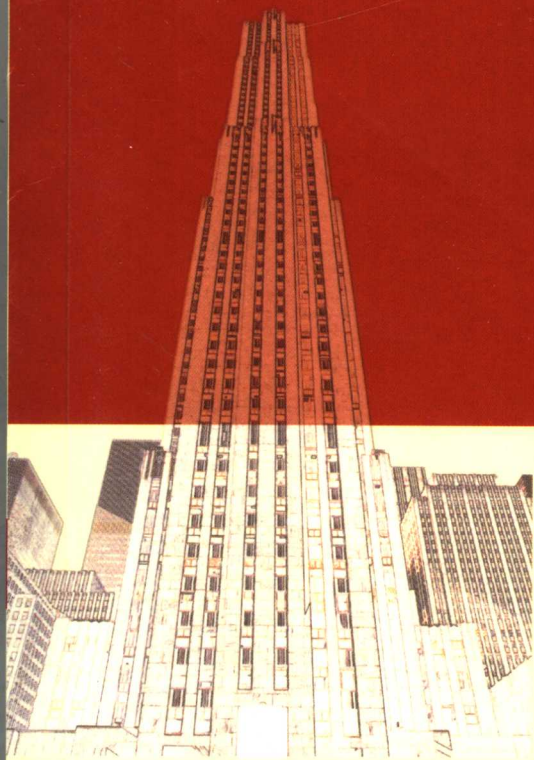


◎ 朱浮声
王凤池 李 纯 王述红

主 编
副主编

DIJI JICHU SHEJI YU JISUAN

地基基础 设计与计算



人民交通出版社

China Communications Press

DIJI JICHU SHEJI YU JISUAN



地基基础 设计与计算

◎ 朱浮声 主 编
王凤池 李 纯 王述红 副主编



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书结合《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)的规定,简要阐述了地基岩土分类及工程特性指标、地基计算、基础工程和基坑工程包括设计计算部分的要点,通过大量具体算例说明了相关设计计算方法。读者可以通过工程算例学习、体会新规范的条文规定,加深对基本概念和基本理论的理解,并可以参照算例算法解决实际工程设计问题。

本书可供土木工程勘察、设计、施工技术人员参考,也可作为相关专业大专院校师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

地基基础设计与计算 / 朱浮声主编. —北京: 人民交通出版社, 2005.5

ISBN 7-114-05484-X

I. 地… II. 朱… III. ①地基—基础(工程)—建筑设计②地基—基础(工程)—计算 IV.TU47

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第019315号

书 名: 地基基础设计与计算

著 译 者: 朱浮声

责任编辑: 武晓涛

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010), 85285838, 85285995

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京宝莲鸿图科技有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 15

字 数: 377 千

版 次: 2005年6月第1版

印 次: 2005年6月第1版第1次印刷

书 号: ISBN7-114-05484-X

印 数: 0001—4000 册

定 价: 26.00 元

(如有印刷、装订质量问题, 由本社负责调换)



建筑地基基础是岩土工程的一个主要技术领域,涉及工程地质、土力学、地基基础的设计和施工等诸多方面。随着我国改革开放的深入和经济建设的大规模展开,岩土工程技术有了空前的发展和进步。工程建设对新技术提出了越来越高的要求,工程技术的不断创新则极大地推动了工程建设的进步。在此背景下,新的《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)颁布实施。

目前,我国岩土工程领域的设计计算手段可以分为两类,即以计算机专业软件为工具的电算和以数学公式为基础的手算。有条件的设计单位的设计计算工作已几乎全部电脑化,为满足建设需要,迅速出图创造了条件。但由此产生的不良后果是设计者越来越脱离整个设计过程,严重阻碍了对基本概念的理解和基本原理的应用。特别地,由于岩土工程是一门实践性很强的学科,加之我国幅员辽阔,地基土差异很大,更增加了地基基础工程技术的复杂性。在此过程中,手算法具有不可替代的作用,对基础理论的深入理解、对基本概念的正确应用及理论与丰富实践经验的结合具有十分重要的地位。为了推动对新的《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)的正确理解和应用,便于设计者参与设计计算全过程,以便更深入理解新规范的基本精神、基本概念和基本方法,组织编写了这本以手算为基础的地基基础设计与计算。

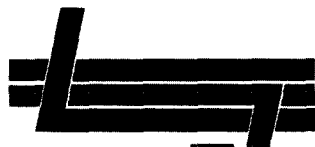
本书内容主要涉及新规范中的地基岩土分类及工程特性指标、地基计算、基础工程和基坑工程等包括设计计算的内容。在新、旧规范中,对于基坑工程内容涉及较少,有关规定散见于国家或行业标准中,给设计带来不便。本书结合新规范对基坑工程设计问题适当增加了篇幅。本书在对规范和相关理论要点进行阐述的基础上,通过具体算例说明相关设计计算方法,体现施工措施和构造措施,必要时补充作者们的实践经验。希望读者通过算例学习、体会新规范的条文规定,加深对基本概念和基本理论的理解,并可以参照算例算法解决实际工程设计问题。

本书第一、二章由东北大学王述红博士编写,并由沈阳建筑大学王凤池博士修改完成;第三章由东北大学陈柏玲博士编写;第四、五、六章由王凤池博士编写,第七、八、九、十章由原中国建筑东北设计研究院工程师、东北大学的李纯硕士完成。全书由博士生导师朱浮声教授编写大纲,修改并定稿。

本书在编写中参考了大量文献,限于篇幅在此无法一一列举,特向各位作者表示深深谢意。限于本书作者水平,书中缺漏、错误在所难免,望广大读者批评指正。

编者

2005年2月



目录 Mulu

第一章 岩土的分类和工程特性	1
第一节 岩石的分类	1
第二节 土的分类	2
第三节 土的工程特性指标	5
第二章 地基承载力和变形	17
第三章 扩展基础	37
第一节 无筋扩展基础	37
第二节 扩展基础	43
第三节 柱下条形基础	53
第四章 桩基设计	58
第一节 竖向荷载作用下桩基础的承载力	59
第二节 水平荷载作用下桩基础的承载力	66
第三节 桩基础的沉降	73
第四节 桩基础的承台结构设计	82
第五节 桩基设计计算实例	87
第五章 筏形基础	92
第一节 地基承载力验算	93
第二节 筏基内力计算	95
第三节 筏基沉降计算	113
第四节 筏基构造设计计算	118
第五节 筏基设计实例	120
第六章 箱形基础	126
第一节 基底反力确定	126
第二节 箱形基础的结构设计	130
第三节 箱基的变形计算	141
第四节 箱形基础设计实例	144



第七章 基坑土压力	154
第一节 土压力的计算	154
第二节 支护结构土压力计算	156
第三节 分层土的土压力计算	164
第四节 水压力计算	167
第八章 悬臂支挡与喷锚支护	170
第一节 多层锚杆围护桩墙	170
第二节 喷锚支护	178
第三节 基坑稳定性验算	188
第九章 土钉墙支护	198
第一节 土钉墙设计	198
第二节 土钉墙算例	203
第十章 地下连续墙	212
第一节 地下连续墙设计	212
第二节 实例分析	213
附录 A 矩形面积均布荷载作用下角点附加应力系数表	219
附录 B 矩形面积均布荷载作用下角点平均附加应力系数表	221
附录 C 矩形面积三角形分布荷载作用下的应力系数表	224
附录 D 圆形面积均布荷载作用下中点的应力系数表	227
附录 E 圆形面积三角形分布荷载作用下边点的应力系数表	228
附录 F 矩形及圆形面积上均布荷载作用下,通过中心点竖线上的平均附加应力系数表	230
参考文献	232

第一章

岩土的分类和工程特性

第一节 岩石的分类

岩石为颗粒间牢固联结、呈整体或具有节理裂隙的天然地质体。岩石作为建筑物地基,除应确定其地质名称外,尚应按表 1-1、表 1-2 划分其坚硬程度和完整程度。

岩石的坚硬程度应根据岩块的饱和单轴抗压强度 f_{rk} 按表 1-1 分为坚硬岩、较硬岩、较软岩、软岩和极软岩。当缺乏饱和单轴抗压强度资料或不能进行该项试验时,可在现场通过观察定性划分。

岩石的坚硬程度的划分

表 1-1

坚硬程度类别	坚 硬 岩	较 硬 岩	较 软 岩	软 岩	极 软 岩
饱和单轴抗压强度标准 f_{rk} (MPa)	$f_{rk} > 60$	$60 \geq f_{rk} > 30$	$30 \geq f_{rk} > 15$	$15 \geq f_{rk} > 5$	$f_{rk} \leq 5$

岩体完整程度应按表 1-2 划分为完整、较完整、较破碎、破碎和极破碎。

岩体完整程度划分

表 1-2

完整程度等级	完 整	较 完 整	较 破 碎	破 碎	极 破 碎
完整性指数	> 0.75	$0.75 \sim 0.55$	$0.55 \sim 0.35$	$0.35 \sim 0.15$	< 0.15

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

岩石按风化程度可分为未风化、微风化、中风化、强风化和全风化。微风化岩石岩质新鲜,表面稍有风化迹象。中等风化岩石结构和构造层理清晰,岩体被节理、裂隙分割成块状(20~50cm),裂隙中填充少量风化物,锤击声脆,且不易击碎,用镐难挖掘,岩心钻方可钻进。强风化岩石结构和构造层理不甚清晰,矿物成分已显著变化,岩体被节理、裂隙分割成碎石状(2~20cm),碎石用手可以折断,用镐可以挖掘,手摇钻不易钻进。



第二节 土 的 分 类

土是自然地质历史的产物,它的成分、结构和性质是千变万化的,工程性质也是千差万别的。为了能大致地判断土的基本性质、合理地选择研究内容和方法,以及便于科学技术交流,有必要对土的类型进行科学的划分。通常,根据不同的工程目的、不同的工程领域和不同的研究内容、方法将具有共性的土划归为一类。这些共性对于其他领域而言就是个性,类别的划分突出了这些个性,有利于人们侧重深入研究这些个性。

目前,土的分类体系主要有两种。第一种体系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;第二种体系则按两个土颗粒粒组相对含量的多少,以含量多的来定名。两个体系对于粗粒土都是按粒度成分来分类的,对于细粒则是按土的 Atterberg 界限进行分类的。此外,还有一些其他分类方法。对于细粒土,第一种体系按塑性指数分类,第二种体系则按塑性图分类。第一种分类体系以前苏联为代表,第二种分类体系的代表是美国 ASTM 的统一分类法。

我国土的分类体系受到上述两种体系的影响,在不同工业领域形成了种类繁多、特点各异分类体系标准。其中,影响比较大的一个是以国家标准《土工试验方法标准》(GBJ 123—88)为代表的分类体系,反映了我国对美国 ASTM 分类方法的研究水平。另一个分类体系源自前苏联的土分类方法,经我国几十年工程实践经验总结和科学研究,已有明显的发展。它是在《工业与民用建筑地基基础设计规范》(TJ 7—74)和《工业与民用建筑工程地质勘察规范》(TJ 21—77)的分类体系基础上发展起来的,并在《岩土工程勘察规范》(GB 50021—94)中得到发展和更完整的表达。前者将土分为巨粒土、含巨粒的土、粗粒土(砾类土和砂类土)和细粒土四个大类,后者则将土划分为碎石土、砂土、粉土和粘土四个大类。

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 1-3,土的亚类划分标准见表 1-4~表 1-7。

土 定 名 标 准 表

表 1-3

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	粒径大于 0.075mm 的颗粒含量不超过全重的 50%,且塑性指数小于或等于 10 的土
粘性土	塑性指数大于 10 的土

碎 石 土 的 分 类

表 1-4

土的名称	颗 粒 形 状	颗 粒 级 配
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 的颗粒超过全重的 50%



续上表

土的名称	颗粒形状	颗粒级配
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 分 类

表 1-5

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%	粉砂	粒径大于 0.075mm 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%		

注:分类时应根据粒组含量栏从上到下以最先符合者确定。

粉 砂 分 类

表 1-6

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%
粘质粉土	粒径小于 0.005mm 的颗粒含量超过全重的 10%

粘 性 土 分 类

表 1-7

塑 性 指 数 I_p	土 的 名 称	塑 性 指 数 I_p	土 的 名 称
$10 < I_p \leq 17$	粉质粘土	$I_p > 17$	粘 土

注:塑性指标由相应于 76g 圆锥体沉入土样中深度为 10mm 时测定的液限计算得到。

碎石土和砂土的密实度可以由表 1-8 和表 1-9 得到。

碎石土的密实度

表 1-8

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 100mm 的碎石土,可按《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)附录 B 鉴别其密实度;

2.表内 $N_{63.5}$ 为经综合修正后的平均值。

砂 土 的 密 实 度

表 1-9

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



有机土的野外鉴别方法见表 1-10。

土的野外鉴别

表 1-10

土 的 名 称		土 的 野 外 鉴 别
粘性土	粘土	切面非常光滑,刀刃有粘滞的阻力,湿土手有滑腻感,能搓成小于 0.5mm 的土条
	粉质粘土	稍有光滑面,切面规则,手稍有滑腻感,夹有少量细颗粒,能搓成 0.5~2mm 的土条
粉土		无光滑面,切面比较粗糙,手感有细颗粒,无粘滞感或轻微粘滞感,能搓成 2~3mm 的土条,有明显的摇振析水反应
砂土	砾砂	大部分颗粒与小米粒近似
	粗砂	大部分颗粒与粗玉米(>0.1mm)近似
	中砂	有一半以上颗粒与砂糖或白菜籽(>0.25mm)近似
	细砂	有一半以上颗粒比小米(>0.5mm)大
	粉砂	约有 1/4 以上颗粒比荞麦或高粱(2mm)大

粉土为介于砂土与粘性土之间,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 50% 的土。

红粘土为碳酸盐岩系的岩石经红土化作用形成的高塑性粘土,其液限一般大于 50。红粘土经再搬运后仍保留其基本特征,其液限大于 45 的土为次生红粘土。

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、粘性土等组成的填土。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。

膨胀土为土中粘粒成分主要由亲水性矿物组成,同时具有显著的吸水膨胀和失水收缩特性,其自由膨胀率大于等于 40% 的粘性土。

湿陷性土为浸水后产生附加沉降,其湿陷系数大于等于 0.015 的粘性土。

【例 1-1】 某砂土试样,各粒组含量百分比如图 1-1 所示,确定砂土名称。

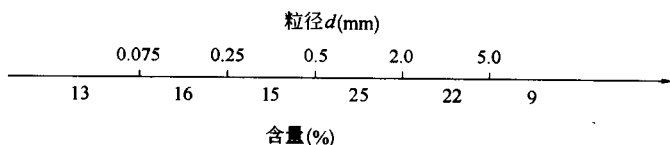


图 1-1 砂样的粒组含量百分比

解:(1)粒径 $d > 2\text{mm}$ 含量占 31%,在 25%~50 之间,定为砾砂;

(2)粒径 $d > 0.5\text{mm}$ 含量占 56% > 50%,定为粗砂;

(3)粒径 $d > 0.25\text{mm}$ 含量占 71% > 50%,定为中砂;

(4)粒径 $d > 0.075\text{mm}$ 含量占 87% > 85%,定为细砂;

(5)粒径 $d > 0.075\text{mm}$ 含量占 87% > 50%,也可定为粉砂。



根据表 1-5 的表注,粒组含量从上到下以最先符合者确定,确定此砂土试样为砾砂。

第三节 土的工程特性指标

一、土的物理指标

(一)土的物理性质指标

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。

$$\gamma = \rho g = 9.8\rho \approx 10\rho (\text{kN/m}^3) \quad (1-1)$$

2. 含水量 w

土的含水量表示土中含水的数量,为土体中水的质量与固体矿物质量的比值,用百分数表示。

$$w = \frac{\text{水的质量}}{\text{固体颗粒质量}} = \frac{m_w}{m_s} \times 100(\%) \quad (1-2)$$

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。

$$e = \frac{\text{孔隙体积}}{\text{固体颗粒体积}} = \frac{V_v}{V_s} \quad (1-3)$$

4. 孔隙度(孔隙率) n

土的孔隙度表示土中孔隙大小的程度,为土中孔隙占总体积的百分比。

$$n = \frac{\text{孔隙体积}}{\text{土体总体积}} = \frac{V_v}{V} \times 100(\%) \quad (1-4)$$

5. 饱和度 S_r

土的饱和度表示水在孔隙中充满的程度。

$$S_r = \frac{\text{水的体积}}{\text{孔隙体积}} = \frac{V_w}{V_v} \quad (1-5)$$

6. 干密度 ρ_d 和干重度 γ_d

土的干密度为单位体积的土,将水分烘干后的质量。土的干容重为单位体积的土,将水分烘干后的重力,即 $\gamma_d = \rho_d g = 9.8\rho_d \approx 10\rho_d (\text{kN/m}^3)$ 。

$$\rho_d = \frac{\text{固体颗粒质量}}{\text{土的总体积}} = \frac{m_s}{V} (\text{g/cm}^3) \quad (1-6)$$

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时,单位体积的重力,即 $\gamma_{sat} = \rho_{sat} g = 9.8\rho_{sat} \approx 10\rho_{sat} (\text{kN/m}^3)$ 。



$$\rho_{sat} = \frac{\text{孔隙全部充满水的总质量}}{\text{总体积}} = \frac{m_s + m_w + V_s \rho_w}{V} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (1-7)$$

8. 有效密度 ρ' 和有效容重 γ'

土的有效密度(浮密度)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(浮重度)为地下水位以下,土体单位体积的重力,即 $\gamma' = \rho' g = 9.8 \rho' \approx 10 \rho' \text{ (kN/m}^3\text{)}$ 。

$$\rho' = \rho_{sat} - \rho_w \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (1-8)$$

常见土的物理性质指标可以参见表 1-11。

土的物理性质指标 表 1-11

名称	符号	表达式	单位	常见值	换算公式
密度 容重	ρ γ	$\rho = \frac{m}{V}, \gamma = 10\rho$	g/cm^3 kN/m^3	1.6 ~ 2.2 16 ~ 22	$\rho = \rho_d(1 + w)$ $\gamma = \gamma_d(1 + w)$
土粒 相对密度	d_s	$d_s = \frac{m_s}{V_s}$		砂土 2.65 ~ 2.69 粉土 2.70 ~ 2.71 粘性土 2.72 ~ 2.75	
含水量	w	$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100$	%	砂土 0 ~ 40% 粘性土 20% ~ 60%	$w = \left(\frac{\gamma}{\gamma_d} - 1 \right) \times 100\%$
孔隙比	e	$e = \frac{V_v}{V_s}$		砂土 0.5 ~ 1.0 粘性土 0.5 ~ 1.2	$e = \frac{n}{1 - n}$
孔隙度	n	$n = \frac{V_v}{V} \times 100$	%	30% ~ 50%	$n = \left(\frac{e}{1 + e} \right) \times 100\%$
饱和度	S_r	$S_r = \frac{V_w}{V_v}$		0 ~ 1	
干密度 干容重	ρ_d γ_d	$\rho_d = \frac{m_s}{V}, \gamma_d = 10\rho_d$	g/cm^3 kN/m^3	1.3 ~ 2.0 13 ~ 20	$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w}, \gamma_d = \frac{\gamma}{1 + w}$
饱和密度 饱和容重	ρ_{sat} γ_{sat}	$\rho_{sat} = \frac{m_s + m_w + V_s \rho_w}{V}$ $\gamma_{sat} = 10\rho_{sat}$	g/cm^3 kN/m^3	1.8 ~ 2.3 18 ~ 23	
有效密度 有效容重	ρ' γ'	$\rho' = \rho_{sat} - \rho_w$ $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$	g/cm^3 kN/m^3	0.8 ~ 1.3 8 ~ 13	

在以上土的 9 个物理指标当中,土的密度(容重)、土粒相对密度和土的含水量称为土的三项基本物理指标。土的孔隙比和孔隙度反映土的松密程度,土的含水量与土的饱和度反映土中含水程度。这 9 个物理指标是相互关联的,如果 ρ 、 d_s 和 w 由实验室测定后,其余 5 个物理

性指标可以通过三相草图求得(图 1-2)。

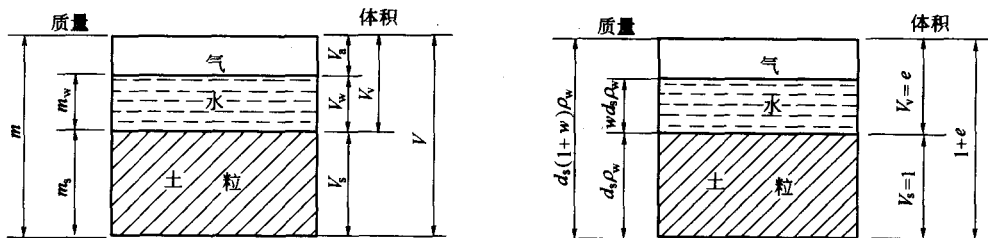


图 1-2 土的三相草图

【例 1-2】某饱和土体积为 120cm^3 , 土的重量为 2.0N , 土烘干后重量为 1.5N , 求 w 、 d_s 、 e 及 γ_d 。

解: 饱和土体, 指孔隙中全部被水充满, 故三相图变成了两相图, 则水的重力为 $2.0 - 1.5 = 0.5\text{N}$ 。水的体积 $V_w = 0.5/10 \times 10^3 = 50\text{cm}^3$, 土粒体积 $V_s = 120 - 50 = 70\text{cm}^3$, 则:

$$w = \frac{0.5}{1.5} \times 100\% = 33.3\%$$

$$d_s = \frac{1.5}{70} = 21.4 \times 10^{-3} \text{N/cm}^3 = 21.4 \text{kN/m}^3$$

$$e = \frac{50}{70} = 0.714$$

$$\gamma_d = \frac{1.5}{120} = 12.5 \times 10^{-3} \text{N/cm}^3 = 12.5 \text{kN/m}^3$$

【例 1-3】在某住宅地基勘察中, 已知一个钻孔原状图试验结果为: 土的密度 $\rho = 1.80 \text{g/cm}^3$, 土粒相对密度 $d_s = 2.70$, 土的含水量 $w = 18.0\%$, 求其余 6 个物理指标。

解: (1) 绘制三相计算草图。

(2) 令 $V = 1\text{cm}^3$ 。

(3) 已知 $\rho = \frac{m}{V} = 1.80\text{g/cm}^3$, 故 $m = 1.80\text{g}$ 。

(4) 已知 $w = \frac{m_w}{m_s} = 0.18$, 所以 $m_w = 0.18m_s$;

又知: $m_w + m_s = 1.80\text{g}$, 所以 $m_s = \frac{1.80}{1.18} = 1.525\text{g}$;

故: $m_w = m - m_s = 1.80\text{g} - 1.525\text{g} = 0.275\text{g}$ 。

(5) $V_w = 0.275\text{cm}^3$ 。

(6) 已知 $d_s = \frac{m_s}{V_s} = 2.70$, 所以 $V_s = \frac{m_s}{2.70} = \frac{1.525\text{g}}{2.70\text{g/cm}^3} = 0.565\text{cm}^3$ 。

(7) 孔隙体积 $V_v = V - V_s = 1\text{cm}^3 - 0.565\text{cm}^3 = 0.435\text{cm}^3$ 。

(8) 气相体积 $V_a = V_v - V_w = 0.435\text{cm}^3 - 0.275\text{cm}^3 = 0.16\text{cm}^3$ 。

至此, 三相草图中 8 个未知量全部计算出数值。

(9) 根据所求物理性质指标的表达式可得:



①孔隙比

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{0.435\text{cm}^3}{0.565\text{cm}^3} = 0.77$$

②孔隙度

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% = 43.5\%$$

③饱和度

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{0.275\text{cm}^3}{0.435\text{cm}^3} = 0.632$$

④干密度

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} = 1.525\text{g/cm}^3, \text{干重度 } \gamma_d = 15.25\text{kN/m}^3$$

⑤饱和密度

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_w + m_s + V_s \rho_w}{V} = 1.80 + 0.16 = 1.96\text{g/cm}^3$$

⑥饱和容重

$$\gamma_{\text{sat}} = 19.6\text{kN/m}^3$$

⑦有效密度

$$\rho' = \rho_{\text{sat}} - \rho_w = 1.96\text{g/cm}^3 - 1.0\text{g/cm}^3 = 0.96\text{g/cm}^3$$

⑧有效容重

$$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = 19.6\text{kN/m}^3 - 10\text{kN/m}^3 = 9.6\text{kN/m}^3$$

上述三相计算中,若设 $V_s = 1\text{cm}^3$,与设 $V = 1\text{cm}^3$ 计算可得相同的结果。

(二)粘性土的塑性

粘性土随着含水量不断增加,土的状态变化为固态——半固态——可塑状态——液体状态,相应的地基承载力相差很大。粘性土最主要的物理特征并非孔隙比、相对密度,而是土粒与土中水相互作用产生的稠度。

粘性土的稠度反映土粒之间的联结强度随着含水量高低而变化的性质,各不同状态之间的分界含水量具有重要的意义。

1. 液限 $w_L(\%)$

粘性土呈液态与塑态之间的分界含水量称之为液限 w_L ,一般通过锥式液限仪或碟式液限仪进行测定。

2. 塑限 $w_p(\%)$

粘性土呈塑态与半固态之间的分界含水量称为塑限 w_p ,一般可通过滚搓法与液、塑限联合测定法进行测定。

3. 缩限 $w_s(\%)$

粘性土呈半固态与固态之间的分界含水量称为缩限 w_s ,可用收缩皿法测定。

4. 塑性指数

粘性土与粉土的液限与塑限的差值去掉百分数后的值为塑性指数。



$$I_p = (w_L - w_p) \times 100 \quad (1-9)$$

塑性指数表示细颗粒土体处于可塑状态下含水量变化的最大区间。一种土的 I_p 越大,表明该土能吸附结合水多,但仍处于可塑状态,亦即该土粘粒含量高或矿物成分吸水能力强。工程上一般用它作为粘性土与粉土定名的标准。

5. 液性指数 I_L

粘性土的液性指数(相对稠度)为天然含水量与塑限的差值和液限与塑限差值之比,反映土的软硬程度,在工程上是确定粘性土承载力的重要指标。

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} \quad (1-10)$$

可以利用粘性土的液性指数确定其存在状态(表 1-12)。当用静力触探探头阻力或标准贯入试验锤击数判定粘性土的状态时,可根据当地经验确定。

粘性土的状态

表 1-12

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		

【例 1-4】某粘性土的天然含水量 $w = 33.5\%$, 液限 $w_L = 42.1\%$, 塑限 $w_p = 24\%$, 试求该土的塑性指数 I_p 和液限指数 I_L , 并确定该土的状态。

解:

$$I_p = (w_L - w_p) \times 100 = 42.1 - 24 = 18.1$$

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} = \frac{33.5 - 24}{42.1 - 24} = 0.525$$

查表 1-12 知, 该土的状态为可塑。

【例 1-5】某地基土试验中, 测得土的干容重 $\gamma_d = 15.7 \text{ kN/m}^3$, 含水量 $w = 19.3\%$, 土粒相对密度 $d_s = 2.71$ 。液限 $w_L = 28.3\%$, 塑限 $w_p = 16.7\%$ 。

求: (1) 该土的孔隙比 e 、空隙度 n 及饱和度 S_r ;

(2) 该土的塑性指数 I_p 、液性指数 I_L , 并定出该土的名称及状态。

解: (1) 求 e 、 n 、 S_r :

令 $V_s = 1$, 则 $V_v = e$; 其他依定义填入图 1-3 中。由图有:

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} = \frac{d_s \rho_w}{1 + e}$$

$$e = \frac{d_s \rho_w}{\rho_d} - 1 = \frac{2.71 \times 1}{1.57} - 1 = 0.726$$

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{e}{1 + e} = 0.42 = 42\%$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{m_w / \rho_w}{e} = \frac{wd_s}{e} = \frac{0.193 \times 2.71}{0.726} = 0.72 = 72\%$$

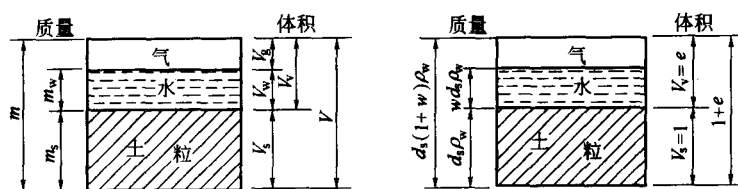


图 1-3

(2)求 I_p 、 I_L 及定名、定态:

一般来说,只有粘性土才需要稠度试验,求得液限 w_L 、塑限 w_p 后,从而求得它的定名指标——塑性指数 I_p ,定态指标——液性指数 I_L 。再进一步细分时,就需计算 I_p 和 I_L 的具体数值。

$$I_p = w_L - w_p = 28.3 - 16.7 = 11.6$$

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} = \frac{w - w_p}{I_p} = \frac{19.3 - 16.7}{11.6} = 0.224$$

因为 $10 < I_p < 17, 0 < I_L < 0.25$,所以该土为硬塑的粉质粘土。

二、土的强度指标

在各类建筑工程设计中,为保证建筑物的安全可靠,要求建筑地基必须同时满足变形条件和强度条件,以便保证在上部荷载作用下地基的稳定性,不发生地基剪切或滑动破坏。

土的抗剪强度和诸多因素有关,库仑经过试验认为:①当土体中任何一个面上的剪应力等于土体的抗剪强度时土体就会破坏;②土体中任何一个面上的抗剪强度 τ_f 都可表述成作用于该面上的法向应力 σ 的函数。

试验证明,在法向应力变化范围不大时,抗剪强度与法向应力的关系近似于直线关系。因此,土的抗剪强度 τ_f 与法向应力 σ 的关系可用下式表示:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (1-11)$$

式中: τ_f ——土的抗剪强度, kPa;

σ ——剪切破坏面上的法向总应力, kPa;

c ——土的粘聚力(对于无粘性土 $c = 0$), kPa;

φ ——土的内摩擦角,°。

式(1-11)称作土体抗剪强度的库伦定律, c 、 φ 即为土的抗剪强度指标,可以通过试验求得。 c 、 φ 反映了土体抗剪强度的大小,是土体非常重要的力学性质指标,但是有效应力的影响不可忽视。 $\tan \varphi = f$ 为土的内摩擦系数, $\sigma \tan \varphi$ 则为土的内摩擦力,通常由两部分组成:一部分是剪切面上颗粒与颗粒接触面所产生的摩擦力;另一部分则是颗粒之间的相互嵌入和连锁作用产生的咬合力。粘聚力 c 是由于粘土颗粒之间的胶结作用、结合水膜以及分子引力作用等形成的。按照库伦定律,对于某一种土,它们是作为常数来使用的。实际上,它们均随试验方法和土样的试验条件等的不同而发生变化,即使是同一种土 c 和 φ 值也不是常数。

表 1-13 给出了不同物理状态下的土体抗剪强度指标的平均值,可供使用参考。



土体抗剪强度指标参考值

表 1-13

土类	粗砂	中砂	细砂	粉砂	粉土	粘性土	粘土
c (kPa)	0	0	0	2~5	2~7	5~40	25~65
φ (°)	38~42	35~40	32~38	28~36	23~30	17~24	15~18

【例 1-6】 某土样 $\varphi = 24^\circ$, $c = 22\text{kPa}$, 承受大小主应力分别为 $\sigma_1 = 420\text{kPa}$, $\sigma_3 = 159\text{kPa}$, 试判断该土样是否达到极限平衡状态?

解: 已知最小主应力 $\sigma_3 = 159\text{kPa}$, 现将 $\varphi = 24^\circ$, $c = 22\text{kPa}$, $\sigma_1 = 420\text{kPa}$, 代入土中某点的极限平衡状态方程:

$$\begin{aligned}\sigma_3 &= \sigma_1 \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) - 2c \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \\ &= 420 \times \tan^2(33^\circ) - 2 \times 22 \times \tan 33^\circ = 158.57\text{kPa}\end{aligned}$$

计算结果可认为 σ_3 的计算值与已知值相等, 所以可以判断该土样处于极限平衡状态。

【例 1-7】 某饱和粘性土在三轴仪中进行固结不排水试验, 得 $c' = 0$, $\varphi' = 25^\circ$ 。如果这个试件受到 $\sigma_1 = 300\text{kPa}$ 和 $\sigma_3 = 200\text{kPa}$ 的作用, 测得空隙水压力 $u = 100\text{kPa}$, 问试件是否被压坏?

解: 先可根据题设作出有效应力圆的包络线, 如图 1-4 所示。

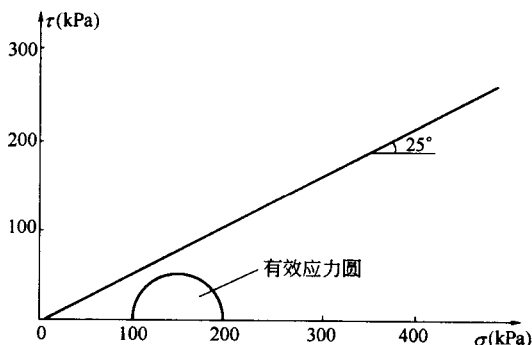


图 1-4

假设此时剪应力达到抗剪强度极限值, 土样即将破坏, 则有:

$$\begin{aligned}\sigma'_1 &= \sigma_1 - u \\ &= 300 - 100 \\ &= 200(\text{kPa}) \\ \sigma'_3 &= \sigma_3 - u \\ &= 200 - 100 \\ &= 100(\text{kPa})\end{aligned}$$

作出此有效应力圆。可见, 该应力圆和包络线相离, 所以, 该试件不会发生破坏。

【例 1-8】 设砂土地基中某点的大主应力 $\sigma_1 = 450\text{kPa}$, 小主应力 $\sigma_3 = 210\text{kPa}$, 砂土的内摩擦角 $\varphi = 25^\circ$, 粘聚力 $c = 0$, 试用多种解法判断该点是否破坏。