

地基基础设计与施工丛书

高大钊 主编

高大钊 徐超 熊启东 编著

天然地基上的浅基础

机械工业出版社

地基基础设计与施工丛书

高大钊 主编

天然地基上的浅基础

高大钊 徐超 熊启东 编著



机械工业出版社

本书是一本集浅基础勘察、设计与施工于一体的技术专著,介绍了基础设计对工程勘察的技术要求、岩土工程勘察技术和勘察成果的利用,阐述地基设计的基本原理和基础设计方法及其最新进展,讨论了浅基础施工技术的现状与发展,既有理论的分析又有工程经验的总结。内容包括地基土的工程性质、地基土的分类、建筑工程勘察、地基承载力设计、建筑物沉降计算与控制、浅基础设计以及浅基础施工等共八章。本书可供从事建筑工程、岩土工程勘察、设计、施工与监理工作的技术人员参考,可作为技术干部继续教育和岗位培训的教材以及土木工程专业师生教学参考书,还可作为全国注册岩土工程师考试参考书。

图书在版编目(CIP)数据

天然地基上的浅基础/高大钊等编著. —北京:机械工业出版社, 1999.10

(地基基础设计与施工丛书/高大钊主编)

ISBN 7-111-07500-5

I. 天… II. 高… III. 浅基础—地基处理 IV. TU471.1

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第43582号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:劳瑞芬 刘彩英

封面设计:姚毅

责任印制:何全君

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1999年9月第1版第1次印刷

787mm×1092mm1/16·13印张·301千字

0001—4000册

定价:22.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页、由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

前 言

在地基基础设计时，最经济的方案是天然地基上的浅基础，这是因为既充分利用了天然地基的承载能力，而且工程量又最少。当然，采用天然地基上的浅基础是有条件的，首先要有比较好的持力层，有足够的承载能力使地基保持稳定，满足地基承载力设计的要求；而建筑物的沉降不致造成结构构件开裂，又能同时满足建筑物的使用要求；当建筑物层数不太多，基础底面压力不大，地质条件又相对比较好的时候，应当尽量采用天然地基上的浅基础，以节省工程造价。

地基基础设计分为地基设计和基础设计两部分，地基设计包括地基承载力计算和地基沉降验算，通过承载力计算以确定基础埋置深度和基础底面尺寸，用沉降验算以控制建筑物的沉降不超过规范规定的允许值。承载力计算和沉降验算所用的地基土工程性质指标和地基土层的层位条件由工程勘察报告提供，荷载由上部结构设计计算的结果确定。基础设计的内容包括基础的选型、构造设计、基础内力计算和钢筋混凝土的配筋。无论是地基设计或基础设计都要考虑场地的工程地质和水文地质条件，同时还要考虑上部结构的特点、建筑物使用上的要求和施工条件等因素。

天然地基是指未经人工处理的天然土层直接作为地基以承受基础传来的上部结构荷载，而浅基础一般是指埋置深度比较浅的基础，但是并没有明确的深度界限。如果从力学分析角度考虑，应当用相对深度来表示，即以埋深与基础宽度的比值来表示，浅基础不考虑基础两侧超载土的抗剪强度。但一般是从施工方法来考虑，浅基础可以用比较简便的、常规的施工方法来修建，而深基础一般都要用比较特殊的施工方法和专门的机械设备来修筑。如果天然地基的承载力或计算沉降不能满足规范的要求，则有两种可供选择的方案：一种是改变基础方案，采用深基础或桩基础将荷载传给深部较好的土层；另一种是采用地基处理的方法加固地基土，而基础仍采用浅基础。关于桩基础和地基处理的设计与施工问题将在丛书的《桩基础的设计方法与施工技术的新进展》和《地基加固新技术》这两本书中作专门的讨论。本书介绍的地基和基础设计的方法不仅适用于天然地基上浅基础的设计与施工，其方法也同样适用于地基处理以后的地基承载力的计算和沉降的验算，只是不用天然地基的承载力和变形指标，而是采用地基处理以后的地基承载力以及有关的土层变形指标；至于浅基础结构设计以及施工方法，则完全与本书介绍的方法相同。

根据浅基础设计与施工所涉及的技术问题，本书将从七个方面加以系统的阐述。

在第 1 章里首先介绍描述土的物理、力学性质指标的基本概念和试验方法，包括土的粒度成分、三相比例指标、状态指标、密实度指标、渗透性指标、压缩性指标和抗剪强度指标等。这些定量的指标可以用于评价土的工程性状，据以考虑基础方案和施工方案；或用以进行各种土力学课题的计算，完成地基设计。这是为了掌握地基基础设计方法所必需的最基本的知识，也是整个丛书全部内容的基础。

在掌握了土的一系列特征指标的基础上，就可以对土进行分类和定名。确定场地地基土的类别与名称是勘察工作的主要内容之一，也是地基设计的主要依据。关于土分类方法的研究在最近 20 年来有了很大的发展，形成了我国的土分类体系，但还存在一些有待进一

步改进的地方,在第2章里将系统地介绍土的分类的发展历史,土分类的基本原理,各种土的分类方法以及国内外的土分类体系。

在地基基础设计施工之前,必须进行工程勘察,通过工程勘察可以了解场地的工程水文地质条件,得到地基土的各种物理力学指标,判别场地的适宜性以及在设计 and 施工中可能出现的问题。没有这些信息,便不可能进行地基基础的设计工作,更谈不上施工。因此,第3章作为承上启下的环节,安排了建筑工程勘察的内容。在这套丛书中讨论工程勘察的目的是为了使设计、施工人员了解必要的工程勘察要求、方法和程序,以便使勘察、设计和施工各方面的更好配合,使设计人员在委托勘察时,对勘察工作能提出更为确切的要求,能更好地运用勘察报告所提供的资料做好设计和施工的工作。

第4和第5两章是地基设计的主要内容,即地基承载力计算和地基变形验算的方法及其基本理论。介绍了地基设计方法发展过程中的三种设计原则,以便读者对于目前正在变革中的设计规范的发展有所了解;关于地基承载力,讨论了地基破坏的不同模式,介绍了测定地基承载力的试验方法,以及界限荷载和极限荷载两种不同性质的承载力理论计算方法,分别给出了基于不同假定的计算公式,可用于容许承载力设计或极限状态设计,还介绍了双层地基的地基承载力的计算方法;关于沉降验算,分别介绍了弹性理论方法,分层总和法和应力面积法等几种实用的方法,以及与沉降计算配套的土中应力的计算方法;在沉降验算与控制这一章里,还着重讨论了如何减少不均匀沉降的技术措施,通过一些实例阐明影响建筑物产生不均匀沉降以及造成建筑物开裂的主要因素,从而提出防止不均匀沉降的若干建筑措施和结构措施;通过如意大利比萨斜塔和我国苏州虎丘塔等各种类型的工程实录,分析了建筑物不均匀沉降所造成的危害,以及在建筑物产生了病害以后如何选择有针对性的治理方案。

第6章是浅基础设计的原理与方法,介绍各种类型的浅基础(独立基础、条形基础、十字交叉条形基础、筏板基础和箱形基础)的结构构造特点及其适用条件,从各种类型浅基础传递建筑物荷载的性能出发,分别给出了不同的构造要求、实用的内力计算方法和控制配筋的设计表达式。

第7章介绍浅基础的施工,从基坑开挖、放坡与支挡、坑内排水、人工降低地下水、钢筋混凝土基础的制作和基础施工安全技术等方面分别介绍了施工技术要求、设备的选择、质量控制等内容。至于深基坑的支护与开挖则是一个比较专门的问题,近十多年来我国有了很大发展,已形成一个专门的技术领域,因此放在丛书的另一本书《深基坑工程》中去讨论。在本书中只限于一般的基坑,其深度较浅,或在周围比较空旷的场地施工,可以放坡或仅作一般的支挡,不需要设置特殊的支护结构。

本书是丛书中的第一本,本书叙述的内容是地基基础设计施工技术中最基本的部分,也是最常用的技术。整套丛书是一个完整的体系,其它的四本书都可以看成是这本书的发展和延续,书中许多基本原理对理解其它几本书的内容也都有一定的帮助。作者希望通过这本书向读者展示有关浅基础设计与施工领域的完整的技术体系,从勘察到设计到施工,从理论到参数到计算,无论是从事勘察还是设计还是施工的技术人员,除了懂得自己这部分工作之外,还能多懂一点相关领域的技术,这对于提高自身工作的水平 and 质量,无疑是有所帮助的。作者根据这一思路完成本书的撰稿,谨以这本书献给读者,愿与读者一起共同探讨,请读者对于本书中的错误之处不吝指正。

编 者

第 1 章 地基土的工程性质

1.1 土的组成

自然界的土是由岩石经风化、搬运、堆积而成的，风化成土的岩石称为母岩，母岩成分、风化性质、搬运过程和堆积的环境是决定土的组成的主要因素，而土的组成又是决定地基土工程性质的物质基础。土是由固体颗粒、水和气体三部分组成的，通常称为土的三相组成，三相物质的质量和体积的比例不同，土的性质也就不同。因此，首要的问题是要了解土是由什么物质组成的。

1.1.1 土的固相

土的固相物质包括无机矿物颗粒和有机质，它们组成了土的骨架。土中的矿物成分可以分为原生矿物和次生矿物两大类。

原生矿物是指岩浆在冷凝过程中形成的矿物，如石英、长石、云母等。

次生矿物是由原生矿物经过风化作用后形成的新矿物，如三氧化二铝、三氧化铁、次生二氧化硅、粘土矿物以及碳酸盐等。次生矿物按其在水中的溶解程度可分为易溶的、难溶的和不可溶的，次生矿物的水溶性对土的性质有极其重要的影响。粘土矿物的主要代表性矿物为高岭石、伊利石和蒙脱石，由于其亲水性不同，当其含量不同时土就显示出不同的工程性质。

在以物理风化为主的过程中，岩石破碎而并不改变其成分，岩石中的原生矿物得以保存下来；但在化学风化的过程中，易风化的矿物如长石、云母等就分解成为次生的粘土矿物，石英等难风化的矿物得以保存下来。粘土矿物是很细小的扁平颗粒，表面具有极强的和水相互作用的能力。颗粒愈细，表面积愈大，这种亲水的能力就愈强，对土的工程性质的影响也就愈大。

风化过程中，在微生物作用下，土中产生复杂的腐殖质矿物，此外还会有动植物残体等有机物，如泥炭等。有机颗粒紧紧地吸附在矿物颗粒的表面形成了颗粒间的连接，但是这种连接的稳定性较差。

从外表上看到的土的颜色，在很大程度上反映了土的固相的不同成分和不同含量。红色、黄色和棕色一般表示土中含有较多的三氧化二铁，并说明氧化程度较高。黑色表示土中含有较多的有机质或锰的化合物；灰蓝色和灰绿色的土一般含有亚铁化合物，是在缺氧条件下形成的；白色或灰白色则表示土中有机质较少，主要含石英或含高岭土等粘土矿物。当然，湿度会影响土的颜色深浅，风干的土颜色比较浅，但是一般描述的是土在潮湿状态的颜色。

1.1.2 土的液相

土的液相是指土孔隙中存在的水。通常认为水是中性的，在零度时冻结，但实际上土中水是成分十分复杂的电解质水溶液，它和亲水性的矿物颗粒表面有着复杂的物理化学作用。按照水与土相互作用程度的强弱，可将土中水分为结合水和自由水两大类。

结合水是指土颗粒表面水膜中的水，受到表面引力的控制而不服从静水力学规律，冰点低于零度。结合水又可分为强结合水和弱结合水。强结合水在最靠近土颗粒表面处，水分子和水化离子排列得非常紧密，以致其密度大于 1g/cm^3 ，并有过冷现象，即温度降到冻结点以下不发生冻结的现象。在距土粒表面较远的地方，由于引力降低，水分子的排列不如强结合水紧密，水分子可能在渗附压力差作用下从较厚水膜或浓度较低处缓慢地迁移到较薄的水膜或浓度较高处，亦即可从一个土粒迁移到另一个土粒，这种运动与重力无关，这层不能传递静水压力的水称为弱结合水。

自由水包括毛细水和重力水。毛细水不仅受到重力的作用，还受到表面张力的支配，能沿着土的细孔隙从潜水面上升到一定的高度。这种毛细上升现象是公路路基冻胀翻浆及建筑物的返潮的主要原因。重力水在重力或压力差作用下能在土中渗流，对于土颗粒和结构物都有浮力作用，当水头差较大时，在渗流出露处发生渗透破坏。在土力学计算中应当考虑这种渗流及浮力的作用力，在工程施工时充分注意水的影响。

1.1.3 土的气相

土的气相是指充填在土的孔隙中的气体，包括与大气连通和不连通的两类。

与大气连通的气体对土的工程性质没有多大的影响，它的成分与空气相似，当土受到外力作用时，这种气体很快从孔隙中挤出；但是密闭的气体对土的工程性质有很大的影响。密闭气体的成分可能是空气、水汽或天然气。在压力作用下这种气体可被压缩或溶解于水中，而当压力减小时，气泡会恢复原状或重新游离出来。含气体的土称为非饱和土，非饱和土的工程性质比较复杂，非饱和土力学已成为土力学的一个新分支。在一般土力学中通常研究饱和土的物理力学性质及其计算，常忽略气体的影响。

1.2 土的粒度成分

天然土是由大小不同的颗粒组成的，土粒的大小称为粒度，土颗粒的大小相差悬殊，从大于几十厘米的漂石到小于几微米的胶粒。由于土粒的形状往往是不规则的，很难直接测量土粒的大小，只能用间接的方法来定量土粒的大小及各种颗粒的相对含量。常用的方法有两种，对粒径大于 0.075mm 的土粒常用筛分析的方法，而对小于 0.075mm 的土粒则用沉降分析的方法。工程上常用不同粒径颗粒的相对含量来描述土的颗粒组成情况，这种指标称为粒度成分。

1.2.1 土的粒组划分

天然土的粒径一般是连续变化的，为了描述的方便，工程上常把大小相近的土粒合并为组，称为粒组。粒组间的分界线是人为划定的，划分时应使粒组界限与粒组性质的变化相适应，并按一定的比例递减关系划分粒组的界限值。

对粒组的划分，各个国家，甚至一个国家的各个部门有不同的规定。我国习惯采用的粒组划分标准见表 1-1。

表 1-1 我国习惯采用的粒组划分标准

粒组名称	粒组范围 / mm
漂石（块石）粒组	>200
卵石（碎石）粒组	20~200
砾石粒组	2~20
砂粒粒组	0.075~2
粉粒粒组	0.005~0.075
粘粒粒组	<0.005

过去的粒组划分标准中，砂粒与粉粒的划分界限是 0.05mm，这一粒径需要用沉降分析方法测定，试验不太方便。从 70 年代末到 80 年代末这 10 年中，我国的粒组划分标准出现了一些变化。《建筑地基基础设计规范》（GBJ 7—89）和《岩土工程勘察规范》（GB 50021—94）在修订和编制过程中经过充分论证，将砂粒粒组与粉粒粒组之间的界限从 0.05mm 改为 0.075mm。这一粒径和欧美国家的 200 号筛是一致的，便于与国际上的交流，同时我国也已生产筛孔直径为 0.075mm 的筛，可以用筛分法测定，比沉降分析方法方便。《土的工程分类标准》（GBJ 145—90）在砂粒粒组与粉粒粒组的界限上取与上述规范相同的标准，但将卵石粒组与砾石粒组界限改为 60mm，其粒组划分标准见表 1-2，但这一修改并没有得到国内建筑工程界广泛的认同。

表 1-2 粒组划分（GBJ 145—90）

粒组统称	粒组名称	粒组范围 / mm
巨粒	漂石（块石）粒组	>200
	卵石（碎石）粒组	200~60
粗粒	砾粒 粗砾	60~20
	细砾	20~2
	砂粒	2~0.075
细粒	粉粒	0.075~0.005
	粘粒	<0.005

1.2.2 粒度成分及其表示方法

土的粒度成分是指土中各种不同粒组的相对含量（以干土质量的百分比表示），用以描

述土中不同粒径土粒含量的分布，常用的表示方法有表格法、累计曲线法和三角坐标法。

1.2.2.1 表格法

表格法是以列表形式直接表达各粒组的相对含量的方法。它用于粒度成分的分类是十分方便的，例如表 1-3 给出了 3 种土样的粒度成分，根据第二章的方法可以进行土的分类和定名。

表 1-3 粒度成分分析结果（质量分数）（%）

粒组 / mm	土样 A	土样 B	土样 C
10~5	—	25.0	—
5~2	3.1	20.0	—
2~1	6.0	12.3	—
1~0.5	16.4	8.0	—
0.5~0.25	41.5	6.2	—
0.25~0.10	26.0	4.9	8.0
0.10~0.075	9.0	4.6	14.4
0.075~0.01	—	8.1	37.6
0.01~0.005	—	4.2	11.1
0.005~0.001	—	5.2	18.9
<0.001	—	1.5	10.0

1.2.2.2 累计曲线法

累计曲线法是一种图示的方法，通常用半对数纸绘制，横坐标（按对数比例尺）表示某一粒径，纵坐标表示小于某一粒径的土粒的质量分数。表 1-3 中的三种土的粒度成分累计曲线示于图 1-1，三种土的粒度成分不同，累计曲线的形态不同。为了定量地描述累计曲线，需要引入能反映曲线特征的指标。

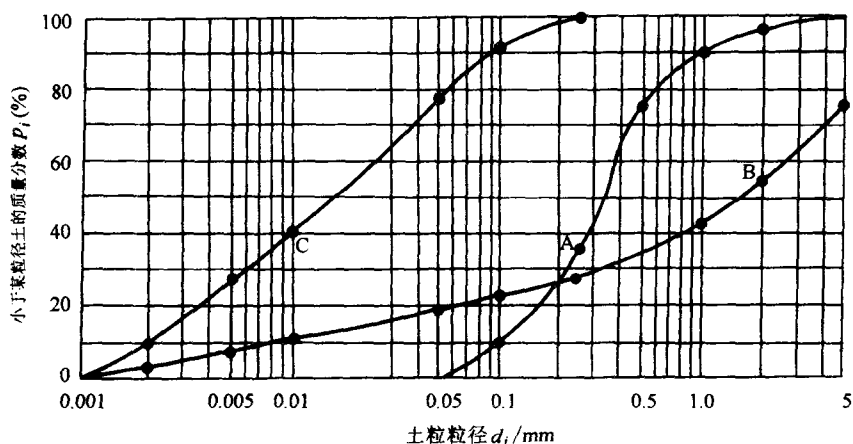


图 1-1 土的粒度成分累计曲线

在累计曲线上,可确定两个描述土的级配的指标不均匀系数和曲率系数:

不均匀系数

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

曲率系数

$$C_s = \frac{d_{30}^2}{d_{60}d_{10}} \quad (1-2)$$

式中 d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} ——分别相当于累计质量分数为 10%、30%和 60%的粒径, d_{10} 称为有效粒径; d_{60} 称为限制粒径。

不均匀系数 C_u 反映大小不同粒组的分布情况, C_u 越大, 表示粒组分布范围比较广, 土的级配良好。但如 C_u 过大, 表示可能缺失中间粒径, 属不连续级配, 故需同时用曲率系数来评价。曲率系数则是描述累计曲线整体形状的指标。

1.2.2.3 三角坐标法

三角坐标法也是一种图示法, 它利用等边三角形内任意一点至三个边的垂直距离的总和恒等于三角形之高的原理, 以表示组成土的三个粒组的相对含量。三角坐标法只适用于划分为三个粒组的情况。例如当把粘性土划分为砂土、粉土和粘土粒组时, 就可以用三角坐标图来表示。

上述三种方法各有其特点和适用条件。表格法能很清楚地用数量说明土样的各粒组含量, 但对于大量土样之间的比较就显得过于冗长, 且无直观概念, 使用比较困难。

累计曲线法能用一条曲线表示一种土的粒度成分, 而且可以在一张图上同时表示多种土的粒度成分, 能直观地比较其级配状况。

三角坐标法能用一点表示一种土的粒度成分, 在一张图上能同时表示许多种土的粒度成分, 便于进行土料的级配设计; 还可以用于表示土按粒度成分的分类方法, 不同的区域粒度成分不同, 土类别也不相同。

在工程上可根据使用的要求选用适合的表示方法, 也可以在不同的场合选用不同的方法。

1.2.3 粒度成分分析方法

粒度成分的分析方法分为筛分法和沉降分析法, 粗粒土应采用筛分法, 而细粒土则必须用沉降分析法。

1.2.3.1 筛分法

筛分法是用一套不同孔径的标准筛把各种粒组分离出来, 这和建筑材料的粒径级配筛分试验是一样的。但很细的粒组却无法用筛分法分离出来, 这是因为很细的土粒互相连结在一起的缘故。按我国原有的标准, 最小孔径的筛是 0.1mm, 但是新的筛孔标准已改为 0.075mm, 这相当于美国 ASTM 标准的 200 号筛 (即在 1 平方英寸面积上有 200 个孔)。这是在国际上比较通用的标准, 因此我国采用了这一标准, 已按新的标准生产了孔径为 0.075mm

的筛。在采用最小孔径的筛作筛分试验时应当采用水筛的方法,用水冲方法把联结在一起的细颗粒分开,才能正确地测定细颗粒的含量。

1.2.3.2 沉降分析法

根据土粒在悬液中沉降的速度与粒径的平方成正比的关系来确定各粒组相对含量的方法称为沉降分析法。

设有一个球形颗粒在无限大的、不可压缩的粘滞性液体中,在重力作用下产生的稳定的沉降速度可用司笃克斯(Stokes)公式计算

$$v = \frac{2}{g} r^2 \frac{\rho_s - \rho_w}{\eta} \quad (1-3)$$

式中 v ——球形颗粒在液体中的稳定沉降速度 (cm/s);

g ——重力加速度 (cm/s²);

r ——球形颗粒的半径 (cm);

ρ_s 、 ρ_w ——分别为颗粒及液体的密度 (g/cm³);

η ——液体粘滞度 (P_a)。

实际上,土粒并不是球形颗粒,因此用上述公式计算的并不是实际土粒的尺寸,而是与实际土粒有相同沉降速度的理想球体直径,称为水力直径。

在进行粒度成分分析时,把一定质量的干土制成一定体积的悬液,搅拌均匀后静置时,悬液中不同粒径的颗粒都以相应的速度下沉,由于粗颗粒沉得快,细颗粒沉得慢,在不同深度处悬液的密度不相同。经过时间 t_i , 在深度 L_i 处,最大的粒径为 d_i , 则三者的关系式为

$$d_i = \sqrt{\frac{18\eta L_i}{(\rho_s - \rho_w) t_i}} \quad (1-4)$$

这个公式表明,粒径为 d_i 的土粒经历时间 t_i 正好从悬液表面沉到深度 L_i 处。由于假定土粒在悬液中匀速下沉,因此在深度 L_i 范围内已经没有大于 d_i 的土粒了,或者说大于 d_i 的颗粒已经沉到 L_i 深度以下。在深度 L_i 附近一个小范围内等于及小于 d_i 的土粒分布浓度与开始时均匀悬液中等于及小于 d_i 的土粒分布密度一样。这个密度可表示为

$$\gamma_i = \frac{1}{1000} \left[g_{si} + \left(1000 - \frac{g_{si}}{\rho_s} \right) \rho_w \right] \quad (1-5)$$

只要能够测得深度 L_i 处的悬液密度 γ_i , 便可按上式求得土样中等于及小于 d_i 的土粒质量 g_{si} , 并可按下式计算土样中等于及小于 d_i 的土粒质量占土总质量的百分比

$$p_i = \frac{g_{si}}{g_s} \times 100\% \quad (1-6)$$

用沉降分析法测定土的粒度成分可用两种方法,比重计法和移液管法。比重计是用于测定液体密度的一种仪器,对于不均匀的液体,从比重计读出的密度只表示浮泡形心处的

液体密度。在粒度成分分析时，比重计读数既表示浮泡形心处的悬液浓度，又表示从悬液表面到浮泡形心处的沉降距离，因此可以同时求得粒径和百分含量（质量分数），只要把悬液搅拌均匀后隔不同时间测读比重计的读数，就能求得一系列的粒径和相应的累计百分含量。移液管法是用一种特定的装置在一定深度处吸出一定量的悬液，用烘干的方法求出其密度，就可以计算出粒径和累计百分含量。

1.3 土的三相比例指标

土的三相物质在体积和质量上的比例关系称为三相比例指标。三相比例指标反映了土的干燥与潮湿、疏松与紧密，是评价土的工程性质的最基本的物理性质指标，也是工程地质勘察报告中不可缺少的基本内容。

为了推导土的三相比例指标，通常把在土体中实际上是处于分散状态的三相物质理想化地分别集中在一起，构成如图 1-2 所示的三相图。在图中，右边注明各相的体积，左边注明各相的质量或重力。土样的体积 V 为土中空气的体积 V_a 、水的体积 V_w 和土粒的体积 V_s 之和；土样的质量 g 为土中空气的质量 g_a 、水的质量 g_w 和土粒的质量 g_s 之和；通常认为空气的质量可以忽略，则土样的质量就仅为水和土粒质量之和。

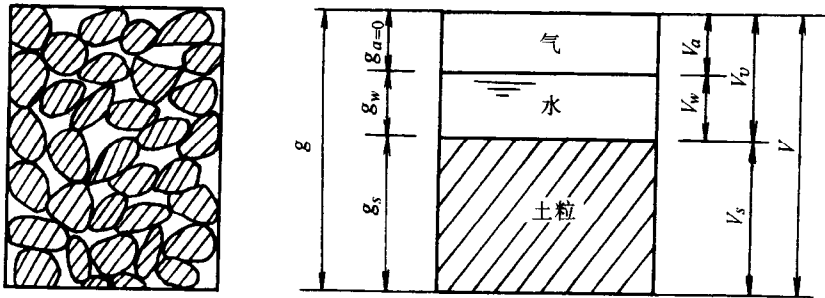


图 1-2 土的三相图

三相比例指标可分为两种，一种是试验指标；另一种是换算指标。

1.3.1 试验指标

通过试验测定的指标有土的密度、土粒密度和含水量。

1. 土的密度 单位体积土的质量，如令土的体积为 V ，质量为 g ，则土的密度 ρ 可由下式表示

$$\rho = \frac{g}{V} \quad (1-7)$$

式中 ρ ——土的密度 (g/cm^3)；
 g ——土的质量 (g)；
 V ——土的体积 (cm^3)。

土的密度常用环刀法测定,一般土的密度为 $1.60 \sim 2.20 \text{g/cm}^3$ 。当用国际单位制计算重力 W 时,由土的质量产生的单位体积的重力称为重力密度 γ , 简称为重度; 重力等于质量乘以重力加速度, 则重度由密度乘以重力加速度求得, 其单位是 (kN/m^3) , 但在工程上为简化计算常用其密度乘以 10。

$$\gamma = 10 \rho \quad (1-8)$$

对天然土求得的密度称为天然密度, 相应的重度称为天然重度, 以区别于其它条件下的指标, 如下面将要讲到的干密度和干重度、饱和密度和饱和重度等。

2. 土粒密度 ρ_s 干土粒的质量 g_s 与其体积 V_s 之比, 由下式表示:

$$\rho_s = \frac{g_s}{V_s} \quad (1-9)$$

式中 ρ_s ——土粒密度 (g/cm^3) ;

g_s ——土粒质量 (g) ;

V_s ——土粒体积 (cm^3) 。

其值可由试验求得。土粒密度主要取决于土的矿物成分, 不同土类的土粒密度变化幅度不大, 在有经验的地区可按经验值选用。一般土的土粒密度值见表 1-4。

表 1-4 土粒密度的一般数值

土 名	砂 土	砂质粉土	粘质粉土	粉质粘土	粘 土
土粒密度 $/ \text{g} \cdot \text{cm}^3$	2.65~2.69	2.70	2.71	2.72~2.73	2.74~2.76

3. 土的含水量 w 土中水的质量 g_w 与固体质量 g_s 之比, 由下式表示

$$w = \frac{g_w}{g_s} \times 100\% \quad (1-10)$$

式中 g_w ——土中水的质量 (g) ;

g_s ——土中固相质量 (g) 。

含水量通常以质量百分数表示。含水量常用烘干法测定, 是描述土的干湿程度的重要指标, 土的天然含水量变化范围很大, 从干砂的含水量接近于零到蒙脱土的含水量可达百分之几百。

1.3.2 换算指标

除了上述三个试验指标之外, 还有六个可以计算求得的指标, 称为换算指标, 包括土的干密度(干重度)、饱和密度(饱和重度)、浮重度、孔隙比、孔隙率和饱和度。

1. 干密度 ρ_d 土的固相质量 g_s 与土的总体积 V 之比, 可由下式表示

$$\rho_d = \frac{g_s}{V} \quad (1-11)$$

式中 ρ_d ——干密度 (g/cm^3) ;

V ——土的总体积 (cm^3) 。

土的干密度越大，土越密实，强度就越高，水稳定性也好。干密度常用作填土密实度的施工控制指标。

2. 土的饱和密度 当土的孔隙中全部为水所充满时的密度，即水的质量 g_w (g) 与固相质量 g_s 之和与土的总体积 V 之比，由下式表示

$$\rho_{sat} = \frac{g_w + g_s}{V} \quad (1-12)$$

式中 ρ_{sat} ——土的饱和密度 (g/cm³);

g_w ——水的质量 (g);

V ——土的总体积 (cm³)。

当用干密度或饱和密度计算重力时，也应乘以 10 变换为干重度或饱和重度。

3. 有效重度 扣除浮力以后的固相重力与土的总体积之比。当土浸没在水中时，土的固相受到水的浮力作用，土体的重力也应扣除浮力。计算地下水位以下土层的自重应力时应当用有效重度（也称为浮重度），有效重度 γ' 由下式表示

$$\gamma' = \frac{10g_s - V_s\gamma_w}{V} = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (1-13)$$

式中 γ_w ——水的重度，纯水在 4℃ 时的重度等于 9.81kN/m³，在工程上化整为 10kN/m³;

γ_{sat} ——土的饱和重度 (kN/m³)。

4. 土的孔隙比 孔隙的体积 V_v 与固相体积 V_s 之比，以小数计，由下式表示

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1-14)$$

式中 e ——孔隙比;

V_v ——孔隙体积 (cm³);

V_s ——土的固相体积 (cm³)。

孔隙比是用途十分广泛的指标，用来评价土的紧密程度，或从孔隙比的变化推算土的压密程度，在土力学的计算中经常用到这个指标。

5. 土的孔隙率 n 孔隙的体积 V_v 与土的总体积 V 之比，由下式表示

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (1-15)$$

6. 土的饱和度 S_r 孔隙中水的体积 V_w 与孔隙体积 V_v 之比，由下式表示

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (1-16)$$

式中 V_w ——孔隙中水的体积 (cm³)。

1.3.3 三相比例指标的换算

土的三相比例指标之间可以互相换算，根据上述三个试验指标，可以用换算公式求得全部计算指标，也可以用某几个指标换算其它的指标。这种换算关系见表 1-5。

表 1-5 三相指标的换算关系

换算指标	用试验指标计算的公式	用其它指标计算的公式
孔隙比	$e = \frac{\gamma_s(1+w)}{\gamma} - 1$	$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1$
		$e = \frac{w\gamma_s}{S_r\gamma_w}$
饱和重度	$\gamma_{sat} = \frac{\gamma(\gamma_s - \gamma_w)}{\gamma_s(1+w)} + \gamma_w$	$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1+e}$
		$\gamma_{sat} = \gamma' + \gamma_w$
饱和度	$S_r = \frac{\gamma\gamma_s w}{\gamma_w[\gamma_s(1+w) - \gamma]}$	$S_r = \frac{w\gamma_s}{e\gamma_w}$
干重度	$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w}$	$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e}$
孔隙率	$n = 1 - \frac{\gamma}{\gamma_s(1+w)}$	$n = \frac{e}{1+e}$
有效重度		$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$

例 如已知土的试验指标为重度 $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ 、土粒重度 $\gamma_s = 27.2 \text{ kN/m}^3$ 和含水量 $w = 10\%$ (质量分数), 求孔隙比 e 、饱和度 S_r 和干重度 γ_d 。

此题可以有二种解法: 第一种方法直接用表 1-5 中的换算公式计算; 第二种方法利用试验指标按定义分别求出三相物质的重力和体积, 然后按定义计算。

第一种方法

$$e = \frac{\gamma_s(1+w)}{\gamma} - 1 = \frac{27.2 \times (1+0.10)}{17} - 1 = 0.76$$

$$S_r = \frac{w\gamma_s}{e\gamma_w} = \frac{0.10 \times 27.2}{0.76 \times 10} = 0.36$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} = \frac{17}{1+0.1} = 15.5 \text{ kN/m}^3$$

第二种方法

设土的体积等于 1, 则土的重力 $W = \gamma V = 17 \text{ kN}$

已知土粒的重力 W_s 与水的重力 W_w 之和等于土的重力 W , 即 $W = W_s + W_w$

水的重力 W_w 与土粒的重力 W_s 之比等于含水量 w , 则 $W_w = w \times W_s$

解联立方程即可得土粒的重力 $W_s = 15.5 \text{ kN}$ 和水的重力 $W_w = 1.5 \text{ kN}$ 。

土粒体积 V_s 可由土粒的重度 γ_s 和土粒的重力 W_s 求得, 其值为 0.57 m^3 , 孔隙的体积 V_v 为 0.43 m^3 , 水的体积 V_w 由水的重度 γ_w 和水的重力 W_w 求得, 其值为 0.15 m^3 。求得三相物质的重力和体积以后就可根据定义计算孔隙比 e 、饱和度 S_r 和干重度 γ_d 的数值

$$e = \frac{V_v}{V_s} = 0.75$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = 0.35$$

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = 15.5 \text{ kN/m}^3$$

从上述二种方法计算的结果看出,在尾数上有一个单位的误差,这是第二种方法计算误差积累的缘故,在工程实际应用上一般都用第一种方法计算。这里介绍第二种方法的目的的是为了使读者通过例题熟悉三相指标的定义。

例 如已知饱和粘土的含水量[⊖]为36%,求其孔隙比。

此题只给出一个试验指标,但同时给出“饱和”和“粘土”二个可以利用的条件,饱和土的饱和度为1,粘土的土粒密度可以从表1-4查得为2.74~2.76g/cm³,如以中间值计算则得

$$e = \frac{w\gamma_s}{S_r\gamma_w} = \frac{0.36 \times 27.5}{1 \times 10} = 0.99$$

如果土的密度取下限值2.74,则求得土的孔隙比为0.986;如取上限值2.76,则求得土的孔隙比为0.994。这对于取小数点后二位的精度,孔隙比均为0.99,可见表1-4中土的密度值的幅度变化对于三相指标的计算影响不大。此例的目的是为了使读者学习如何查用土的密度的经验值以及掌握饱和土的物理特性,对饱和土来说,孔隙比与含水量呈线性关系,软土的含水量一般均超过36%。大量实测数据的统计也证明了这一点。

1.4 砂土的密实度

砂土的密实度对其工程性质具有重要的影响。密实的砂土具有较高的强度和较低的压缩性,是良好的建筑物地基;松散的砂土,尤其是饱和的松散砂土,不仅强度低,且水稳定性很差,容易产生流砂、液化等工程事故。

土的孔隙比一般可以用来描述土的密实程度,但砂土的密实程度并不单独取决于孔隙比,而在很大程度上取决于土的级配情况。粒径级配不同的砂土即使具有相同的孔隙比,但由于颗粒大小不同,颗粒排列不同,所处的密实状态也会不同。为了同时考虑孔隙比和级配的影响,引入砂土相对密度的概念。

当砂土处于最密实状态时,其孔隙比称为最小孔隙比;而砂土处于最疏松状态时的孔隙比则称为最大孔隙比。试验标准规定了一定的方法测定砂土的最小孔隙比和最大孔隙比,然后可按下式计算砂土的相对密度

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (1-17)$$

⊖ 含水量一般为质量分数,后同。——编者注

从上式可以看出,当砂土的天然孔隙比接近于最小孔隙比时,相对密度接近于 1,表明砂土接近于最密实的状态;而当天然孔隙比接近于最大孔隙比则表明砂土处于最松散的状态,其相对密度接近于 0。根据砂土的相对密度,可以按表 1-6 将砂土划分为密实、中密、和松散 3 种密实度。

表 1-6 砂土密实度划分标准

密实度	密实	中密	松散
相对密度	1~0.67	0.67~0.33	0.33~0

我国一些地区砂土的最大孔隙比和最小孔隙比的实测资料见表 1-7。从表中可以看出颗粒的大小和级配对砂土的这二个指标的影响,随着粒度增大,最大孔隙比和最小孔隙比都相应地减少;级配良好的砂土与级配均匀的相比,最大孔隙比增大,最小孔隙比减小。

表 1-7 砂土最大孔隙比和最小孔隙比资料

土类	地区	最大孔隙比	最小孔隙比
粉砂	黑龙江	1.21	0.62
细砂		1.08	0.59
中砂		1.01	0.55
粗砂		0.98	0.52
砾砂		0.98	0.48
中砂(级配均匀)	四川德阳	1.05	0.67
(级配良好)		1.14	0.51
粗砂(级配均匀)		0.89	0.56
(级配良好)		1.04	0.48
砾砂(级配均匀)		0.64	0.40
(级配良好)		0.74	0.38

1.5 粘性土的分界含水量及状态指标

在生活中经常可以看到这样的现象,雨天土路泥泞不堪,车辆驶过便形成深深的车辙,而在久晴以后土路却异常坚硬。这种现象说明土的工程性质与它的含水量有着十分密切的关系,需要定量地加以研究。

1.5.1 粘性土的状态与界限含水量

土从泥泞到坚硬经历了几个不同的物理状态。含水量很大时土就成为泥浆,是一种粘滞流动的液体,称为流动状态;含水量逐渐减少时,粘滞流动的特点渐渐消失而显示出一