

建筑工程分部分项施工手册

JIANZHU GONGCHENG

FENBU FENXIANG

SHIGONG SHOUCE

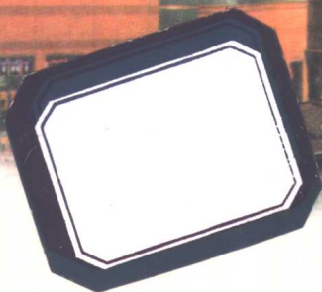
地基与基础工程

1

徐伟 苏宏阳 主编



DIJI YU JICHU GONGCHENG



中国计划出版社

建筑工程分部分项施工手册

(1)

地基与基础工程

主 编 徐 伟 苏宏阳
副主编 曾进伦 王广国

中 国 计 划 出 版 社
1999 北京

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑工程分部分项施工手册 (1): 地基与基础工程/徐伟, 苏宏阳主编. -北京: 中国计划出版社, 1999. 6

ISBN 7-80058-712-6

I. 建… II. ①徐… ②苏… III. ①建筑工程-工程施工-手册 ②地基-基础 (工程)-工程施工-手册 IV. TU74-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 22317 号

建筑工程分部分项施工手册

(1) 地基与基础工程

徐伟 苏宏阳 主编

中国计划出版社出版

(地址: 北京市西城区月坛北小街 2 号 3 号楼)

(邮政编码: 100837 电话: 68030048)

新华书店 北京发行所发行

河北省赵县印刷厂印刷

787×1092 毫米 1/16 48 $\frac{1}{4}$ 印张 1220 千字

1999 年 5 月第一版 1999 年 5 月第一次印刷

印数 1—5000 册

*

ISBN 7-80058-712-6/TU·104

定价: 92.00 元

序

改革开放以来,我国的社会主义建设事业蓬勃发展,建设规模日益宏大,大量现代化建筑的兴建促进了建筑施工领域新技术、新工艺的不断进步,也带来了相当多亟待总结和规范的技术与工艺问题。为了使国内众多建筑施工企业在进行施工组织 and 施工技术方案设计时能够更好地推广新技术,解决新问题,使工程施工在技术上更加先进,经济上更为合理,结构上也更为安全可靠,本书作者在各自长期积累的丰硕经验的基础上,编纂了这本工程实用型的施工手册,以满足当前建设第一线的迫切需要。

这本手册依据《建筑工程分项施工工艺标准》,根据我国最新的有关规范、规程,较为全面系统地介绍了建筑工程各个分部的施工理论知识,施工技术方案设计原则,以及施工技术和施工工艺方法,并十分注意总结近年来工程实践中所积累的经验教训,介绍国内各地许多新的科技成果与业绩,广泛应用的新技术、新材料、新设备、新工艺,可以作为第一线工程技术人员解决工程实际问题,应用新技术和新工艺的一本很好的工具用书。

这本手册以建筑施工中各分部分项的施工内容为主线,将全书分为四大部分,即:《地基与基础工程》、《主体工程》、《地面与屋面工程》以及《装饰工程》。全书约400万字,是一部内容较为全面、丰富,资料翔实,具有理论性、实用性和可操作性于一体的综合性系列专书。全书由同济大学、重庆建筑大学、哈尔滨建筑大学、中航勘察设计研究院、中建三局、中建六局、中建八局、青岛建工学院、上海市基础公司等数十位在建筑施工、科研、教学、设计领域工作多年的专家、学者与工程师们博采众长共同努力,编写而成。相信本书的出版能为我们建筑施工界的技术进步添砖加瓦,使广大同行相互学习、深受助益。谨以为序。

中国科学院院士



1999 春于上海同济大学

前 言

本手册为《建筑工程分部分项施工手册》的第1分册，内容包括：土的工程性质及分类、地基处理与加固技术、施工排水与降水、大开挖基坑设计与施工、深基坑支护结构设计、桩基础、深基础、浅基础、大体积混凝土施工、冬雨期施工、地下防水及基坑监测等12部分。

地基与基础工程是分部分项工程的基础，在建筑工程中占有极为重要的地位。这是因为地基基础造价要占到全部建筑造价的1/5，甚至1/3，施工期约占整个工程工期的1/2~1/3，它的施工质量将直接影响着建筑物的安全和使用寿命。虽然我国的施工技术和管理水平随着基本建设规模的扩大得到了很大提高，但工程实践中各类地基与基础工程的质量问题或工程事故亦不断增多。究其原因，主要是由于我国地域辽阔，地质、水文情况千变万化，使得地基与基础这门施工技术十分复杂；建筑施工队伍发展迅速，大量未受过正规训练的民工加入，影响整个队伍的素质。因此，为广大建筑施工人员，以及建筑设计人员，提供一本全面、系统地介绍地基与基础工程各方面知识、设计原则、施工技术和方法，以及有关的最新标准和规范，如《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120—99)等，以帮助正确解决现场施工的技术问题，这正是我们所期望的。

本手册在编写过程中，力求简明、实用、新颖，取材力图反映国内外最先进技术水平，重点介绍近年来各种新的科技成果和日益广泛采用的、行之有效的新技术、新材料、新工艺，参考图表丰富，并配有大量工程实例。同时，将工程实践中积累起来的经验教训加以总结，在手册内容中予以体现。虽然我们力求写好这本手册，但由于地基与基础工程实践性强、综合性大、社会性广，也限于我们的水平，加上时间仓促，书中缺点在所难免，恳切希望读者批评指正，以便再版时进一步修改、补充。

本手册在编写过程中，参阅了一些资料和书籍，并得到中国科学院院士、同济大学孙钧教授的支持，谨此表示衷心感谢！

本手册由徐伟、苏宏阳任主编，曾进伦、王广国任副主编。具体编写分工如下：第一章由董炳炎、张博文编写；第二章由苏宏阳、王广国、刘焕存编写；第三章由唐益群、刘焕存编写；第四章由赖允谨、陶鹤进编写；第五章由徐伟、王广国、袁国泉、夏明耀、夏冰、李惠强、曾进伦编写；第六章由王广国、李思明、金国芳、沈保汉编写；第七章由陆浩亮、曾进伦、李建林编写；第八章由袁国泉、白蓉编写；第九章由顾建明、龚利生编写；第十章由郦锁林、孙济生编写；第十一章由郦锁林、宁仁岐编写；第十二章由李惠强、王聿、苗兴城编写；全书由苏宏阳统稿并整理。

目 录

第一章 土的工程性质及分类	(1)	四、质量控制与检验	(69)
第一节 土的工程性质	(1)	第五节 挤密桩法	(71)
一、土的三相组成	(1)	一、挤密桩法设计	(72)
二、土的物理状态及特征指标	(2)	二、挤密桩法施工及机械设备	(73)
三、土的渗透性	(4)	三、质量控制与检验	(76)
四、土的流变性	(7)	第六节 砂石桩法	(77)
五、土的变性特性	(8)	一、砂石桩法设计	(78)
六、土的强度特性	(13)	二、砂石桩法施工及机械设备	(81)
第二节 地基土的分类及性质	(15)	三、质量控制与检验	(82)
一、碎石土分类	(15)	第七节 深层搅拌法	(83)
二、砂土分类	(16)	一、深层搅拌法设计	(84)
三、粉土分类	(16)	二、深层搅拌法施工机械设备	(86)
四、粘性土分类	(17)	三、深层搅拌法施工	(89)
五、填土分类	(17)	四、质量控制与检验	(91)
六、土的鉴别方法	(17)	第八节 高压喷射注浆法	(92)
七、各类土的有关物理力学性质指标		一、高压喷射注浆法设计	(94)
参考值	(19)	二、高压喷射注浆法施工机械设备	(97)
八、土的边坡容许坡度值	(26)	三、高压喷射注浆法施工	(104)
九、建筑物地基容许变形值	(26)	四、质量控制与检验	(109)
第三节 地基承载力的确定	(27)	第九节 托换法	(110)
一、确定地基承载力的原则	(27)	一、托换法分类	(112)
二、确定地基承载力的方法	(27)	二、桩式托换法施工	(116)
第二章 地基处理方法与加固技术	(35)	三、灌浆托换法施工	(121)
第一节 换填法	(35)	四、基础加固法施工	(125)
一、换填垫层材料选择	(35)	第三章 施工排水与降水	(127)
二、垫层设计	(36)	第一节 集水明排	(127)
三、垫层施工	(38)	一、排水沟与集水井的设置	(127)
四、质量控制与检验	(40)	二、抽水设备与选用	(128)
第二节 预压法	(44)	第二节 人工降低地下水位	(130)
一、预压法设计	(45)	一、降水原理	(131)
二、预压法施工及施工机械	(48)	二、地下水的不良作用及防沉措施	(132)
三、质量控制与检验	(53)	三、井点降水	(136)
第三节 强夯法	(54)	四、井点降水计算	(151)
一、强夯法设计	(54)	五、井点管滤网和填砂的选择	(158)
二、强夯法施工及机械设备	(57)	六、井点降水常见问题及处理对策	(161)
三、质量控制与检验	(60)	七、工程实例	(164)
第四节 振冲法	(61)	第四章 大开挖基坑设计与施工	(172)
一、振冲法设计	(62)	第一节 概述	(172)
二、振冲法施工机械设备	(65)	第二节 地质勘察和环境调查	(173)
三、振冲法施工	(66)	一、地质勘察	(173)

二、环境调查	(173)	第六节 土钉墙支护结构设计与施工	(245)
第三节 大开挖基坑施工的边坡稳定性		一、适用范围和特点	(245)
计算	(174)	二、加固机理	(246)
一、边坡失稳的破坏形式和原因	(174)	三、土钉墙支护结构设计计算	(247)
二、基坑边坡稳定性计算	(174)	四、土钉墙支护结构施工	(249)
第四节 大开挖基坑边坡失稳的		五、质量检测	(252)
防止措施	(185)	六、工程实例	(252)
一、土方开挖注意事项	(185)	第七节 SMW 工法设计与施工	(257)
二、基坑边坡失稳的防止措施	(185)	一、SMW 工法挡土墙的设计	(257)
第五节 基坑开挖施工	(186)	二、SMW 工法挡土墙施工	(262)
一、机械挖土	(186)	三、工程实例	(263)
二、土方运输方法	(194)	第八节 内支撑结构设计	(267)
第五章 深基坑支护结构设计		一、内支撑结构概述	(267)
与施工	(195)	二、内支撑结构内力计算	(268)
第一节 深基坑支护结构概述	(195)	三、内支撑结构施工	(272)
一、基坑工程概述	(195)	四、内支撑适用范围	(277)
二、支护结构的作用	(196)	五、工程实例	(278)
三、支护结构类型	(196)	第九节 土层锚杆设计与施工	(280)
四、支护结构选择	(200)	一、土层锚杆类型与构造	(281)
第二节 深基坑支护结构设计	(201)	二、土层锚杆作用原理与设计	(282)
一、设计原则与设计步骤	(201)	三、土层锚杆施工	(289)
二、支护结构荷载计算	(203)	四、土层锚杆施工机械设备	(293)
三、支护结构内力计算方法	(206)	五、工程实例	(295)
四、基坑稳定性验算	(206)	第六章 桩基础	(298)
第三节 钢板桩支护结构设计与施工	(209)	第一节 桩的分类与选择	(298)
一、常用钢板桩的种类及规格	(209)	一、桩的分类	(299)
二、钢板桩挡土支护结构设计	(217)	二、桩的选型与布置	(302)
三、钢板桩挡土支护结构的施工	(221)	三、施工前的调查与准备	(306)
四、钢板桩支撑施工	(226)	第二节 预制桩	(308)
五、钢板桩施工常见问题与处理		一、预制桩施工概述	(308)
对策	(228)	二、钢筋混凝土预制桩的类型与制作	
第四节 钻孔灌注桩支护结构设计	(228)	工艺	(310)
一、钻孔灌注桩支护结构类型及适用		三、钢桩类型与制作工艺	(314)
条件	(228)	四、预制桩施工方法及选择	(318)
二、钻孔灌注桩支护结构设计	(230)	五、预制桩施工机械设备	(321)
三、钻孔灌注桩支护结构施工	(231)	六、预制桩施工准备及桩的沉设	(352)
四、双排灌注桩支护结构	(231)	七、施工质量控制与检验	(361)
五、工程实例	(232)	八、施工中预制桩承载力确定方法	(363)
第五节 水泥土墙支护结构设计与		九、预制桩施工中的问题与	
施工	(239)	处理对策	(364)
一、水泥土墙支护结构设计	(239)	十、工程实例	(367)
二、水泥土墙支护结构施工	(242)	第三节 灌注桩	(369)
三、工程实例	(243)	一、灌注桩施工概述	(369)

二、灌注桩选型与实用范围	(374)	三、毛石基础施工	(570)
三、泥浆护壁成孔灌注桩施工及施工 机械设备	(375)	四、砖基础施工	(574)
四、沉管灌注桩和内夯灌注桩施工及 施工机械设备	(392)	五、混凝土和毛石混凝土基础 施工	(577)
五、干作业成孔灌注桩施工及施工机 械设备	(402)	第二节 钢筋混凝土基础施工	(578)
六、灌注桩质量控制与检验	(410)	一、概述	(578)
七、灌注桩承载力检测方法	(413)	二、钢筋混凝土独立基础施工	(581)
八、施工中的问题与处理对策	(424)	三、钢筋混凝土条形基础施工	(584)
九、工程实例	(430)	四、片筏式钢筋混凝土基础施工	(586)
第四节 钢管桩	(434)	五、箱形基础施工	(587)
一、钢管桩的型式及规格	(434)	六、墩基础施工	(590)
二、钢管桩施工工艺	(440)	第九章 大体积混凝土施工	(598)
三、钢管桩打桩设备	(444)	第一节 大体积混凝土的特点	(598)
第七章 深基础	(446)	第二节 大体积混凝土的裂缝及控制	(598)
第一节 地下连续墙设计与施工	(446)	一、大体积混凝土的裂缝	(598)
一、地下连续墙的分类与施工方法 简述	(447)	二、大体积混凝土裂缝的控制	(599)
二、地下连续墙设计	(449)	第三节 大体积混凝土设计计算	(600)
三、地下连续墙施工	(466)	一、温度、收缩应力计算	(600)
四、地下连续墙槽段间的接头处理	(481)	二、伸缩缝间距计算	(604)
五、挖槽机械	(487)	三、混凝土养护材料厚度计算	(606)
六、施工中常见问题与处理对策	(495)	第四节 大体积混凝土的施工	(607)
七、工程实例	(498)	一、施工准备	(607)
第二节 沉井设计与施工	(504)	二、施工工艺	(608)
一、沉井分类与构造	(504)	三、施工中常见问题与处理对策	(610)
二、沉井设计	(509)	四、工程实例	(611)
三、沉井施工	(530)	第十章 冬雨期施工	(621)
四、质量控制与检验	(547)	第一节 雨期施工	(621)
五、施工常见问题与处理对策	(549)	一、概述	(621)
第三节 逆作法施工	(552)	二、雨期施工准备	(622)
一、逆作法的工艺原理	(552)	三、雨期施工方法及技术措施	(623)
二、逆作方式的选择	(553)	第二节 冬期施工	(623)
三、逆作法施工的优缺点	(553)	一、概述	(623)
四、半逆作法施工	(554)	二、砌筑工程冬期施工	(625)
五、全逆作法施工	(555)	三、钢筋工程冬期施工	(629)
六、逆作法施工技术	(555)	四、混凝土工程冬期施工	(639)
七、工程实例	(561)	五、施工中常见问题与处理对策	(649)
第八章 浅基础	(567)	第三节 冬雨期施工安全技术	(651)
第一节 刚性基础施工	(567)	一、冬期施工安全技术	(651)
一、概述	(567)	二、雨期施工安全技术	(651)
二、灰土和三合土基础施工	(569)	第十一章 地下防水	(652)
		第一节 概述	(652)
		一、地下防水的类型及应用	(652)

二、地下防水方案	(653)	三、监测方案的主要内容	(708)
第二节 防水混凝土防水施工	(654)	四、编制监测方案的基础资料	(708)
一、概述	(654)	第三节 监测的组织与实施	(709)
二、材料	(656)	一、监测的前期准备工作	(709)
三、施工缝及处理方法	(659)	二、监测实施阶段	(710)
四、防水混凝土的配制及施工	(662)	第四节 监测资料的整理与分析	(714)
五、质量控制与检验	(668)	一、监测资料的种类	(714)
六、施工中常见问题与处理对策	(669)	二、资料整理要求	(715)
第三节 附加防水层的地下防水施工	(672)	第五节 监测仪器设备	(717)
一、防水砂浆防水层施工	(672)	第六节 常用监测项目及其方法	(723)
二、防水涂料防水层施工	(679)	一、沉降监测	(723)
三、卷材防水层施工	(684)	二、水平位移监测	(724)
四、施工中常见问题与处理对策	(692)	三、支护结构变形监测	(726)
第四节 工程实例	(696)	四、支护结构内力监测	(733)
一、重庆世界贸易中心地下防水设计 与施工	(696)	五、地下水土压力和变形的监测	(737)
二、卡尔登花园辅楼地下防水	(702)	六、建筑物变形监测	(746)
三、京皇国际大厦地下防水	(704)	七、地下管线变形监测	(753)
第十二章 基坑监测	(707)	第七节 工程实例	(754)
第一节 概述	(707)	一、工程概况	(755)
第二节 监测方案的编制	(707)	二、监测工作布置	(757)
一、监测方案的设计原则	(707)	三、监测成果分析	(758)
二、编制监测方案的步骤	(708)	参考文献	(764)

第一章 土的工程性质及分类

第一节 土的工程性质

一、土的三相组成

一般情况下，土是一种松散物质，由颗粒（固相）、水（液相）和空气（气相）三部分组成，这三部分之间的比例关系随着周围条件的变化而变化，三者相互间比例不同，反映出土的不同物理状态，如干燥、稍湿或很湿，密实、稍密或松散。这些指标是最基本的物理性质指标，对于评价土的工程性质，进行土的工程分类具有重要意义。

土的三相物质是混合分布的，为研究阐述的方便，一般用三相图（图 1-1）表示，把土的固体颗粒、水、空气各自划分开来，其中最常用的指标是重度（天然重度）、含水量、密度（相对密度），这三者是需要由试验直接测定的物理量，由此引伸和换算出其他 6 个常见的物理性质指标，即干重度、饱和重度、浮重度、孔隙比、孔隙率及饱和度等。

土的三相物理指标及常用换算公式见表 1-1。

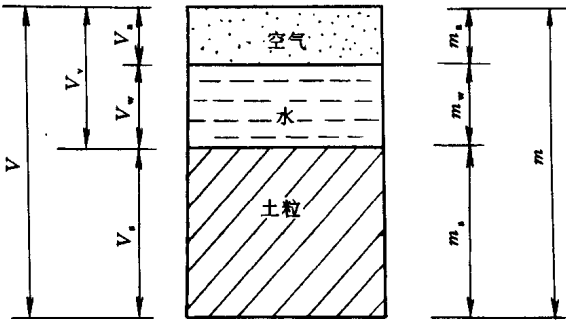


图 1-1 土的三相组成示意图

m —土的总质量； m_w —土中水的质量； m_s —土中颗粒质量； V —土的总体积； V_w —土中水所占的体积； V_a —土中空气的体积； V_s —土中颗粒的体积； V_v —土中孔隙的体积

土的三相物理指标及常用换算公式

表 1-1

指标名称	符 号	单 位	物 理 意 义	表 达 式	常用换算公式	附 注
相对密度	G_s	—	土粒质量与同体积 4℃ 时水的质量之比	$G_s = \frac{m_s}{V_s} \rho_w$	$G_s = \frac{e S_r}{W} = \frac{(1+e) \rho_d}{\rho_w}$	由试验测定后计算求得，一般为 2.65~2.76
天然密度	ρ	g/cm^3	土在天然状态下单位体积的质量	$\rho = \frac{m}{V}$	$\rho = \rho_d (1+W)$	一般用环刀法测定。一般粘性土为 1.8~2.0 g/cm^3 ；砂土为 1.6~2.0 g/cm^3
干重度	ρ_d	g/cm^3	单位体积土中固体颗粒的质量	$\rho_d = \frac{m_s}{V}$	$\rho_d = \frac{\rho}{1+W}$ $\rho_d = n S_r / W$	由计算求得。一般土的干密度：1.3~1.8 g/cm^3
重 度	γ	kN/m^3	单位体积土所受的重力	$\gamma = \frac{m}{V} \cdot g = \rho g$	$\gamma = \frac{G_s (1+W)}{1+e} \gamma_w$	由试验测定后计算求得。一般为 16~20 kN/m^3

续表

指标名称	符 号	单 位	物 理 意 义	表 达 式	常用换算公式	附 注
天然含水量	w	%	土中水的质量与土颗粒质量之比	$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\%$	$w = \frac{\rho}{\rho_d} - 1 = \frac{S_r}{G_s}$	由试验直接测定 (一般用烘干法测定), 取土要求保护天然湿度。土的含水量一般由 20%~60%
孔隙比	e	-	土中孔隙的体积与土颗粒体积之比	$e = \frac{V_v}{V_s}$	$e = \frac{G_s \cdot \rho_w}{\rho_d} - 1$ $e = \frac{n}{1-n}$	由计算求得。一般粘性土、粉土 0.4~1.2, 砂土 0.3~0.9
饱和度	S_r	%	土中水的体积与孔隙体积之比	$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\%$	$S_r = \frac{W \rho_d}{n}$ $S_r = \frac{\rho - \rho_d}{n}$	由计算求得。孔隙全部为水所充填, $S_r = 100\%$ 的土称饱和土; $S_r \geq 80\%$ 的土可认为是饱和的
饱和重度	γ_{sat}	kN/m ³	土孔隙中充满水时的重度	$\gamma_{sat} = \frac{m_s + V_r \gamma_w}{V}$	$\gamma_{sat} = \rho_d + \frac{e}{1+e}$	由计算求得。一般土的饱和密度: 18~23kN/m ³
孔隙率	n	%	土中孔隙体积与土粒体积之比	$n = \frac{V_r}{V} \times 100\%$	$n = \frac{e}{1+e}$	一般粘性土: 30%~60%; 砂土: 25%~45%
有效重度 (浮重度)	γ'	kN/m ³	地下水位以下土的重度	$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$		一般水的重度 $\gamma_w = 10\text{kN/m}^3$, $\gamma' = 8 \sim 13\text{kN/m}^3$

二、土的物理状态及特征指标

(一) 粘性土的可塑性

土的塑性是粘性土的分类依据, 与粘土矿物表面和水溶液相互作用的一些物理化学作用有关。

土的塑性是由液限 w_L 与塑限 w_P 这两个界限含水量来定义的。当土的天然含水量介于液限、塑限之间时, 土具有塑性, 在外力作用下, 可以塑成任何形状, 并不发生裂缝, 解除外力后, 土仍保持已有的变形而不恢复原状。土的天然含水量大于液限或小于塑限时, 土则呈液体状态或呈现具有脆性的固体特征。

塑性指数 I_P 与液性指数 I_L 也是土的重要状态指标, 它们不仅表示粘性土中随着其含水量变化所导致土体的不同软硬状态和稠度性状, 而且还可定性地判断土体中粘粒含量的多寡及其对粘性土可塑性状 (也是对土的工程性能) 的影响。如根据液性指数的不同可把粘性土区分为坚硬、硬塑、可塑、软塑以及流塑等五种稠度状态, 根据塑性指数可以区分粘土、粉质粘土以至粉土, 这将有助于对现场土体的工程性能作出直观而有效的定性判断。

粘性土的可塑性指标, 见表 1-2。

粘性土的可塑性指标 表 1-2

指标名称	符 号	单 位	物 理 意 义	表 达 式	附 注
塑 限	w_p	%	土由固态变到塑性状态时的分界含水量		由试验直接测定(通常用“搓条法”进行测定)
液 限	w_L	%	土由塑性状态变到流动状态时的分界含水量		由试验直接测定(通常用锤式液限仪来测定)
塑性指数	I_p		液限与塑限之差	$I_p = w_L - w_p$	由计算求得。是进行粘土分类的重要指标
液性指数	I_L		土的天然含水量与塑限之差对塑性指数之比	$I_L = \frac{w - w_p}{I_p}$	由计算求得。是判别粘性土软硬程度的指标
含 水 比	α_w		土的天然含水量与液限的比值	$\alpha_w = \frac{w}{w_L}$	由计算求得

注：塑限现场简易测定方法：在土中逐渐加水，至能用手在毛玻璃板上搓成土条，当土条搓到 3mm 时，恰好断裂，此时土条的含水量即为塑限。

(二) 砂土的密实度与颗粒组成

1. 砂土的密实度

砂土土粒间的联结是极微弱的，土粒排列的紧密程度对砂土的工程性质有重要影响，砂土、粉土的松密程度用砂土、粉土的密实度来定义和表达。以前曾用相对密度 D_r 和孔隙比 e 来区分，但由于难以采取砂土原状土样，又鉴于孔隙比最大值 e_{max} 与最小值 e_{min} 的测定方法尚无统一标准，因此砂土的 D_r 的测定误差是很大的。新的国家标准已改用标准贯入击数 N 来划分砂土为密实、中密、稍密和松散及用孔隙比 e 来划分粉土为密实、中密和稍密的不同状态。

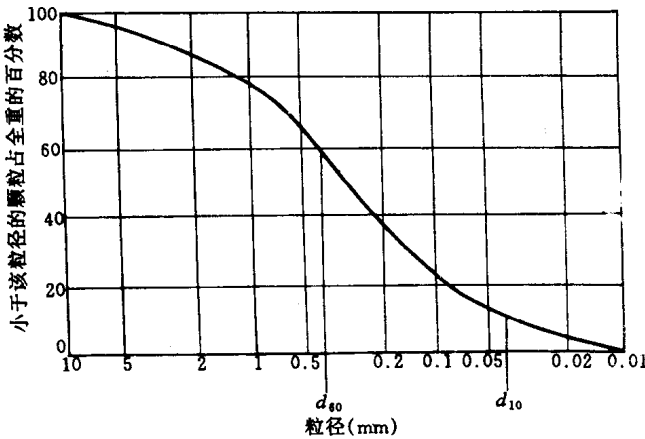


图 1-2 颗粒级配曲线

2. 颗粒组成

土按粒径大小分组所占的重量百分数，可以绘制如图 1-2 所示的颗粒级配累积曲线。从颗粒分配曲线求得小于该粒径的颗粒占土总重的 60% 称为界限粒径 (d_{60})，小于该粒径的颗粒占土总量的 10% 称为有效粒径 (d_{10})。

土的级配是否良好，可用不均匀系数 C_u 来衡量：

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \tag{1-1}$$

土的不均匀系数愈大，表明土的粒径成分愈不均匀。工程上把 $C_u < 5$ 的土看作级配均匀； $C_u > 10$ 的土看作不均匀的，即级配良好的。

判断土粒组合性状的优劣,见表 1-3。

从累计曲线形态、不均匀系数 C_u 等判断土粒组合性状的优劣

表 1-3

C_u	级配曲线形态	d_{80} 与 d_{10} 的坐标差距	土粒均匀性	级配优劣	力学性能 (定性)
大	平缓	大	不均匀	良好	好, 密实, 强度大, 压缩性低, 透水性小
小	陡峭	小	均匀	不良	差, 不密实, 强度小, 压缩性高, 透水性大

三、土的渗透性

(一) 土的渗透定律

土的三相物质组成中含有液态的水, 土中孔隙的存在给土孔隙中的水体 (主要是重力水) 提供了迁移流动 (渗流) 的可能条件, 土的渗透性是指水流通过土中孔隙的能力。

土的渗流在工程实践中有着现实意义, 它是促使土的物理、力学性质发生变化的影响因素, 它也影响了岩土工程设计与施工的安全稳定, 如地下工程深基坑开挖施工排水、隔水或降水的考虑及其措施, 建(构)筑物地基的渗流稳定和防护措施等。

水在土中的渗流运动有层流和紊流两种形式。渗流速度远较地表水为慢, 除在宽大裂隙或空洞中具有较大速度外, 一般均以层流为主要运动形式。土中水的渗流规律可以认为是符合层流渗透定律, 这个定律是法国学者达西 (H·Darcy) 根据砂土的实验结果得到的, 也称达西定律, 它的基本表达式为:

$$Q = FkI \quad (1-2)$$

或

$$v = kI \quad (1-3)$$

式中 Q ——渗透流量 (m^3/d 或 cm^3/s) 即单位时间内流过土截面积 F 的流量;

v ——渗流速度 (m/d 或 cm/s);

F ——水流过土的横截面面积 (m^2 或 cm^2);

k ——渗透系数 (m/d 或 cm/s), 由试验测定;

I ——水力梯度, 代表渗透流程中单位长度的水头差值, 即

$$I = \frac{\Delta H}{L} \quad (1-4)$$

式中 ΔH ——距离为 L 的断面间的水头差值 (cm);

L ——渗透长度 (cm)。

达西定律表明, 水在土中的渗透速度与水力梯度成正比。应该指出, 由于孔隙水的渗流不是通过土的整个截面, 而仅是通过该截面内土颗粒间的孔隙, 因此, 土中孔隙水的实际渗流速度 v_0 要比公式 (1-3) 的计算平均流速 v 要大, 它们间的关系为:

$$v_0 = \frac{v}{n} \quad (1-5)$$

式中 n ——土的孔隙率。

由于达西定律只适用于层流的情况, 故一般只适用于中砂、细砂、粉砂等。对粗砂、砾石、卵石等粗颗粒土就不适用, 因为这时土的孔隙大, 水的渗流速度也大, 已不是层流而是紊流, 这时则服从于紊流运动的定律, 即水的渗透速度与水力梯度的平方根成正比。此即哲才定律, 其表达式如下:

$$v = kI^{\frac{1}{2}} \quad (1-6)$$

在粘土中,土颗粒周围存在着结合水,结合水因受到分子引力作用而呈现粘滞性,因此,粘土中自由水的渗流受到结合水的粘滞作用产生很大阻力,只有克服结合水的抗剪强度后才能开始渗流。我们把克服此抗剪强度所需要的水头梯度,称之为粘土的起始水力梯度。这样,在粘土中,应按下式修正后的达西定律来计算水的渗流速度:

$$v = k(I - I_0) \quad (1-7)$$

砂土与粘土的渗透规律绘于图 1-3 中,直线 a 表示砂土的 $v-I$ 关系,它是通过原点 O 的一条直线。粘土的 $v-I$ 关系是曲线 b (图中虚线所示), d 点是粘土的起始水力梯度,当土中水头梯度超过此值后水才开始渗流,一般常用折线 oef 代替曲线 b ,即认为 e 点是粘土的起始水头梯度 I_0 。

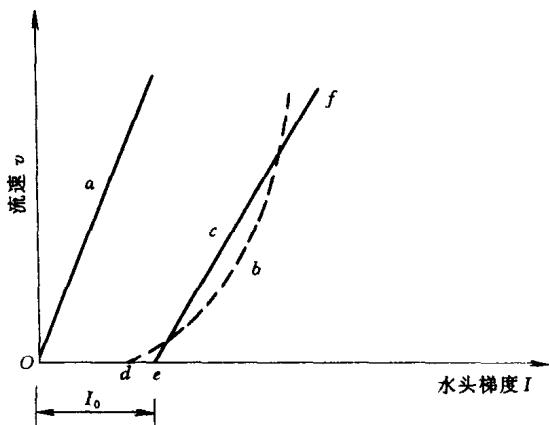


图 1-3 砂土和粘土的渗透规律

(二) 土的渗透系数

渗流计算和基坑人工降低地下水位时,渗透多数是不可少的参数。

可用下列方法确定土的渗透系数。

1. 根据粒度分析资料计算渗透系数

土的组成颗粒愈大,孔隙率也愈大,所以,随着土颗粒的增大,土的透水性增强,渗透系数也增大;反之则减小。

(1) 哈赞根据对各种砂进行的实验,确定渗透系数与土颗粒的有效粒径间的关系如下:

$$k = Cd_{10}^2(0.7 + 0.03t) \quad (1-8)$$

式中 k ——渗透系数 (m/d 或 cm/s);

d_{10} ——颗粒的有效粒径;

t ——渗透水的温度 ($^{\circ}\text{C}$);

C ——经验系数,视砂的均匀性与孔隙度而定,粘土质砂为 500~700,纯砂为 700~1000。

哈赞公式适用于粒径为 0.1~3mm, 且不均匀系数不超过 5 的砂。

(2) 斯利哈吉尔除考虑有效直径外,还考虑了土的孔隙度和水的粘滞性的影响,其式如下:

$$k = Ad_{10}^2 m \frac{1}{\mu} \quad (1-9)$$

式中 A ——与渗透系数单位有关的系数。当 k 的单位为 m/d 时, $A=88.3$;

m ——与孔隙度有关的系数;

μ ——与水的温度有关的粘滞性系数。

斯利哈吉尔公式适用于较为等粒的砂。

(3) 克留盖尔对不等粒的和细粒的砂,无结构的粘土,确定如下计算公式:

$$k = 1.44 \times 10^6 \frac{n}{W^2} \quad (1-10)$$

式中 k ——渗透系数 (m/d);

n ——孔隙度;

W —— 1cm^3 土中全部颗粒的表面积 (cm^2)。

2. 软土渗透系数的计算

对于透水性很低的软土,可通过固结试验测定固结系数 C_v 和体积压缩系数 m_v (或 a 与 e) 计算:

$$k = \frac{C_v \rho_w a}{1 + e} = \frac{C_v \rho_w}{m_v} \quad (1-11)$$

3. 在野外用试验方法测定渗透系数

在野外天然条件下测定土的渗透系数是最准确的方法,在非饱水土层内,可以采用渗水试验的方法进行,而在饱水土层内,则多采用抽水试验的方法进行。

(1) 渗水试验

在地表掘试坑,挖至需要进行试验的土层,在坑底再掘一平底方形或圆形小坑,边长 $35 \sim 40\text{cm}$,坑深 10cm 。小坑底铺以 2cm 厚的小砾石,以防坑底在注水时受到冲刷。注水入小坑,保持水位固定,水层厚 $3 \sim 4\text{cm}$ 。通过测定时间和水量的消耗,可以确定单位时间渗入的水量 Q ,小坑的面积 F 可以量出,这样可以计算出渗透速度。

当试验时间较长,水渗入地下相当深时,小坑中水层厚度 Z 与渗透深度 h 之和与渗透深度 h 很接近,即水头梯度 I 接近于 1,此时渗透系数 k 约等于渗透速度。

(2) 抽水试验

在试验现场沉入 1 根抽水井管,若井管穿过饱水土层,达到其下的隔水层,这种情况称为完整井,如图 1-4 所示。裘布依公式求得渗透系数 k 值为:

$$k = \frac{Q \ln \frac{R}{r}}{\pi(H^2 - h^2)} \quad (1-12a)$$

$$\text{或} \quad k = \frac{0.733 Q \lg \frac{R}{r}}{H^2 - h^2} \quad (1-12b)$$

式中 Q ——渗透流量 (m^3/d 或 cm^3/s);

R ——抽水影响半径 (m);

r ——抽水井的半径 (m);

H ——含水层厚度 (m);

h ——井孔中水的厚度或井中的动水位 (m)。

表 1-4 列出各类土 k 值数量级范围,可供参考。

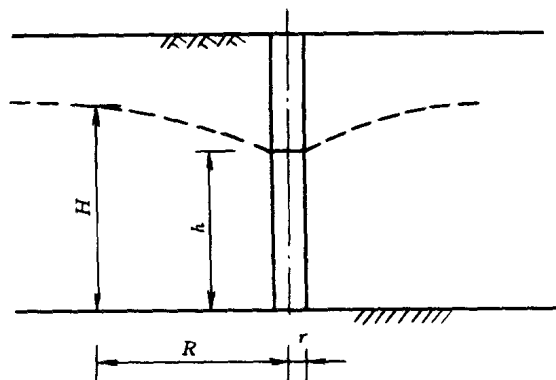


图 1-4 潜水完整井抽水试验示意图

渗透系数 k 的数量级范围

表 1-4

土 类	砾 石	砾 砂	粗 砂	中 砂	细 砂	粉 砂	粉 土	粉质粘土	粘 土
k 值范围 (cm/s)	$>10^{-1}$	10^{-1}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-3}	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	$10^{-5} \sim 10^{-7}$	$<10^{-7}$

几种土的渗透系数参考值见表 1-5。

土的渗透系数 表 1-5

土 的 名 称	渗 透 系 数 k		土 的 名 称	渗 透 系 数 k	
	m/d	cm/s		m/d	cm/s
粘 土	<0.005	< 6×10^{-6}	粗 砂	20~50	$2 \times 10^{-2} \sim 6 \times 10^{-2}$
粉质粘土	0.005~0.1	$6 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$	均质粗砂	60~75	$7 \times 10^{-2} \sim 3 \times 10^{-2}$
粉 土	0.1~0.5	$1 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$	圆 砾	50~100	$6 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-1}$
黄 土	0.25~0.5	$3 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$	卵 石	100~500	$1 \times 10^{-1} \sim 6 \times 10^{-1}$
粉 砂	0.5~1.0	$6 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$	无充填物卵石	500~1000	$6 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10$
细 砂	1.0~5	$1 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-3}$	稍有裂隙岩石	20~60	$2 \times 10^{-2} \sim 7 \times 10^{-2}$
中 砂	5~20	$6 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-2}$	裂隙多的岩石	>60	> 7×10^{-2}
均质中砂	35~50	$4 \times 10^{-2} \sim 6 \times 10^{-2}$			

四、土的流变性

流变性是粘性土和淤泥质粘性土的重要工程性质，它对于估算地基的长期稳定、土坡的深层稳定、挡墙和地下结构土压力变化以及次时间效应引起地基过量的沉降有着重要意义。

土的流变性一般包括以下几个方面：

(一) 蠕变特性

所谓蠕变性是指粘性土在某种大小不变的荷载作用下，应变 ϵ 随时间 t 而逐渐增长的特性。图 1-5 是具有蠕变性的土样在不同的恒值剪应力作用下，剪应变 ϵ 与剪切历时 t 的一组关系曲线。曲线 1 表示在较小剪应力作用下，土样仅在剪应力刚刚施加时产生微小的剪应变（瞬时应变），而后剪应变速率保持不变（即 $\frac{d\epsilon}{dt}=0$ ），就是说，土样这时不发生蠕变。而当剪应力大于某个值（如 τ_1 ）时，则得到曲线 2、3、……，在瞬时变形（OA 段）后，土的剪应变随着时间继续发展，即表现出蠕变特征。这些曲线一般包括剪应变速率 $\frac{d\epsilon}{dt}$ 逐渐减小的非稳定蠕变段（AB 段）、稳定蠕变段（BC 段 $\frac{d\epsilon}{dt}=K_2$ ）以及变形过大时的破坏段（虚线 CD）。剪应力愈大，剪应变的速率愈大，土样破坏得越快，如曲线 4。

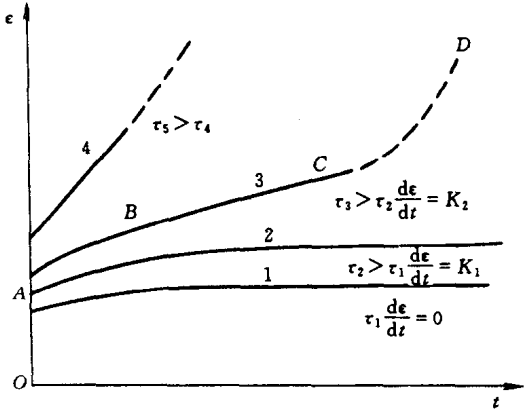


图 1-5 蠕变性土样的剪应变与剪切历时的关系

(二) 松弛特性

土的应力松弛是指在一定的变形 ϵ_0 下，土中抵抗变形的阻力将随着时间而被减弱（图 1-6）的特性。

应力松弛的结果常常使隧洞顶上的压力或挡土墙背后的主动压力增加。

土的蠕变及应力松弛与时间因素有关，也受土类、土的结构、排水条件、温度等因素的影响。一般粘粒含量愈高，粘土活动性愈大，蠕变及应力松弛愈大。高含水量土的蠕变比低含水量土的蠕变重要，当应力大于前期固结压力时，灵敏性亚稳结构的蠕变比重塑的非灵敏性结构的蠕变大，干土及砂土的蠕变及应变速率是不大的，但有着相似的规律性。

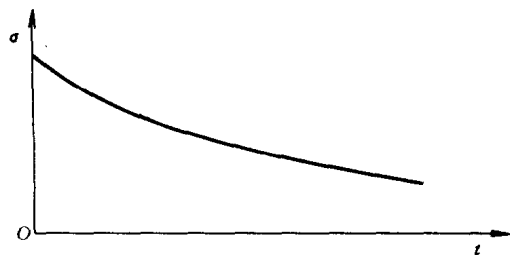


图 1-6 恒定应变下的应力松弛

剪切历时的强度，称作长期强度，记为 τ_t 。按现行规程的一般方法测定抗剪强度时的剪切历时较短，相应于图中之 τ_s 值，通常称为标准强度。

粘性土的蠕变性和应力松弛及由此而产生的强度衰减特性，对于建造在软土地基上的建筑物、水工构筑物、码头、桥台及土质边坡的稳定性常具有重要的意义，不少这类工程常因土的这种特性而产生过大的有害变形，甚至遭到破坏。因此，应该对粘性土的流变性予以足够的重视。

不过，并不是所有粘性土在任何条件下都会发生流变性的。一般说来，正常压密的透水性很差的高含水量的软粘土和淤泥常具有蠕变与强度衰减的特性，一般粘性土在不排水条件下剪切时，也往往会出现这种现象。

五、土的变形特性

（一）土的压缩性与变形指标

地基土体在上部结构荷载作用下发生变形，地基的竖直方向变形即为沉降。土体的变形或沉降是与土的压缩性能密切相关的。一般天然土是三相体，完全浸水饱和土则是二相体（大部分软土是二相体），地基土受力后的变形，实际上包括了土颗粒压缩，土孔隙中的水和气体的排出，土体积减小的过程，也即孔隙水压力消散，有效应力增大，土体产生压缩的过程。土体变形通常包括两个方面含义或两个内容：（1）压缩变形量的绝对大小，亦即沉降量大小；（2）压缩变形随时间的变化，即所谓土体固结的问题。

土的压缩性，在描述其应力与应变关系时，常用的是孔隙比 e 和压力 P 的变化关系，其几何图形即压缩曲线。根据其描述坐标系统的不同而有直角坐标的 $e \sim P$ 曲线和半对数坐标的 $e \sim \log P$ 曲线，见图 1-8。在压缩曲线上可以得到土的压缩性参数，这些参数都是进行地基变形（沉降）计算时常用的，有的甚至是不可缺少的。

从 $e \sim P$ 曲线中可看出：当压力变化不大时，孔隙比 e 的变化与压力 P 的变化成正比。即可得到曲线中某一压力范围的割线的斜率，称为土的压缩系数 a (MPa^{-1})，其表达式为：

$$a = \frac{\Delta e}{\Delta P} = \frac{e_1 - e_2}{P_2 - P_1} \quad (1-13)$$

（三）长期强度

土的长期强度是指土体在静荷作用下，其强度随着时间的延长而降低的特性。

图 1-7 绘出抗剪强度 τ 与剪切历时 t 的关系曲线。可以看出，土的抗剪强度随着剪切历时而逐渐降低，最后（当 $t \rightarrow \infty$ 时）趋于一稳定值 τ_∞ ， τ_∞ 称为长期强度极限；而当 $t \approx 0$ 时，抗剪强度最大，称作瞬时强度，记为 τ_0 。相应于任一较长的

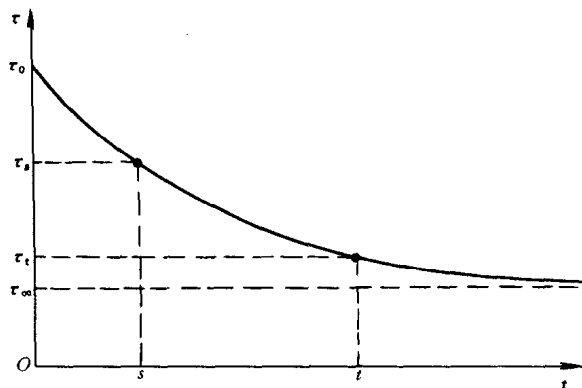


图 1-7 抗剪强度与剪切历时的关系