18	9.5~12.4	21.0	7	25	23
		0.5~0.6	19~22		20.0	5	24	16
		0.6~0.7	23~25		19.5	3	23	13
黏 性 土	粉质 黏土	0.4~0.5	15~18	12.5~15.4	21.0	25	24	45
		0.5~0.6	19~22		20.0	15	23	21
		0.7~0.8	26~29		19.0	5	21	12
		0.5~0.6	19~22	15.5~18.4	20.0	35	22	39
		0.7~0.8	26~29		19.0	10	20	15
		0.9~1.0	35~40		18.0	5	18	8
		0.6~0.7	23~25	18.5~22.4	19.5	40	20	33
		0.7~0.8	26~29		19.0	25	19	19
		0.9~1.0	35~40		18.0	10	17	9