

概 述

1.1 地基基础的概念

建筑物都是建造在土体或岩体上面的，土体受到建筑物的荷载后，就会产生压缩变形。土体的压缩性比建造墙或柱的建筑材料（如砖或混凝土等）大得多，为了减小建筑物的下沉，并保证它的强度和稳定性，就要将墙或柱与土体的接触部分的断面尺寸适当扩大，以减小建筑物与土体接触部分的压强。我们将建筑物最下面扩大的这一部分称为基础；而将承受由基础传来的建筑物荷载的土体（或岩体）称为地基。位于基础底面下第一层土称为持力层；而在其下的各个土层统称为下卧层（图 1-1）。

基础是建筑物十分重要的组成部分，没有一个坚固而耐久的基础，上部结构建造得再结实，也是要出问题的。因此，为了保证建筑物的安全和必需的使用年限，基础应具有足够的强度和耐久性。地基虽不是建筑物的组成部分，但是它的好坏却直接影响整个建筑物的安危。实践证明，建筑物的事故很多是与地基基础有关的。例如，著名的意大利比萨斜塔就是由于地基不均匀沉降所引起的。该塔始建于 1173 年，高度约 55m，当建至 24m 时发现塔身倾斜而被迫停工，直至 1273 年续建完工。该塔由于建造在不均匀、高压缩性软土地基上，致使北侧下沉 1m 有余，南侧下沉近 3m，沉降差达 1.8m，倾角达 5.8°之多。现在该塔仍以每年 1mm 的沉降速率下沉。又如，建于 1913 年的加拿大特朗斯康谷仓，由于设计前不了解地基埋藏有厚达 16m 的软黏土层，建成后谷仓的荷载超过了地基的承载能力，造成地基丧失稳定性，使谷仓西侧陷入土中 8.8m，东侧抬高 1.5m，仓身倾斜 27°。

为了保证建筑物的安全，地基应同时满足两个基本要求：

- （1）地基应具有足够的承载力，在荷载作用下，不至于因地基失稳而破坏；
- （2）地基不能产生过大的变形而影响建筑物的安全和正常使用。

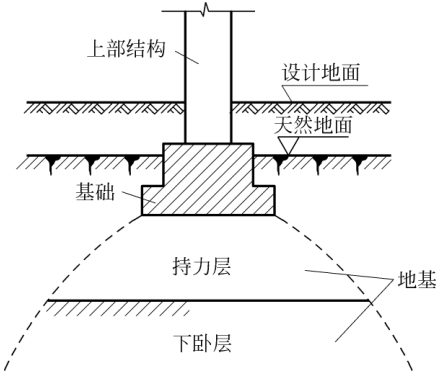


图 1-1 地基和基础示意图

良好的地基一般具有较高的承载力与较低的压缩性,不须人工处理就能满足上述要求,这种地基称为天然地基。软土地基的工程性较差,对这种地基必须进行人工处理,方能满足承载力与变形的要求。经过人工处理而达到设计要求的地基称为人工地基,这种地基随着建设的发展已被广泛利用。设计地基基础前,要进行充分的调查研究,掌握必要的设计资料。一方面通过地基勘探和验槽查清地基土的类别及其分布情况,有无软土层、暗塘、古井、古墓与地下人防工程等异常部位,以及地下水位高低,它对基础材料有无侵蚀作用;另一方面要弄清建筑物的使用要求,荷载大小,有无振动设备,振动频率与振幅大小等。根据这两方面情况,本着安全可靠、经济合理、技术先进和便于施工的原则,考虑上部结构和地基的共同作用,全面分析,权衡利弊,最后,拟出最佳地基基础的设计方案,做出正确的设计。

1.2 荷载效应不利组合与相应抗力限值

地基基础设计时,荷载效应的不利组合与相应的抗力限值,可按表 1-1 的规定采用。

表 1-1 地基基础设计时荷载效应不利组合与相应抗力限值

项次	计算内容	荷载效应组合	抗力限值
1	按地基承载力确定基础底面积	按正常使用极限状态下荷载效应的标准组合,用式(1-1)计算	地基承载力特征值
2	按单桩承载力确定桩数	同上	单桩承载力特征值
3	按变形计算地基	按正常使用极限状态下荷载效应的准永久组合,不应计入风荷载和地震作用,用式(1-2)计算	地基变形容许值
4	计算挡土墙土压力、地基或滑坡稳定以及基础抗浮稳定	按承载能力极限状态下荷载效应的基本组合,但其分项系数均为 1.0,用式(1-3)计算	挡土墙、地基或滑坡稳定以及基础抗浮稳定容许抗力
5	确定基础或桩基承台高度、支挡结构截面,计算基础或支挡结构内力,确定配筋和验算材料强度时,上部结构传来的作用效应和相应的基底反力、挡土墙土压力以及滑坡推力	按承载能力极限状态下荷载效应的基本组合,采用相应的分项系数,用式(1-3)或式(1-4)计算	结构抗力设计值,按有关结构设计规范的规定确定
6	验算基础裂缝宽度	按正常使用极限状态下荷载效应的标准组合,用式(1-1)计算	最大裂缝宽度限值

地基基础设计时,作用组合的效应设计值,应符合下列规定:

(1) 正常使用极限状态下标准组合的效应设计值 S_k ,应按下式确定:

$$S_k = S_{Gk} + S_{Q1k} + \psi_{c2} S_{Q2k} + \cdots + \psi_{cn} S_{Qnk} \quad (1-1)$$

式中: S_{Gk} ——永久作用标准值 G_k 的效应;

S_{Qik} ——第 i 个可变作用标准值 Q_{ik} 的效应;

ψ_{ci} ——第 i 个可变作用 Q_i 的组合值系数。

(2) 正常使用极限状态下准永久组合效应的设计值 S_k , 应按下式确定:

$$S_k = S_{Gk} + \phi_{q1} S_{Q1k} + \phi_{q2} S_{Q2k} + \cdots + \phi_{qn} S_{Qnk} \quad (1-2)$$

式中: ϕ_{qi} ——第 i 个可变作用 Q_i 的准永久值系数。

(3) 承载力极限状态下, 由可变作用控制的基本组合的效应设计值 S_d , 应按下式确定:

$$S_d = \gamma_G S_{Gk} + \gamma_{Q1} S_{Q1k} + \gamma_{Q2} \phi_{c2} S_{Q2k} + \cdots + \gamma_{Qn} \phi_{cn} S_{Qnk} \quad (1-3)$$

式中: γ_G ——永久作用的分项系数;

γ_{Qi} ——第 i 个可变作用的分项系数。

(4) 对由永久作用控制的基本组合, 也可采用简化规则, 基本组合的效应设计值 S_d 可按下式确定:

$$S_d = 1.35 S_k \quad (1-4)$$

式中: S_k ——标准组合的作用效应设计值。

1.3 本书内容和学习要求

本书是参照国家新颁布的《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)编写的。书中反映了新规范的主要内容, 特别是对新规范的条文作了必要的解释和说明。

全书共分 10 章, 包括以下内容:

第 1 章概述。

第 2 章地基土的物理性质及岩土的分类, 简要地介绍了土的成因、组成和反映土的物理性质的指标, 以及岩土的分类方法。本章内容是学好地基基础必备的知识, 不可忽视。

第 3、4、5 章较详细地叙述了土中的应力、变形及强度稳定性的计算方法。这些内容是地基基础设计的理论基础, 必须掌握。

第 6 章建筑物地基的计算原则。本章根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)的有关内容, 叙述了地基基础设计等级, 地基按承载力、变形和稳定性的计算规定。在学习本章时, 要特别注意地基按承载力计算, 按变形计算和按稳定性计算, 以及计算时结构荷载效应的组合方法。

第 7 章天然地基浅基础设计。本章首先介绍了基础的类型, 基础埋置深度的确定, 无筋和配筋扩展基础底面尺寸的计算, 特别重点介绍了偏心受压基底尺寸直接算法, 基础剖面尺寸的确定, 以及基础配筋的计算。其次还介绍了柱下条形基础和交叉条形基础的设计。

无筋和配筋扩展基础应用最为广泛, 因此, 应重点掌握。

第 8 章基槽检验与地基的局部处理。本章叙述了基槽检验的目的、方法和地基的局部处理。验槽是地基勘察的补充, 是保证地基基础安全的重要措施。因此, 在基础工程中, 十分重视验槽工作。

第 9 章软土地基, 本章叙述了关于软土地基勘察、设计和施工的一般规定, 软土地基的利用与处理, 以及在软土地基上兴建房屋所采取的建设和结构措施。

第 10 章桩基础设计。本章较详细地介绍了桩的功能和种类、单桩竖向承载力特征值的确定, 以及桩基的设计方法。随着我国经济建设的发展, 高层建筑不断出现, 桩基在高层建筑中广泛应用。因此, 要掌握桩基设计。

由于地基土的种类繁多,土层分布又十分复杂,所以,在设计地基基础前,必须通过地基原位测试和室内土工试验,获得土的各种计算资料。因此,土的现场原位测试和室内土工试验也是本学科的一个重要内容。

1.4 本学科发展简介

远溯到我国史前,地基基础工程技术就已应用于建筑工程中。如在我国西安半坡村发现的新石器时代的遗址中就有土台石础,就是古代的地基基础。自公元前 2 世纪开始修建的驰名中外的万里长城、宏伟的宫殿和寺院以及宝塔建筑,都是因为有了坚固的地基基础,才能经受强风考验和历次大地震的袭击而保留至今。

隋朝石工李春所修赵州桥,不仅因其造型艺术高超而为后人所赞许,其地基基础设计合理也是令人称奇的。他把桥台埋在密实的粗砂层上,赵州桥迄今虽已逾 1300 余年,其下沉量也不过几厘米。现经计算,其基础底面压力为 $500 \sim 600 \text{ kN/m}^2$,与持力层土的承载力设计值十分接近。

桩基和人工地基用于我国建筑工程中,也由来已久。如郑州隋朝所建超化寺的塔基,采用的就是桩基。许多古建筑的基础就应用了灰土垫层。但是,由于当时生产力发展水平的限制,这些地基基础高超技艺未能提炼成系统的科学理论。

18 世纪工业革命后,随着资本主义工业化的发展,建筑、铁路和水利工程的兴建,推动了作为地基基础理论基础的土力学的发展。1773 年法国库伦(C. A. Coulomb)根据实验提出了砂土的抗剪强度公式,创立了滑动土楔的土压力理论。之后,1857 年英国朗金(W. J. M. Rankine)根据土体极限平衡条件,从另一途径建立了土压力理论。1885 年法国布辛奈斯克(J. Boussinesq)求得了半无限弹性体在竖向集中力作用下的应力和变形理论解答。1922 年瑞典费伦纽斯(B. H. Fellenius)解决了土坡稳定计算理论课题。以上这些古典理论和计算方法,至今仍在工程中沿用。1925 年美国太沙基(K. Terzaghi)发表了土力学专著,这对土力学理论的发展起了很大的推动作用。

半个世纪以来,世界各国高层和大跨建筑、大跨桥梁工程、大型水利工程及核电站大型工程的兴建,促进了土力学和基础工程理论的进一步发展。新中国成立六十多年来,在勘察、测试技术、土的物理力学性质研究、土力学理论以及地基基础设计和施工技术等方面,都取得了很多科研成果和实践经验,特别是新版《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)于 2011 年 7 月业已公布,并于 2012 年 8 月 1 日开始实施,这对加速我国基础建设进程具有重要意义。

地基土的物理性质及岩土的分类

2.1 土的成因与组成

2.1.1 土的成因

地壳表面的岩石由于在大气中长期受到风、霜、雨、雪的侵蚀和生物活动的破坏作用(风化作用),使其崩解和破碎而形成大小不同的松散物质,这种松散物质就称为土。风化后残留在原地的土称为残积土,它主要分布在岩石暴露在地面而受到强烈风化的山区和丘陵地带。由于残积土未经分选作用,所以无层理,厚度很不均匀。因此,在残积土地基上进行工程建设时应注意其不均匀性,防止建筑物产生不均匀沉降。如风化后的土受到各种自然力(例如重力、雨雪水流、山洪急流、河流、风力和冰川等)的作用,被搬运到大陆低洼地区或海底而沉积下来,在漫长的地质年代里沉积的土层逐渐加厚,并在自重和外力作用下逐渐压密,这样形成的土就称为沉积土。陆地上大部分平原地区的土都属于沉积土。由于沉积土在沉积过程中地质环境不同,生长年代不一,所以它的物理力学性质有很大差异。如洪水沉积的洪积土,有一定的分选作用,距山区较近的地段,其颗粒较粗,远的地方颗粒较细。由于每次洪水搬运能力不同,所以形成了土层粗细颗粒交错的地质剖面。通常,粗颗粒的土层压缩性较低、承载力高;而细颗粒的土层压缩性高,承载力较低。在沉积土地基上进行工程建设时,应尽量选择粗颗粒土层作为基础的持力层。

土的沉积年代不同,其工程性质将有很大变化,因此,了解土的沉积年代的知识,对正确判断土的工程性质有实际意义。土的沉积年代通常采用地质学中的相对地质年代来划分。所谓相对地质年代,是指根据主要地壳运动和古生物演化顺序,将地壳历史进行划分的时间段落。最大的时间单位称为代,每个代分为若干纪,纪分为若干世,世再分为若干期。

大多数的土是在第四纪地质年代沉积形成的,这一地质历史时期是距今较近的时间段落(0.025万~100万年)。在第四纪中包括四个世,即早更新世(用符号 Q_1 表示)、中更新世(Q_2)、晚更新世(Q_3)和全新世(Q_4)。

2.1.2 土的组成

如前所述,土是一种松散物质,这种松散物质主要是矿物,是指在地壳中具有一定化学

成分和物理性质的自然元素或化合物,如石英,云母等。在矿物颗粒之间有许多孔隙,通常孔隙中间有液体(一般是水),也有气体(一般是空气)。所以,在一般情况下,土是由固体颗粒、水和气体三部分(也称为三相)组成的。

显然,土的工程性质与组成土的三部分的性质及其之间的比例有关。因此,对这三个部分的性质和它们之间的比例关系应分别加以研究。本节仅叙述固体矿物颗粒、水和气体的性质。关于土的三个组成部分的比例关系及其对土的性质影响,将在下一节讨论。

1. 土的固体颗粒

土的固体颗粒主要由矿物颗粒构成,对于有些土来说,除矿物颗粒外还含有有机质。土的固体颗粒的大小和形状、矿物成分及组成情况对土的物理力学性质有很大的影响。

1) 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。大的颗粒粒径有几百毫米;小的颗粒粒径仅几微米。试验表明,随着土的粒径由粗变细,土的性质也会相应地发生很大变化,例如,可使土的透水性由大变小,甚至变为不透水,可以使土由无黏性变为有黏性等。因此,为了便于分析和利用土的工程性质,解决工程建设问题,可将性质相近的土粒划分若干粒组,见表 2-1。由表 2-1 中可见,粒径较大的粒组与水之间几乎没有物理化学作用,而粒径小的粒组,例如黏粒组和胶粒组就受到水的强烈影响,遇水后出现黏性、可塑性等。

表 2-1 土的粒组划分

粒组名称		分界粒径/mm	一般特征
漂石或块石颗粒 卵石或碎石颗粒		>200 200~10	透水性大,无黏性,无毛细水,不能保持水分
圆砾或角砾颗粒	粗	20~10	透水性大,无黏性,无毛细水
	中	10~5	
	细	5~2	
砂粒	粗	2~0.5	易透水,无黏性,干燥时不收缩,呈松散状态,不表现可塑性,压缩性小,毛细水上升高度不大
	中	0.5~0.25	
	细	0.25~0.075	
粉粒	粗	0.075~0.01	透水性小,潮湿时稍有黏性,干燥时稍有收缩,毛细水上升高度较大,极易出现冻胀现象
	细	0.01~0.005	
黏粒 胶粒		0.005~0.002	几乎不透水,结合水作用显著,潮湿时呈可塑性,黏性大,遇水膨胀,干燥时收缩显著,压缩性大
		<0.002	

注: 1. 漂石和圆砾颗粒均成一定的磨圆形状(圆形或亚圆形),块石、碎石和角砾颗粒都有棱角。

2. 黏粒、粉粒可分别称为黏土粒、粉土粒。

显然,土中所含各粒组的相对含量不同,则表现出来的土的工程性质也就必然不同。为此,工程上常以土中各个粒组的相对含量(各粒组占土粒总重的百分数)表示土中颗粒的组成情况。粒组的相对含量称为土的颗粒级配,它是确定土的名称和选用建筑材料的重要依据。

确定粒组相对含量的方法称为粒径分析法。对于粒径大于 0.075mm 的土采用筛分法;粒径小于 0.075mm 的土采用密度计法。所谓筛分法就是将所要分析的风干分散的代

表性土样放进一套筛子(常用每套共计六个筛子,筛孔分别为 200mm、20mm、2mm、0.5mm、0.25mm 和 0.075mm,另外还有顶盖和底盘各一个)的顶部,当筛子振动时,大小不同的土粒就被筛分开来,直径大于 200mm 的颗粒留在最上边的筛子里,直径小于 0.075mm 的颗粒通过各层筛子,最后落到底盘里,留在每个筛子里的土重除以土的总重再乘以 100%,即可求得各粒组的相对含量。粒径小于 0.075mm 的土采用密度计法测定粒组的相对含量。关于密度计法可参阅《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)。

颗粒分析结果常用图 2-1 的颗粒级配累积曲线表示。图中横坐标(为对数坐标)表示粒径,纵坐标表示小于某粒径的土粒占土总重的百分比,由颗粒级配累积曲线可求得各粒组的相对含量。对于图 2-1 所示的土样,砂粒组占土总量为 $80\% - 7\% = 73\%$ 。同时,由曲线的坡度还可以鉴别土的均匀程度。如曲线较平缓,则表示粒径大小相差悬殊,土粒不均匀,即级配良好;如曲线较陡,则表示粒径相差不多,土粒均匀,即级配不良。

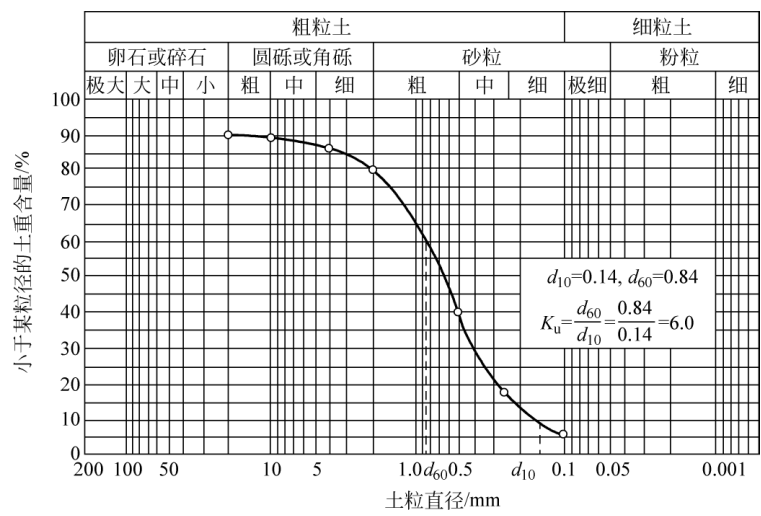


图 2-1 颗粒级配累积曲线

在工程上常采用不均匀系数 K_u 来衡量颗粒级配的不均匀程度

$$K_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

式中： d_{60} ——土中小于某粒径的土重百分比为 60% 时相应的粒径，又称限定粒径；

d_{10} ——土中小于某粒径的土重百分比为 10% 时相应的粒径，又称有效粒径。

不均匀系数 K_u 越大,说明曲线越平缓、土粒越不均匀。工程中把 $K_u < 5$ 的土看作是级配均匀,即级配不良的土; $5 \leq K_u \leq 10$ 的土看作是中等均匀的土; $K_u > 10$ 的土看作是不均匀,即级配良好的土。级配良好的土,粗粒间的孔隙为细粒所填充,压实后容易获得较大的密实度。这样的土压实后强度高、压缩性小,适于做地基填方的土料。

2) 土粒的矿物成分

土粒中的矿物成分分为原生矿物和次生矿物两种,原生矿物就是岩石风化前的矿物成分,如石英、长石、云母等,原生矿物的性质比较稳定,粗的土粒中常含有这些矿物成分;次生矿物是岩石经化学风化后而产生的新的矿物,如蒙脱石、伊利石、高岭石等,极细的黏粒常含有这些次生矿物。土粒中所含矿物成分不同,其性质就不同。如黏粒中蒙脱石含量较多

时,则这种土遇水就会强烈膨胀,失水后又会产生收缩,给工程建设带来不利影响。

2. 土中水

土中水按其性质可分为以下几类(图 2-2):

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)。

(1) 吸着水: 实验表明,极细的黏粒表面带有负电荷,由于水分子为极性分子,即一端显正电荷,另一端显负电荷,因此水分子就被颗粒表面电荷引力牢固地吸附在其周围而形成很薄的一层水,这种水就称为吸着水,其性质接近于固态,不冻结,相对密度(密度)大于 1,具有很大的黏滞性,受外力不转移,在温度 100~105℃下被蒸发,这种水不传递静水压力。

(2) 薄膜水: 这种水是位于吸着水以外,但仍受土颗粒表面电荷吸引的一层水膜。显然,距土粒表面越远,水分子的引力就越小。薄膜水也不能流动,含薄膜水的土具有塑性。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,土中含有自由水时呈现出流动状态。

3. 土中气体

土中气体可分为两类: 与大气连通的自由气体和与大气隔绝的封闭气体。自由气体在外力作用下能很快逸出,因此它不影响土的性质; 封闭气体则会增加土的弹性,减小土的透水性。

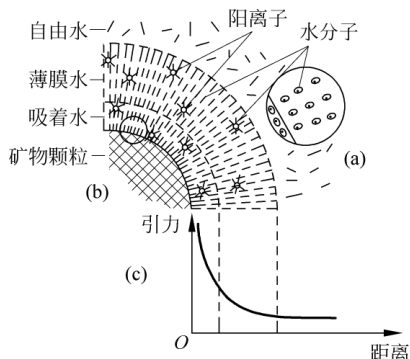


图 2-2 水在土中的形态简图

(a) 水分子在土粒四周定向排列;

(b) 土粒与水的相互作用;

(c) 土粒电荷引力随距离的变化

2.2 土的物理性质指标

如前所述,土是由固体颗粒、水和气体三部分组成的。这三部分之间的不同比例,反映着土处于各种不同的状态: 稍湿或很湿、密实或松散。它们对于评定土的物理力学性质有很重要的意义。因此,为了研究土的物理性质,就要掌握土的三个组成部分之间的比例关系。表示这三部分之间关系的指标,就称为土的物理指标。

为了便于说明和计算,用图 2-3 表示土的三个组成部分。

气体的质量比其他两部分质量小得多,可以忽略不计。

1. 土的质量密度和重力密度

1) 土的质量密度

单位体积土的质量称为土的质量密度,简称土的密度,用符号 ρ 表示。

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

土的密度随着土的矿物成分、孔隙大小和水的含量而不同,天然状态下土的密度一般为 1.6~2.0 t/m³。

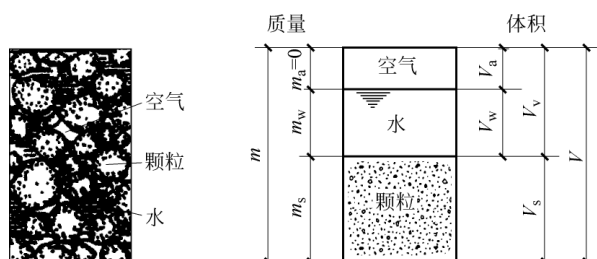


图 2-3 土的三相简图

m —土的总质量； m_s —土的颗粒质量； m_w —土中水的质量； m_a —土中空气的质量；

V —土的总体积； V_s —土的颗粒体积； V_w —土中水的体积；

V_v —土中孔隙的体积； V_a —土中气体的体积

2) 土的重力密度

单位体积土所受的重力称为土的重力密度，简称土的重度，用符号 γ 表示。

$$\gamma = \frac{G}{V} (\text{kN/m}^3) \quad (2-1b)$$

式中： G ——土的重力，kN。

把 $G=mg$ 代入式(2-1b)得

$$\gamma = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (2-1c)$$

式(2-1c)说明，土的重度等于土的密度与重力加速度的乘积。

2. 土的含水量

土中水的质量与颗粒质量之比(用百分数表示)，称为土的含水量，用符号 w 表示。

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

3. 土粒相对密度(比重)

土粒单位体积的质量与 4°C 时蒸馏水的密度之比，称为土粒相对密度或(比重)，用符号 d_s 表示。

$$d_s = \frac{m_s}{V_s \rho_w} \quad (2-3)$$

土粒相对密度是无因次的，它的数值变化范围不大，一般为 $2.65 \sim 2.75$ 。

上面三个物理指标： ρ 、 w 和 d_s 是直接用试验方法测定的，通常称为试验指标。已知这三个基本指标就可以用公式算出下面一些指标——计算指标。

4. 土的干密度和干重度

1) 土的干密度

土的单位体积内颗粒质量称为土的干密度，用符号 ρ_d 表示。

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} (\text{t/m}^3) \quad (2-4a)$$

土的干密度越大，表示土越密实。在填土夯实时，常以土的干密度来控制土的夯实标准。例如，房心填土和基础回填土夯实后的干密度一般要求达到 $1.50 \sim 1.65 \text{t/m}^3$ 。

如果已知土的密度 ρ 和含水量 w ，就可以按下式算出土的干密度，即

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w} \quad (2-4b)$$

现将式(2-4b)推导如下:

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \times \frac{m}{m} = \frac{\frac{m}{V}}{\frac{m_s + m_w}{m_s}} = \frac{\rho}{1 + w}$$

2) 土的干重度

土的单位体积内颗粒的重力称为土的干重度,用符号 γ_d 表示。

$$\gamma_d = \frac{G_s}{V} (\text{kN/m}^3) \quad (2-5a)$$

式中: G_s ——颗粒重力。

同理可得

$$\gamma_d = \rho_d g \quad (2-5b)$$

5. 土的饱和密度和饱和重度

1) 饱和密度

土中孔隙完全被水充满时土的密度称为土的饱和密度,用符号 ρ_{sat} 表示。

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V} (\text{t/m}^3) \quad (2-6a)$$

2) 饱和重度

土中孔隙完全被水充满时土的重度称为土的饱和重度,用符号 γ_{sat} 表示。

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{G_s + V_v \gamma_w}{V} (\text{kN/m}^3) \quad (2-6b)$$

6. 土的有效重度

在地下水位以下,土体受到水的浮力作用时,土的重度称为土的有效重度,用符号 γ' 表示。

$$\gamma' = \frac{G_s + V_v \gamma_w}{V} - \frac{V \gamma_w}{V} = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w \quad (2-7)$$

式中第一项为饱和重度,第二项为单位体积土所受到的水的浮力,即排开与 V 同体积的水重,其中 γ_w 为水的重度。

7. 土的孔隙比

土中孔隙体积与土粒体积之比称为孔隙比,用符号 e 表示。

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2-8)$$

孔隙比也是反映土的密实程度的物理指标。一般 $e \leq 0.6$ 的土是密实的低压缩性土, $e > 1$ 的土是疏松的高压缩性土。

孔隙比可以用下式计算

$$e = \frac{d_s \rho_w (1 + w)}{\rho} - 1 \quad (2-9)$$

根据以上介绍的物理指标的定义,公式(2-9)推导过程如下:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{V_m}{V_s m} - 1 = \frac{\frac{m_s + m_w}{V_s}}{\frac{m}{V}} - 1 = \frac{\frac{m_s (1 + w)}{V_s}}{\frac{\rho}{m_s}} - 1 = \frac{d_s \rho_w (1 + w)}{\rho} - 1$$