

绪 论

0.1 土力学与地基基础课程简介

0.1.1 本课程的研究对象及研究内容

地球表面的大块岩体经自然界风化、搬运、沉积等地质作用形成的松散的堆积物或沉淀物，在建筑工程中称为土。土是各种矿物颗粒的集合体。土是自然界的产物，与其他建筑材料相比，它在质地、强度等诸多方面存在着较大差异特别是某些土在含水量很高的情况下，其压缩性很大，承受荷载的能力很低。

由于土的形成年代、生成环境及矿物成分不同，所以其性质也是复杂多样的。例如，沿海及内陆地区的软土，华北、东北及西北地区的黄土，分布在全国各地区的粘土、膨胀土和杂填土等，都具有不同的性质。因此，进行建筑物设计之前，必须对建筑场地进行勘察，提出工程地质报告；然后根据上部荷载、桥梁涵洞或房屋使用及构造上的要求，采取一些必要的措施，使地基变形不超过其允许值，并保证建筑物和构筑物是稳定的。

任何建筑物都支承于地层上，受建筑物荷载影响的那一部分地层称为地基。建筑物的下部通常要埋入地下一定的深度，使之坐落在较好的地层上，建筑物向地基传递荷载的下部结构称为基础。建筑物的地基、基础如图 0-1 所示。

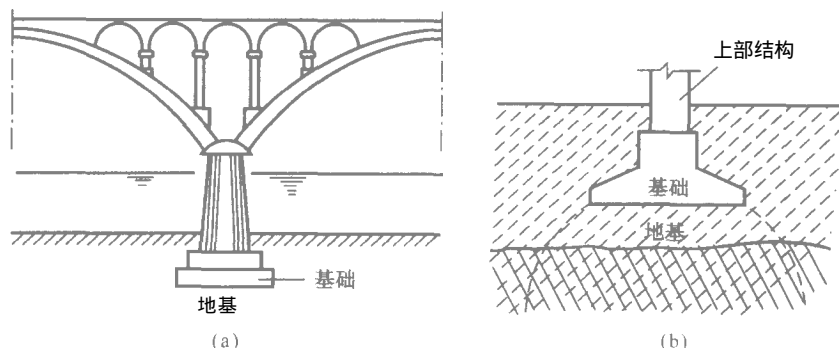


图 0-1 地基与基础

未经过人工处理的地基，称为天然地基。如果地基软弱，其承载力及变形不能满足设计要求时，则要对地基进行加固处理，这种地基称为人工地基（如采用机械压实、强力夯实、换土垫层、排

水固结等方法处理过的地基)。

基础根据埋深不同可分为浅基础和深基础。对一般房屋的基础,如土质较好,埋深通常不大(1~5 m),可用简便的方法开挖基坑和排水,这类基础称为浅基础。如果建筑物荷载较大或下部地层较软弱时,需要把基础埋置于深处较好的地层,要采用特殊的基础类型或特殊的施工方法,这种基础称为深基础(例如桩基础、沉井、地下连续墙等)。

土力学与地基基础这门课程包括土力学及地基基础两部分。土力学是以土为研究对象,利用力学的一般原理,研究土的特性及其受力后应力、变形、渗透、强度和稳定性及其随时间变化规律的学科。它是力学的一个分支,是为解决建筑物的地基基础、土工建筑物和地下结构物的工程问题服务的。地基基础主要研究常见的房屋、桥梁、涵洞等地基基础的类型、设计计算和施工方法。

建筑物的地基、基础和上部结构三部分虽然各自功能及研究方法不同,但对一个建筑物来说,在荷载作用下,三者都是相互联系、相互制约的整体。目前,由于受人们对建筑物的研究程度及计算方法的限制,要把三者完全统一起来进行设计计算还不现实。但在解决地基基础问题时,从地基—基础—上部结构相互作用的整体概念出发,全面考虑问题,是建筑物设计的发展方向。

0.1.2 土力学与地基基础理论的发展历史

土力学与地基基础既是一门古老的工程技术,又是一门新兴的理论。它伴随着生产实践的发展而发展。它的发展也总是与社会各历史阶段的生产和科学水平相适应。

就土力学学科而论,它和其他学科一样,经历过从感性认识到理性认识、形成独立学科和新的发展四个阶段。

土力学学科最早为感性认识阶段,我国劳动人民远在春秋战国时期开始兴建的万里长城以及隋唐时期修通的南北大运河,穿越各种复杂的地质条件,历经千百年风雨沧桑而不毁,被誉为亘古奇观;宏伟壮丽的宫殿寺院,要依靠精心设计的地基基础,才能逾千百年而流存至今;遍布各地的高塔,正是由于有牢固的基础,才能遇多次强震而无恙。隋朝工匠李春在河北省修建的赵州石拱桥,不仅因其建筑和结构设计而闻名于世,其地基基础处理也是非常合理的。他将桥台砌置于密实粗砂层上,1300多年来估计沉降量仅几厘米。现代通过验算确定桥台的基底压力约为500~600 kPa,这与用现代土力学理论方法给出的该土层的承载力非常接近。

18世纪中叶,随着欧洲工业革命的兴起,大规模的城市建设和水利、铁路的兴建,遇到了许多与土有关的力学问题,积累了许多成功的经验,也总结了不少失败的教训,这促使人们对积累的经验作出理论上的解释,因此土力学的理论才开始逐渐产生和发展。1773年,法国库仑(Coulomb)根据实验提出了砂土的抗剪强度公式和挡土墙土压力的滑动楔体理论(统称为库仑理论);1857年,英国朗肯(Rankine)又从另一途径建立了土压力理论,这一土压力理论与库仑土压力理论统称为古典土压力理论,对后来土体强度理论的建立起了推动作用;1885年布辛涅斯克(Boussinesq)求得了弹性半无限空间体表面在集中力作用下的应力、应变理论解答;弗伦纽斯(Follenius)为解决铁路塌方问题提出了土坡稳定分析方法。这些理论和方法至今仍作为土力学的基本理论被广泛应用着。

1925年奥裔美国土力学专家太沙基(Terzaghi)著名的“Eoubakmeceanik”的出版,被公认为是近代土力学的开始。他在总结实践经验和大量试验的基础上提出了很多独特的见解,其中,著

名的土的有效应力原理和固结理论是对土力学学科的突出贡献。至此，土力学才成为一门独立学科，并在以后的工程实践中不断丰富、提高

20 世纪 50 年代开始，现代科技成就特别是电子技术进入了土力学与地基基础的研究领域。实验技术实现了自动化、现代化，人们对地层的性质有了更深的了解。土力学理论和基础工程技术出现了令人瞩目的进展。

长期以来，在计算地基变形时，假定土体是弹性体；在进行挡土墙土压力计算和边坡稳定分析时，又将土看作理想的刚性体。而实际土体的应力应变关系是非线弹性的，因此确切地讲，土力学的理论对于那些高层建筑物的设计，其相符性和精度是远远不能满足要求的。借助电子技术及试验技术，许多学者已开展了土的弹塑性应力应变关系的研究，提出了各种本构关系的模型，有些已用于工程计算和分析。我国不少学者对土力学理论的发展也作出了可贵的贡献，如陈宗基教授 1957 年提出的土流变学和粘土结构模式，目前已被电子显微镜观测证实；黄文熙教授 1957 年提出非均质地基考虑侧向变形影响的沉降计算方法和砂土液化理论。我国已成功地建造了一大批高层建筑，解决了大量复杂的基础工程问题，为土力学与地基基础理论和实践积累了丰富的经验。

时至今日，在土建、水利、桥梁、隧道、道路、港口、海洋等有关工程中，以岩土体的利用、改造与整治问题为研究对象的科技领域，因其区别于结构工程的特殊性和各专业岩土问题的共同性，已融合为一个自成体系的新专业——“岩土工程”(Geotechnical Engineering)。它的工作方法是调查勘察、试验测定、分析计算、方案论证、监测控制、反演分析、修改方案；它的研究方法是以三种相辅相成的基本手段，即数学模拟（建立岩土力学模型进行数值分析）、物理模拟（定性的模型试验、以离心机中的模型进行定量测试和其他物理模拟试验）和原体观测（对工程实体或建筑物的性状进行短期或长期观测）综合而成的。我国的地基及基础理论技术作为岩土工程的一个重要组成部分，已经遵循现代岩土工程的工作方法和研究方法阔步进入 21 世纪，取得了更多、更高的成就，为我国的现代化建设作出了更大的贡献。

当然，由于土的性质的复杂性，到目前为止，土力学与地基基础的理论虽已有了很大发展，但与其他成熟学科相比较尚不完善，在假定条件下得出的理论应用于实践时多带有近似性，有待于人们不断实践、研究，以获得更加令人满意的突破。

0.2 正确处理土力学与地基基础问题的重要性

地基与基础是建筑物一个重要的组成部分，又属于地下隐蔽工程，因此，它的质量好坏关系到建筑物的安全、经济和正常使用。由于基础工程在地下或水下进行，施工难度较大，造价、工期和劳动消耗量在整个工程中占的比重均较大。根据建筑物复杂程度和设计施工合理性的不同，基础工程费用在建筑物的总造价中所占的比重变幅很大，其工期可占总工期的 1/4 以上。如果采用人工地基或深基础，则工期和造价所占的比例将更大。实践证明，建筑物事故的原因很多与地基基础有关，并且，地基基础一旦发生事故就不易补救。随着高层建筑物的兴起，深基础工程增多，这对地基基础的设计与施工提出了更高的要求。

建于 1941 年的加拿大特朗斯康谷仓，主体结构由 65 个圆柱形筒仓组成，高 31 m，宽 23 m。

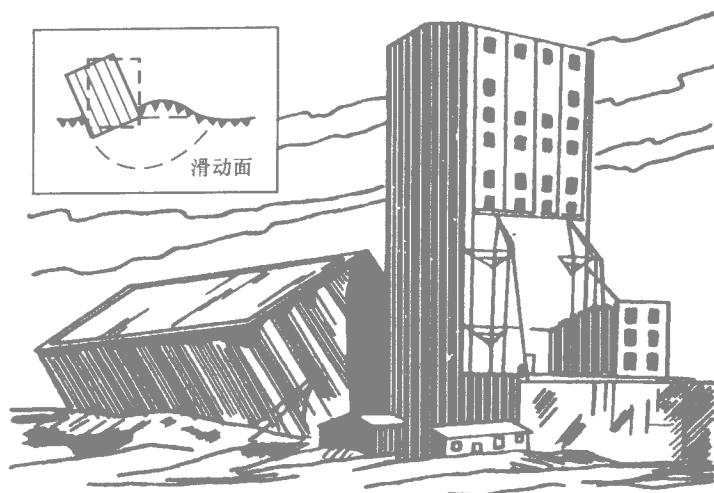


图 0-2 加拿大特朗斯康谷仓的地基事故

其下为片筏基础。由于事前不了解基础下埋藏有厚达 16 m 的软粘土层，建成后初次贮存谷物时，基底压力超过了地基承载力，致使谷仓一侧突然陷入土中 8.8 m 另一侧则抬高 1.5 m 仓身倾斜达 27° 如图 0-2 所示。这是地基发生整体滑动、建筑物失稳的典型例子。由于该谷仓整体性较强，谷仓完好无损，事后在主体结构下面做了 70 多个支承于基岩上的混凝土墩，用 388 个 500 kN 的千斤顶，才将仓体扶正，但其标高比原来降低了 4 m。

建于 1954 年的上海工业展览馆中央大厅，总重约 10 000 t 采用平面尺寸为 45 m×45 m 的两层箱形基础。地基为厚约 14 m 的淤泥质软粘土。建成后其基础当年下沉 0.6 m 目前大厅平均下沉量达 1.6 m，墙面由于不均匀沉降产生了较大裂缝。

又如 1173 年兴建的意大利比萨斜塔，当建至 24 m 时发现倾斜，被迫停工。100 年后续建至塔顶（高约 55 m）。至今塔身一侧下沉了 1 m 以上，另一侧下沉了约 3 m 倾斜 5.8° 。1932 年曾于塔基灌注了 1 000 t 水泥，效果仍然不明显。在以后的数十年里该塔仍以每年 11 mm 的速度下沉。意大利当局被迫于 1990 年关闭斜塔，斜塔因此而成为世界上著名的基础工程问题。在经历了十多年的应力解除并辅以配重的矫正工程后，工程专家组于 2001 年 6 月 16 日将该塔正式交给比萨市政当局。专家组声称比萨斜塔至少可以再良好地保持 300 年。

以上工程实例说明，在建筑物地基基础设计中就建筑物安全方面必须遵守两条规则：① 应满足地基强度要求；② 地基变形应在允许范围之内。这就要求工程技术人员熟练掌握土力学与地基基础的基本原理和主要概念，结合建筑场地及建筑物的结构特点，因地制宜地进行设计和必要的验算。

0.3 本课程的特点和学习要求

0.3.1 研究对象的复杂多变性

如前所述，土力学是以土为研究对象的。土不同于一般固体材料，它是由固体颗粒、土中水和气体组成，土颗粒构成土的骨架，土中孔隙由气体和液体填充，所以我们称土体为三相体系。土体的强度一般比土粒强度小得多，这就决定了土的松散性土的成因类型和空间分布情况构成了土的多样性。与连续介质比较，土体更具复杂性，而且受外界环境影响较大，诸如在温度、湿度、压力、水流、振动等环境影响下，其性质会有显著变化。现有的土力学理论还很难准确地模拟天然土层在荷载作用下所显现出来的力学性质。土的上述特点构成土力学的研究规律具有复杂性。所以，土力学虽是指导人们进行地基基础设计的重要理论依据，但还应通过实验、实测并根据实践经验进行综合分析，才能获得比较满意的结果。只有通过这种理论与实践的反复比较，才能逐步提高对理论的认识，从而不断增强解决地基基础问题的能力。

0.3.2 研究内容的广泛性

土力学与地基基础是一门理论性与实践性均较强的技术基础课，它是联系基础课和专业课的桥梁。它以多种课程为先修课程，如人们熟悉的物理、化学、理论力学、材料力学、结构力学、建筑材料、弹性理论、水力学、工程地质、钢筋混凝土及砖石结构等。它的后续课程是土木工程各相关专业的专业课，如房屋建筑学、钢结构、建筑施工技术、建筑抗震等。

本课程内容广泛、综合性强，学习时应抓住重点，兼顾全面。从专业要求出发，必须牢固掌握土的应力、变形、强度和地基计算等土力学的基本概念和原理，从而应用这些概念和原理并结合建筑结构和施工知识，分析和计算地基基础问题。

本课程内容的广泛性还体现在土力学学科应用的广泛上，土木建筑、道路桥梁、交通运输、冶金、能源、国防等，凡是有关土木工程的行业，建筑物都需建在地基上，从事这些行业的设计和施工人员都需具备坚实的土力学基础知识。

0.3.3 研究方法的特殊性

土力学的研究方法同其他学科一样，具有共同性，但是也有自己的特殊性，表现在下面几点上：

1. 对于土的有关知识从感性阶段过渡到理性阶段，人们往往把实际的复杂的土加以简化。在相应研究的问题中，忽略土的繁杂而又次要的现象，抓住其突出而主要的性能，并且对这种主要性能又给以一定的假设，使其符合于当时解决该问题所达到的科学水平。这样，原来的土就被某种比较简单的理想的模型所代替。例如，在研究土体中应力分布时，布辛奈斯克只抓住土体可压缩这个主要性能，并且把实际的松散体看成是一种理想的半无限连续弹性体，把应力分布和传播方式按光线辐射原理来处理，这个理论目前仍广泛应用于土力学中。应当指出，任何简化模型的假设都必须以比较丰富而且正确的经验和感性知识为依据，必须对土的自然性质具有比较清

楚的概念。可是，到目前为止，土力学还是一个非常年轻的学科，对于同一问题的研究常常出现不同的模型假设和相应的各种理论方法，它们的解答结果往往相差很大。只有在生产和科学研究水平不断提高的过程中，上述矛盾才能逐步得到解决，使土力学的理论日益近似于土的客观实际。在目前应用这些理论时，必须注意其应用场合和条件，结合一定的模型试验和工程经验加以比较分析。对待土力学的发展过程应当采用现实的态度，一方面承认原有理论的不足和存在尚待改进之处，另一方面也承认它们在当前条件下对生产实践的应用价值。

2. 土力学理论通常都应用一些土的物理力学指标和参数，确定这些指标和参数的数值对于理论解答的影响往往大于理论本身的精确性。因此，必须对这些指标和参数的概念有正确的理解，使所采用的试验方法和仪器都符合于这些正确概念的要求。同时，还要弄清这些指标和参数被视为常数时所需的条件和范围，超出这个范围，就应当按因果关系考虑它们的变化。

3. 土力学中的公式和方法绝大部分都是半理论半经验性的混合产物，纯理论和纯经验的方法是不多的。而我国土地辽阔，幅员广大，由于自然地理环境的不同，分布着多种不同的土类，如软弱土、湿陷性黄土、膨胀土、多年冻土和红粘土等。天然地层的性质和分布不仅因地而异，即使在较小的范围内，也可能有很大的变化，因此不能像其他建筑材料一样，有统一的规格可供查阅。每一建筑场地都必须进行地基勘察，采取原状试样进行土工测试，以其试验结果作为地基基础设计的依据。在学习本课程时，要紧紧抓住其研究对象的复杂多变特点，根据不同地区、不同地点土的特点，合理选用勘察和室内试验乃至原位测试方法，正确选用有关指标和参数，不断完善理论公式，既重视所运用的基础理论，更要重视土力学与地基基础的实践，做到理论和实践相结合才是学好本课程的关键。

第一章 土的物理性质与工程分类

学习目标 熟悉并掌握土的生成与组成的基本概念；熟练掌握并能熟练计算土的物理性质与物理状态指标；熟悉土的压实机理；了解并掌握土的工程分类，为学好本课程后续知识打下坚实的基础。

1.1 土的概念与基本特征

土是岩石经风化、搬运、沉积所形成的产物。不同的土其矿物成分和颗粒大小存在着很大差异，颗粒、水和气体的相对比例也各不相同。

土体的物理性质，如轻重、软硬、干湿、松密等在一定程度上决定了土的力学性质，它是土的最基本的特征。土的物理性质由三相物质的性质、相对含量以及土的结构构造等因素决定。在工程设计中，必须掌握这些物理性质的测定方法和指标间存在的换算关系，熟练按有关特征及指标对地基土进行工程分类及初步判定土体的工程性质。

1.2 土的生成

构成天然地基的物质是地壳外表的土和岩石。地壳厚度一般为 30~80 km 地壳以下存在着高温、高压的复杂的硅酸盐熔融体，即人们所说的岩浆。岩浆活动可使岩浆沿着地壳薄弱地带侵入地壳或喷出地表，岩浆冷凝后生成的岩石称为岩浆岩。在地壳运动和岩浆活动的过程中，原来生成的各种岩石在高温、高压及挥发性物质的变质作用下，生成另外一种新的岩石，称为变质岩。地壳表层的岩石长期受自然界的空气、水、温度、周围环境以及各种生物的共同作用，发生风化，使大块岩体不断地破碎与分解，产生新的产物——碎屑。这些风化产物在山洪、河流、海浪、冰川或风力作用下，被剥蚀、搬运到大陆低洼处或海洋底部沉积下来。在漫长的地质年代中，沉积物越来越厚，在上覆压力和胶结物质的共同作用下，最初沉积下来的松散碎屑逐渐被压密、脱水、胶结、硬化（钙化）生成一种新的岩石，称为沉积岩。而上述过程中，未经成岩过程而形成的沉积物，即是通常所说的大小、形状和成分都不相同的颗粒集合体——土。

风化分为物理风化和化学风化两种。长期暴露在大气中的岩石，受到温度、湿度变化的影响，体积经常在膨胀、收缩，从而逐渐崩解、破裂为大小和形状各异的碎块，这个过程叫做物理风化。物理风化的过程仅限体积大小和形状的改变，不改变颗粒的矿物成分。其产物保留了原来

岩石的性质和成分，称为原生矿物，如石英、长石和云母等。砂、砾石和其他粗颗粒土即无粘性土就是物理风化的产物。如果原生矿物与周围的氧气、二氧化碳、水等接触，并受到有机物、微生物的作用，发生化学变化，产生出与原来岩石颗粒成分不同的次生矿物，这个过程叫做化学风化。化学风化所形成的细粒土颗粒之间具有粘结能力，该产物为粘土矿物，如蒙脱石、伊利石和高岭石等，通常称为粘性土。自然界中这两种风化过程是同时或相互交替进行的。由此可见，原生矿物与次生矿物是堆积在一起的，这就是我们所见到的性质复杂的土。

土由于不同的成因而具有各异的工程地质特征，下面简单介绍几种主要类型。

1 残积土

残积土是残留在原地未被搬运的那一部分原岩风化剥蚀后的产物（见图 1-1）。未被搬运的颗粒棱角分明。残积土与基岩之间没有明显的界限，一般分布规律为，上部残积土、中部风化带、下部新鲜岩石。残积土中残留碎屑的矿物成分在很大程度上和下卧岩层一致，根据这个道理也可推测下卧岩层的种类。由于残积土没有层理构造，土的物理性质相差较大，且有较大的孔隙，作为建筑地基容易引起不均匀沉降。

2. 坡积土

坡积土是降水水流的作用力将高处岩石风化产物缓慢冲刷、剥蚀，顺着斜坡向下逐渐移动，沉积至较平缓的山坡上而形成的沉积物。它分布于坡腰至坡脚，上部与残积土相接，基岩的倾斜程度决定了坡积土的倾斜度（见图 1-2）。坡积土随斜坡自上而下呈现由粗而细的分选现象，矿物成分与下卧基岩无直接关系，这一点与残积土不同。

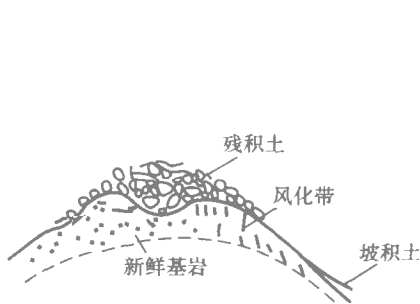


图 1-1 残积土示意图

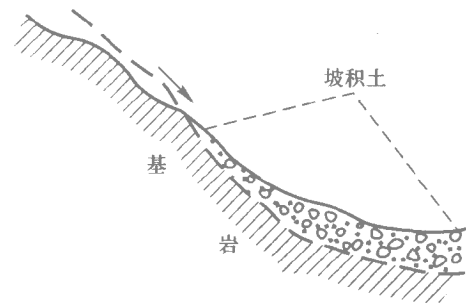


图 1-2 坡积土示意图

坡积土由于在山坡形成，故常发生沿下卧基岩斜面滑动的现象。组成坡积土的颗粒粗细混杂，土质不均匀，厚度变化大，土质疏松，压缩性较大。

3. 洪积土

降水造成的暂时性山洪急流，具有很大的剥蚀和搬运能力。它可以挟带地表大量碎屑堆积在山谷冲沟出口或山前平原而形成洪积土。山洪流出山谷后，因过水断面增大，流速骤减，被搬运的粗颗粒大量堆积下来，离山越远，颗粒越细，分布范围也越大（见图 1-3）。

洪积土的颗粒虽因搬运过程中的分选作用而呈

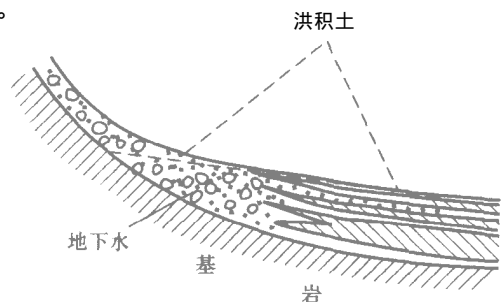


图 1-3 洪积土示意图

现由粗到细的变化，但由于搬运距离短，颗粒棱角仍较明显。由于靠近山地的洪积土颗粒较粗，承载力一般较高，属于良好的天然地基；离山较远的地段所形成的洪积土颗粒较细，成分均匀，厚度较大，这部分土分为两种情况，一种因受到周期性干旱的影响，土质较为密实，是良好的天然地基；另一种由于场地环境影响，地下水溢出地表，造成沼泽地带，因此承载力较低。

4. 冲积土

冲积土是流水的作用力将河岸基岩及上部覆盖的坡积土、洪积土剥蚀后搬运、沉积在河道坡度较平缓的地带形成的。随着水流的急、缓、消失重复出现，冲积土呈现出明显的层理构造。由于搬运过程长，搬运作用显著，棱角颗粒经碰撞、滚磨逐渐形成亚圆形或圆形的颗粒。搬运距离越长，沉积的颗粒越细。

5. 其他沉积土

除上述几种沉积土之外，还有海洋沉积土、湖泊沉积土、冰川沉积土、海陆交互沉积土和风积土。它们分别由海洋、湖泊、冰川及风的地质作用而形成。下面仅介绍湖泊沉积土。

湖泊沉积土主要由湖浪冲击湖岸，破坏岸壁形成的碎屑组成。近岸带沉积的主要为粗颗粒，远岸带沉积的是细颗粒。近岸带有较高的承载能力，远岸带则差些。湖心沉积物是由河流和湖流夹带的细小颗粒到达湖心后沉积形成的，主要是粘土和淤泥，常夹有细砂、粉砂薄层，称为带状土。这种土压缩性高，强度低。

1.3 土的组成

土是松散的颗粒集合体，它是由固体、液体和气体三部分所组成（也称三相系）。固体部分即为土粒，它构成土的骨架，骨架中布满着许多孔隙，孔隙为液体、气体所占据。水及其溶解物构成土中液体部分；空气及其他一些气体构成土中的气体部分。这些组成部分之间的数量比例关系和相互作用，决定着土的物理力学性质。

1.3.1 土的固体颗粒

1. 土粒的矿物组成

土中的固体颗粒的形状、大小、矿物成分及组成情况是决定土的物理力学性质的主要因素。粗大颗粒往往是岩石经物理风化后形成的碎屑，即原生矿物；而细粒土主要是化学风化作用形成的次生矿物和生成过程中混入的有机物质。粗大颗粒均成块状或粒状，而细小颗粒主要呈片状。土粒的组合情况就是大大小小的土粒含量的相对数量关系。

2. 土的颗粒级配

众所周知，自然界中的土都是由大小不同的颗粒组成，土颗粒的大小与土的性质有密切的关系。但在自然界中，单一粒径存在的颗粒并不多见，绝大部分大小不同的颗粒是混杂在一起的，所以要判断土的性质，需对土的颗粒组成进行分析。

土粒由粗到细逐渐变化时，土的性质相应发生变化，由无粘性变为有粘性，渗透性由大变小。粒径大小在一定范围内的土粒，其性质也比较接近，因此，可将土中不同粒径的土粒按适当的粒径范围分成若干小组，即粒组。划分粒组的分界尺寸称为界限粒径。表 1-1 是常用粒组划分方

法,表中根据界限粒径 200 mm、20 mm、2 mm、0.5 mm 和 0.005 mm 把土粒分成六大组:即漂石(块石)颗粒、卵石(碎石)颗粒、圆砾(角砾)颗粒、砂粒、粉粒和粘粒。

土中各粒组相对含量百分数称为土的颗粒级配。

土的各粒组含量可通过土的颗粒分析试验测定。方法如下:将土样风干、分散之后,取具有代表性的土样倒入一套按孔径大小排列的标准筛(例如孔径为 200、20、2、0.5、0.25、0.075 mm 的筛及底盘见图 1-4),经振摇后,分别称出留在各个筛及底盘上土的质量,即可求出各粒组相对含量的百分数小于 0.075 mm 的土颗粒不能采用筛分的方法分析,可采用比重计法测定其级配

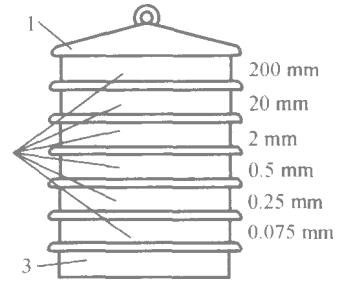


图 1-4 标准筛

1—筛盖;2—筛盘;3—底盘;

表 1-1 土粒的粒组划分

粒组名称		粒径范围/mm	一般特征
漂石或块石颗粒 卵石或碎石颗粒		>200 200~20	透水性很大,无粘性,无毛细水
圆砾或角砾颗粒	粗	20~10	透水性大,无粘性,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,压缩性增加;无粘性,遇水不膨胀,干燥时松散;毛细水上升高度不大,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;湿时稍有粘性,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	
粘粒		<0.005	透水性很小;湿时有粘性、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. 粘粒或称粘土粒,粉粒或称粉土粒;

3. 粘粒的粒径上限也有采用 0.002 mm 的。

根据颗粒大小分析试验结果,在半对数坐标纸上,以纵坐标表示小于某粒径颗粒含量占总土量的百分数,横坐标表示颗粒直径,绘出颗粒级配曲线(见图 1-5)。由曲线的陡缓大致可判断土的均匀程度。如曲线较陡,则表示颗粒大小相差不多,土粒均匀;反之曲线平缓,则表示粒径大小相差悬殊,土粒不均匀。

在工程中,采用定量分析的方法判断土的级配,常以不均匀系数 C_u 表示颗粒的不均匀程度即

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

式中: d_{60} ——小于某粒径颗粒含量占总土重的 60%时的粒径,该粒径称为限定粒径

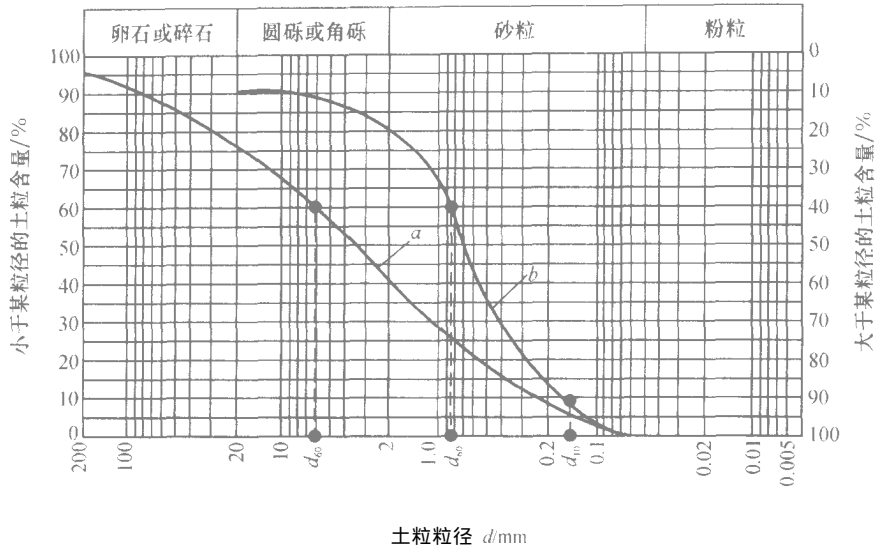


图 1-5 颗粒级配曲线

d_{10} ——小于某粒径颗粒含量占总土重的 10% 时的粒径，该粒径称为有效粒径。

不均匀系数反映颗粒的分布情况， C_u 越大，表示颗粒分布范围越广，越不均匀，其级配越好，作为填方工程的土料时，比较容易获得较大的干密度； C_u 越小，颗粒越均匀，级配不良。工程中将 $C_u < 5$ 的土称为级配不良的土， $C_u > 10$ 的土称为级配良好的土

颗粒级配可以在一定程度上反映土的某些性质。对于级配良好的土，较粗颗粒间的孔隙被较细的颗粒填充，颗粒之间粗细搭配填充好，易被压实，因而土的密实度较好，相应地基土的强度和稳定性也较好，透水性和压缩性较小，可用作路基、堤坝或其他土建工程的填方土料。

1.3.2 土中水

在天然情况下，土中常有一定数量的水。土中细粒越多，水对土的性质影响越大。对水的研究，包括其存在状态和与土的相互作用。存在于土粒晶格之间的水称为结晶水，它只有在较高的温度 ($> 105^\circ\text{C}$) 下才能化为气态水与土粒分开从工程性质上分析，结晶水作为矿物的一部分。建筑工程中所讨论的土中水，主要是以液态形式存在着的结合水与自由水。

1. 结合水

结合水是指在电分子引力下吸附于土粒表面的水。这种电分子引力高达几千到几万个大气压，使部分水分子和土粒表面牢固地粘结在一起这一点已被电渗电泳试验所验证。

由于土粒表面一般带有负电荷，围绕土粒形成电场，在土粒电场范围内的水分子和水溶液中的阳离子被吸附在土粒表面。原来不规则排列的极性水分子，被吸附后呈定向排列。在靠近土粒表面处，由于静电引力较强，能把水化离子和极性水分子牢固地吸附在颗粒表面而形成固定层。在固定层外围，静电引力比较小，水化离子和极性水分子活动性比在固定层中大些，形成扩散层由此可将结合水分成强结合水和弱结合水两种。

(1) 强结合水

强结合水是指紧靠土粒表面的结合水。它的特征是：没有溶解盐类的能力，不能传递静水压力，只有吸热变成蒸汽时才能移动。这种水分子极牢固地结合在土颗粒表面上，其性质接近固体，密度约为 $1.2 \sim 2.4 \text{ g/cm}^3$ ，冰点为 -78°C ，具有极大的粘滞性、弹性和抗剪强度。如果将干燥的土放在天然湿度和温度的空间，土的质量增加，直到土中强结合水达到最大吸着度为止。土粒越细，吸着度越大。粘性土只有强结合水存在时，呈固体状态。

(2) 弱结合水

弱结合水紧靠于强结合水的外围形成一层结合水膜。它仍不能传递静水压力，但水膜较厚的弱结合水能向邻近较薄的水膜缓慢移动。当土中含有较多的弱结合水时，土具有一定的可塑性。因砂粒比表面积较小，几乎不具有可塑性。而粘性土的比表面积较大，含薄膜水较多，其可塑范围较大，这就是粘性土具有粘性的原因（见图 1-6）。

随着与土粒表面距离增大，吸附力减小，弱结合水逐渐过渡为自由水。

2. 自由水

存在于土孔隙中颗粒表面电场影响范围以外的水称为自由水。它的性质和普通水一样，能传递静水压力和溶解盐类，冰点为 0°C 。自由水按其移动所受作用力的不同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，具有一般液态水的共性，存在于地下水位以下的透水层中。重力水在土的孔隙中流动时，能产生动水压力，带走土中细颗粒，而且还能溶解土中的盐类。这两种作用会使土的孔隙增大，压缩性提高，抗剪强度降低。地下水位以下的土粒受水的浮力作用，使土的应力状态发生变化。在水头作用下，重力水会产生动水压力，对开挖基坑、排水等方面均产生较大影响。

(2) 毛细水

毛细水是受到水与空气界面处表面张力作用的自由水。毛细水存在于地下水位以上的透水层中。毛细水与地下水位无直接联系的称为毛细悬挂水，与地下水位相连的称为毛细上升水。

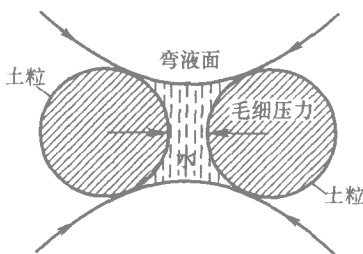


图 1-7 毛细水压力示意图

土孔隙中局部存在的毛细水中，毛细水的弯液面和土粒接触处的表面引力反作用于土粒上，使土粒之间由于这种毛细压力而挤紧，土呈现出粘聚现象，这种力称为毛细粘聚力，也称假粘聚力（见图 1-7）。在施工现场可见到稍湿状态的砂性地基可开挖成一定深度的直立坑壁，就是因为砂粒间存在着假粘聚力的缘故。当地基饱和或特别干燥时，不存在水与空气的界

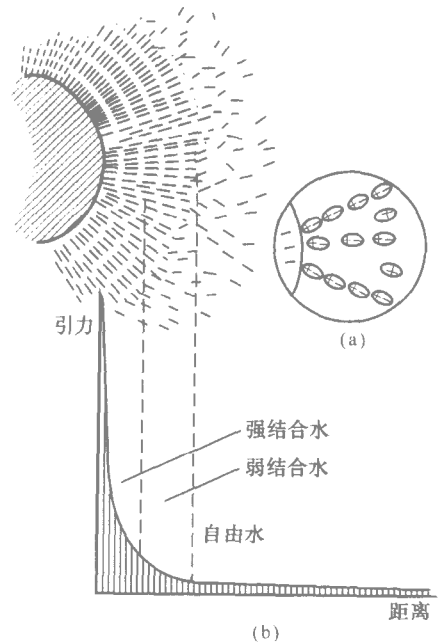


图 1-6 土中水示意图

面，假粘聚力消失，坑壁就会塌落。

在工程中，应特别注意毛细水上升的高度和速度，因为毛细水的上升对建筑物地下部分的防潮措施和地基土的浸湿和冻胀有重要影响。

地基土的土温随大气温度变化，当地温降到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下，土体便因土中水冻结而形成冻土。细粒土在冻结时往往发生膨胀，即所谓冻胀冻胀的机理如下：土层冻结时，下部未冻区土中的水分向冻结区迁移、集聚。弱结合水的外层已接近自由水，在 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时冻结。越靠近土粒表面冰点越低，在大约 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下才能全部冻结当低温传入土中时，土中的自由水首先冻结成冰，弱结合水的外层开始冻结，使冰晶体逐渐扩大，冰晶体周围土粒的水膜变薄，土粒产生剩余的电分子引力；另外，由于结合水膜变薄，使水膜中的离子浓度增加，产生渗附压力。在这两种力的作用下，下部未冻结区的自由水便被吸到冻结区维持平衡，同时受温度影响而冻结，水晶体增大，不平衡引力继续形成，引发水分迁移现象。若下卧不冻结区能不断地给予水源补充，则水晶体不断扩大，在土层中形成夹冰层，地面随之隆起，出现冻胀现象当土层解冻时，夹冰层融化，地面下陷，即出现融陷现象。对此，在道路、房屋设计中应对土体的冻胀现象给予足够的重视。

1.3.3 土中气体

土中气体有两种存在形式，一种与大气相通；另一种在土的孔隙中封闭着，与大气隔绝。

与大气相通的气体存在于接近地表的土孔隙中，其含量与孔隙体积大小及孔隙被填充的程度有关，它对土的工程性质影响不大。在细粒土中常存在着与大气隔绝的封闭气泡，其成分可能是空气、水汽或天然气等，它不易逸出，因气泡的栓塞作用，降低了土的透水性。封闭气体的存在，增大了土的弹性和压缩性，对土的性质有较大的影响。

1.3.4 土的结构

土的结构是指土颗粒的大小、形状、表面特征、相互排列及其联结关系的综合特征。一般分为单粒结构、蜂窝结构、絮状结构。

1. 单粒结构

单粒结构是无粘性土的基本组成形式，由较粗的砾石颗粒、砂粒在自重作用下沉积而成因颗粒较大，颗粒间没有连接力，有时仅有微弱的假粘聚力，土的密实程度受沉积条件影响。如土粒受波浪的反复冲击推动作用，其结构紧密，强度大，压缩性小，是良好的天然地基。而洪水冲积形成的砂层和砾石层，一般较疏松（见图 1-8）由于孔隙大，土的骨架不稳定，当受到动力荷载或其他外力作用时，土粒易于移动，以趋于更加稳定的状态，同时产生较大变形，这种土不宜做天然地基。如果细砂或粉砂处于饱和疏松状态，在强烈振动作用下，土的结构趋于紧密，在瞬间变成了流动状态，即所谓“液化”，土体强度丧失，在地震区将产生震害。1976 年唐山大地震后，当地许多地方出现了喷砂冒水现象，这就是砂土液化的结果。

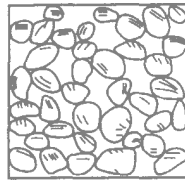
2. 蜂窝结构

组成蜂窝结构的颗粒主要是粉粒。研究发现，粒径在 $0.05\sim 0.005\text{ mm}$ 的颗粒在水中沉积时，仍然是以单个颗粒下沉，当通到已沉积的颗粒时，由于它们之间的相互引力大于自重力，因此土粒停留在最初的接触点上不能再下沉，形成的结构像蜂窝一样，具有很大的孔隙（见图 1-9）。

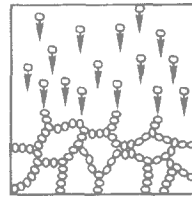
3. 絮状结构



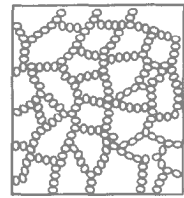
(a) 紧密结构



(b) 疏松结构



(a) 颗粒正在沉积



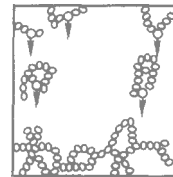
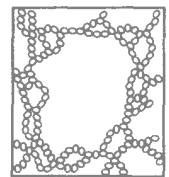
(b) 沉积完毕

图 1-8 单粒结构

图 1-9 蜂窝结构

粒径小于 0.005mm 的粘粒在水中处于悬浮状态，不能靠自重下沉。当这些悬浮在水中的颗粒被带到电解质浓度较大的环境中（如海水），粘粒间的排斥力因电荷中和而破坏，聚集成絮状的粘粒集合体，因自重增大而下沉，与已下沉的絮状集合体相接触，形成孔隙很大的絮状结构（见图 1-10）。

具有蜂窝结构和絮状结构的土，因为存在大量的细微孔隙，所以渗透性小，压缩性大，强度低，土粒间连接较弱，受扰动时，土粒接触点可能脱离，导致结构强度损失，强度迅速下降；而后随时间增长，强度还会逐渐恢复。这类土颗粒间的连接力往往由于长期的压密作用和胶结作用而得到加强。

(a) 絮状集合体
正在沉积

(b) 沉积完毕

图 1-10 絮状结构

1.3.5 土的构造

土的构造是指同一土层中颗粒或颗粒集合体相互间的分布特征。通常分为层状构造、分散构造和裂隙构造。

层状构造是土粒在沉积过程中，由于不同阶段沉积的物质成分、颗粒大小不同，沿铅直方向呈层状分布

分散构造是土层颗粒间无大的差别，分布均匀，性质相近，常见于厚度较大的粗粒土。

裂隙构造是土体被许多不连续的小裂隙所分割裂隙的存在大大降低了土体的强度和稳定性，增大了透水性，对工程不利。

1.4 土的三相量比例指标

组成土的三相成分及各自的性质对土的性质有显著影响。三相成分的体积和质量间的比例关系也决定着土的物理、力学性质。土的各组成部分质量和体积之间的比例关系，用土的三相量比例指标表示。它们对评价土的工程性质有重要的意义。

1.4.1 三相简图

土的颗粒、水和气体是混杂在一起的，为分析问题方便，设想将三部分分别集中起来，如图

1-11 所示,称为三相关系简图。图中各部分用下列符号表示:

- m_s ——土粒质量;
- m_w ——土中水质量;
- m ——土的总质量;
- V_s ——土粒体积;
- V_w ——土中水体积;
- V_a ——土中气体体积;
- V_v ——土中孔隙体积;
- V ——土的总体积

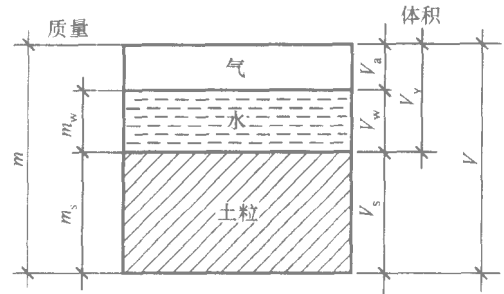


图 1-11 三相关系简图

1.4.2 由试验直接测定的指标

1. 土的密度 ρ 与重度 γ

在天然状态下(即保持原始状态和含水量不变)单位土体积内湿土的质量称为土的湿密度 ρ ,简称天然密度或密度,即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{t/m}^3 \text{ 或 } \text{g/cm}^3) \quad (1-2)$$

单位体积土受到的重力称为土的湿重度 γ ,又称土的重力密度或重度,其值等于土的湿密度乘以重力加速度 g 工程中可取 $g = 10 \text{ m/s}^2$ 即

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

天然状态下,土的密度变化范围较大,其值一般介于 $1.8 \sim 2.2 \text{ g/cm}^3$ 之间。若土较软则介于 $1.2 \sim 1.8 \text{ g/cm}^3$ 之间,有机质含量高或塑性指数大的极软粘性土可降至 1.2 g/cm^3 以下。

2. 土粒比重 d_s

单位土粒的密度 ρ_s 与同体积 4°C 水的密度 ρ_w 之比,称为土粒的比重 d_s 即

$$d_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{m_s}{V \rho_w} \quad (1-4)$$

式中: ρ_w 一般取 1 t/m^3

土粒的比重取决于土的矿物成分和有机质含量。一般砂性土的比重介于 $2.63 \sim 2.67$ 之间,粘性土的比重介于 $2.67 \sim 2.75$ 之间。

3. 含水量 w

在天然状态下,土中水的质量与土颗粒的质量之比,称为土的含水量,以百分数表示,即

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% \quad (1-5)$$

含水量 w 是标志土的湿度的一个重要指标。天然土层的含水量变化范围较大,它与自然环境和土的种类有关。一般干砂土的含水量接近零,而饱和砂土可高达 40% ;粘性土处于坚硬状态时,含水量可小于 30% ,而处于流塑状态时,可能大于 60% 一般情况下,同一类土含水量越大则强度越低,土的力学性质也随之改变。

1.4.3 换算指标

1. 土的孔隙比 e

土的孔隙体积与土粒体积之比称为土的孔隙比，即

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1-6)$$

孔隙比用小数表示。它是一个重要的物理性质指标，可以评价天然土层的密实程度。当 $e < 0.6$ 时，是低压缩性的密实土； $e > 1.0$ 时，是高压缩性的疏松土。

2. 土的孔隙率 n

土的孔隙体积与土的总体积之比称为土的孔隙率，用百分数表示，即

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \quad (1-7)$$

3. 土的饱和度 S_r

土中水的体积与孔隙体积之比称为土的饱和度，用小数表示，即

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (1-8)$$

饱和度是反映孔隙被水充满程度的一个指标，是反映土体潮湿程度的物理性质指标。当 $S_r < 0.5$ 时土为稍湿的； S_r 在 $0.5 \sim 0.8$ 之间时土为很湿的； $S_r > 0.8$ 时土为饱和的；当 $S_r = 1.0$ 时，土则处于完全饱和状态。

4. 不同情况下土的密度与重度

(1) 土粒密度 ρ_s

单位颗粒体积内颗粒的质量，称为土粒密度，即

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (\text{t/m}^3 \text{ 或 } \text{g/cm}^3) \quad (1-9)$$

(2) 土的干密度 ρ_d 和干重度 γ_d

单位土体积内土颗粒的质量称为土的干密度或干土密度，即

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (\text{t/m}^3 \text{ 或 } \text{g/cm}^3) \quad (1-10)$$

单位体积土颗粒受到的重力称为土的干重度或干土的重力密度，其值等于土的干密度乘以重力加速度，即

$$\gamma_d = \rho_d g \quad (\text{kN/m}^3) \quad (1-11)$$

工程中以土的干密度作为评定土体紧密程度的标准，控制填土工程的施工质量。

(3) 土的饱和密度 ρ_{sat} 和饱和重度 γ_{sat}

土体孔隙被水充满时，单位土体积内饱和土的质量称为土的饱和密度，即

$$\rho_{sat} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V} \quad (\text{t/m}^3 \text{ 或 } \text{g/cm}^3) \quad (1-12)$$

单位土体积内饱和土所受到的重力，称为土的饱和重度，其值等于饱和密度乘以重力加速度，即

$$\gamma_{sat} = \rho_{sat} g \quad (\text{kN/m}^3) \quad (1-13)$$

(4) 土的浮密度 ρ' 和浮重度 γ'

在水面以下的土，其土粒受浮力作用时，单位土体积内土粒的质量称为土的浮密度，即

$$\rho' = \frac{m_s - V_s \rho_w}{V} \quad (\text{t/m}^3 \text{ 或 } \text{g/cm}^3) \quad (1-14)$$

处在水面以下的土，考虑土粒受浮力作用时，单位土体积内土粒所受到的重力扣除浮力后的重度称为土的浮重度，其值为土的浮密度乘以重力加速度，即

$$\gamma' = \rho' g = \frac{m_s g - V_s \rho_w g}{V} = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w \quad (\text{kN/m}^3) \quad (1-15)$$

式中： γ_w ——水的重度，一般为 10 kN/m^3

以上对各指标进行了定义，如测得三个基本物理性质指标后，替换三相图中的各符号即可得出其他三相比例指标（见图 1-12）。

换算时，一般设 $V_s = 1$ ，由式 (1-9) 得， $m_s = \rho d_s$ ，由式 (1-4) 得， $m_s = d_s \rho_w w$ ，由式 (1-5) 得， $m_w = w d_s \rho_w$ ，因为 $\rho_w = \frac{m_w}{V_w}$ ，所以 $V_w = \frac{w d_s \rho_w}{\rho_w} = w d_s$ ， $m = d_s (1 + w) \rho_w$ ， $V = \frac{d_s (1 + w) \rho_w}{\rho}$ ， $V_s = \frac{d_s (1 + w) \rho_w}{\rho} - w d_s - 1$ ，

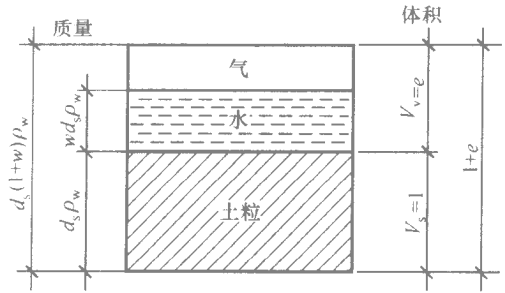


图 1-12 土的三相物理指标换算图

$$\rho_d - \frac{m_s}{V} = \frac{\rho}{1 + w} \quad (1-16)$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{d_s (1 + w) \rho_w}{\rho} - 1 \quad (1-17)$$

$$n = \frac{V_v}{V} = 1 - \frac{\rho}{d_s (1 + w) \rho_w} \quad (1-18)$$

其他指标推导过程略，将换算公式一并列于表 1-2。

表 1-2 土的三相比例指标换算公式

名称	符号	表达式	常用换算公式	单位	常见的数值范围
含水量	w	$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\%$	$w = \frac{S_r e}{d_s} = \frac{\gamma}{\gamma_d} - 1$		20% ~ 60%
土粒比重	d_s	$d_s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$	$d_s = \frac{S_r e}{w}$		一般粘性土: 2.67 ~ 2.75 砂土: 2.63 ~ 2.67
密度	ρ	$\rho = \frac{m}{V}$	$\rho = \frac{d_s + S_r e}{1 + e} \rho_w$	t/m^3	1.6 ~ 2.2 t/m^3
重度	γ	$\gamma = \rho g$	$\gamma = \frac{d_s + S_r e}{1 + e} \gamma_w$	kN/m^3	16 ~ 20 kN/m^3
干土密度	ρ_d	$\rho_d = \frac{m_s}{V}$	$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w}$	t/m^3	1.3 ~ 1.8 t/m^3
干土重度	γ_d	$\gamma_d = \rho_d g$	$\gamma_d = \frac{\rho}{1 + w} g = \frac{\gamma}{1 + w}$	kN/m^3	13 ~ 18 kN/m^3
饱和土密度	ρ_{sat}	$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V}$	$\rho_{\text{sat}} = \frac{d_s + e}{1 + e} \rho_w$	t/m^3	1.8 ~ 2.3 t/m^3