

# 绪 论

## 一、土力学的基本概念

工程地质学和土力学两者都是工程实用科学，都是研究作为建筑物地基的岩土体的形成、存在及其工程性状，应用于解决地基基础的设计与施工的岩土工程领域。但两者的学科内涵不同，研究方法不同。工程地质学是从宏观的角度出发来研究岩土工程问题，而土力学是从微观的角度出发研究土的强度、变形、稳定性和渗透性的一门学科。

工程地质学是研究与工程有关的地质问题的学科。任何土木工程都与土发生直接的关系，建造房屋时土作为建筑物的地基，直接承受建筑物的全部重量，修建道路和水利堤坝时，土又作为建筑材料而使用。因此，工程技术人员遇到岩土工程问题时，首先应了解建筑场地的地形、地貌特征、岩土的种类、成因类型、工程性质及其影响建筑环境的不良地质现象。工程地质学的研究分为两个方向，一是研究影响工程建设的工程地质条件，包括地形、地貌、地层岩性、地质构造、水文地质及地质作用等，还有影响工程建设经济合理、安全可靠及正常运行的工程地质问题（如地基变形、边坡稳定、堤坝渗漏等问题），为工程提供建筑场地的工程地质条件和岩土工程性质的设计资料，对建筑场地的工程地质条件和地质环境作出评价；二是研究人类的经济活动对地质环境的影响，可称为环境工程地质学。工程地质学的研究目的是改造、利用和保护地质环境。

土力学是一门工程实用科学，主要研究在建筑物荷载作用下土中的应力、应变、强度、稳定性、渗透性等，并将研究成果应用于工程实践，解决工程实际问题。由于土是一种自然地质形成的产物，性质复杂多变，与一般的建筑材料不同，因而与其他学科的研究方法有所不同，主要采用勘探与试验、原位观测与理论分析和工程实践相结合的方法，解决工程实际问题。

土的定义（狭义）：岩石经过风化、剥蚀、搬运、沉积等物理、化学、生物作用，在地壳表面形成的各种松散堆积物，建筑工程上就称为土，广义的土包括岩石在内。

土的特点：

(1) 土是自然历史的组合体。土不是一下子就形成的，它经过了漫长的地质历史时期，并且是在各种复杂的自然因素（包括风、雨、雪、河流、海洋等对岩

石的作用)和地质作用下才形成的,随着形成的时间、地点以及形成的方式不同,土的工程特性也各不相同。沉积时间长的土工程性质相对较好,形成时间较短的土工程性质相对较差;内陆沉积的土工程性质比沿海地区沉积的要好,所以在研究土的工程性质时应对土的成因类型等方面加以研究。

(2)土是多相系的组合体。工程中所研究的土并不只是土的颗粒,而主要研究的是松散堆积物的整体,这个整体是由不同的相系所组成的多相体系。矿物颗粒组成土的骨架,骨架间有孔隙,若孔隙中同时存在着水和气体,则土是三相的,土粒、水和气体分别称为土的固相、液相和气相。有时土是由四相所组成,即固相、液相、气相及有机质。固相是构成土的主要成分,当土颗粒之间的孔隙被水所充满时就形成了两相的饱和土;当土颗粒之间的孔隙中没有水时也形成了两相(固相、液相)土(干土)。

(3)土是多矿物的组合体。一般情况下,土中含有5~10种或更多的矿物,包括原生矿物和次生矿物。矿物一般是指:存在于地壳中的具有一定化学成分和物理性质的自然元素或化合物;原生矿物一般是指岩浆在冷凝过程中所形成的矿物(如石英、长石、云母等);次生矿物一般是指原生矿物经化学风化等作用后而形成的新的矿物。

地基土由土和岩石所构成,作为建筑物的地基以土居多。研究土的基本物理特性和在建筑物荷载作用下的应力、应变、强度、稳定以及渗透等规律的学科就是土力学(Soil Mechanics),将土力学与岩石力学统一于一个新的学科称为岩土力学(Geomechanics)。

建筑物的全部荷载都将通过基础传给下面的地层。建筑物的修建使地层中一定范围内的应力状态发生变化,这一范围内的地层就称为地基,如图1所示。地基按是否经过人工处理分为两种:①天然地基:基础直接砌筑在未经人工处理的天然土层上,这种地基就称为天然地基,多数支承建筑物的土层都可以采用天然地基。人工地基:当天然地基的承载力或变形不能满足设计要求时,对地基要进行人工加固处理,经人工处理后的地基称为人工地基。由于地基土具有压缩性,强度较低,因而上部结构荷载通过墙或柱不能直接传给地基,必须在墙或柱与地基接触处适当扩大尺寸,把荷载扩散后再传给地基,将与地基接触的建筑物下部结构就称为基础。基础依据埋置深浅分为两类:浅基础:通常把埋深不大(一般浅于5m),不需要采用特殊方法施工的基础统称为浅基础(如墙下条形基础、柱下扩展基础等);深基础:若浅层地基不良,需要基础埋置较深时,一般都需要用特殊的施工方法和装备来修建的基础称为深基础(如桩基础、沉井、沉箱、地下连续墙等)。

建筑物的建造使地基中原有的应力状态发生变化,因此就必须研究在荷载作用下地基的变形和承载力问题,以便使地基基础的设计满足两个基本条件:

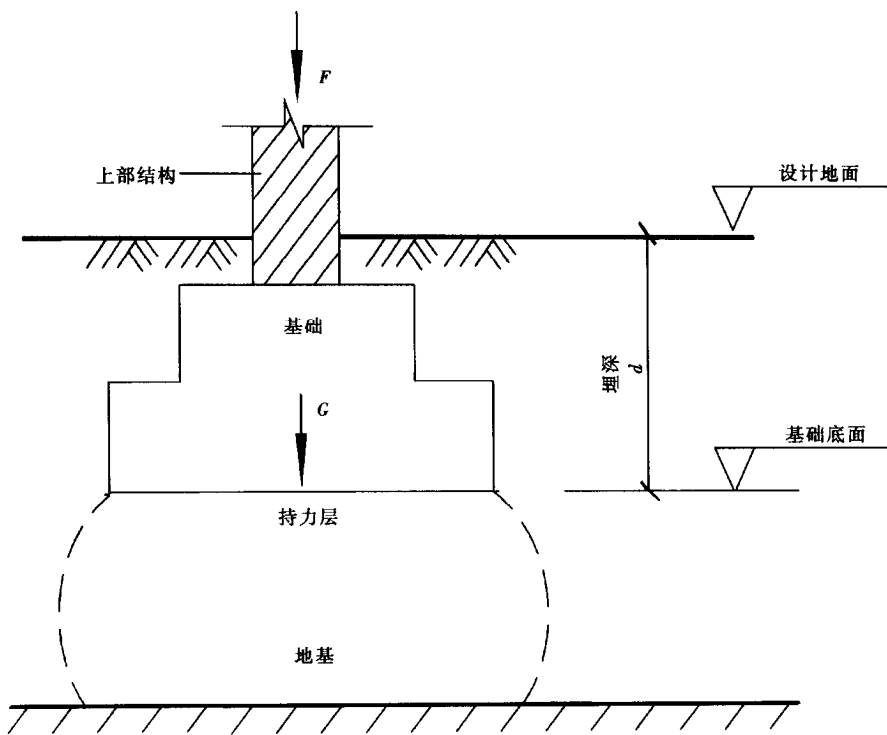


图 1 地基及基础示意图

求作用于地基上的荷载不超过地基的承载能力，保证地基在防止整体破坏方面有足够的安全储备；控制基础的沉降不超过允许值，保证建筑物不因地基变形而损坏或影响其正常使用。除了满足上述两个基本条件外，还应该满足安全可靠、经济合理的原则。

建筑物是由地基、基础和上部结构组成的统一整体，既互相联系又互相制约。目前要把这三者完全统一起来进行设计尚有一定难度，但在处理地基基础问题时，应该从地基、基础和上部结构共同工作的整体概念出发，全面地加以考虑才能收到良好的效果。

## 二、地基和基础的重要性

地基和基础是建筑物的根基，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危。实践表明，许多建筑物的工程质量事故往往发生在地基基础之上，而且，一旦事故发生，补救并非易事。此外，随着城市的发展，高层建筑越来越多，基础的埋置深度越来越大，因此，基础工程费用占建筑

物总造价的比例越来越高。所以地基与基础在建筑工程中的重要性是显而易见。工程实践中地基基础事故屡见不鲜，以下实例可见一斑。

图 2 是建于 1941 年的加拿大特朗斯康谷仓 (Transcona Grain Elevator) 地基破坏情况。该谷仓由 65 个圆筒仓组成，高 31m，宽 23m，其下为钢筋混凝土筏板基础。谷仓总重量 20 万 kN，容积为  $36500\text{m}^3$ 。建成后，当谷仓装谷  $32200\text{m}^3$  后，谷仓西侧突然下沉 8.8m，东侧抬高 1.5m，整体倾斜  $26^\circ 53'$ 。事后勘察得知基底以下有 16m 厚的淤泥质黏土层，地基极限承载力设计值仅有  $245\text{kPa}$ ，而装谷后的基底压力已超过  $320\text{kPa}$ 。这是地基发生整体滑动、建筑物丧失稳定性的典型例子。由于该谷仓的整体性很强，筒仓完好无损。事后，在原有基础下做了 70 多个支承于基岩上的混凝土墩，用 388 个 50t 的千斤顶和支承系统，才将仓体纠正过来，但整个仓体标高比原来降低了 4m。

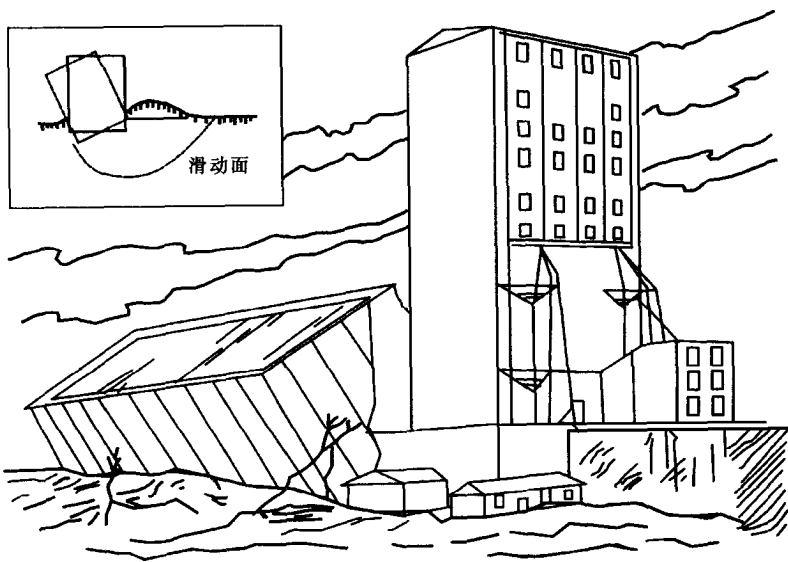


图 2 加拿大特朗斯康谷仓的地基事故

意大利的比萨斜塔，建于 1173 年，当建至 24m 时发现倾斜而被迫停工，100 年后建至塔顶（55m）。因地基压缩层厚度不均，北侧沉降 1m 多，南侧下沉近 3m，沉降差达 1.8m，倾斜  $5.8^\circ$ 。1932 年曾向塔基灌注 1000t 水泥也未奏效。1590 年伽利略在此塔上做了著名自由落体试验。该塔已成为世界上最著名的基础工程难题之一。

苏州市虎丘塔，建于公元 959 ~ 961 年，七级八角形砖塔，塔底直径 13.66m，高 47.5m，由于地基土的压缩层厚度不均匀及砖砌体偏心受压，致使塔身严重朝东北向倾斜，至 1978 年，塔顶位移已达 2.3m，塔身重心偏离基础轴线 0.924m。

塔身多处出现纵向裂缝。后采用桩排式地下连续墙及注浆方案进行处理，直径1.4m的深人基岩的44根挖孔桩形成一圈，像一巨大的花盆，塔位于中间，在塔身内外地基中钻孔灌注水泥浆加固地基，塔体的不均匀沉降和倾斜得到了有效控制。

### 三、课程的特点、内容及学习要求

本课程是一门理论性和实践性都较强的课程，与其他结构工程的课程不同，它有以下几个特点：

(1) 土力学是以土的三相体系作为一个整体进行研究的，成分复杂，从坚硬的岩石到软弱的淤泥及淤泥质土，工程性质差异甚大，进行建筑物设计时必须掌握土的工程性质。

(2) 地基土质条件不依人的愿望来选择，一旦建筑物场地确定，就无选择的余地，有时场地位置稍有变化，土的性质也就不相同。

(3) 地基和基础在地面以下，属于隐蔽工程，它的勘察、设计和施工质量直接影响建筑物的安全，一旦发生地基基础的质量事故，又较难挽救处理，因此，它的技术要求高，不可以轻易处置。

(4) 本课程内容多，涉及范围广。本课程涉及工程地质学、土力学、结构设计和施工等几个学科领域。内容广泛，综合性强。

本课程的内容包括工程地质学和土力学两部分。工程地质学包括工程地质和建筑工程地质问题两部分。土力学部分包括土的物理性质及工程分类、基础最终沉降计算、土的抗剪强度和地基承载力、土压力和挡土墙设计等。工程地质学和土力学是地基基础工程实践的理论基础，其特点是以勘探和试验的结果为依据，以土的工程性状及理论分析为核心，以解决工程实际问题为目的。因此，在学习本课程时，应充分认识到本学科的特点，学习理论知识要密切联系工程实际问题。学习时应突出重点，兼顾全面，应该重视工程地质学的基本知识，培养阅读和使用工程地质勘察资料的能力；牢固掌握土的应力、变形、强度和地基计算等土力学的基本原理，从而能够应用这些基本概念和原理，结合有关建筑结构理论和施工知识，分析和解决地基基础问题。

### 四、本学科发展概况

在建筑工程领域中，土力学与基础工程是个重要的学科。既是一项古老的工程技术，又是一门年轻的应用科学。

土力学与基础工程同其他科学技术一样，也是劳动人民长期生产实践的产物。人类很早以前就利用土进行建设，我国西安半坡村新石器时代遗址发现的土台和石基就是古代的地基基础。春秋战国开始兴建直至秦朝建成的万里长城历经

千百载屹立至今，以及隋朝修通的南北大运河，穿越各种地质条件，至今仍在通航。隋朝石工李春修建的赵州石拱桥，把桥台砌筑在密实的粗砂层上，1300多年来沉降很小，经验算，基底压力约 490 ~ 588kPa，很接近现行规范确定的地基承载力。公元 989 年在建造开封开宝寺木塔时，预测塔基土质不均，将会引起基础的不均匀沉降，施工时特意做成倾斜状，经沉降稳定后自动复正。

18 世纪欧洲兴起工业革命，随着城市建设的扩大，公路、水利、铁路的修建，遇到许许多多与土有关的力学问题，促进了对土力学的研究。1773 年法国的库伦 (C·A·C·Culomb) 提出了著名的砂土抗剪强度的库伦定律和土压力滑楔理论。1857 年英国的朗肯 (W·J·M·Rankine) 从不同角度提出挡土墙土压力理论，推动了土体强度理论的发展。1885 年布辛涅斯克 (J·Boussinesq) 提出垂直集中力作用下半无限弹性体中应力和变形的计算公式。1922 年瑞典的费伦纽斯 (W·Fellenius) 为解决土坡塌方问题提出计算边坡稳定性分析的圆弧滑动面法。以上这些古典理论至今仍在广泛应用。1925 年美国的太沙基 (K·Terzaghi) 系统地论述了土力学问题，并提出著名的有效应力原理和渗透固结理论，使土力学成为一门独立的学科。

建国以来，我国进行了大规模的工程建设，成功地处理了大型的基础工程问题。如武汉长江大桥、葛洲坝水利枢纽工程、上海宝山钢铁公司、长江三峡水利工程以及全国许许多多高层建筑的修建，都为土力学和基础工程积累了丰富的经验。我国曾于 1958、1962、1979、1983、1987 年等先后召开了数次土力学与基础工程学术会议，各地建立了许多地基基础的专业研究机构、施工队伍和土工实验室，培养了大量的地基基础方面的专业人才。我国不少学者对土力学与基础工程理论的发展做出了宝贵的贡献。陈宗基教授于 20 世纪 50 年代对土的流变学和黏土结构模式的研究已被电子显微镜的观测所证实；黄文熙教授在 1957 年提出非均匀地基考虑土的侧向变形的沉降计算方法和砂土液化理论均受到国际岩土工程界的重视。

从 20 世纪 50 年代起，现代科技成就尤其是电子技术渗入了土力学及基础工程的研究领域，在实现实验测试技术自动化、现代化的同时，人们对土的基本性质又有了更进一步的认识；随着计算机的迅速发展和数值分析法的广泛应用，科学研究和工程设计更具备了强有力的手段，使土力学理论和基础工程技术出现了划时代的进展。随着我国建设事业的发展，岩土工程学科必将取得更大的进步。

# 第一章 土的物理性质及工程分类

## 学 习 要 点

本章讨论了土的组成、结构、构造，介绍了土的三相比例关系、土的物理状态以及岩土的分类。通过本章的学习，要求读者掌握土的组成、基本物理性质指标及比例关系、岩土的工程分类；对由不同成因形成的第四纪沉积土的主要工程特征有一定的了解；了解土的各组成部分对土的物理特征和工程性能的影响，并能根据三相草图和三相比例指标的定义熟练计算出土的三相比例指标；能按《建筑地基基础设计规范》（GB 50007—2002）对地基岩、土进行工程分类，并熟悉反映各类土的工程性能的物理特征及其指标。

## 第一节 概 述

土是由暴露在地表的岩石经风化、剥蚀、搬运、沉积而成的松散物质。一般情况下，土是由固体颗粒（固相）、水（液相）和气体（气相）组成的三相体，土中颗粒的大小、矿物成分及三相的比例关系反映出土的不同物理性质，如干湿、轻重、松密及软硬等基本物理性质，同时也决定它的力学性质，所以物理性质是土的最基本的工程特性。

在处理地基基础工程问题及进行土力学计算时，不仅要了解土的物理性质及变化规律，还应掌握土的物理性质指标的测定方法和指标间的换算关系，并且熟悉按土的有关特征和指标来制订的地基土的分类方法。

本章主要介绍土的成因和组成，土的基本物理性质指标及有关的特征，并利用这些指标及特征对地基进行工程分类。

## 第二节 土 的 成 因

地球表面的坚硬岩石长期受到风、霜、雨、雪的侵蚀和生物活动的破坏作用，逐渐破碎崩解成为大小悬殊的颗粒，经过不同的搬运方式在各种自然环境下沉积下来，由于沉积历史不长，只能形成未经胶结的松散沉积物，这就是建筑工程中通常称的“第四纪沉积物”或“土”。不同类型的第四纪沉积物各自具有一

定的分布规律和工程地质特征。根据地质成因的条件不同而有以下几种。

### 一、残积土

岩石经风化作用后残留在原地的碎屑堆积物称为残积土如图 1-1 (a) 所示。它的分布主要受到地形的控制,在宽广的分水岭上、在平缓的山坡上常有残积物覆盖。残积土没有分选作用和层理构造,与基岩之间没有明显的界限,矿物成分与基岩大致相同,由于山区原始地形变化很大且岩层风化程度不一,使残积土的厚度在小范围内就有很大变化,当残积土被风或降水带走一部分后土中存在较大的孔隙。因此,该种沉积土均匀性很差,作为建筑物地基时,要特别注意其不均匀沉降。

### 二、坡积土

高处的风化物经雨水、雪水或本身的重力作用搬运后,沉积在较平缓的山坡上的堆积物称为坡积土,如图 1-1 (b) 所示。它一般分布在坡腰上或坡脚下,其上部与残积土相接,坡积土底部的倾斜度取决于基岩的倾斜程度,而表面的倾斜度则与生成的时间有关,时间越长,搬运、沉积在山坡下的土层就越厚,表面的倾斜度就越小,因此坡积土的厚度变化很大,有时上部厚度不足 1m,而下部可达几十米。由于坡积土形成于山坡,矿物成分与下卧基岩没有直接的关系,但由上而下具有一定的分选性,土质不均匀,还常易发生沿基岩倾斜面的滑动,尤其是新近堆积的坡积土土质疏松、压缩性较高,对这些不良地质条件,在工程建设中要引起重视。

### 三、洪积土

在山区或高地由暂时性的山洪急流把大量的残积土、堆积土剥蚀、搬运到山谷中或山麓平原上而形成的堆积物称为洪积土,如图 1-1 (c) 所示。山洪流出沟谷口后,由于流速骤减,被搬运的粗碎屑物质,如块石、砾石、粗砂等首先大量堆积下来,离山越远,洪积土的颗粒越细,分布范围也越来越广,形成扇形地貌,故也称为洪积扇。有时相邻沟谷口的洪积扇互相连接起来组成洪积扇群。洪积土具有分选性,但因搬运距离较短,颗粒磨圆程度较差,且山洪不规则地暴发,堆积物质各不一样,所以洪积土还具有不规则交替的层理构造。一般地,靠近山地的粗粒碎屑堆积物,地下水位埋藏较深,土质较均匀,是良好的天然地基;离山较远的山前平原开阔地段由较细的粉砂黏土颗粒堆积,厚度较大,颗粒均匀,由于其形成过程中受到周期性干旱的影响,细小黏土颗粒发生凝聚作用,同时析出可溶性盐类,使土质较为密实,通常这部分洪积土也是良好的天然地基;而中间地带,土粒组成复杂,常由于地下水溢出地面而形成沼泽地带,存在

尖灭或透镜体，因此，土质较弱而承载力较低，工程建设时应注意其复杂的地质条件。

#### 四、冲积土

由河流流水作用将两岸基岩及其上部覆盖的坡积土、洪积物质剥蚀后搬运，沉积在河流坡降平缓地带而形成的堆积物称为冲积土。冲积土具有明显的层理构造，由于搬运距离大，土颗粒的磨圆程度较好，搬运距离越大，沉积物的颗粒越细。沉积土分布很广，主要分为平原河谷的冲积土和山区河谷的冲积土。

山区河谷的冲积土，如图 1-1 (d) 所示，颗粒较粗，多为砂粒填充的卵石、圆砾组成，所以，透水性好、压缩性小，是良好的建筑地基。而平原河谷的冲积土，如图 1-1 (e) 所示，则比较复杂。例如河床沉积土大多为中密砾砂，承载力高且压缩性低，但必须注意河流的冲刷作用导致地基毁坏和岩坡稳定性问题；河漫滩沉积土具有两层地质构造，上层为河流泛滥的沉积物，颗粒较细局部夹有的有机物，承载力低，压缩性大，下层河床沉积物为砂石类土，地基承载力高，但开挖时可能发生流砂现象，不可忽视；河流阶地是由河床沉积土和河漫滩沉积土上升演变而成，形成时间长，又受干燥作用，所以结构强度较高，是良好的地基。在河流入海或入湖口处，所搬运的大量细颗粒沉积下来，形成了面积相当宽广、厚度较大的三角洲沉积土，它的含水量很高，孔隙率大，呈饱和状态，常有较厚的淤泥或淤泥质土层，因而承载力较低，压缩变形量大。但在三角洲沉积土的表面，有一层厚度不大且经过长期干燥而形成的黏性土硬壳层，承载力较高，可作为一般建筑物基础的持力层。

#### 五、海洋沉积土

由河水带入海洋的物质和海岸破坏后的物质以及化学、生物物质在搬运过程中随着流速逐渐降低在海洋各分区（海滨、浅海、陆坡、深海地区）中沉积下来的堆积物称海洋沉积土。

海滨（海水高潮位时淹没，低潮位时露出的海洋地带）沉积土主要由卵石、圆砾和砂等粗碎屑物质组成，有时有黏性土夹层，具有基本水平或缓倾斜的层理构造，作为地基，强度较高。但在河流入海口地区常有淤泥沉积，这是由河流带来的泥砂及有机物与海中有有机物沉积的结果。浅海（水深约 0 ~ 200m，宽度约 100 ~ 200km 的大陆架）沉积土主要有细颗粒砂土、黏性土、淤泥和生物化学沉积物。离海岸越远，沉积物的颗粒越细小。该沉积土具有层理构造，其中砂土比滨海带更疏松，易发生流砂现象，其分布广，厚度不均匀，压缩性高；在浅海带近代沉积的黏土则密度小、含水量高，因而其压缩性大、承载力低；而古老的黏土则密度大、含水量低，压缩性小，承载力高。陆坡（浅海区与深海区之间过渡

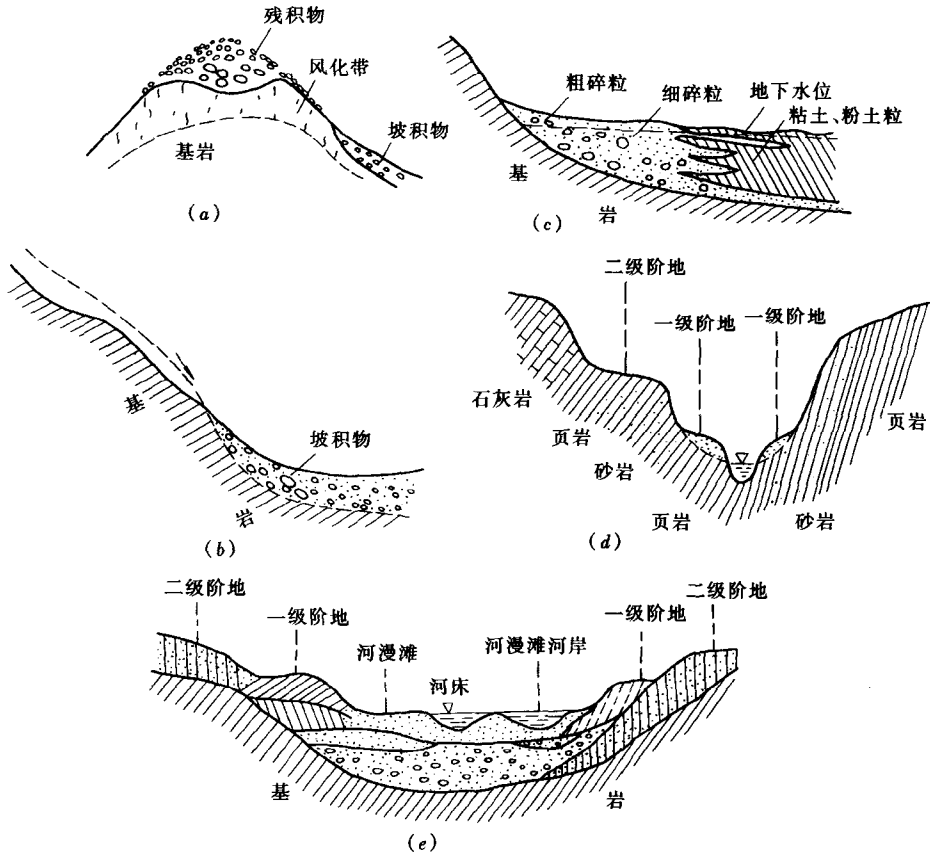


图 1-1 各种沉积土

(a) 残积土；(b) 坡积土；(c) 洪积土；

(d) 山区河谷冲积土横断面；(e) 平原河谷冲积土横断面

的陆坡地带，水深约 200~1000m，宽度约 100~200km) 及深海（水深超过 1000m 的海洋底盘）的沉积物主要为有机质软泥，成分均一。

## 六、湖泊沉积土

由湖浪、湖流、冲蚀高湖海地质作用而在湖中沉积的堆积土称湖泊沉积土，可分为湖边、湖心沉积土。

湖边沉积土主要是由湖浪冲蚀湖岸、破坏岸壁形成的碎屑物质组成，具有明显的斜层理构造，离湖岸越远、沉积物越细。近岸的沉积土主要有粗颗粒的卵石、圆砾、砂土，作为地基，具有较高的承载力；远岸的沉积土则主要有细颗粒的砂土、黏性土，承载力较前者低。湖心沉积土是由河流和湖流挟带的细小悬浮

颗粒到达湖心后沉积，主要是黏土和淤泥，常夹有细砂粉砂薄层，该沉积土强度低，压缩性高。若湖泊逐渐淤塞后则可变成沼泽，形成沼泽土，它主要是由泥炭（有机物含量近 60% 以上）组成，其主要特征是：含水量极高，透水性极低，压缩性很高且不均匀，承载能力也很低，因此，不能作为天然地基。

此外还有冰积土和风积土。它们分别是在冰川地质作用和风的地质作用下形成的。

### 第三节 土的组成

一般情况下，土是由固体颗粒（固相）、水（液相）和空气（气相）三相所组成。固体颗粒构成土的骨架，水和气体填充于孔隙中，故土为三相体系。当孔隙完全被水充满时为饱和土，孔隙被空气充满时称为干土。饱和土和干土是两种特殊情况的土，均为两相体系。

#### 一、固体颗粒

固体颗粒是土的主要组成部分，是决定土的性质的主要因素。土颗粒的大小、形状、矿物成分及颗粒级配对土的物理力学性质有很大的影响。

##### 1. 土的矿物成分

土粒的矿物有两类：一类是原生矿物，另一类是次生矿物。在粗粒土中主要含有原生矿物，原生矿物主要因岩石经物理风化后形成，其成分与母岩相同，常见的有石英、长石、云母等，它们的性质稳定；而次生矿物是岩石经化学风化后产生的新的矿物，如黏土矿物，常见的有蒙脱石、伊利石、高岭石。不同的矿物成分对土的性质有着不同的影响，其中以细粒组的矿物成分的影响最为明显，如土中蒙脱石含量较高时，就会遇水膨胀、失水收缩，给工程带来不利影响。

##### 2. 土的颗粒级配

自然界中的土都是由大小不同的土粒组成的。随着土粒由粗变细，土可由无黏性变为有黏性，透水性也随之减小。当土粒的粒径在一定范围内变化时，这些土粒的性质接近，因此，可按适当的范围将不同粒径的土粒分成若干粒组，见表 1-1。显然，土中所含各粒组的相对含量不同，土的工程性质也有所不同。

工程上，常以土中各粒组的相对含量（各粒组占土粒总重的百分数）表示土中颗粒大小的组成情况，即颗粒级配。颗粒级配可通过土的颗粒分析试验测定，其结果在半对数纸上绘出如图 1-2 所示的颗粒级配曲线 *a*、*b*。根据曲线的陡缓可进行粗略分析：如曲线平缓，表示粒径相差悬殊，土粒不均匀，即级配良好（图 1-2 中 *a* 线）；反之，曲线很陡，表示粒径均匀，级配不好（图 1-2 中 *b* 线）。在工程计算中常以不均匀系数  $C_u$  作为定量分析，表示颗粒的不均匀程度，即：

土粒粒组的划分

表 1-1

粒组名称		粒径范围 (mm)	一般特征
漂石或块石颗粒		> 200	透水性很大, 无黏性, 无毛细水
卵石或碎石颗粒		200 ~ 20	
圆砾或角砾颗粒	粗	20 ~ 10	透水性大, 无黏性, 毛细水上升高度不超过粒径大小
	中	10 ~ 5	
	细	5 ~ 2	
砂粒	粗	2 ~ 0.5	易透水, 当混入云母等杂质时透水性减小, 而压缩性增加; 无黏性, 遇水不膨胀, 干燥时松散; 毛细水上升高度不大, 并随粒径变小而增大
	中	0.5 ~ 0.25	
	细	0.25 ~ 0.1	
	极细	0.1 ~ 0.075	
粉粒	粗	0.075 ~ 0.01	透水性小; 湿时稍有黏性, 遇水膨胀小, 干时稍有收缩, 毛细水上升高度较大较快, 极易出现冻胀现象
	细	0.01 ~ 0.005	
黏粒		< 0.005	透水性很小; 湿时有黏性、可塑性, 遇水膨胀大, 干时收缩显著; 毛细水上升高度大, 但速度较慢

注: 1. 漂石、卵石和圆砾颗粒均呈一定的磨圆形状 (圆形或亚圆形); 块石、碎石和角砾颗粒都带有棱角;

2. 黏粒或称黏土粒, 粉粒或称粉土粒;

3. 黏粒的粒径上限也有采用 0.002mm 的。

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

式中  $d_{60}$ ——小于某粒径土的质量占土总质量 60% 时的粒径, 该粒径称为限定粒径;

$d_{10}$ ——小于某粒径土的质量占土总质量 10% 时的粒径, 该粒径称为有效粒径。

颗粒级配曲线越陡, 不均匀系数  $C_u$  越小, 表示土粒越均匀。工程上把  $C_u < 5$  的土称为均匀的;  $C_u > 10$  的土视为不均匀的。不均匀土颗粒级配良好, 作为填方或垫层材料时, 易获得较好的压实效果。

## 二、土中水

水在土中存在的状态有三种: 固态水、气态水和液态水。固态水是指在温度低于 0 时土中水以冰的形式存在, 形成冻土。结冻时由于水的冰晶体不断扩大, 土体发生隆起, 出现冻胀现象; 当解冻时, 土中积聚的冰晶体融化, 土体又随之下陷, 出现融陷现象, 往往会使土体强度降低。气态水是指土中出现的水蒸气, 对土的性质影响不大。液态水主要指土中的结合水和自由水。

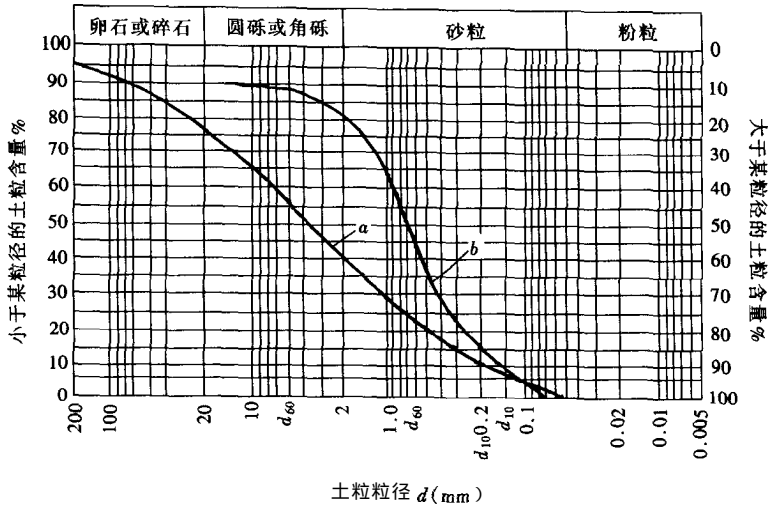


图 1-2 颗粒级配曲线

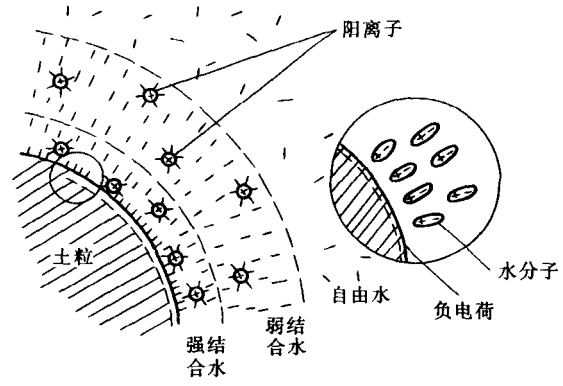


图 1-3 黏粒表面的水

### 1. 结合水

结合水是指土粒表面由电分子引力吸附着的土中水。研究表明，细小土粒与周围介质相互作用使其表面带负电荷，围绕土粒形成电场。在土粒电场范围内的水分子以及水溶液中的阳离子（如  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  等）一起被吸附在土粒周围。水分子是极性分子，受电场作用而定向排列，且越靠近土粒表面吸附越牢固，随着距离的增大，吸附力减弱，活动性增大。因此结合水可分为强结合水和弱结合水，如图 1-3 所示。

#### (1) 强结合水

强结合水受土粒表面强大的吸引力（可达几千个大气压力）作用而紧紧地

吸附在土粒表面的结合水。强结合水没有传递静水压力和溶解盐类的能力，温度达  $105^{\circ}\text{C}$  以上时才能蒸发，冰点为  $-78^{\circ}\text{C}$ ，密度为  $1.2\sim 2.4\text{g}/\text{cm}^3$ ，具有极大的黏滞性、弹性和抗剪强度，其力学性质接近固体。土粒越细，土的比表面越大，则吸着度越大。砂粒含的强结合水所占比例很小，当黏性土仅含强结合水时呈固体状态，磨碎后则呈粉末状态。

## (2) 弱结合水

弱结合水是在强结合水外吸附力稍低的一层水膜。其厚度比强结合水水膜大，受到电分子引力较小，具有黏滞性和抗剪强度，仍不能传递静水压力，但能从厚水膜向薄水膜处转移，直至平衡为止。黏性土的比表面较大，弱结合水水膜较厚，使黏性土具有可塑性。黏性土的一系列物理力学特性都与弱结合水的含量有关。砂土比表面小，含弱结合水少，故几乎不具可塑性。随着与土粒表面的距离增大，吸附力减小，弱结合水逐渐过渡为自由水。

## 2. 自由水

自由水是指在土粒表面电场影响范围以外的土中水，它能传递静水压力和溶解盐类，在  $0^{\circ}\text{C}$  温度下结冰。自由水按其移动时所受作用力的不同，可分为重力水和毛细水。

### (1) 重力水

重力水是在土孔隙中受重力作用能自由流动的水，一般存在于地下水位以下的透水层中。重力水在土孔隙中流动时，产生动水压力，能带走土中细颗粒；在地下水位以下的土粒会受到重力水的浮力作用，使土中应力状态发生变化。施工时，重力水对基坑开挖、排水等方面均有很大影响。

### (2) 毛细水

毛细水是水与空气界面的表面张力作用而存在于细孔隙中的自由水，一般存在于地下水位以上的透水层中。毛细水的上升高度视孔隙大小而定，粒径大于  $2\text{mm}$  的颗粒，孔隙较大，一般无毛细现象；极细小的孔隙，土粒周围有可能被结合水充满，亦无毛细现象。所以，毛细水主要存在于孔隙直径为  $0.002\sim 0.5\text{mm}$  的砂土、粉土、粉质黏土的孔隙中。毛细水上升到地表会引起沼泽化、盐渍化，而且还会使地基润湿、降低强度、增大变形量，在寒冷地区还会加剧土的冻胀作用。在建筑工程中要注意毛细水的可能上升高度，采取一定的防潮、防冻胀的措施。

## 三、土中气体

土中气体存在于孔隙中未被水所占据的部位。与大气连通的气体（常见于粒土中）对土的性质影响不大；与大气隔绝的封闭气泡（常见于细粒土中）不易逸出，因而增大了土体的弹性和压缩性，降低了土的透水性。在淤泥和泥炭土层

中，由于微生物的活动和分解，在土中产生一些可燃气体（如硫化氢、甲烷等），使土层不易压密而具高压缩性。

#### 四、土的结构和构造

土的结构是指由土粒的大小、形状、表面特征、相互排列及其联结关系等因素形成的综合特征，可分单粒结构、蜂窝结构和絮状结构三种基本类型。

单粒结构是无黏性土的基本结构形式。因其颗粒较大，土粒的结合水很少，粒间没有联结力，有时仅会有微弱的毛细水联结。土粒间的排列紧密程度主要随其沉积条件的不同而异，如土粒沉积时受到波浪反复冲击推动作用，就会形成紧密的单粒结构，如图 1-4 (a) 所示。由于土粒排列紧密，在动、静荷载下都不会产生较大的沉降，因而应属强度大、压缩性小的良好天然地基。当土粒沉积速度快，如洪水冲积形成的砂层、砾石层，往往就形成疏松的单粒结构，如图 1-4 (b) 所示，因其土粒排列疏松，土中孔隙大，土粒骨架不稳定，在受到震动或其他外力作用时，土粒易发生移动，使土中孔隙减小，引起土的很大变形。因此，这种土层未经处理一般不宜作为建筑物的地基。饱和疏松的细砂、粉砂及粉土，在振动荷载作用下，会引起“液化”现象，在地震区将会引起震害。



图 1-4 单粒结构  
(a) 紧密结构；(b) 疏松结构

蜂窝结构是指粉粒（0.005 ~ 0.075mm）在水中沉积时，基本上是以单个土粒在自重作用下下沉，当碰到已沉积的土粒时，由于它们之间的相互引力大于其重力，土粒就停留在它们最初的接触点上而不再下沉，形成了具有很大孔隙的蜂窝结构，如图 1-5 所示。

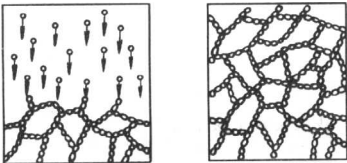


图 1-5 蜂窝结构  
(a) 颗粒正在沉积；(b) 沉积完毕

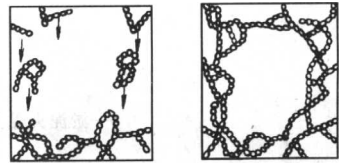


图 1-6 絮状结构  
(a) 絮状集体正在沉积；(b) 沉积完毕

絮状结构是由黏粒（粒径小于 0.005mm）集体组成的结构形式。黏粒能够在水中处于悬浮状态，不会因单个的自重而下沉，当这些黏粒被带到电解质浓度

较大的环境中（如海水），黏粒凝集成絮状的集合体，达到一定质量时就会相继下沉，与已沉积的絮状集合体接触，形成孔隙很大的絮状结构，如图 1-6 所示。

具有蜂窝结构和絮状结构的土，因粒间存在大量的微细孔隙，具有压缩性大、强度低、透水性小的特点。这类土还因土粒间的联结较弱且不甚稳定，当受到扰动时（如施工扰动影响），土粒接触点可能脱离，结构受到破坏，土强度迅速降低；但土粒之间的联结力（结构强度）也会因长期的压密作用和胶结作用而得到加强。

土的构造是指土层中的物质成分和颗粒大小等都相近的各部分之间的相互关系的特征。土的构造最主要的特征是层状性，即层理构造，如图 1-7 所示。它是在土的形成过程中，由于不同阶段沉积的物质成分、颗粒大小或颜色不同，而沿竖向呈现的成层特征，常见的有水平层理构造和带有夹层、尖灭或透镜体等的交错层理构造。层理构造使土在垂直层理方向与平行层理方向性质不一，一般平行于层理方向的压缩模量与渗透系数往往大于垂直方向的。土的构造的另一特征是土的裂隙性，即裂隙构造。土体被许多不连续的小裂隙所分割，在裂隙中常填充有各种盐类的沉淀物，裂隙的存在破坏了土体的整体性，降低了土体的强度和稳定性，增大了其透水性，对工程不利。此外，土中的裹物（如腐殖物、贝壳、结构体等）以及天然或人为的孔洞等构造特征也会造成土的不均匀性。

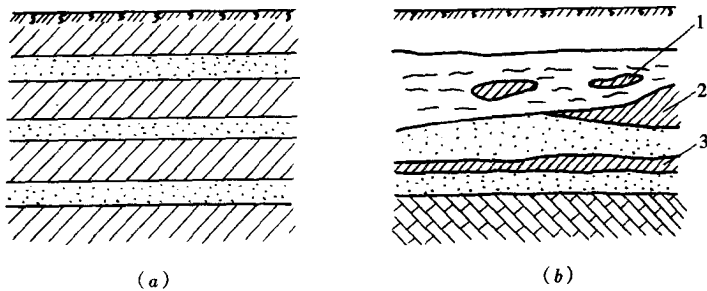


图 1-7 层理构造  
(a) 水平层理；(b) 交错层理  
1—淤泥夹黏土透镜体；2—黏土尖灭；3—砂土夹黏土层

## 第四节 土的物理性质指标

一般情况下，土是由固体颗粒、水、气体三相所组成，三部分之间比例不同，能反映出土的各种不同的物理性质和所处的状态，如软或硬、干或湿、松或密、轻或重。因此，我们可用三相的比例关系作为评定土的工程性质的定量指标。

为了方便说明和计算，将三相体系中分散的土颗粒、水和气体分别集中在一起，用质量和体积来表示，即土的三相简图，如图 1-8 所示。

气体的质量比其他两部分质量小得多，可忽略不计。

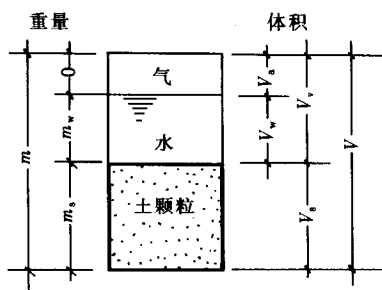


图 1-8 土的三相简图

$m$ —土的总质量； $m_s$ —土中颗粒质量；  
 $m_w$ —土中水的质量； $V$ —土的总体积；  
 $V_s$ —土中颗粒体积； $V_w$ —土中水的体积；  
 $V_v$ —土中孔隙体积； $V_g$ —土中空气的体积

## 一、土的含水特征指标

### 1. 土的含水量 $w$

土中水的质量与土粒质量之比的百分率，称为土的含水量，即

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

$w$  是表示土的湿度的一个重要指标。它

与土的种类、埋藏条件和自然环境等因素有关，变化范围在 20% ~ 60%。含水量小，土较干，其强度就高。对于黏性土，随着含水量的增加，土由较干的坚硬状态变化为可塑状态，甚至为流塑状态。

土的含水量一般用“烘干法”测定，先称小块原状土样的湿土质量，然后置于烘箱内 105℃ 恒温下烘干，再称干土质量，湿、干土质量之差与干土质量的比即为土的含水量。

### 2. 土的饱和度 $S_r$

土中水的体积与孔隙总体积之比的百分率，称为土的饱和度，即

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad (1-3)$$

$S_r$  表示土的潮湿程度，当  $S_r = 100\%$ ，表示土的孔隙中完全充满水，土处于完全饱和状态；当  $S_r = 0$  时，土是完全干燥的。

## 二、土的孔隙特征指标

### 1. 土的孔隙比 $e$

土中孔隙体积与土的颗粒体积之比，称为土的孔隙比，即

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1-4)$$

$e$  是表示土的密实程度的一个很重要的指标。一般地， $e < 0.6$  的土属密实的低压缩性土； $e > 1$  的土是疏松的高压缩性土。

### 2. 土的孔隙率 $n$