

地基基础的设计与计算

黄熙龄 秦宝玖 等编

中国建筑工业出版社

9222/71

39876

地基基础的设计与计算

黄熙龄 秦宝玖 等编



中国建筑工业出版社

本书为配合《工业与民用建筑地基基础设计规范》(TJ7—74)的使用而编写的一部规范辅助用书。共分十四章:第一至三章叙述土力学基本理论和计算方法、地基勘察;第四章为地基基础设计的基本原则,这是本书的重点,介绍了地基按容许承载力计算和按变形验算的原理和方法;第五至十章介绍特殊地基设计的经验,包括了山区地基、软弱地基、湿陷性黄土地基、季节性冻土地基、膨胀土地基和地震等;最后介绍了各类浅基础、桩基础和支挡结构的设计以及基坑的开挖等。

本书可供土建勘察、设计技术人员参考。

本书主要由黄熙龄、秦宝玖、胡定、徐攸在、王钟琦、徐士峰等执笔编写,此外,参加编写的还有刘栋国、吴东江、舒振声、刘守明、朱桐浩、张永钧、邓仁林、平涌潮、陈希泉等,最后由黄熙龄、秦宝玖负责总成,插图由金宝森绘制。

地基基础的设计与计算

黄熙龄 秦宝玖 等编

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
外文印刷厂印刷

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 23 字数: 558 千字

1981年12月第一版 1981年12月第一次印刷

印数: 1—30,000册 定价: 1.85元

统一书号: 15040·3999

前 言

一九七四年由国家基本建设委员会批准试行的《工业与民用建筑地基基础设计规范》(TJ7—74),是我国建国以来第一本国家颁布的地基基础设计规范。这本规范是由全国60多个单位的近百名工程技术人员和教师,搜集并总结了建国二十多年来大量的工程实践资料和经验之后,编写出来的。为了帮助设计人员较好地运用规范解决一些设计中的实际问题,有必要介绍一些土质学和土力学的基础知识、地基设计原则、计算方法和实践的经验和。中国建筑科学研究院地基基础研究所会同规范编制组的部分同志编写了这本书。可以说这是一本以阐明建筑物地基基础设计和计算为主的规范辅助用书。当前我国社会主义现代化建设正蓬勃发展着,规范颁布以来,一些生产建设中的新技术、新经验不断涌现,对此,本书在内容上也尽量予以介绍。

本书共计十四章,可分为以下几个主要部分:

一~三章为基本理论和设计参数。重点阐明了在进行地基基础设计时常用的土力学理论和计算方法,土的基本性质和设计取用的参数,以及取得这些参数的手段和方法。在土的基本性质方面,除对土的物理、力学性质指标的概念、试验假定、试验方法以及在实际使用中的问题做了一般介绍外,又对土的工程分类做了重点阐述。勘察是设计的一个重要环节,本书对各类地基的勘察重点、野外勘察手段和野外试验方法做了简要介绍。在地基计算方面,重点阐述了按地基容许承载力计算、沉降计算和斜坡地基的稳定性计算的理论概念和方法。这一部分是进行地基基础设计的基本前提,编入这一部分的目的,在于使设计者进一步认识地基土的建筑性质,了解所采用的设计参数的来源,掌握在设计上所应用的土力学理论,灵活地运用计算方法去解决设计中的具体问题。

第四章为地基基础设计的基本原则,也是这本书的中心。这一部分的内容,主要取材于规范。将房屋和构筑物的地基计算分为甲、乙两类,甲类——按容许承载力计算;乙类——除按容许承载力计算外,还应进行变形验算。在阐述这两类地基计算时,均编入了设计计算例题,以期达到举一反三的效果。书中在介绍地基容许变形值的同时,又根据建筑物一般变形的特征,列入了一般需要注意验算变形的部位。对建筑物的沉降观测也做了较为详细的介绍。

五~十章为特殊地基设计的经验。我国幅员广阔,各种土的地基类别俱全,建国廿多年来,在各种土的地基上都取得了十分丰富的经验。在这本书里分章加以详细介绍,其中山区地基、软弱地基和季节性冻土地基是规范所包括的,而湿陷性黄土地基、膨胀土地基和地震,则是综合了建筑科学研究院地基基础研究所在这方面协调国内各有关单位共同工作得出的研究成果,并参照国内其他有关规范、规程编写的。总的来说,上述各种地基的设计是在第四章所阐述的基本原则下的具体运用。

十一~十三章为基础和支挡结构的设计,这一部分的资料来源于规范以及近年来国内各单位对基础和支挡结构的研究成果。在基础方面,除了一般常用的基础(刚性基础和钢

钢筋混凝土基础)和桩基础之外,又编入了适用于大型构筑物的壳体基础和在岩层埋藏较浅时采用的锚桩基础。在支挡结构方面,除了习惯用的重力式挡土墙之外,又编入了锚杆挡土墙。

十四章基础开挖与处理,主要编入了与设计有关的一些施工措施。

综上所述,本书对一般常用的地基基础设计问题均做了较为详细的介绍,对于工业与民用建筑地基的设计与计算可能起到辅助作用。在基础理论方面只给出了基本概念和计算的公式,未做更多的公式推导,仅为结合实用编入了一些必要的算例,以便对照应用加深理解。另外,本书限于以工业与民用建筑的地基基础为主要对象,故而对大型滑坡的综合治理、大型支挡结构以及水工结构物的设计等未能涉及。

编写本书所用的资料,大部分来自规范以及国内各科研、设计单位,鉴于资料繁多又较零散,且大部分未正式发表,因此,本书不另列参考资料目录。

由于水平所限,本书还会有不少缺点和错误,敬请读者批评指正。

目 录

前 言

第一章 地基土的基本性质及其工程分类	1
第一节 土的物理性质	1
第二节 土的力学性质	11
第三节 土的工程分类	24
第二章 地基勘察	31
第一节 勘察目的和内容	31
第二节 工程地质勘探与现场试验	39
第三章 地基计算	48
第一节 基本原理	48
第二节 地基承载力	49
第三节 沉降计算	60
第四节 地基稳定性计算	82
第四章 地基基础设计的基本原则	87
第一节 一般原则	87
第二节 按容许承载力计算	89
第三节 建筑物的变形特征及地基容许变形值	98
第四节 变形验算	106
第五节 建筑物的沉降观测	118
第五章 山区地基	122
第一节 概述	122
第二节 山区不均匀地基	123
第三节 岩溶与土洞	131
第四节 滑坡及其防治	138
第六章 软弱地基	152
第一节 概述	152
第二节 单元组合设计原则	155
第三节 减少不均匀沉降的措施	164
第四节 相邻建筑物的相互影响	167
第五节 大面积地面荷载问题	171
第六节 软弱地基的处理	176
第七章 湿陷性黄土地基	179
第一节 概述	179
第二节 湿陷性黄土的组成成分和状态	182
第三节 湿陷性黄土的鉴定	185
第四节 湿陷起始压力与自重湿陷	187
第五节 黄土地基的湿陷变形特征	193
第六节 湿陷性黄土地基的建筑设计	199

第七节 水在黄土地基中的扩散	203
第八章 季节性冻土地基	210
第一节 概述	210
第二节 冻胀分类及其分类指标	211
第三节 地基冻胀对建筑物的危害	215
第四节 基础最小埋深 D_{min} 的确定	217
第五节 防冻害措施	223
第九章 膨胀土地基	226
第一节 一般特征	226
第二节 膨胀的力学性质、自由膨胀率、膨胀率	227
第三节 收缩与收缩系数	229
第四节 膨胀与收缩的可逆性、胀缩总率	230
第五节 膨胀土地基上房屋的变形	232
第六节 膨胀土的判别方法与膨胀土地基评价	236
第七节 膨胀土地基计算	240
第八节 膨胀土地基设计及处理	243
第十章 地震	248
第一节 概述	248
第二节 建筑场地的选择	254
第三节 不同地基上建筑物的地震反应及其防震措施	254
第四节 关于基础抗震设计的一些问题	262
第十一章 一般基础设计	265
第一节 刚性基础	265
第二节 钢筋混凝土板式基础	270
第三节 壳体基础	277
第十二章 桩基础	230
第一节 概述	230
第二节 桩的垂直容许承载力	292
第三节 垂直荷载作用下桩基的设计	297
第四节 水平荷载作用下桩基的设计	301
第五节 承台和桩的设计与构造	303
第六节 锚桩基础	307
第十三章 挡土墙设计	310
第一节 土压力计算	311
第二节 重力式挡土墙	320
第三节 锚定板挡土墙	328
第四节 锚杆挡土墙	337
第十四章 基坑开挖与处理	344
第一节 基坑开挖	344
第二节 基槽坑壁的临时支护	345
第三节 基坑排水	354
第四节 流砂现象及防护	359

第一章 地基土的基本性质及其工程分类

第一节 土的物理性质

一、土的成因和年代概述

地球表层的整体岩石，由于经受长期的风化作用而逐渐崩解破碎，形成各种形状不同和大小不一的松散物质。这些物质在不同的地质环境下堆积（或沉积）下来，形成了我们所说的土。根据在我国的大量工程实践，说明不同成因和年代的土，具有不同的工程性质。例如，武汉地区的下蜀系粘土和湘江两岸的网纹状粘土，其生成年代比较久（晚更新世 Q_3 ），它和后期沉积的一般粘性土（全新世 Q_4 ）相比，即便是二者物理性质指标十分相近，但其力学性质却有较大差别，特别是在地基容许承载力方面，前者要比后者高得多。又如北京地区新近沉积的粘性土，是在人类有了文字记载的历史之后沉积的，它又不同于一般粘性土，是一种比较软弱的粘性土，其压缩性较之有相似颗粒组成和密度的一般粘性土要大得多。此外，土的工程性质又与土的成因和所处的气候环境有关。如我国西南地区的红粘土，是碳酸盐类岩石经风化作用后的残积物或坡积物，虽然它的孔隙比大，含水量高，但却具有较高的强度和较低的压缩性。因此，我们说地基土的工程性质与它的成因和沉积年代有着十分密切的关系，在研究地基土的工程性质时，必须考虑其成因和沉积年代的影响。

土的沉积年代一般延用工程地质学中的地质年代，通常地质年代有绝对年代和相对年代之分，绝对年代是借用地壳中放射性元素蜕变的结果推算出来的地球年龄，相对年代是将地球的历史分为与生物界的发展以及重大的地壳运动变化相应的时间段落来表示的。而土的沉积年代多采用后者表示。相对地质年代划分为代、纪、世、期四级，即将地质年代总分为五个代，每个代又分为若干个纪，每个纪分为若干个世，每个世再分为若干个期。另外，也有以沉积生成物的时间岩层为单位划分为界、系、统、阶。两种划分方法相互对应为：

代纪世期

界系统阶

整个地质年代的划分可见表1-1。

大多数的土是在第四纪地质历史时期内形成的，而第四纪又可划分如表1-2。

《工业与民用建筑地基基础设计规范》（TJ7—74）将第四纪晚更新世（ Q_3 ）及其以前沉积的粘性土定为老粘性土，全新世（ Q_4 ）沉积的粘性土定为一般粘性土，又将相当于人类有了文字记载历史以后沉积的粘性土定为新近沉积粘性土，这是由于形成年代不同的这几种粘性土有着显著不同的工程性质，为了工程实用而进行划分的。

地质年代的划分

表 1-1

代 (或界)	纪 (或系)		重 要 生 物	距今年数 (亿 年)	重要地壳运动
新生代 (K_z)	第四纪(Q)		石器时代的人类	0.01	喜马拉雅山运动 (阿尔卑斯运动)
	第三纪 (R)	晚第三纪(N)	哺乳动物全盛期到猿、人分枝	0.7±0.02	
		早第三纪(E)	近代型的哺乳动物出现		
中生代 (M_z)	白垩纪(K)		大爬虫灭亡, 胎生哺乳动物出现	1.35±0.05	四川运动 } 燕山 宁镇运动 } 运动 印支运动
	侏罗纪(J)		爬虫全盛期, 鸟类出现	1.80±0.05	
	三叠纪(T)		恐龙开始, 哺乳类出现	2.25±0.05	
古生代 (P_z)	二叠纪(P)		两栖动物繁盛, 爬虫开始	2.70±0.05	苏皖运动 东吴运动 } 柳江运动 } 加里宁运动 太康运动
	石炭纪(C)		昆虫出现羊齿与种子植物繁盛	3.50±0.10	
	泥盆纪(D)		鱼类繁盛两栖类开始	4.00±0.10	
	志留纪(S)		陆地生物出现	4.40±0.10	
	奥陶纪(O)		淡水鱼类与陆地生物出现	5.00±0.15	
	寒武纪(ε)		三叶虫全盛, 其它生物繁殖	6.00±0.20	
元古代 (P_i)	震旦纪(Z)		生物痕迹, 海绵、海藻遗迹	至少17.50	
太古代 (A_r)	前震旦纪(A_nZ)		火山活动, 地球初期		
	地球原始				

第四纪地质时代的划分

表 1-2

纪 (或 系)	世 (或 统)
第 四 纪(Q)	全 新 世 (Q_4)
	晚更新世(Q_3)
	中更新世(Q_2)
	早更新世(Q_1)

土的成因有多种, 有些土的工程性质与它的成因有着密切的关系, 所以在研究土的工程性质时, 必须了解它在成因类型上的特点。第四纪土的成因可概括地分为以下几种:

(1) 残积土: 岩石表面经风化破碎后残留在原地的一种堆积物, 其主要特征是颗粒未经分选作用, 无层理。残积土的成分与母岩的岩性有密切关系, 如在花岗岩地区的残积土中, 长石常被分解成粘土矿物, 石英常破碎成细砂。石灰岩地区的残积土则往往成为红粘土。此外, 由于山区原始地形变化较大, 且岩石风化程度不一, 往往在一个很小的范围内残积土层厚度变化就很大, 因此, 在残积土地基上进行工程建设时, 要注意地基的不均匀性。

(2) 坡积土: 在重力作用下, 风化物被雨水或雪水搬运而形成的山坡堆积物, 主要可分为山地坡积和山麓平原坡积两种。前者常为粘土夹碎石, 后者则以粘性土为主, 亦含少量碎石。坡积土常以不同厚度埋藏在坡地上, 越向坡角厚度越大。坡积土的组成, 在以粘性土为主时, 一般天然孔隙比较大。新近堆积的坡积土, 具有较高的压缩性, 在水中很易崩解。

(3) 洪积土：是由山区暴雨和临时性的洪水作用，在山前形成的堆积物。由于水的作用，洪积土具有一定的分选作用，距山区或高地近的地方，洪积土的颗粒较粗，远的地方则颗粒较细。但是由于每次暂时性水流的搬运能力不等，在粗颗粒中往往填充了细颗粒，细颗粒中又会夹有粗颗粒。洪积土一般层理比较明显，但在山区或高地近处，层理往往交错，且夹有透镜体或夹层。洪积土的性质随距山区或高地的远近而有较大区别，山前的洪积土常由较粗的颗粒组成，因而具有较高的强度和较低的压缩性。

(4) 冲积土：是由河流搬运所形成的沉积物。这种土形成于山区河谷中或是于山区以外的冲积平原上。其特征是有明显的分选性，层理清晰，常为砂与粘性土的交错层理，亦存在有砾石层。冲积土有较多的成因种类，例如，平原河谷、山区河谷、山前平原以及三角洲沉积等。冲积土的性质主要因其沉积环境和形成物质的不同而有不同。

(5) 湖沼沉积土：是在极为缓慢的水流环境下所形成的沉积物。根据沉积环境的不同有湖泊相和沼泽相两种类型。它们的共同特征是除了在沉积物中有细粒物质外，还有生物化学作用的有机质存在，形成了特殊性质的淤泥或泥炭，其含水量大，压缩性高、强度低。进行工程建设时，必须注意这种土的特点。

(6) 冰川沉积土：是由冰川和冰水作用所形成的沉积物，一般又可分为冰碛、冰湖及冰水沉积三种类型。冰碛物主要堆积在冰川的近底部分，颗粒常以砾石为主，夹有砂和粘土，由于受上覆冰层的巨大压力所压实，具有较高的强度，是良好的建筑物地基。冰湖和冰水沉积物，分别是冰湖或融化后的冰川水所形成的堆积物。冰湖沉积的带状粘土，具有明显的层理，但有时含有少量漂石，形成不均匀地基。

(7) 风积土：是由风的搬运形成的堆积物。主要包括松散的砂和砂丘，典型的黄土也是风积物的一种。这种土的特征是没有层理，同一地点沉积的物质，颗粒大小十分接近。

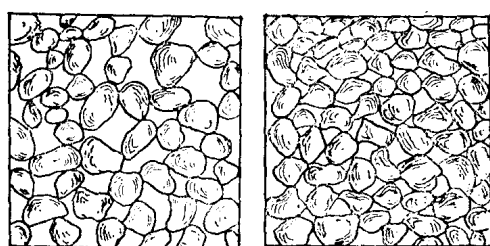
(8) 海相沉积土：是被河流带到海水中的物质，堆积在海底的沉积物。一般离海岸越远，颗粒越细。海相沉积物有滨海、浅海、大陆架、深海四种，其主要特征是常含有海底生物经生物化学作用而产生的大量石灰质、泥灰质及硅质等胶结成分。土的性质受形成历史年代以及距离海岸的远近而不同，例如，滨海沉积物，主要是由粗碎屑和砂粒组成，厚度不大，无层理或层理不规则；浅海沉积物，主要为细小碎屑、粉土、粘土及淤泥所组成；大陆架沉积物，主要由浮游生物的遗体以及各种灰尘的混合物所组成；深海沉积物，主要为生物软泥组成。此外，三角洲的泻湖及溺谷相沉积物是介于大陆沉积与海相沉积之间的过渡类型。其特征是土质松软、厚度很大，常含有有机质的混合物，以淤泥质为主。

二、土的结构和构造

1. 土的结构

是指土粒或土粒集合体的大小、形状及其相互联结和排列的形式，一般有单粒结构和团粒结构两种。单粒结构多是以原生矿物的单体组成，是砂类土的主要结构特征，根据单粒排列的密度有疏松的和密实的两种（图 1-1）。疏松的砂土，尤其粉细砂，在饱和情况下，地震时易于液化，但在排水条件下施加振动荷载，又可使之转变为密实的。密实的砂土，则是较好的天然地基。团粒结构多是次生矿物颗粒的集合体，根据矿物颗粒的排列形式，又可分为蜂窝结构和绒粒结构（图 1-2）。蜂窝结构仅在分选很好的粘土中见到，如

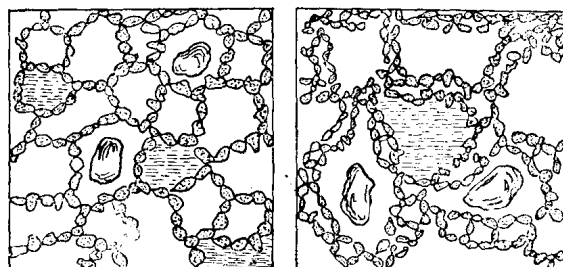
在某些纯高岭粘土中。绒粒结构是由多个小的蜂窝结构组成，有时其中混有较大的颗粒，常见于一般高塑性粘性土中。



(a) 疏松的

(b) 密实的

图 1-1 砂土的单粒结构示意图



(a) 蜂窝结构

(b) 绒粒结构

图 1-2 土的团粒结构示意图

天然沉积的土，除了颗粒间因分子吸引力而形成的连接之外，在颗粒较细的粘性土中，还由于长期的物理化学作用使颗粒或颗粒集合体之间产生一定的连接强度，叫做土的结构强度。对于土的天然结构强度，目前多采用对比试验的方法进行评价，即利用具有天然结构的原状土样，测求其无侧限抗压强度 q_u 值，并以同一土样，经完全破坏其天然结构后，制成相同湿度和密度的重塑土样，测得其无侧限抗压强度 q'_u 值，由于天然结构强度的影响， q_u 值恒大于 q'_u 值。因此，可以利用二者的比值表征土的结构性，并定名为灵敏度 S_t ，即：

$$S_t = \frac{q_u}{q'_u} \quad (1-1)$$

根据灵敏度 S_t 值的大小可分为：

$S_t = 2 \sim 4$	一般粘性土
$S_t = 4 \sim 8$	灵敏粘性土
$S_t > 16$	特别灵敏粘性土

2. 土的构造

是指土层的构成特征，亦即层理与裂隙的情况、结构单元的分布、颗粒成分以及土层各向异性的程度等，这些与土的沉积形成条件以及以后外力作用的大小和方向有关。土的构造主要可分为松散构造和层状构造两种，松散构造多见于无胶结的砂、砾石、卵石等厚层土中，分散构造比较接近于理想的各向同性体。层状构造的土分布较广，其中又可分为水平层理和斜交层理等，层状构造土的性质在各个方向均有不同，形成各向异性。此外，在研究土的构造时，还应注意土中是否有包裹体和结核体；有无不连续的裂隙分割等等。这些构造的存在，都将影响土的性质和受力的不均匀性。

三、土的组成

土是由固体、液体和气体三个部分所组成，固体的矿物颗粒构成土的骨架，在骨架之间存在着孔隙，这些孔隙又被水和气体所占据，故常称土中的固体、液体和气体为土的三相。如果所有的孔隙全部被水充满，又可称为二相体。

1. 土中的固体

土中固体颗粒的矿物成分有原生矿物（如长石、石英、云母、角闪石等）、不溶于水

的次生矿物（如高岭土、蒙脱土、伊利土等）、溶于水的次生矿物（如方解石、白云石、石膏、岩盐等），有时还有一些固体有机物质。

原生矿物是岩石经物理风化后形成的碎屑，其性质一般比较稳定，常以较粗颗粒出现，是碎石和砂土的主要矿物成分。原生矿物对土性质的影响主要决定于矿物颗粒的大小和形状。

在次生矿物中，高岭土是一种比较稳定的矿物，亲水性小，而蒙脱土则亲水性大，浸湿时能强烈地膨胀，失水时又会产生收缩，伊利土则介于高岭土和蒙脱土之间。此外，土中所含的盐类，也对土的工程性质有一定的影响，根据盐类的溶解度，可分为易溶盐、中溶盐和难溶盐。难溶盐和中溶盐分别是以碳酸盐（ CaCO_3 ）和硫酸盐（ CaSO_4 ）为主的化合物，易溶盐主要是各种盐类的氯化物，如氯化钠（ NaCl ）、氯化钙（ CaCl_2 ）、氯化钾（ KCl ）、氯化镁（ MgCl_2 ）等。

2. 土中水

在天然土中经常含有一定数量的水分，由于这些水分距离固体颗粒表面的远近不一，致使水与固体颗粒相互作用的程度有所不同，因而，水分处于不同的状态，具有不同的性质。图 1-3 为土的固体颗粒与水分子相互作用简图，（a）表示水在固体颗粒表面的两极化定向作用；（b）表示在距固体颗粒表面不同距离上，两极化作用的强弱程度，并在一定距离处已经失去了这种两极化的定向作用；（c）表示分子力 p_u 随着与固体颗粒表面距离的增加而很快下降的规律，可以看出在固体颗粒的表面上，分子力十分大，使水分主要处于与固体颗粒的分子吸引状态，而在距离固体颗粒接近 0.5μ 处，分子力已经极其微小，一般可以认为水分主要处于本身重力作用的影响了。根据以上所述，将土中水概略的分为：

（1）结合水：根据其与土颗粒表面结合的紧密程度又可分为吸着水（强结合水）和薄膜水（弱结合水）。

吸着水（强结合水）：它极其牢固地吸着在土颗粒表面上，性质接近于固体，比重大于 1，约在 1.2~2.0 之间，一般即使在温度为 -78°C 的时候也不冻结，具有极大的粘滞性和弹性。这种水不传递静水压力，受压时不转移，但在 $100\sim 105^\circ\text{C}$ 温度下将土烤干时，可使吸着水化为水气从土中排出。

薄膜水（弱结合水）：这种水处于吸着水的外围形成一层水膜，但与土颗粒之间的结合仍然很强，常呈半固态或塑性状态，它不传递静水压力，冻结温度低，已冻结的薄膜水在不太大的负温下就能融化。

（2）自由水：只受重力的影响，其性质与普通水无异，能传递静水压力，又可分为毛细水和重力水。

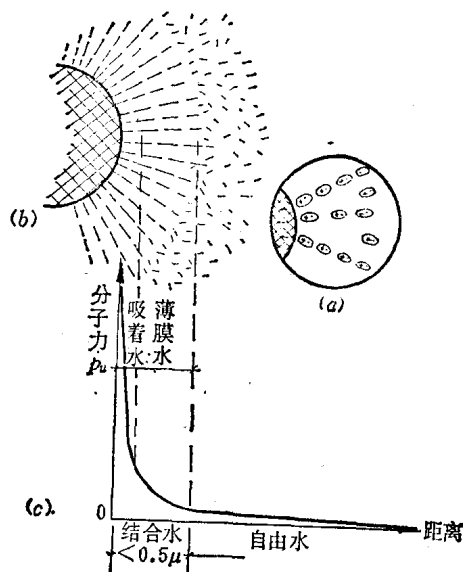


图 1-3 土的固体颗粒与水分子相互作用简图
（a）水在矿物颗粒表面的定向作用；（b）水在矿物颗粒表面的结合；（c）分子力 p_u 随距离的变化

毛细水：位于地下水位以上土的孔隙中，由毛细作用，使水通过土的微孔道上升到高出自由水面以上的水叫毛细水。毛细水的上升高度，界于0（在砾砂或卵石中）到5~6米（在粘土中）之间，由于毛细水高出自由水面，可以在地下水位以上的一定高度范围内形成毛细饱水区，故在考虑地基或土坡稳定计算，以及地基冻胀等问题时，应注意毛细水的作用。

重力水：即地下水位以下土孔隙中的水，它和一般水一样，可以传递静水压力，对土产生浮力，在水头作用下可以流动，并产生动水压力。

3. 土中气体

土中的气体以两种形式存在于土的孔隙中：一种是自由气体（气泡），存在于未被水所占据的地方，另一种是溶解于水的气体，与孔隙水形成不稳定的结合。常年处于地下水位以下的土中。与大气联通的气体，在粗粒的沉积物中最为常见。一般与大气联通的气体不影响土的性质。与大气隔绝的封闭气体，常存在于粘性土中。封闭气体的存在会增加土的弹性变形，减少土的透水性，影响土在压缩固结过程中的特性和速度。

四、土的基本物理性指标

土的物理性指标是指土的单位容重(γ)、含水量(w)、固体颗粒比重(G)、孔隙比(e)、孔隙度(n)、饱和度(S_r)等，图1-4是一个简化了的土体模型，通过这个模型可以计算出各个物理性指标。

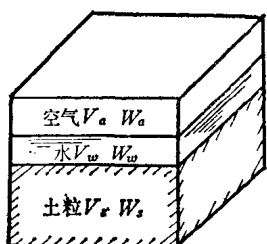


图 1-4 土的物理性指标计算模型

(1) 单位容重：具有天然结构和湿度的土重与其体积之比，即为土的单位容重，以 γ 表示：

$$\gamma = \frac{W}{V} \text{ (克/厘米}^3\text{)} \quad (1-2)$$

式中 W ——土重(克)；

V ——土的体积(厘米³)。

(2) 含水量：土中水重与固体颗粒重之比，即为土的含水量，以 w 表示：

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100(\%) \quad (1-3)$$

式中 W_w ——土中的水重(克)；

W_s ——固体颗粒重(克)。

(3) 干容重：土的固体颗粒重与土体积之比，即为土的干容重，以 γ_d 表示：

$$\begin{aligned} \gamma_d &= \frac{W_s}{V} = \frac{W_s \cdot W}{V \cdot W} = \frac{W}{V} \bigg/ \frac{W}{W_s} = \frac{W}{V} \bigg/ \frac{W_s + W_w}{W_s} \\ &= \frac{W}{V} \bigg/ \left(1 + \frac{W_w}{W_s} \right) = \gamma / (1 + 0.01w) \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中符号同前。

干容重反映着土粒骨架的紧密程度，可用作人工填土施工质量的控制指标。

(4) 比重：土的固体颗粒重与其同体积摄氏4°C水重之比，即为土的比重，以 G 表示：

$$G = \frac{W_s}{V_s} \cdot \frac{1}{\gamma_w} \quad (1-5)$$

式中 V_s ——固体颗粒体积 (厘米³)；

γ_w ——水的密度，采用 1 克/厘米³；

其余符号同前。

砂土的比重一般在 2.6~2.7 之间，平均为 2.65；粘土的比重一般在 2.7~2.8 之间，平均为 2.75，土中含有大量有机质时，比重将显著减小。

(5) 孔隙比：土的孔隙体积与固体颗粒体积之比，即为土的孔隙比，以 e 表示；

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{V}{V_s} - 1$$

由 (1-5) 式得 $V_s = \frac{W_s}{G\gamma_w}$ ；

(1-4) 式得 $\frac{W_s}{V} = \frac{\gamma}{1+0.01w}$

则
$$e = \frac{\frac{V}{\frac{W_s}{G\gamma_w}} - 1}{\frac{G\gamma_w}{\frac{W_s}{V}}} = \frac{\frac{G\gamma_w}{\frac{W_s}{V}} - 1}{\frac{G\gamma_w}{\frac{W_s}{V}}} = \frac{G\gamma_w}{\frac{W_s}{V}} - 1 = \frac{G\gamma_w}{\frac{\gamma}{1+0.01w}} - 1 = \frac{G\gamma_w(1+0.01w)}{\gamma} - 1 \quad (1-6)$$

式中 V_v ——孔隙体积 (克/厘米³)；

其余符号同前。

(6) 孔隙度：土的孔隙体积与土体积之比，即为土的孔隙度，以 n 表示；

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{\frac{V_v}{V_s}}{\frac{V}{V_s}} = \frac{\frac{e}{V_s + V_v}}{\frac{V}{V_s}} = \frac{e}{1+e} \quad (1-7)$$

式中符号同前。

(7) 饱和度：土孔隙中水的体积与孔隙体积之比，即为土的饱和度，以 S_r 表示

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{\frac{V_w}{V_s}}{\frac{V_v}{V_s}} = \frac{\frac{W_s}{V_s} \cdot \frac{W_w}{W_s}}{\frac{V_v}{V_s}} = \frac{G(0.01w)}{e} \quad (1-8)$$

式中 V_w ——水的体积，水的密度为 1 克/厘米³，故 $V_w = W_w$ ；

其余符号同前。

饱和度是说明土的饱水程度的一个指标，如当 S_r 为 100% 时，说明土孔隙内完全充满了水，土是饱和的。

(8) 饱和容重：孔隙中全部充满水时的土重与其体积之比，即为土的饱和容重，以 γ_m 表示；

$$\gamma_m = \frac{W_s + V_v(\gamma_w)}{V} = \gamma_d + n \quad (1-9)$$

式中符号同前。

(9) 浮容重：地下水位以下的土受水的浮力作用，其单位体积土粒的有效重，即为土的浮容重，以 γ' 表示；

$$\gamma' = \frac{W_s + V_v(\gamma_w) - V(\gamma_w)}{V} = \gamma_m - \gamma_w = \gamma_m - 1 \quad (1-10)$$

式中符号同前。

此外，还可以推导出下列公式：

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{G\gamma_w}$$

$$e = \frac{n}{1-n}$$

$$e = \frac{G}{\gamma_d} - 1$$

$$S_r = \frac{0.01w\gamma_d}{e}$$

$$\gamma_m = \frac{G+e}{1+e}$$

$$\gamma' = \frac{G-1}{1+e}$$

各式中符号同前。

【例题】一原状土，经试验得 $\gamma = 1.95$ 克/厘米³， $w = 29\%$ ， $G = 2.71$ ，求土的孔隙比 e 、孔隙度 n 、饱和度 S_r 及干容重 γ_d 。

$$1. \text{孔隙比} \quad e = \frac{G\gamma_w(1+0.01w)}{\gamma} - 1 = \frac{2.71(1+0.29)}{1.95} - 1 = 0.79$$

$$2. \text{孔隙度} \quad n = \frac{e}{1+e} = \frac{0.79}{1+0.79} = 0.441 = 44.1\%$$

$$3. \text{干容重} \quad \gamma_d = \frac{\gamma}{1+0.01w} = \frac{1.95}{1+0.29} = 1.51 \text{ 克/厘米}^3$$

$$4. \text{饱和度} \quad S_r = \frac{G0.01w}{e} \times 100\% = \frac{2.71 \times 0.29}{0.79} \times 100\% = 99.6\%$$

五、土的物理状态

1. 砂土、碎石土的密实度

在天然条件下，砂土、碎石土处于不同的物理状态，有密实的，有疏松的。砂土、碎石土最重要的物理状态指标就是密实度。工程上对于作为地基的砂土层和碎石土层，首先要知道它的天然密实度。

砂土和碎石土的密实度反映在孔隙比 e 和干容重 γ_d 上， e 越小或 γ_d 越大，就表示土越密实。

砂土的密实度与组成颗粒大小、形状和均匀程度有很大关系，不同的颗粒组成情况可有不同的极限孔隙比（最大孔隙比 e_{max} 和最小孔隙比 e_{min} ），因此用相对密度 D 表示砂土的密实程度：

$$D = \frac{e_{max} - e_0}{e_{max} - e_{min}} \quad (1-11)$$

式中 e_0 ——天然孔隙比（或为人工土的实际孔隙比）。

根据相对密度 D 值的大小可将砂土分为下列三种类型：

$0 < D \leq 0.33$ 疏松的砂土；
 $0.33 < D \leq 0.67$ 中密的砂土；
 $0.67 < D \leq 1.00$ 密实的砂土。

但须指出，由于取得最大和最小孔隙比的方法不够成熟和统一，不同的方法将得出不同的结果。例如水工方面曾对同一砂土试样以不同的方法进行试验，得出的最大孔隙比为0.91~0.97，相差0.06，最小孔隙比为0.44~0.59，相差0.15，若以最大孔隙比取平均值为0.94，假定砂土的天然孔隙比为0.7，则当最小孔隙比为0.44时， D 等于0.48，属于中密的砂土，而当最小孔隙比为0.59时， D 等于0.69，则属于紧密的砂土。

我国的《工业与民用建筑地基基础设计规范》从地基容许承载力的角度直接以砂土的天然孔隙比划分其密实程度；并将密实程度分为密实、中密、稍密、松散四级，见表1-3。由于对地基深层饱和砂土的天然孔隙比的测定存在困难，推荐采用标准贯入试验判定其密实程度，见表1-4。

砂土的密实度

表 1-3

土 的 名 称	密 实 度			
	密 实	中 密	稍 密	松 散
砾砂、粗砂、中砂	$e < 0.60$	$0.60 \leq e \leq 0.75$	$0.75 < e \leq 0.85$	$e > 0.85$
细砂、粉砂	$e < 0.70$	$0.70 \leq e \leq 0.85$	$0.85 < e \leq 0.95$	$e > 0.95$

按标准贯入试验判定砂土的密实度

表 1-4

密 实 度	密 实	中 密	稍 密
锤击数 $N_{63.5}$	50~30	30~15	15~10

2. 砂土、碎石土的颗粒级配

土总是由若干粒组混合而成的（例如碎石土中既包括卵石粒，也往往含有砂粒，甚至有粘土粒，而粘性土中不仅含有粘土粒，也可能含有砂粒），因此需要测定土的固体部分各种粒组的相对含量，借以反映土的级配，以便作为土的分类的依据等。各种不同大小土粒的相对含量是以占全部土粒重量的百分比来表示的。为决定粒径级配，必须进行粒径分析试验，把土粒分成若干组，并决定各粒组部分重量对土粒总重的百分数。然后以粒径为横坐标，小于某粒径的土粒总重所占的百分数为纵坐标，绘制粒径级配曲线（图1-5）。为了曲线清晰，通常横坐标以对数比例尺表示粒径。这条颗粒级配曲线的形状位置及范围不仅能够充分反映土的颗粒大小，同时还可表明组成土的颗粒粗细程度或均匀性，从曲线上还可求得两项有意义的指标：

（1）有效粒径 d_{10} ，即相当于全部颗粒

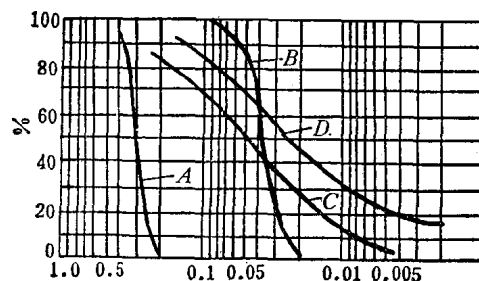


图 1-5 土的粒径级配曲线

按粗糙程度 $A > C > D > B$
 按均匀性 $B > A > D > C$
 按级配良好程度 $C > D > A > B$

总重10%的颗粒粒径，常用于根据颗粒成分计算确定土的渗透系数。例如在温度为10°C时，土的渗透系数可用简单的经验公式计算为：

$$k = C d_{10}^2 \quad (1-12)$$

式中 k ——渗透系数（米/昼夜）；

d_{10} ——土的有效粒径（毫米）；

C ——经验系数，对纯砂取700~1000，对亚粘土取500~700。

(2) 不均匀系数 K_u ，用以表示颗粒成分的不均匀程度。不均匀系数以下式计算：

$$K_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1-13)$$

式中 d_{60} ——相当于占全部颗粒总重60%的颗粒粒径。

一般 $K_u \leq 5$ 时，为颗粒均匀或级配不良的土； $5 < K_u \leq 15$ 时，为颗粒中等均匀的土； $K_u > 15$ 时，为颗粒不均匀或级配良好的土。

填土的土料 K_u 值愈大时，愈容易得到较小的孔隙比。

3. 粘性土的液性指数

土的液性指数反映土在某一含水量下所表现的状态。而一定状态的粘性土又反映一定的物理、力学性质，如土的软硬程度和压缩性、抗剪强度的大小等等。在工程实用中，常利用这种关系，通过测求土的液性指数，概略地了解土的工程性质。

粘性土的液性指数以下式表示：

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} = \frac{w - w_p}{I_p} \quad (1-14)$$

式中 w_p ——土的塑限含水量（%）；

w_L ——土的液限含水量（%）；

I_p ——土的塑性指数。

液限含水量(w_L)，也叫塑性上限含水量，是土由塑性状态转变为流动状态的界限含水量，也就是土的含水量超过此值时，土呈流动状态的粘滞性液体了。在国内一般采用圆锥液限仪对抗动的重塑土样进行试验测求。土的液限含水量往往与土的力学性质有一定关系，如同样湿度和密度的不同粘性土，当其液限含水量相同时，则其压缩性也十分近似。

塑限含水量(w_p)，也叫塑性下限含水量，是土由半固态转变为塑性状态的界限含水量，以扰动后的重塑土样进行滚搓试验得出，所以又叫滚搓界限。土的含水量低于塑限含水量以后，则土中水的物理性质大部分不具有自由水的性质了。

塑性指数(I_p)，是土的液限含水量与塑限含水量之差：

$$I_p = w_L - w_p \quad (1-15)$$

它表示土处在塑性状态下的含水量区段，在工程上以塑性指数做为粘性土的分类指标。

土所含的水分多少，对土的状态和性质有直接的影响，当分散的土颗粒间被自由水隔开时，土处于流动状态；当水分减少到多数土颗粒为弱结合水隔开时，土在外力作用下，土粒可以相互移动而不产生断裂破坏，这时可以将土塑造成任何形状，而处于不断裂的可塑状态；当弱结合水再减少，水膜进一步减薄而至粘滞性增加，土就处在半固体状态；当土中主要为强结合水时，土就处在固体状态了。此时，水分再进一步减少时，土的体积变化很微小，则此时的含水量为土的缩限含水量(w_s)。