

中等专业学校教材

铁路桥梁墩台基础

天津铁路工程学校 沈庆均 主编
渭南铁路工程学校 黄 湘 主审

中 国 铁 道 出 版 社

1 9 9 7 年 · 北 京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书较系统地叙述了土力学与墩台基础的基本知识,内容包括:土的物理性质及工程分类、土中应力、土的压缩性及沉降计算,土的抗剪强度及地基承载力,土压力的计算;桥墩与桥台的类型、构造、设计检算以及标准设计图的应用;桥梁在曲线上和坡道上的布置;明挖基础、沉井基础、桩基础的构造、设计检算及施工等十三章。各章均有算例、复习思考题及习题,便于学生学习。书后还附有土工试验指导书。

本书除作为铁路桥梁与隧道专业的教材外,亦可供土建工程技术人员参考应用。

图书在版编目(CIP)数据

铁路桥梁墩台基础/沈庆均主编.-北京:中国铁道出版社,1997

中等专业学校教材

ISBN 7-113-02593-5

. 铁... . 沈... . 铁路桥-下部结构-专业学校-教材 .U448.133.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 08347 号

中等专业学校教材

铁路桥梁墩台基础

天津铁路工程学校 沈庆均 主编

*

中国铁道出版社出版发行

(100054,北京市宣武区右安门西街 8 号)

责任编辑 刘桂华 封面设计 赵敬宇

中国铁道出版社印刷厂印刷

开本: 787× 1092 1/16 印张: 20 字数: 千

1997 年 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 1—00000 册

ISBN 7-113-02593-5/TU · 536 定价: 15.80 元

前 言

为了满足铁路系统中等专业学校铁路桥梁与隧道专业教学的需要,根据铁路中等专业学校建筑工程专业教学指导委员会 1994 年教材编写计划,并经铁道部教卫司批准,编写《铁路桥梁墩台基础》教材,讲授学时数为 140~150 学时。

本教材内容分为三篇:第一篇为土力学,共五章(一~五章),主要阐述土力学的基本知识、地基变形、地基承载力及土侧压力的计算方法;第二篇为桥墩与桥台,共四章(六~九章),主要介绍桥梁墩台的类型、构造、基本的设计检算方法以及墩台的施工,还阐述了桥梁在曲线上及坡道上的布置;第三篇为墩台基础,共四章(十~十三章),主要介绍明挖基础(浅基础)的构造及施工、沉井基础、桩基础(深基础)的类型、构造、适用条件、设计检算方法及施工。教材内容注意反映桥梁的新技术,对近年来采用的:用“静力触探法”确定地基承载力、墩台中的柔性墩、锚定板桥台以及修改后的圆端形桥墩、T 形桥台标准图等,均作了不同程度的介绍。

本教材符合《铁路桥涵设计规范》(1996 年)和《铁路桥涵施工规范》(1996 年)的条文规定,该规范在教材中简称为《桥规》和《桥施规》。

教材内容符合铁路中等专业学校桥梁与隧道专业教学大纲的要求。全教材采用了法定计量单位。为了加深对所学内容的理解,各章均有算例,并在章后附有复习思考题和习题。

本教材由天津铁路工程学校沈庆均主编,渭南铁路工程学校黄湘主审。参加编写的有:天津铁路工程学校张广寅(一、二、三、四、八、十章及附录);天津铁路工程学校沈庆均(五、六、七、九、十一、十二、十三章)。

在编写过程中,得到了天津铁路工程学校、渭南铁路工程学校领导及同仁的支持和帮助,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,谬误之处在所难免,敬希望读者批评指正。

编 者

1997 年 7 月

目 录

第一篇 土 力 学

第一章 土的物理性质及工程分类.....	1
第一节 土的三相组成.....	1
第二节 土的物理性质指标.....	8
第三节 土的物理状态划分	15
第四节 地基土的工程分类	20
第二章 土中应力计算	24
第一节 天然地基土的自重应力	24
第二节 基底应力计算	25
第三节 地基土中附加应力计算	29
第四节 软弱下卧层顶面的应力计算	44
第三章 土的压缩性及地基沉降计算	50
第一节 土的压缩性	50
第二节 分层总和法计算地基沉降量	57
第三节 基础的沉降差与倾斜	61
第四节 地基随时间变化的沉降计算	63
第四章 土的抗剪强度及天然地基的容许承载力	70
第一节 土的抗剪强度及测定方法	70
第二节 土的极限平衡条件	72
第三节 三轴压缩试验简介	75
第四节 地基的临塑荷载、临界荷载和极限荷载简介.....	77
第五节 利用现场荷载试验确定地基容许承载力	82
第六节 按《桥规》确定地基容许承载力	84
第七节 用触探法确定地基容许承载力	90
第八节 几种确定地基承载力方法的比较	95
第五章 土压力和土坡稳定	99
第一节 土压力的种类	99
第二节 按库伦土压力理论计算土压力.....	101
第三节 几种常见情况的土压力计算.....	104
第四节 土坡稳定的分析.....	111

第二篇 桥墩与桥台

第六章 桥 墩.....	115
第一节 桥墩类型与构造.....	115
第二节 桥墩荷载计算及荷载组合.....	121
第三节 桥墩设计与检算.....	128
第四节 桥墩标准设计图的应用.....	143
第七章 桥 台.....	150

第一节	桥台类型与构造.....	150
第二节	桥台设计与检算.....	154
第三节	桥台标准设计图的应用.....	162
第八章	墩台施工.....	170
第一节	墩台施工.....	170
第二节	墩台模板.....	178
第三节	桥头填土及锥体护坡施工.....	186
第九章	桥梁在曲线上及坡道上的布置.....	190
第一节	单线桥梁在曲线上的布置.....	190
第二节	桥梁在坡道上的布置.....	202

第三篇 墩台基础

第十章	明挖基础.....	205
第一节	基础砌体材料及构造形式.....	205
第二节	明挖基础施工.....	207
第十一章	沉井基础.....	222
第一节	沉井基础类型与构造.....	222
第二节	沉井主要尺寸的拟定和下沉检算.....	226
第三节	考虑沉井基础土的弹性抗力的计算.....	227
第四节	沉井标准设计图的应用.....	235
第五节	沉井基础的施工.....	242
第十二章	桩基础.....	249
第一节	桩基础的类型与构造.....	249
第二节	单桩的轴向容许承载力.....	252
第三节	群桩作用及桩基承载力的检算.....	259
第四节	桩基设计.....	261
第五节	用“M”法进行单桩和单排式桩基础的计算.....	266
第六节	用“M”法进行多排式桩基础的计算.....	280
第七节	桩基础的施工.....	284
第十三章	特殊地基加固简介.....	295
第一节	概 述.....	295
第二节	软土地基加固.....	295
第三节	湿陷性黄土地基加固.....	297
附 录	土工试验指示书及报告.....	299
试验一	密度、含水量和比重试验.....	299
试验二	液、塑限试验.....	303
试验三	固结(压缩)试验.....	305
试验四	直接剪切试验.....	307
参考文献	310

第一篇 土 力 学

建筑物的全部重量都由地壳支承。以铁路桥梁为例,列车荷载连同桥梁上部结构及墩台自重,一并作用在基础上,并且通过基础把全部荷载传递给地壳。与基础相接触的这部分地壳,称之为地基。组成地基的介质为连成整体的岩石或由岩石风化后形成的散粒土。

地基对建筑物起着关键作用,它的变形或破坏(丧失稳定)直接影响到整个结构的安全和使用,所以在建筑物设计中,最重要的工作是地基基础的设计和计算,而它的主要内容就是计算地基土的变形和强度(或承载力)。

要进行地基设计计算,应先搞清楚土的基本特性,再掌握地基的计算方法,通过计算可以知道在外力作用下地基是否会产生破坏,会产生多大沉降变形。只有掌握了这些土力学基本知识,才能根据不同的地质条件,合理地设计不同类型的基础。

理论联系实际是土力学这门课的显著特点。掌握室内试验方法,了解野外测试的新方法,理论和实际相结合,才能使实际的工程问题更为妥善地解决。

土的物理性质及工程分类,介绍了土的组成及其内部结构,并提出土的基本物理性质指标以及导出它们之间的关系,最后介绍了土的工程分类;土中应力计算,介绍了自重应力、基底应力、附加应力及软弱下卧层顶面应力的计算方法;土的压缩性及地基沉降计算,介绍了土的压缩性及地基沉降量、基础倾斜和沉降差、地基随时间变化的沉降量计算方法;土的抗剪强度及天然地基承载力,介绍了土的强度概念及测定方法以及极限平衡条件,临塑、临界、极限荷载及几种确定地基容许承载力的方法;土压力和土坡稳定,介绍了土压力的种类、库伦土压力理论及计算、土坡稳定分析。

第一章 土的物理性质 及工程分类

第一节 土的三相组成

一、土的成因

地表岩石长期在不同温度、水、大气、生物活动及其他外力作用的影响下不断破碎,并发生化学变化,这种变化称为岩石的风化。土木工程建筑上狭义概念的土就是岩石风化后的产物;广义概念的土则是将整体岩石也视为土。

岩石的风化可分为物理风化、化学风化和生物风化三种类型。物理风化是地壳变动、温度、水流等对岩石的崩解和破碎的机械作用。经过物理风化生成的土,基本上保持与母岩相

同的矿物成分，这种矿物称为原生矿物，如石英、长石及云母等。化学风化是岩石受水、空气以及有机体等的化学作用。这种作用使其矿物成分发生变化，形成与母岩不同的新矿物成分，这种新矿物称为次生矿物，如粘土矿物的高岭石、蒙脱石或伊里石等。生物风化是动植物对岩石的作用，例如植物的生长，造成岩石的机械破碎；生物新陈代谢的分泌物对岩石或土的侵蚀等。

经过风化后的岩石碎屑有的残存原地，有的受动力(如风力、水等)搬运，有的搬运较近，有的搬运甚远，然后沉积下来形成大地表层各种各样的土。根据土的搬运和沉积条件的不同，土可分为以下几种类型：

残积土——岩石风化碎屑(或颗粒)后未经搬运，残存在原地的松散堆积物。这种土的颗粒未经碾磨，多棱角，没有经过分选，颗粒不均匀，也无明显的堆积层理，厚度变化大，其表层往往含有较多的有机物(图 1—1(a))。

坡积土——经过风化而成的土，由于雨雪等水力作用，使其顺坡移动，沉积在较缓的坡面上。由斜坡上部往坡脚方向，土的组成物质粒度逐渐变细，厚度增大。这种土的土层厚度变化较大，粗细颗粒互相混杂，土质也不均匀，没有明显的层理，其压缩性和强度差别较大(图 1—1(b))。

洪积土——由于山洪暴发，冲刷地面，带走大量残积土或坡积土，在山谷冲沟出口或山前倾斜平原沉积而形成。山洪流出沟谷出口后，由于流速骤减，被搬运的粗碎屑物(如块石、砾石、粗砂等)首先沉积，离山渐远是较细颗粒的沉积，其分布范围也逐渐扩大，形成扇形，故称为洪积扇。洪积土在山洪挟带过程中经受一定的分选作用。由于该处地下水埋藏较深，洪积土长期处于干旱状态，故压缩性较低，承载力较好，可作为良好地基(图 1—1(c))。

冲积土——经江河水流的冲刷和搬运，在河床较平缓的地方沉积下来的土。这种土有明显的分选性，层理清晰。由于河流自然情况不同，可把冲积土分为山区河谷冲积土、平原河谷冲积土和三角洲冲积土三种类型。山区河谷冲积土，由于河流坡度陡、水流急，沉积物颗粒较粗，分选性也较差，因此，这种土的透水性较大，压缩性较小，可作为良好地基。平原河谷冲积土，因河流从上游至下游水流速度逐渐变缓，上游的沉积物颗粒较粗，下游的沉积物颗粒较细，一般说来这种土压缩性较低，承载力较高，可作为建筑物地基。三角洲冲积土是河流入海入湖口处沉积而形成的。这种土沉积面广，厚度也大，沉积物常常是细粒土，如细砂、粘土或淤泥。由于三角洲处于水系密布、地下水位较高的地区，因此，土的含水量也较高。三角洲冲积土一般情况下是结构疏松、压缩性较高、承载力较低，在这种土上修建建筑物，地基常常需要加固(图 1—1(d))。

其它沉积土，如海相沉积、湖泊或沼泽沉积土，一般颗粒较细，孔隙较大，压缩性较高。除此之外，还有风积土和冰积土，它们分别是风力搬运和冰川搬运沉积的土。风积土颗粒较细且均匀，无层理。冰积土颗粒较大，并夹有细砂和粘土，层理也不明显。

沉积年代对沉积土的性质也有影响。沉积年代愈长，上覆土层重量愈大，土压得愈密实，由孔隙水中析出的化学胶结物也愈多。因此，老土层的强度和变形模量比新土层的要高；甚至由散粒体经过成岩作用又变成整体岩石，如砂类土成为砂岩，粘土变成页岩等。目前常见的土大都是第四纪沉积层，这个沉积层还处于成岩过程中，但尚未完成这个过程，因此，一般都呈松散状态。但第四纪在距今约一百万年开始的相当长的时期内，第四纪早期沉积的土在性质上就与近期沉积的土有相当大的差别。这种沉积年代长短对土性质的影响，特别对粘性土尤为明

显。不同的自然地理环境对土的性质也有很大的影响。我国沿海地区的软土、严寒地区的多年冻土、西北地区的湿陷性黄土和西南亚热带的红粘土等,除了具有一般土的共性外,还各具有自己的特点。

图 1—1 各种沉积土

(a)残积土;(b)坡积土;(c)洪积土;(d)冲积土。

二、土的特性

由土的成因可知,土是地壳表层的岩石经风化作用后,在不同的条件下所形成的堆积物和沉积物,是碎散颗粒的集合体。这与一般的建筑材料(如钢材、混凝土、石料等)有根本的区别。这种碎散性使土具有与一般建筑材料不同的若干特性:

(一)土有较大的压缩性

土的固体颗粒之间有孔隙,当受外力作用时,这些孔隙能大大缩小,使土具有压缩性。这是引起建筑物沉降的内因。

(二)土颗粒之间具有相对的移动性

土体受剪时,其抗剪强度是由土颗粒之间表面的摩擦力和内聚力组成的。而一般建筑材料受剪时,其抗剪强度则由材料本身的抗剪能力而产生。土颗粒之间的联结(表面摩擦力和内聚力)比颗粒本身的强度低得多,因此,土的抗剪强度就比一般建筑材料的低得多。土颗粒之间这种相对移动性是引起地基丧失稳定,产生滑动破坏的内因。

(三)土具有较大的透水性

土的固体颗粒之间有较强的孔隙,水可以在孔隙中流动而透水。而一般建筑材料的透水性往往是很小的。

三、土的组成

土是由固体颗粒构成了土骨架,在骨架中间布满了孔隙,而孔隙又被水和空气所填充。因

此,土一般是固相(土颗粒)、液相(水)和气相(空气)三相组成体。如果土的孔隙完全被水充满,称为饱和土。孔隙完全被空气所填充,称为干土。饱和土或干土是二相组成体。土的三相组成部分及其相互作用影响着土的物理及力学性质,下面将分别予以讨论。

(一) 土的固相

1. 土的矿物成分

土的矿物成分决定于母岩的矿物成分及风化作用。主要经过物理风化所形成的土,如砂及砂以上的粗粒土,都是由原生矿物如石英、长石和云母等所组成。这种矿物成分的性质较稳定,由其组成的土表现出无粘性,透水性较大,压缩性较低,通常对建筑工程的地基较为有利。经过化学风化所形成的土,一般都是粘性土,其矿物成分与母岩不同,是次生矿物,如粘土矿物的高岭石、伊里石及蒙脱石等。其性质较不稳定,具有较强的亲水性,遇水易膨胀。由次生矿物所组成的土,具有粘性,透水性较小,压缩性较高,一般对建筑工程地基来说是不利的。

2. 土的结构

土的结构是指土在形成过程中,颗粒之间的排列及联结形式。由于土的风化不同,颗粒大小不同以及颗粒间作用力的不同,形成了不同的结构形式。通常把土的结构形式归纳为如下三种:

(1)单粒状结构。这种结构形式主要存在于粗粒所形成的土中。粗颗粒土的沉积,依靠自重沉落,沉落的颗粒被先前已沉积稳定的土颗粒所支承,形成了单粒结构(图 1—2(a))。这种结构形式的特点是颗粒间呈点和点接触。由于形成条件不同,有的比较紧密,有的比较疏松。一般来说单粒状结构是比较稳定的结构形式,孔隙占的比例较小,承载力较高。但也应看到,处于疏松状态的砂土,其承载力也是较低的,特别是饱和状态的细砂,受到振动易产生液化,因此而丧失承载力。

(2)蜂窝状结构。这种结构形式主要存在于细颗粒所形成的土中。细小颗粒间存在着分子引力,当这种引力大于下沉土颗粒本身重力时,该土颗粒就停留在颗粒间的接触点处而不再下沉,如此形成孔隙比较大的蜂窝状结构(图 1—2(b))。蜂窝状结构较不稳定,在外力作用下会产生较大的变形。

(3)絮状结构。极细小的土颗粒(粒径小于 0.005mm)在水中常处于悬浮状态,当悬浮液的介质发生变化,如细小颗粒被带到电介质较大的水中,由于带电的细小颗粒分子相互吸引聚合,变成絮状而下沉,形成孔隙很大的絮状结构(图 1—2(c))。具有絮状结构的土,其结构也不稳定,受到外力较易破坏,因此这种土强度较低,压缩性较高。但也并不尽然,无论是蜂窝状或絮状结构的土,如果形成年代比较久远,长期在自重压力作用下,其联结强度也会增强。

3. 土的级配

自然界存在的土都是由不同的大小颗粒所组成,土的颗粒大小及其含量直接影响着土的工程性质。例如颗粒比较大的粗粒土,透水性较大,且无粘性,而细粒土则透水性较小,有粘性。

图 1—2 土的结构示意图

因此,研究土的粒径大小及其相对含量,亦即土的级配,对了解土的性质有重要意义。对此分述如下:

(1) 粒组。为了分析土的颗粒大小,常将土性质相近的土颗粒划分若干组,称为粒组。表 1—1 所列为《桥规》对粒组的划分。

(2) 颗粒大小分析试验。确定土的粒径分布范围的试验称土的颗粒大小分析试验。根据《土工试验方法标准》(GBJ123—88)(以下简称《国标》)的规定,颗粒大小分析可采用筛析法、密度计法和移液管法。筛析法适应于粒径大于 0.074mm 但不大于 60mm 的土,密度计法和移液管法适用于粒径小于 0.074mm 的土。

用筛析法作土的颗粒大小分析,其主要设备是一套分析筛。这套筛子中的各筛孔大小不同,由上至下排列,上加顶盖,下加底盘,叠在一起。分析筛有粗筛和细筛两种。粗筛的孔径(圆孔)为 60、40、20、10、5 和 2mm;细筛的孔径为 2.0、1.0、0.5、0.25、0.1 和 0.074mm。试样的用量为:最大颗粒粒径小于 2mm 的土,用 100~300g;最大颗粒粒径大于 2mm 但小于 10、20、40mm 的土,分别用 300~900、1000~2000 和 2000~4000g;最大颗粒粒径大于 40mm 者,用 4000g 以上。称取试样质量多于 500g 时,精确至 1g,否则精确至 0.1g。

土的颗粒分组

表 1—1

粒 组 名 称		粒 径 (mm)	一 般 特 性
漂石(浑圆或圆棱)或块石(尖棱)	大	大于 800	无粘性,孔隙大,透水性大,毛细上升高度极微,不能保持水分,强度大,能承受很大静压,压缩性小
	中	800~400	
	小	400~200	
卵石(浑圆或圆棱)或碎石(尖棱)	大	200~60	
	中	60~40	
	小	40~20	
圆砾(浑圆或圆棱)或角砾(尖棱)	大	20~10	
	中	10~5	
	小	5~2	
砂 粒	粗	2~0.5	无粘性,易透水,毛细上升高度不大,遇水不膨胀,干燥时不收缩且松散,不呈现可塑性,能承受较大静压,压缩性较小
	中	0.5~0.25	
	细	0.25~0.05	
粉 粒		0.05~0.005	湿润时出现轻微粘性,透水性小,遇水膨胀和干缩都不显著,毛细上升较快,上升高度较大
粘 土 粒		小于 0.005	粘性大,几乎不透水,湿润时呈可塑性,遇水膨胀和干缩都较显著,压缩性大

试验时,对于砂性土,将试样过 2mm 筛,称出筛上和筛下的土样质量。当筛下的试样质量小于试样总质量的 1% 时,不做细筛分析;筛上的质量小于试样总质量的 10% 时,可不作粗筛分析。当筛上和筛下试样质量均大于试样总质量的 10% 时,分别将筛上、筛下试样倒入依次叠好的粗筛和细筛中进行筛析。细筛宜置于筛析机上震筛,震筛时间宜为 10~15min。称出各级

筛上及底盘内试样的质量(精确至 0.1g),就可以计算出粒径小于(或大于)某一数值的试样质量占试样总质量的百分数。各筛中试样质量的总和与试样总质量的差值不得大于试样总质量的 1%。

土的颗粒大小分析试验成果,可以用表格和颗粒级配曲线两种方法表达。表格法即列表说明土样中各粒组的土质量占土样总质量的百分数。表格法简单明了。颗粒级配曲线法即用曲线表示土的颗粒级配。曲线建立在一直角坐标系中,纵坐标表示小于某粒径的土质量占试样总质量的百分数,横坐标表示土粒粒径,由于土中的粒径相差悬殊,为了突出显示细小颗粒粒径而采用对数尺度。颗粒级配曲线的陡缓可以表示土的级配情况。曲线平缓,表示各种粒径的土都有,颗粒不均匀,级配良好;曲线陡峻,表示土粒较均匀,级配不好。

对于粒径小于 0.074mm 的土,根据密度计或移液管法的试验结果,同样可绘制颗粒级配曲线。若某土样中粒径大于 0.074mm 的土虽较多,但粒径小于 0.1mm 的土仍超过土样总质量的 10%,应采用筛析法和密度计法联合试验。

(二) 土的液相

土中水可分为结合水和自由水。

1. 结合水

结合水是由土颗粒表面电分子力吸附在其表面的一层水。试验证明,土颗粒的表面带有负电荷。水分子(H_2O)是极性分子,就是说带正电荷的 H^+ 和带负电荷的 OH^- 各位于水分子的两端(图 1—3(a))。这样的分子会被颗粒表面的负电荷吸引而定向地排列在颗粒的四周(图 1—3(b)和(c)),离颗粒表面愈近,吸引力愈大。结合水按其所受土粒的吸引力大小,可分为强结合水和弱结合水。

强结合水又称为吸着水,是被土颗粒表面负电荷紧紧吸附在土粒周围很薄的一层水。这种水的性质接近于固体,冰点很低,沸点较高, - 78 才冻结,在 105 以上才蒸发,不因重力影响而转移,不传递静水压力,它对土的性质没有什么影响。土粒可以从潮湿空气中吸附这种水。仅含吸着水的粘土呈干硬状态或半干硬状态,碾碎则成粉末。砂类土也可能有极少量吸着水,仅含吸着水的砂类土成散粒状。弱结合水又称薄膜水。是受颗粒表面负电荷的吸引力作用而吸附在颗粒的四周、吸着水外面一定范围内的水,由于距离土颗粒表面较远,电分子力对它的作用较小,呈粘滞状态,它不传递压力,也不能在孔隙中流动,但能从水膜厚的地方向水膜薄的地方转移。砂类土可以认为不含薄膜水;粘性土的薄膜水较厚,且薄膜水的含量随粘粒增多而增大。薄膜水的多少对粘性土的性质影响很大,粘性土的一些特性(粘性、塑性——可以捏成各种形状而不破裂也不流动的特性、压缩性等)都

图 1—3 土中固体颗粒与水的相互作用

和薄膜水有关。

2. 自由水

离开土颗粒表面较远, 不受土颗粒电分子吸引力作用, 且可以自由移动的水称为自由水。自由水又分为重力水和毛细水两种。

(1) 重力水和土的渗透性。在土中仅受重力作用的水称为重力水。它与一般水一样, 可以传递压力, 对土颗粒有浮力作用, 并且在水头差作用下, 可在土中流动, 形成渗流。

土的渗透性是指土被水透过的性质。早在 1856 年法国学者达西(H. Darcy) 曾利用砂土进行过渗透性试验, 其装置如图 1—4 所示。试验发现水在土中的渗流速度 v 与水力梯度 i 成正比, 这就是有名的达西定律, 可用公式表示:

图 1—4 达西渗透试验装置示意图

$$v = K_T i \quad (1-1)$$

或 $q = A \cdot v = A \cdot K_T \cdot i \quad (1-1a)$

其中 $i = \frac{h}{L}$

式中 i ——水力梯度;

h ——作用于试样的水头差(cm);

L ——渗径长度(cm);

q ——通过截面 A 的渗透流量(cm^3/s);

A 为截面 $a-a$ 或 $b-b$ 的面积(cm^2);

K_T ——水温为 T 时试样的渗透系数 (cm/s)。

渗透系数 K_T 的物理意义是当水力梯度 $i = 1$ 时的渗流速度, 因此, 渗透系数 K_T 是表明土的渗透性大小的指标。表 1—2 中列出了土的渗透系数的参考值。从表中可见, 土的渗透系数随土颗粒大小而变化, 土颗粒愈细, 渗透系数愈小, 反之, 渗透系数愈大。渗透系数可由室内试验或野外现场抽水试验测定。室内渗透试验有变水头试验和常水头试验两种, 常水头试验见下面的例题 1—1。

土的渗透系数 K_T 参考值 表 1—2

土 的 名 称	$K_T(\text{cm}/\text{s})$
粘土	$< 10^{-7}$
砂粘土	$10^{-6} \sim 10^{-7}$
粘砂土	$10^{-4} \sim 10^{-6}$
粉砂、细砂	$10^{-3} \sim 10^{-4}$
中砂	$10^{-1} \sim 10^{-3}$
粗砂、砾石	$10^2 \sim 10^{-1}$

图 1—5 渗透定律 $v-i$ 关系图

水在粘性土中渗透时, 由于孔隙小, 且土颗粒表面有弱结合水膜存在, 堵塞了孔隙通道, 因

此,只有当水力梯度 i 超过 i_b 才开始渗透, i_b 称为起始水力梯度(图 1—5)。粘性土的渗透定律表达式可修正如下:

$$v = K_T (i - i_b) \quad (1-2)$$

例题 1—1】将砂土放入常水头渗透装置中(图 1—4),装置的过水断面 a—a(或 b—b)的面积为 32.2cm^2 ,水流从 a—a 至 b—b 渗径长度为: $L = 12\text{cm}$ 试验时保持常水头差 $h = h_1 - h_2 = 8\text{cm}$,经过 1min 测得流过土样的水量 $Q = 42\text{cm}^3$,求此砂土的渗透系数 K_T 。

解】 渗透流量 $q = Q/t = 42/60 = 0.7\text{cm}^3/\text{s}$

水力梯度 $i = h/L = 8/12 = 0.667$

由式(1—1a)得:

$$K_T = q / (A \cdot i) = 0.7 / (32.2 \times 0.667) = 3.26 \times 10^{-2} \text{cm/s}$$

(2)毛细水。存在于地下水位以上土的细微毛细孔隙中,并和地下水连通的自由水称为毛细水。土粒间不规则的细小通道称为毛细孔隙。水和空气界面上存在着表面张力,该张力促使土的地下水会沿毛细孔隙逐渐上升,形成毛细水上升带。毛细水的上升高度与毛细孔隙大小有关,土颗粒愈细,毛细水上升愈高,粘性土的毛细水上升较高,可达一至几米;而对于孔隙较大的粗粒土,毛细水几乎不存在。在工程上,毛细水对地基或土坡稳定以及地基冻胀等问题都有一定的影响。

(三)土的气相

非饱和土的孔隙中含有气体。土中的气体分为两类:与大气相通的自由气体和与大气隔绝的封闭气体(气泡)。自由气体一般不影响土的性质;封闭气体的存在会增加土的弹性,减小土的透水性。目前还未发现土中气体对土的性质有值得重视的影响,因此,在工程上一般不予考虑。

第二节 土的物理性质指标

前面介绍了土的生成和组成等知识,即从定性角度阐述了影响土性质的一些因素。土的最基本性质,如软或硬、干或湿、松散或紧密等也可以用定量的方法加以描述,这就是本节将要讨论的主要内容。上述土的一些物理性质主要决定于土的固体颗粒、孔隙中的水和气体这三相所占的体积和质量的比例关系,而反映这种关系的指标称为土的物理性质(物性)指标。

为了便于分析土的三相体积和质量比例关系,常把本来三相交错混杂在一起的土加以理想化,即假想土中的固体颗粒、水和气体分别集合在一起,并以图形表示出,这样的图称为土的三相(草)图(图 1—6)。图中 m 、 V 分别表示土的质量和体积,其角标 s 、 w 、 a 及 v 分别表示土的颗粒、水、气体和孔隙。即图中符号的意义为:

V ——土的总体积;

V_s ——土中土粒的体积;

V_v ——土中孔隙的体积;

V_w ——土中水的体积;

V_a ——土中气体的体积;

m ——土的总质量;

图 1—6 土的三相(草)图

m_s ——土中土粒的质量(干土质量);
 m_w ——土中水的质量;
 m_a ——土中气体的质量(可以认为 $m_a = 0$)。

一、直接测定的物理性质指标

(一) 土的密度 和容重

土在天然状态下单位体积的质量称土的天然密度,简称土的密度,用下式表示。

$$= \frac{m}{V} = \frac{m_s + m_w}{V_s + V_v} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (1-3)$$

在天然状态下,单位体积土所受的重力,叫做土的天然容重,简称容重,用下式表示。

$$= \frac{W}{V} = \frac{mg}{V} = \frac{(m_s + m_w)g}{V} \quad (\text{kN/m}^3) \quad (1-3a)$$

式中 W ——土样的总重力(kN);

g ——重力加速度,通常取 $g = 10\text{m/s}^2$;

其他符号的意义同前。

应该明确,容重并不是实测指标。通常是实测土的密度 再算出容重 。根据牛顿第二定律,可推导出土的密度和容重的关系式为

$$= \frac{W}{g} \quad \text{或} \quad = \gamma \cdot g \quad (1-4)$$

土的容重与土的含水量和密度有关。一般土的容重为 $16 \sim 22\text{kN/m}^3$ 。

(二) 土的含水量 w

土的含水量是指土中水的质量和土粒质量的比值;试验测定时,是指将土样在 $105 \sim 110$ 温度下烘至质量不变时所失去的水分质量与干土质量的比值,以百分数表示,即

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

式中 w ——土的含水量,精确至 0.1% ;

其他符号的意义同前。

土的天然含水量变化很大。干的砂类土,含水量约为 $0\% \sim 3\%$;饱和软粘土的含水量可达 $70\% \sim 80\%$ 或更大。一般地说,对于同一类土,当含水量增大时,其强度就降低。

(三) 土粒比重(颗粒比重) G_s 和土粒容重 ρ_s

土粒比重是指土粒在 $105 \sim 110$ 温度下,烘至质量不变时的质量与同体积 4 的纯水质量的比值,即

$$G_s = \frac{m_s}{V_s \cdot \rho_w} = \frac{m_s}{V_s \times 1} = \frac{m_s}{V_s} \quad (1-6)$$

式中 ρ_w ——水的密度, $\rho_w = 1\text{g/cm}^3$;

其余各符号的意义同前。

土粒比重的大小决定于土粒中的矿物成分,其值一般为:砂类土 $2.65 \sim 2.69$,粘性土 $2.70 \sim 2.75$ 。土粒比重,除重要建筑物的地基土在实验室测定外,可不作试验而采用地区经验值。

单位体积土粒的重量叫做土粒容重。土粒容重通常是通过实测土粒比重 G_s 再算出土粒容重 ρ_s 。由土粒容重的定义,可得 ρ_s 和 G_s 的关系式。

$$s = \frac{W_s}{V_s} = \frac{m_s g}{V_s} = G_s \cdot g \quad (\text{kN/m}^3) \quad (1-6a)$$

式中 W_s ——土样内土粒的重力(kN)

其他符号的意义同前。

二、换算的物理性质指标

下列各物理性质指标可根据他们的定义及三个直接测定的指标换算得出。

(一) 孔隙比 e 和孔隙度 n

土的孔隙比 e 是土中孔隙体积与土粒体积的比值, 用下式表示:

$$e = V_v / V_s \quad (1-7)$$

孔隙比用小数表示。对同一类土, 孔隙比愈大, 土愈松; 孔隙比愈小, 土愈密实。它是表示土的密实程度的重要物理性质指标。

土的孔隙度 n 是土中孔隙的体积与土的总体积的比值, 用下式表示:

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (1-8)$$

下面根据孔隙比的定义和三个直接测定的指标来推导孔隙比的换算关系式。

从三个直接测定的指标的定义及其表达式可知, 物理性质指标的计算结果与所取土样的体积(或质量)大小无关。因此可假设土样的土粒体积 $V_s = 1$ 个单位体积, 土样其余部分的体积和质量可用其他物理性质指标来表示(图 1—7(a))。现对图 1—7(a) 部分的体积和质量的关系说明如下: 假设 $V_s = 1$, 根据式(1—6), 可得土粒质量 $m_s = G_s$; 再根据式(1—5), 可得水的质量 $m_w = m - m_s = w m_s = w G_s$; 故土的总质量 $m = m_s + m_w = G_s(1 + w)$ 。根据式(1—3), 得土的总体积 $V = \frac{G_s}{\gamma}(1 + w)$; 而孔隙体积 $V_v = V - V_s = \frac{G_s}{\gamma}(1 + w) - 1$; 水的体积可根据水的密度 $\rho_w = 1 \text{g/cm}^3$ 导出, 即 $V_w = \frac{m_w}{\rho_w} = m_w = w G_s$ 。再根据孔隙比定义可推导出孔隙比和三个直接测定指标的换算关系式, 即:

图 1—7 土的三相换算图

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{G_s}{\gamma}(1 + w) - 1 = \frac{\gamma}{G_s}(1 + w) - 1 \quad (1-9)$$

需要说明的是, 推导式(1—9)时以土粒体积 $V_s = 1$ 作为计算的出发点。但是, 由于各物理性质指标都是三相间量的比例关系, 而不是量的绝对值, 因此, 取其他量为 1(例如设土的体积 $V = 1$) 作为计算的出发点, 也可以得出相同的换算关系式。图 1—7(b) 是假设 $V = 1$ 个单位体积所得出的三相换算图, 现根据图 1—7(b) 及孔隙度的定义推导孔隙度的换算关系式为:

$$n = \frac{V_v}{V} = 1 - \frac{G_s(1+w)}{G_s(1+w)} = 1 - \frac{1}{s(1+w)} \quad (1-10)$$

在土力学和地基的计算中, 孔隙比 e 的应用较为广泛。因此, 如采用三相换算图计算土的物理性质指标, 常采用图 1—7(a) (即假定 $V_s = 1$)。

孔隙比和孔隙度之间的换算关系为:

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{e}{1+e} \quad (1-11)$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{n}{1-n} \quad (1-12)$$

(二) 饱和度 S_r

土中被水充满的程度叫做饱和度, 以土中水的体积与孔隙体积的比值来表示, 即:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (1-13)$$

饱和度的换算关系式可根据饱和度的定义和图 1—7 求得, 即:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{wG_s}{e} \quad (1-14)$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{m_w}{V_v} = \frac{(1-n)G_s w}{n} \quad (1-15)$$

$S_r = 0$, 表示土的孔隙中没有水, 土是干土; 如果 $S_r = 1$, 表示土的孔隙中充满着水, 土是完全饱和的。

(三) 土的干密度、饱和密度和几种特殊容重

1. 土的干密度 ρ_d 和干容重 γ_d

单位体积土体中的土粒质量称为土的干密度, 用下式表示:

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} = \frac{m - m_w}{V} = \frac{wm_s}{V} = \rho_d \cdot w$$

$$\rho_d = \frac{1}{1+w} (\text{g/cm}^3) \quad (1-16)$$

单位体积土体中的土粒重力称为土的干容重, 用下式表示:

$$\gamma_d = \frac{m_s g}{V} = \rho_d \cdot g \quad (\text{kN/m}^3) \quad (1-16a)$$

干容重的换算关系式可根据干容重的定义和图 1—7 得出, 即:

$$\gamma_d = \frac{m_s g}{V} = \frac{G_s \cdot g}{1+e} = \frac{\gamma_s}{1+e} = (1-n) \gamma_s \quad (1-17)$$

由式(1—16)和(1—16a)得:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+w} \quad (1-18)$$

干容重愈大, 表示土愈密实。

2. 土的饱和密度 ρ_{sat} 和饱和容重 γ_{sat}

孔隙中完全充满水的土的密度称为饱和密度, 用下式表示。

$$\rho_{sat} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V} = \frac{m_s + V_v}{V} \quad (1-19)$$

上式中的 ρ_w 为水的密度, 即 4℃ 时单位体积水的质量, $\rho_w = 1\text{g/cm}^3$ 。孔隙中完全充满水的土, 其容重称为饱和容重, 用下式表示。

$$\gamma_{sat} = \frac{m_s g + V_v \gamma_w}{V} = \frac{m_s g + V_v \gamma_w}{V} \quad (1-19a)$$

上式中的 γ_w 为水的容重, 即 4 时单位体积水的重力, 土工计算一般取 $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$ 。
土的饱和密度和饱和容重的关系为:

$$\gamma_{sat} = \rho_{sat} \cdot g$$

饱和容重的换算关系式可根据饱和容重的定义和图 1—7 得出, 即:

$$\gamma_{sat} = \frac{m_s g + V_v \gamma_w}{V} = \frac{s + e \gamma_w}{1 + e} \quad (1-20)$$

$$\gamma_{sat} = \frac{m_s g + V_v \gamma_w}{V} = (1 - n) \rho_s + n \gamma_w \quad (1-21)$$

3. 土的浮容重

在水下的土体, 要受到水的浮力作用, 其重力会减轻。浮力的大小等于土粒排开的水重。因此, 土的浮容重等于单位体积土体中的土粒重力减去与土粒体积相同的水的重力, 其定义表达式为:

$$\gamma' = \frac{m_s g - V_s \gamma_w}{V} = \frac{m_s g - V_s \gamma_w}{V} = \frac{m_s g + V_v \gamma_w - V \gamma_w}{V} = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (1-22)$$

浮容重的换算关系式可根据浮容重的定义和图 1—7 得出, 即:

$$\gamma' = \frac{m_s g - V_s \gamma_w}{V} = \frac{s - w \gamma_w}{1 + e} \quad (1-23)$$

$$\gamma' = \frac{m_s g - V_s \gamma_w}{V} = (1 - n) \rho_s - (1 - n) \gamma_w = (1 - n) (\rho_s - \gamma_w) \quad (1-24)$$

为了便于应用, 表 1—3 列出了上述土的物理性质指标的类别、名称、符号、定义表达式、常用换算关系式和单位。

例题 1—2】土样总质量为 49.5g, 总体积为 30cm³, 此土样烘干后质量为 40.5g, 土粒比重 G_s 为 2.65。试求此土样的含水量、孔隙比、孔隙度、饱和度和干容重。

土的物理性质指标

表 1—3

类别	名称	符号	定义表达式	常用换算关系式	单位
实测指标	密度		$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_s + m_w}{V_s + V_v}$	$\rho = \frac{G_s + S_r \cdot e}{1 + e}$	g/cm ³
	容重		$\gamma = \frac{m \cdot g}{V} = \frac{(m_s + m_w)}{V} g = \rho \cdot g$	$\gamma = \rho_d (1 + w)$ $\gamma = \frac{s + S_r e \gamma_w}{1 + e}$	kN/m ³
	含水量	w	$w = \frac{m - m_s}{m_s} \times 100\%$	$w = \frac{S_r \cdot e}{G_s} - 1$	
	土粒比重	G_s	$G_s = \frac{m_s}{V_s}$	$G_s = \frac{S_r \cdot e}{w}$	-
	土粒容重	γ_s	$\gamma_s = \frac{m_s}{V_s} g = G_s \cdot g$	$\gamma_s = \frac{S_r e \gamma_w}{w}$	kN/m ³