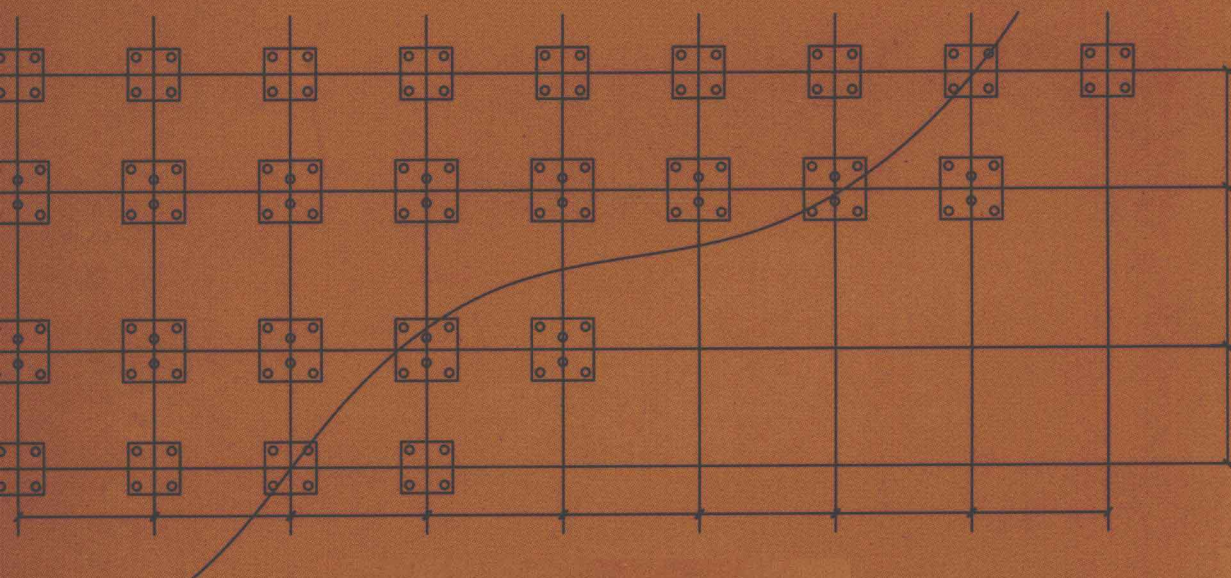


后灌浆与地基处理

赵同新 编著



地震出版社

后灌浆与地基处理

赵同新 编著

地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

后灌浆与地基处理/赵同新 编著. —北京:地震出版社, 2010. 11

ISBN 978-7-5028-3803-4

I. ①后… II. ①赵… III. ①灌浆—施工技术—应用—地基处理 IV. ①TU427

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 205522 号

地震版 XT 201000209 (XM 2073)

后灌浆与地基处理

赵同新 编著

责任编辑: 江 楚

责任校对: 庞亚萍

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709 68423029

传真: 68455221

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京鑫丰华彩印有限公司

版 (印) 次: 2010 年 11 月第一版 2010 年 11 月第一次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

字数: 173 千字

印张: 6.75

书号: ISBN 978-7-5028-3803-4/TU (4443)

定价: 20.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

前 言

所谓后灌浆是指在地基处理中灌浆作为后续工序而称之。如后灌浆桩，是在桩体形成之后进行灌浆工序的，尤其是后灌浆桩复合地基工艺，灌浆工序安排在与建筑物结构施工同时进行。后灌浆之所以后施工，是对前施工的补充与完善，也正是对地基处理时间顺序概念的完美诠释。

早在 20 世纪 50 年代，灌浆技术就在我国地下建筑工程中得到应用。20 世纪六七十年代，灌浆技术广泛应用于水库大坝的防渗加固、交通道桥涵洞的固结补强等岩土工程。20 世纪 80 年代，灌浆技术引入城镇工民建的地基处理，尤其在一些抢险工程中，如高耸构筑物的倾斜、沉降、开裂等，在地基存在缺陷部位进行定位高压固结灌浆、桩底补强灌浆，均取得了良好的工程效益和社会影响。

随着城市基本建设与中高层建筑大规模的发展，结合改善环境，一些软土地基经地基处理后得以开发，费用较低且效果显著的地基处理方法不断创新，如水泥土桩、CFG 等复合地基方法得到普遍推广。但某些特殊场地，如下伏为池塘、窑坑等具不均匀的杂填土地层，多数复合地基方法不适用，例如北京芍药居、望京小区某些住宅楼区为垃圾回填场地。基于这类情况，中国水利水电科学研究院利用后灌浆技术对地基进行了处理，取得了成功，之后通过一系列相似工程，逐渐完善了这一工法。

后灌浆桩复合地基工法不但体现在成桩工艺上，最特殊点在于后期的底板灌浆效应，对于复合地基的压缩沉降、桩土应力比均有明显的作用。这一工法不但能满足荷载及变形要求，还具有无噪声、无振动及无污染等优点，属于环保施工。

本书作者多年研究和参与这项工程的实践，书中详细介绍了后灌浆桩复合地基的每一工序，包括复合地基承载力计算、桩底灌浆、底板灌浆以及质量检测 and 实时监测，在理论上对后灌浆桩复合地基进行了初步的探讨。

本书适用于从事地基基础研究、设计、施工的工程技术人员，为了工程单位使用方便，还收入了一些复合地基设计应用的内容，重点分析了后灌浆桩复

合地基特性，本书的工程实例有着较高的实用价值，类似地质条件的工程完全可以参用。目前国内尚未见到专门论述后灌浆桩的书籍，希望本书起到抛砖引玉的作用，期待后灌浆桩技术能够有更快的发展。

书中引用了许多学者和工程技术人员的研究成果，在此一并表示谢意。

由于作者水平所限，书中难免存在不足与错误，恳请广大读者指正。

2010 年 10 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 地基的基本术语和基本概念	1
第三节 地基强度理论	9
第四节 地基的荷载试验与变形	17
第二章 地基处理与复合地基	22
第一节 地基处理	22
第二节 桩基承载力的设计与计算	24
第三节 复合地基	32
第三章 灌浆与后灌浆桩复合地基	41
第一节 灌浆	41
第二节 后灌浆桩	47
第三节 后灌浆桩复合地基	50
第四章 灌浆工程实例	56
第一节 不良地质体地基处理的灌浆试验	56
第二节 小直径灌浆桩	59
第三节 灌浆与灌浆桩的应用	64
第四节 树根桩及裂缝化学灌浆	74
第五节 水泥浆灌浆堵漏工程	80
第六节 后灌浆桩复合地基	84
第七节 调平灌浆法	88
第八节 地基再处理工程	95
参考文献	102

第一章 绪 论

第一节 概 述

自 20 世纪 80 年代以来,随着经济建设的飞速发展,在岩土工程中遇到的地基问题与日俱增,同时对地基处理也提出了越来越高的要求,地基处理已成为岩土工程中最主要的课题。地基最为常见的问题就是已有建筑物的沉降与倾斜;或是由于软弱下卧层的压缩、地基土的变化多样,导致管线、道路长期不均匀地下沉、开裂;在有深厚淤泥质地层条件下,即便是地基埋深较大的工程,经深宽修正后,天然地基也不能满足承载力和变形要求;时有勘探不周、施工不当而发生大批基桩经检测承载力达不到要求的尴尬局面。总之,地基是每一个工程所面临的最基本问题,一旦地基出现问题,只有停工,务必需要进行人工处理,否则就要重新考虑降低建筑物的设计。

地基处理工程是一种地下隐蔽工程,规模大、投资高,质量不易保证,处理效果也不会像地上建筑一目了然。因此,地基处理各种方法的优劣、适应范围只有经过一段时间考验、多个工程的实践,才能进行类比与确定。到目前为止,较为常用与成熟的方法有换填法、挤密法、固结法、桩法、胶结法、化学法等。

地基处理技术的最新发展反映在地基处理技术的创新、设计计算理论的实用、机械设备自动化程度的提高、材料的经济环保、施工工艺的简捷有效等多方面。20 世纪 80 年代,费用较低且效果显著的地基处理方法不断创新,如深搅桩、CFG 复合地基方法得到普遍推广。但每一种处理方法都有其适用范围,在某些特殊场合,如不均匀的杂填垃圾土地层、已处理地基的再处理、或是已有建筑的地基加固,多数复合地基方法并不适用,而用后灌浆工法,上述问题就能迎刃而解。

后灌浆复合地基工法是灌浆工艺在地基处理工程中的应用,十几年来,不断创新、不断总结,逐渐完善和发展,这一工法最大的特点就是特别适合于补救性工程,在多个工程实践中已取得成功。

后灌浆复合地基的有关计算是利用原有的灌浆理论、复合地基理论,而桩与土的应力分配、调节机理还有待于今后更多实践与试验的摸索、提高。随着地基处理工程的实践和发展,人们不断丰富对岩土力学的认识,从而不断推动地基处理技术和方法的更新,因而我们相信:在岩土工程领域中,地基处理是一门不断发展、具有强大活力的学科,而后灌浆复合地基工法也会有更大的应用空间。

第二节 地基的基本术语和基本概念

在地基处理工程设计中,涉及到一些有关岩土工程的基本理论和计算方法,通过对重点概念的了解,可以更好地理解与应用现有规范,以便能正确地进行地基处理工程的设计。

一、土的分类

土的分类有两种，第一种按土的粒径从粗到细的顺序，以大于某一粒径土颗粒的百分数含量超过某一界限来定名。第二种按两个土颗粒粒组相对含量的多少，以含量多的来定名。粗粒土都是按粒度成分来分类的，细粒土则是按塑性指数或按塑性图而分类的^[1]。

我国土的分类以《土工试验方法标准》（GB/T 50123—1999）为标准，统一试验方法，在新的《建筑地基基础设计规范》（GB 50007—2002）中，土的定名标准见表 1-1，土的亚类划分标准见表 1-2 ~ 表 1-5。

表 1-1 土定名标准

土的名称	颗粒级配或塑性指数
碎石土	粒径大于 2mm 的颗粒含量超过全重的 50%
砂土	粒径大于 2mm 的颗粒含量不超过全重的 50%，且粒径大于 0.075mm 的颗粒含量超过全重的 50%
粉土	塑性指数 $I_p \leq 10$ ，且粒径大于 0.075mm 的颗粒含量不超过全重的 50%
黏性土	塑性指数 $I_p > 10$

表 1-2 碎石土的分类

土的名称	颗粒形状	颗粒级配
漂石	圆形及亚圆形为主	粒径大于 200mm 的颗粒超过全重的 50%
块石	棱角形为主	
卵石	圆形及亚圆形为主	粒径大于 20mm 的颗粒超过全重的 50%
碎石	棱角形为主	
圆砾	圆形及亚圆形为主	粒径大于 2mm 的颗粒超过全重的 50%
角砾	棱角形为主	

表 1-3 砂土分类

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%
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%
细砂	粒径大于 0.075mm 的颗粒含量超过全重的 85%
粉砂	粒径大于 0.075mm 的颗粒含量超过全重的 50%

表 1-4 粉砂分类

土的名称	岩土工程勘察规范
砂质粉土	粒径小于 0.005mm 的颗粒含量小于或等于全重的 10%
黏质粉土	粒径小于 0.005mm 的颗粒含量超过全重的 10%

表 1-5 黏性土分类

塑性指数 I_p	土的名称
$10 < I_p \leq 17$	粉质黏土
$I_p > 17$	黏土

碎石土和砂土的密实度见表 1-6 和表 1-7。

表 1-6 碎石土的密实度

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

表 1-7 砂土的密实度

标准贯入试验锤击数 N	密实度
$N \leq 10$	松散
$10 < N \leq 15$	稍密
$15 < N \leq 30$	中密
$N > 30$	密实

人工填土是指由于人类活动而堆积的土，根据其物质组成和成因，可分为素填土、压实填土、杂填土、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。

二、土的工程特性指标和物理指标

土的工程特性指标包括强度指标、压缩性指标以及静力触探探头阻力，标准贯入试验锤击数、载荷试验承载力等特性指标。

地基土工程特性指标的代表值应分别为标准值、平均值及特征值。抗剪强度指标应取标

准值，压缩性指标应取平均值，载荷试验承载力应取特征值。

土的抗剪强度指标，可采用原状土室内剪切试验、无侧限抗压强度试验、现场剪切试验、十字板剪切试验等方法测定。当采用室内剪切试验确定时，要选择三轴压缩试验中的不固结不排水试验，经过预压固结的地基可采用固结不排水试验。

土的压缩性指标可采用原状土室内压缩试验、原位浅层或深层平板载荷试验、旁压试验确定。

土的物理性质指标反映土的工程性质的特征，具有重要的实用价值。

1. 密度 ρ 和容重 γ

土的密度 ρ 为单位体积土的质量，容重 γ 为单位体积土的重力。

$$\gamma = \rho g = 9.8\rho(\text{kN/m}^3) \quad (1-1)$$

2. 含水量 ω

土的含水量表示土体中水的质量 m_w 与固体颗粒质量 m_s 的比值，用百分数表示，土的含水量反映土中含水程度。

$$\omega = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% \quad (1-2)$$

3. 孔隙比 e

土的孔隙比为土中孔隙体积与固体颗粒的体积之比值，土的孔隙比反映土的松密程度。

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1-3)$$

4. 孔隙度 n

土的孔隙度为土中孔隙占土总体积的百分比。

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \quad (1-4)$$

5. 饱和度 S_r

土的饱和度表示水在孔隙中充满的程度，是水的体积与孔隙体积比。

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (1-5)$$

6. 干密度 ρ_d 和干重度 γ_d

干密度是将水分烘干后，单位体积的土的质量。土的干重度为单位体积的土将水分烘干

后的重度。

$$\begin{aligned}\rho_d &= m_s/V(\text{g/cm}^3) \\ \gamma_d &= \rho_d g \approx 10\rho_d(\text{kN/m}^3)\end{aligned}\tag{1-6}$$

7. 饱和密度 ρ_{sat} 和饱和容重 γ_{sat}

土的饱和密度为孔隙中全部充满水时单位体积的质量。土的饱和容重为孔隙中全部充满水用单位体积的重度。

$$\begin{aligned}\rho_{\text{sat}} &= (m_s + m_w + V_a \rho_w)/V(\text{g/cm}^3) \\ \gamma_{\text{sat}} &= \rho_{\text{sat}} g \approx 10\rho_{\text{sat}}(\text{kN/m}^3)\end{aligned}\tag{1-7}$$

8. 有效密度 ρ' 和有效容重 γ'

土的有效密度指地下水位以下土体受水的浮力作用时单位体积的质量。土的有效容重为地下水位以下土体单位体积的重力。

$$\begin{aligned}\rho' &= \rho_{\text{sat}} - \rho_w(\text{g/cm}^3) \\ \gamma' &= \rho' g \approx 10\rho'(\text{kN/m}^3)\end{aligned}\tag{1-8}$$

9. 土粒相对密度 d_s

土粒相对密度为单位体积的干土的质量与固体颗粒的体积之比值。

$$d_s = m_s/V_s\tag{1-9}$$

在以上土的9个物理指标当中，土的密度 ρ 、土粒相对密度 d_s 和土的含水量 ω 称为土的三项基本物理指标。这9个物理指标是相互关联的，如果 ρ 、 d_s 和 ω 测定后，其余几个物理指标均可换算求得，如表1-8所示。

表 1-8 土的物理性质指标换算

名称	符号	换算公式	常见数值范围
含水量	ω	$\omega = S_r e/d_s; \omega = \gamma/\gamma_d - 1$	20% ~ 60%
相对密度	d_s	$d_s = S_r e/\omega$	2.65 ~ 2.75
密度	ρ	$\rho = (d_s + S_r e) \rho_w / (1 + e)$	1.6 ~ 2.0
重度	γ	$\gamma_d = (d_s + S_r e) \gamma_w / (1 + e)$	16 ~ 20
干土密度	ρ_d	$\rho_d = \rho_s / (1 + \omega)$	1.3 ~ 1.8
干土重度	γ_d	$\gamma_d = \gamma_s / (1 + \omega)$	1.3 ~ 18
饱和土密度	ρ_{sat}	$\rho_{\text{sat}} = (d_s + e) \rho_w / (1 + e)$	1.8 ~ 2.3

续表

名称	符号	换算公式	常见数值范围
饱和土重度	γ_{sat}	$\gamma_{\text{sat}} = (d_s + e) \gamma_w / (1 + e)$	18 ~ 23
有效重度	γ'	$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w$	8 ~ 13
孔隙比	e	$e = d_s \rho_w / \rho_d - 1$ $e = N / (1 - N)$	黏土 0.6 ~ 1.2 砂土 0.3 ~ 0.9
孔隙度	n	$n = e / (1 + e)$	黏土 30% ~ 60% 砂土 25% ~ 45%
饱和度	S_r	$S_r = \omega d_s / e$	0 ~ 1.0

三、地基承载力

基础是将建筑物结构所承受的各种荷载作用传递到地基的下部结构组成部分，地基和基础的设计往往是相关的，基础设计时，除保证基础结构本身具有足够刚度和强度外，还需选择合理的基础尺寸和布置，使地基的强度和变形满足规范的要求。

基础有多种形式，表 1-9 为基础的分类与形式。

表 1-9 基础的分类与形式

分类	基础名称		形式
埋深	浅基础		挖槽、排水等普通施工程序，建造一般埋深小于基础宽度的基础
	深基础		桩、沉井等特殊施工方法和设备，建造一般埋深大于基础宽度的基础
受力特征	刚性基础		基础底部扩展部分不超过基础材料刚性角的天然地基上的基础
	柔性基础		能承受一定弯曲变形的钢筋混凝土基础
材料	砖基础		用砖砌筑的刚性基础
	三合土基础		用三合土做成的刚性基础
	灰土基础		用灰土做成的刚性基础
	毛石基础		用强度较高且未风化的毛石砌筑的刚性基础
	混凝土或毛石混凝土基础		用混凝土或毛石混凝土浇筑的刚性基础
	钢筋混凝土基础		用钢筋混凝土浇筑的柔性基础
构造	独立基础		配制于柱或塔式、筒式整个结构物之下的无筋或配筋的单个基础
	条形基础	墙下条形基础	位于墙下的长条形基础
		柱下条形基础	将柱下单独基础联成一起的条形基础
	联合基础	交叉条形基础	将柱下单独基础联成一起的网格形基础
	筏板基础	柱下墙下筏板基础	大面积整体钢筋混凝土板式或梁板式基础
	箱形基础		由钢筋混凝土底板、顶板、侧墙组成的具有一定高度的整体性基础

地基是支承建筑物基础的土体或岩体。所谓地基承载力就是描述地基能够承受上部荷载的大小及抵抗变形的能力。地基承载力的确定是由荷载试验测定的,有关地基承载力的术语,在《建筑地基基础设计规范》(GBJ 7—89)版中,有基本值、标准值和设计值定义,虽然现在已废止使用,但作为与《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)版的比较,也在此列出。

在《建筑地基基础设计规范》(GBJ 7—89)版中,对于低压缩性土,在 $p-s$ 曲线上,地基承载力基本值 f_0 一般由强度安全控制,规定取比例界限荷载 p_1 作为地基承载力基本值^[2]。如 p_1 与极限荷载 p_u 很接近时,取 $p_u/2$ 作为承载力基本值。对于中、高压缩性土,地基承载力基本值的确定受允许沉降量的限制,即以 $p-s$ 曲线上荷载板的沉降量等于 $0.02b$ (b 为荷载板的宽度)时的压力 $p_{0.02}$ 作为承载力基本值。

对于同一土层,应选择三个以上试验点,如所得的基本值的极差不超过平均值的30%时,则取该平均值作为地基承载力标准值 f_k 。

对竖向荷载偏心 and 水平力都不大的基础来说,当荷载偏心距 $e \leq b/30$ (b 为偏心方向基础边长)时,以界限荷载 $p_{1/4}$ 为基础的理论公式计算设计值,其值为:

$$f_v = M_b \gamma b + M_d \gamma_0 d + M_c c_k \quad (1-10)$$

式中, b 为基础底面宽度(m),大于6m时按6m考虑;对于砂土地基小于3m时,按3m考虑。 M_b 、 M_d 、 M_c 为承载力系数,按表1-10确定。 γ 、 γ_0 为地下水位以下土的有效重度(kN/m^3)、埋深 d 范围内土的平均重度(kN/m^3)。 c_k 、 d 为基底下一倍基宽深度内土的黏聚力(kPa)、基础埋深(m)。

上述地基承载力设计值与《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)版的地基承载力特征值 f_a 有相同的表示形式。

在《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)版中,地基承载力特征值 f_a 是指由荷载试验测定的地基土压力变形曲线线性变形段内,规定的变形所对应的压力值,其最大值为比例界限值^[3]。

当荷载偏心距 $e \leq 0.033$ 倍基础底板宽度 b 时,根据土的抗剪强度指标确定地基承载力特征值 f_a ,其值为:

$$f_a = M_b \gamma b + M_d \gamma_m d + M_c c_k \quad (1-11)$$

式中, γ_m 为埋深 d 范围内土的平均量度(kN/m^3)。

地基设计是采用正常使用极限状态这一原则,所选定的地基承载力是在地基土的压力变形曲线线性变形段内相应于不超过比例界限点的地基压力值,即允许承载力。

根据国外有关文献,相应于我国规范中“标准值”的含义可以有特征值、公称值、名义值、标定值四种,在国际标准《结构可靠性总原则》ISO2394中相应的术语直译为“特征值”(characteristic value),该值的确定可以是统计得出,也可以是传统经验值或某一物理量限定的值^{[3][6]}。“特征值”一词,用以表示正常使用极限状态计算时采用的地基承载力和单桩承载力的值,其涵义即为在发挥正常使用功能时所允许采用的抗力设计值。

表 1-10 承载力经验系数 M_b 、 M_d 、 M_c

φ_k	M_b	M_d	M_c	φ_k	M_b	M_d	M_c
0	0.00	1.00	3.14	22	0.61	3.44	6.04
2	0.03	1.12	3.32	24	0.80	3.87	6.45
4	0.06	1.25	3.51	26	1.10	4.37	6.90
6	0.10	1.39	3.71	28	1.40	4.93	7.40
8	0.14	1.55	3.93	30	1.90	5.59	7.95
10	0.18	1.73	4.17	32	2.60	6.35	8.55
12	0.23	1.94	4.42	34	3.40	7.21	9.22
14	0.29	2.17	4.69	36	4.20	8.25	9.97
16	0.36	2.43	5.00	38	5.00	9.44	10.80
18	0.43	2.72	5.30	40	5.80	10.84	11.73
20	0.51	3.06	5.66				

注： φ_k 为基底下一倍基宽深度内土的内摩擦角（°）。

以下为有关表 1-10 的说明：

（1）按式（1-10）计算承载力，影响最大的是土体的抗剪强度指标的取值。应采用不固结不排水三轴压缩试验，或采用直接剪切试验。

（2）地基承载力不仅与土的性质有关，还与基础的大小、形状、埋深以及荷载情况有关，而这些因素对承载力的影响程度又随着土质不同而变化。

（3）对饱和软土（ $\varphi_u = 0$ ， $\eta_b = M_b = 0$ ），增大基底尺寸不可能提高地基承载力，但对 $\varphi_k > 0$ 的土，增大基底宽度，承载力的增加将随着 φ_k 的提高而逐渐显著，当 $b > 6\text{m}$ 时， b 按 6m 取值。

（4）系数 $M_d \geq 1$ 、 $\eta_d \geq 1$ 时，承载力随着埋深 d 呈线性增加。

（5）地下水位以下的有效重度约为饱和重度的一半。对砂土地基，当地下水位上升至基底时，地基承载力将明显降低。

（6） γ 为基底以下一倍基宽深度内土的重度，地下水位以下取土的有效重度， γ_0 为埋深 d 范围内土的加权平均重度。

当基础宽度大于 3m 或埋置深度大于 0.5m 时，从载荷试验或其他原位测试、经验值等方法确定的地基承载力特征值还应按下式修正：

$$f_a = f_{ak} + \eta_b \gamma (b - 3) + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) \tag{1-12}$$

式中， f_a 为修正后的地基承载力特征值； f_{ak} 为地基承载力特征值； η_b 、 η_d 为基础宽度和埋深的地基承载力修正系数，按表 1-11 取值； b 为基础底面宽度（m），当地基宽度小于 3m 时，按 3m 考虑，大于 6m 时按 6m 取值； d 为基础埋置深度（m）； γ 为基础底面以下土的重度（ kN/m^3 ），地下水位以下取浮重度； γ_m 为基础底面以上土的加权平均重度（ kN/m^3 ），地下水位以下取浮重度。

表 1-11 承载力修正系数表

土的类型		η_b	η_d
淤泥和淤泥质土		0	1.0
人工填土 e 或 $I_L \geq 0.85$		0	1.0
红黏土	含水比 $a_w > 0.8$,	0	1.2
	含水比 $a_w \leq 0.8$	0.15	1.4
大面积压实填土	压实系数 > 0.95 , 黏粒含量 > 0.1 的粉土	0	1.5
	最大干密度 $> 2.1 \text{ t/m}^3$ 的级配砂石	0	2.0
粉土	黏粒含量 $\geq 10\%$	0.3	1.5
	黏粒含量 $< 10\%$	0.5	2.0
e 及 I_L 均小于 0.85 的黏性土		0.3	1.6
粉砂、细砂		2.0	3.0
中砂、粗砂、砾砂和碎石土		3.0	4.4

第三节 地基强度理论

土力学是岩土工程设计的基本理论依据，土力学研究的主要对象是土的本构关系，即土的应力、应变、强度和时间的关系，以及土与结构物之间的相互作用规律。

土的物理性质、状态指标、工程地质分类，土的抗剪切强度是土力学的重要概念，岩土工程地基设计计算是建立在这些理论基础之上的，下面就涉及到的土力学中有关的基本原理内容做一简述。

一、用摩尔圆表示土体某点的应力状态

假定土体是均匀的、连续的半空间材料，水平地面以下任一深度 z 处 M 点的应力状态如图 1-1 (a) 所示。在 M 点取一微元体 $dx dy dz$ ，使微元体上、下面平行于地面。如图 1-1 (b) 所示，微元体顶面和底面作用力为：

$$\sigma_1 = \gamma \cdot z \tag{1-13}$$

式中， σ_1 为作用在微元体上的竖向法向应力，即土的自重应力 (kPa)； γ 为土体的重度 (kN/m^3)； z 为深度 (m)。

微元体侧面作用力为：

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \xi \sigma_1 = \xi \gamma z \tag{1-14}$$

式中， σ_2 、 σ_3 为作用在微元体侧面的水平向法向应力 (kPa)； ξ 为土的静止侧压系数，小于 1。

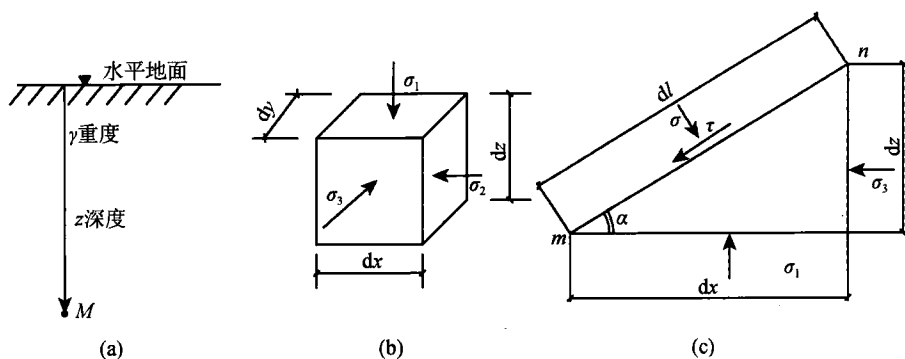


图 1-1 土体中任一点 M 的应力

在微元体上任取一截面 mn ，与水平面成 α 角，斜面 mn 上作用法向应力 σ 和剪应力 τ ，如图 1-1 (c) 所示。

取 $dy=1$ (三角的厚度)，按平面问题计算，以 m 点为坐标原点， ox 向右为正， oz 向下为正，根据静力平衡条件，取水平与竖向合力为零。

$$\sum x = 0, \sigma \cdot \sin \alpha \cdot dl - \tau \cdot \cos \alpha \cdot dl - \sigma_3 \cdot \sin \alpha \cdot dl = 0 \quad (a)$$

$$\sum z = 0, \sigma \cdot \cos \alpha \cdot dl + \tau \cdot \sin \alpha \cdot dl - \sigma_1 \cdot \cos \alpha \cdot dl = 0 \quad (b) \quad (1-15)$$

解联立方程 (a)、(b)，可求出任意截面 mn 上的法向应力 σ 和剪应力 τ ：

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \quad (1-16)$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \quad (1-17)$$

式中， σ 为与主应力面成 α 角的截面 mn 上的法向应力 (kPa)； τ 为同一 mn 截面上的剪应力 (kPa)。

将式 (1-16) 移项，

$$\sigma - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha$$

然后与式 (1-17) 平方和，得到：

$$\left(\sigma - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)^2 \quad (1-18)$$

这是一个以 $[(\sigma_1 + \sigma_3)/2, 0]$ 为圆心，以 $[(\sigma_1 - \sigma_3)/2]$ 为半径的圆，称为应力摩尔圆。

如图 1-2 (a) 所示，取 $\tau - \sigma$ 直角坐标系，在横坐标 $o\sigma$ 上，按一定的比例尺，确定 σ_1 、 σ_3 的位置，以 $\sigma_1 - \sigma_3$ 为直径作圆，即为应力摩尔圆。如图 1-2 (b) 所示，取应力摩尔圆的圆心为 o_1 ，自 $o_1\sigma_1$ 逆时针转 2α 角，得半径 o_1a ， a 点为摩尔圆圆周上一点，此 a 点的坐标值 σ 、 τ 即为 M 点处与最大主应面成 α 角的斜面 mn 上的法向应力和剪应力值。

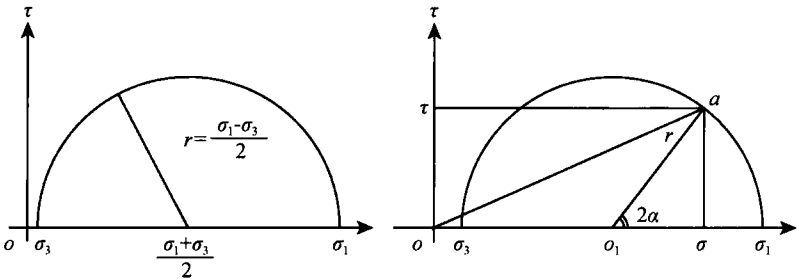


图 1-2 摩尔应力圆

从图 1-2 (b) 计算法向应力 σ 和剪应力值 τ ：

$$\sigma = oo_1 + o\sigma_1 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + r \cdot \cos 2\alpha = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha$$

$$\tau = a\sigma = r \cdot \sin 2\alpha = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha$$

此式与式 (1-16)、式 (1-17) 一样，或合并为式 (1-18)，即用应力摩尔圆可表示任意斜面上的应力状态。

二、摩尔—库仑准则

摩尔强度理论认为材料受荷载发生破坏是剪切破坏，在破坏面上的剪应力 τ_f 是法向应力 σ 的函数：

$$\tau_f = f(\sigma)$$

此函数曲线为摩尔破坏包线，如图 1-3 所示。

砂土的抗剪强度 τ_f 与作用在剪切面上的法向应力 σ 成正比，比例系数是内摩擦系数。黏土的抗剪强度 τ_f 比砂土的抗剪强度增加一项土的黏聚力 c 。

砂土：

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi \tag{1-19}$$