

土力学地基基础 问题精解

李 驰 主编

TULIXUE DIJICHU
WENTI JINGJIE



天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

TU4/76

2008

土力学地基基础问题精解

李驰 主编



天津大学出版社

TIANJIN UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书为土力学地基基础教学指导书。全书共分 10 章,包括绪言、土的物理力学性质、土的渗透性、土中应力计算、土的压缩性及地基变形计算、土的抗剪强度、土压力与土坡稳定分析、土的动力特性、地基承载力、浅基础设计。各章均分为内容提示、知识要点、基本概念和基本原理、典型例题及解析、模拟练习题及答案等几部分。

本书可作为土木工程专业学生的学习指导书,也可作为岩土工程专业研究生入学考试复习资料,还可作为全国注册土木(岩土)工程师执业资格考试应试人员的复习备考资料。

图书在版编目(CIP)数据

土力学地基基础问题精解/李驰主编. —天津:天津大学出版社, 2008.4

ISBN 978 - 7 - 5618 - 2658 - 4

I. 土… II. 李… III. 地基 - 基础(工程) IV. TU47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 048558 号

出版发行 天津大学出版社

出版人 杨欢

地址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)

电话 发行部:022 - 27403647 邮购部:022 - 27402742

印刷 天津市泰宇印务有限公司

经销 全国各地新华书店

开本 185mm × 260mm

印张 12.5

字数 312 千

版次 2008 年 4 月第 1 版

印次 2008 年 4 月第 1 次

印数 1 - 3 000

定价 20.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

本书是根据全国高等学校路桥与交通工程教学指导委员会制定的土力学教学大纲,配合《土力学与地基基础》教材使用而编写。在编写的过程中,吸收了本学科领域《土质学与土力学》、《土力学地基基础》、《基础工程》等教材相关内容的知识重点和新的进展,旨在帮助路桥与交通工程专业和其他相近专业的学生理解和掌握土力学地基基础中的基本概念,并尽快应用于工程实践,也可以作为岩土工程专业研究生入学考试的复习资料。同时,考虑到我国自2002年开始实施注册土木(岩土)工程师职业资格考试以来,土力学地基基础基本概念及其运用部分的考题占很大的比重,书中对岩土执业资格考试中在土力学地基基础基本概念部分设置的考点和难点进行了详细的解析,故本书也可以作为参加全国注册土木(岩土)工程师执业资格考试的工程技术人员复习备考的资料。

全书共分10章,内容包括绪言、土的物理性质、土的渗透性、土中应力计算、土的压缩性及地基变形计算、土的抗剪强度、挡土墙土压力与土坡稳定分析、土的动力特性、地基承载力理论和浅基础设计。在各章节中阐述了基本概念和基本原理,对典型例题进行详细解析,并附有大量的模拟试题,以加深读者对基本概念和基本原理的理解和掌握。

本书由内蒙古工业大学道路与交通工程系李驰副教授主编,天津大学建工学院要明伦教授主审。内蒙古工业大学和河北工业大学多年从事该课程教学的教师参加了编写工作,具体分工是:李驰编写第一、四、五、八、九、十章;刘霖编写第二章;李帆编写第三章;刘俊芳编写第六、七章。

本书既注重基本理论的阐述,更强调基本理论在工程中的运用。在编写的过程中,得到许多同行专家的支持和帮助,参考引用了土力学地基基础方面的教材和相关资料,硕士研究生于浩等参加了书稿的整理工作,在此一并表示感谢。

限于编者水平,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2008年1月于内蒙古工业大学

目 录

第一章 绪言	1
一、土力学、地基及基础的概念.....	1
二、土的特性及其在工程中的运用	1
三、本学科的发展概况及新世纪的研究热点	1
四、岩土工程问题的计算机分析	2
五、岩土工程测试技术	3
六、岩土工程的设计计算理论	3
七、岩土工程的动力计算	4
八、环境岩土工程及特殊岩土工程	4
第二章 土的物理力学性质	6
内容提示.....	6
知识要点.....	6
基本概念和基本原理.....	6
典型例题及解析	12
模拟练习题及答案	13
第三章 土的渗透性	21
内容提示	21
知识要点	21
基本概念和基本原理	21
典型例题及解析	26
模拟练习题及答案	28
第四章 土中应力计算	32
内容提示	32
知识要点	32
基本概念和基本原理	32
典型例题及解析	37
模拟练习题及答案	42
第五章 土的压缩性及地基变形计算	52
内容提示	52
知识要点	52
基本概念和基本原理	52
典型例题及解析	62
模拟练习题及答案	66
第六章 土的抗剪强度	77
内容提示	77

知识要点	77
基本概念和基本原理	77
典型例题及解析	83
模拟练习题及答案	86
第七章 土压力与土坡稳定分析	94
内容提示	94
知识要点	94
基本概念和基本原理	94
典型例题及解析	104
模拟练习题及答案	108
第八章 土的动力特性	118
内容提示	118
知识要点	118
基本概念和基本原理	118
典型例题及解析	131
模拟练习题及答案	137
第九章 地基承载力	141
内容提示	141
知识要点	141
基本概念和基本原理	141
典型例题及解析	151
模拟练习题及答案	154
第十章 浅基础设计	158
内容提示	158
知识要点	158
基本概念和基本原理	158
典型例题及解析	173
模拟练习题及答案	177
参考文献	191

第一章 绪 言

一、土力学、地基及基础的概念

土力学是将土作为建筑物的地基、建筑材料和介质来研究的一门学科。将土视为物理—力学系统,根据土的应力—应变—强度关系提出力学计算模型,用数学的方法求解土在各种条件下的应力分布、变形情况以及土压力、地基承载力与土坡稳定等的计算理论与方法,同时根据土的实际情况结合土工试验技术,评价各种力学计算方法的可靠性与适用条件。

建筑物的全部荷载都由它下面的地层来承担,受建筑物荷载影响的那一部分地层称为地基;建筑物向地基传递荷载的下部结构就是基础。建筑物的地基、基础和上部结构三个方面是彼此联系、相互制约的整体。运用土力学的原理研究建筑物地基、基础在上部结构荷载作用下的应力、变形、强度和稳定性是土力学的基本内容。

二、土的特性及其在工程中的运用

土的形成决定了土的特性。土在漫长地质历史年代中经历了风化作用、挟带与搬运作用以及沉积作用,这就决定了土具有分散性、多相性、复杂性和不确定性等特性。作为一种自然地质历史的产物,土是一种特殊的变形体材料,它既服从连续介质力学的一般规律,又有特殊的应力—应变关系和特殊的强度和变形规律,形成了土力学不同于一般固体力学的分析和计算方法。

在路基工程中,土既是修筑路堤的基本材料又是支承路堤的地基,路堤的临界高度和边坡的取值都与土的抗剪强度以及土体的稳定性有关。为了获得具有一定强度和良好水稳定性的路基,需要采用碾压的施工方法压实填土,而碾压的质量控制方法正是基于对土击实特性的研究成果。同时,挡土墙设计的侧向荷载——土压力的取用,需借助于土压力理论计算。近年来,随着我国高速公路的大量修建,对路基的沉降计算与控制提出了很高的技术要求,而要解决沉降问题,就需要对土的压缩特性进行深入的研究。

在路面工程中,土基的冻胀和翻浆是北方地区非常突出的问题,根据土的物理化学特性提出时土的改良措施,如采用稳定土作为基层材料,是防止冻害的有效措施之一。由于道路一般在车辆的反复荷载作用下工作,因此需要研究土在重复荷载作用下的变形特性,而抗震设计更需要研究土的动力特性。

在桥梁工程中,基础工程是决定能否在预选桥址建桥的技术关键,基础工程的造价占总造价的比重很大,经济、合理的桥梁基础设计,需要依靠土力学基本理论的支持。对于超静定的大跨度桥梁结构,基础的沉降、倾斜或水平位移是引起结构过大次应力的重要因素。此外,在软土地区高速公路建设中的“桥头跳车”问题是影响工程质量的难题,解决这一难题的技术关键就在于如何处理好桥墩与高路堤之间的沉降差,这涉及桩基和高路堤的沉降计算和填土的碾压质量控制以及软基的加固处理等问题。

三、本学科的发展概况及新世纪的研究热点

岩土工程是 20 世纪 60 年代末至 70 年代初,将土力学及基础工程、工程地质学、岩体力学三者逐渐结合为一体,并应用于土木工程实际而形成的新学科。岩土工程研究的对象是岩体

和土体;研究的基本问题是岩体或土体的强度、稳定、变形和渗流等;涉及的领域是土木工程建设中岩石与土的利用、整治或改造。

土木工程建设中出现的岩土工程问题促进了岩土工程学科的发展。例如,在土木工程建设中最早遇到的是土体稳定问题。土力学理论的最早贡献始于 1773 年库仑建立的库仑定律;随后发展了 Rankine(1857)理论和 Fellenius(1926)圆弧滑动分析理论。为了分析软黏土地基在荷载作用下沉降随时间发展的过程, Terzaghi(1925)发展了一维固结理论。岩土工程在我国的发展,是紧紧围绕我国土木工程建设中出现的岩土工程问题而发展的,在改革开放以前,岩土工程工作者的注意力大多集中在水利、铁道和矿井工程建设中的岩土工程问题。改革开放后,随着高层建筑、城市地下空间利用和高速公路的发展,岩土工程者的注意力较多地集中在市政工程和交通工程建设中的岩土工程问题。土木工程功能化、城市立体化、交通高速化以及改善综合居住环境,成为现代土木工程建设的特点。人口的增长加速了城市发展,城市化的进程促进了大城市在数量和规模上的急剧发展。人们将不断拓展新的生存空间,开发地下空间,向海洋扩展,修建跨海大桥、海底隧道和人工岛,改造沙漠,修建高速公路和高速铁路等。新时期我国岩土工程的发展,主要集中在以下几个方面:岩土工程问题的计算机分析、岩土工程的测试技术、岩土工程的设计计算理论、岩土工程的动力计算、环境岩土工程及区域性特殊岩土工程问题研究等。

四、岩土工程问题的计算机分析

随着计算机技术的发展,岩土工程问题计算机分析的范围和领域在不断扩大。开展岩土工程问题计算机分析研究是一个重要的研究方向。

1. 本构模型研究

自 Roscoe(1958—1963)创建剑桥模型至今,各国学者已发展了数百个本构模型,但得到工程界普遍认可的极少,严格地说尚没有。因为实际工程中土的应力—应变关系是很复杂的,具有非线性、弹性、塑性、黏性、剪胀性、各向异性等特性。同时,应力路径、强度发挥度以及岩土的状态、组成、结构等均对其有影响。因此,建立能反映各类岩土的、适用于各类岩土工程理想本构模型较为困难。开展岩土本构模型的研究有两个重要方向:一是努力建立用于解决实际工程问题的实用模型;二是为了建立能进一步反映某些岩土体应力、应变特性的理论模型。理论模型包括各类弹性模型、弹塑性模型、黏弹性模型、黏弹塑性模型、内时模型和损伤模型以及结构性模型等。它们应能较好反映岩土的某种或几种变形特性,是建立工程实用模型的基础。工程实用模型应是为某地区岩土、某类岩土工程问题建立的本构模型,它应能反映这种情况下岩土体的主要性状。用它进行工程计算分析,可以获得工程建设所需精度的分析结果。这些工作需要借助岩土工程数值计算方法。除了常用的有限元法(FEA)和有限差分法(FDM)外,离散单元法(DEM)、拉格朗日法(FLAC)、不连续变形分析方法(DDA)、流形元法(MEM)和半解析元法(SAEM)等也在岩土工程分析中得到应用。

2. 不同介质间相互作用及共同分析

岩土工程不同介质间相互作用及共同作用分析研究可以分为三个层次。①岩土材料微观层次的相互作用;土体由固、液、气三相组成。固、液、气三相间相互作用对土的工程性质有很大的影响。土体应力—应变关系的复杂性从根本上讲都与土颗粒相互作用有关。②土与复合土或土与加筋材料之间的相互作用;当天然地基不能满足建(构)筑物对地基要求时,需要进行地基加固,从而形成复合地基。复合地基是指天然地基在地基处理过程中部分土体得到增强

或被置换,或在天然地基中设计加筋材料,加固区是由基体(天然地基土体)和增强体两部分组成的人工地基。研究桩体与土体、复合地基中增强体与土体之间的相互作用,对了解桩基础和复合地基的承载力和变形特性是非常有意义的。

除此之外,地基与建(构)筑物相互作用与共同分析,已引起人们重视并取得一些研究成果,但将共同作用分析普遍应用于工程设计,为时尚早。大部分工程设计中,地基与建筑物还是分开设计计算的。现代计算技术和计算机的发展为研究地基与建(构)筑物的共同作用奠定了基础,为了了解地基与建(构)筑物之间互相作用的真实性状,本构模型等提供了良好的条件。此外,各种数值计算方法、专家系统、AutoCAD 技术和计算机仿真技术在岩土工程中应用等,都是岩土工程计算机分析的发展方向。

五、岩土工程测试技术

岩土工程测试技术不仅在岩土工程建设实践中十分重要,而且在岩土工程理论的形成和发展过程中也起着决定性的作用。理论分析、室内外测试和工程实践是岩土工程分析三个重要的方面。岩土工程中的许多理论是建立在试验基础上的,如 Terzaghi 的有效应力原理是建立在压缩试验中孔隙水压力的测试基础上的,Darcy 定律是建立在渗透试验基础上的,剑桥模型是建立在正常固结黏土和微超固结黏土压缩试验和等向三轴压缩试验基础上的。测试技术也是保证岩土工程设计的合理性和施工质量的重要手段。

岩土工程测试技术一般分为室内试验技术、原位试验技术和现场监测技术等几个方面。在原位测试方面,地基中的位移场、应力场测试,地下结构表面的土压力测试,地基土的强度特性及变形特性测试等,将会成为研究的重点。同时,虚拟测试技术也会在岩土工程测试技术中得到较广泛的应用。及时有效地利用其他学科科学技术的成果,对推动岩土工程领域的测试技术发展,起到越来越重要的作用,如电子计算机技术,电子测量技术,光学测试技术,航测技术,电、磁场测试技术,声波测试技术,遥感测试技术等方面的新的进展都有可能在岩土工程测试方面找到应用的结合点。

岩土工程问题的反分析方法,即对原位式和现场监测得到岩土工程施工过程中的各种信息进行反分析,根据反分析结果修正设计、指导施工。这种信息化施工方法被认为是合理的施工方法,是未来的发展方向。

六、岩土工程的设计计算理论

随着土木工程建设发展和岩土工程实践中新问题的不断出现,岩土工程新的设计计算理论也就相应而生,如可靠度分析理论、沉降控制设计理论。

1. 岩土工程可靠度分析

在建筑结构设计,我国已采用以概率理论为基础并通过分项系数表达的极限状态设计方法。地基基础设计与上部结构设计在这一点上尚未统一。应用概率理论为基础的极限状态设计方法是努力的方向。由于岩土工程的特殊性,岩土工程应用概率极限状态设计在技术上还有许多有待解决的问题。重要的是根据岩土工程特点积极开展岩土工程问题可靠度分析理论研究,使上部结构和地基基础设计方法尽早统一起来。

2. 按沉降控制设计理论

建(构)筑物地基一般要同时满足承载力的要求和基础沉降量(包括小于某一沉降差)的要求。当承载力满足要求后,基础沉降是否满足要求可以不验算;有二种情况:一种是承载力满足后,沉降肯定很小,可以不进行验算,例如端承桩桩基础;另一种是对变形没有严格要求,例

如一般路堤地基和砂石料等松散原料堆场地基等。也有沉降量满足要求后,承载力可以不进行验算。在这种情况下,可只按沉降量控制设计。

在深厚软黏土地基上建造建筑物,沉降量和差异沉降量控制是问题的关键。软土地区建筑地基工程事故大部分是由沉降量或沉降差过大造成的,特别是不均匀沉降对建筑物的危害最大。深厚软黏土地基建筑物的沉降量与工程投资密切相关,如何合理控制沉降量又能节省工程投资是工程中最为关注的问题。

3. 基坑围护体系的稳定和变形

随着高层建筑的发展和城市地下空间的开发,深基坑工程日益增多。基坑围护体系的稳定和变形成为重要的研究课题。基坑围护体系的稳定和变形研究包括:土压力计算、围护体系的合理形式及适用范围、围护结构的设计及优化、基坑的“时空效应”、围护结构的变形以及基坑开挖对周围环境的影响,等等。基坑工程涉及土体稳定、变形和渗流三个基本问题以及考虑土与结构的共同作用,因此是一个综合性课题,也是一个系统工程。

基坑工程区域性、特殊性很强。有的基坑工程土压力引起围护结构的稳定性是主要矛盾,有的则是土中渗流引起流土破坏是主要矛盾,还有的控制基坑周围地面变形量是主要矛盾。此外,作用在围护结构上的土压力与挡土结构的位移有关。基坑围护结构承受的土压力一般是介于主动土压力和静止土压力之间或介于被动土压力和静止土压力之间。同时,土具有蠕变性,作用在围护结构上的土压力还与作用时间有关。这些都是工程中进行深入研究的课题。

七、岩土工程的动力计算

在周期荷载或动力荷载作用下,岩土材料的强度和变形特性与静荷载作用时有许多特殊的性状。近二三十年来,土在动力荷载作用下的动力性质(包括变形特性和动强度)的研究已广泛开展。随着高速公路、高速铁路以及海洋工程的发展,需要了解周期荷载以及动力荷载作用下地基土体的性状和对周围环境的影响。与动力机器基础的动荷载有所不同,在高速公路、高速铁路以及海洋工程中,其外部动荷载是运动的,同时自身又产生振动,因此地基土体的受力状况将更复杂,土体的强度、变形特性以及土体的蠕变特性需要进一步深入的研究,以满足建设的需要。交通荷载的周期较长、自动振动频率较低,因而荷载产生的振动波的波长较长,波传播较远,影响范围也较大。研究交通荷载作用下地基动力响应计算方法,从而进一步研究交通荷载引起的荷载自身振动和对周围环境造成的影响,对实际工程具有重要学术意义和应用前景。

八、环境岩土工程及特殊岩土工程

1. 环境岩土工程研究

环境岩土工程是岩土工程与环境科学密切结合的一门新学科。它主要应用岩土工程的理论、技术和方法治理和保护环境。人类生产活动和工程建设造成许多环境公害,例如:采矿造成采空区坍塌;过量抽取地下水引起区域性地面沉降;工业垃圾、城市生活垃圾及其他废弃物,特别有毒有害废弃物污染环境;施工扰动对周围环境的影响等。另外,地震、洪水、风沙、泥石流、滑坡、地裂缝、隐伏岩溶引起地面塌陷等灾害也对环境造成破坏。上述环境问题的治理和预防给岩土工程师们提出了许多新的研究课题。随着城市化、工业化发展进程加快,环境岩土工程研究将更加重要,应从保持良好的生态环境和保持可持续发展的高度来认识,重视环境岩土工程研究。

2. 特殊岩土工程问题研究

岩土工程的发展特别要重视特殊岩土工程问题的研究,例如:库区水位上升引起周围边坡稳定问题,越江越海地下隧道中岩土工程问题,超高层建筑的超深基础工程问题,特大桥、跨海大桥超深基础工程问题,大规模地表和地下工程开挖引起岩土体卸荷变形破坏问题,等等。

综上所述,岩土工程是一门应用科学,是为工程建设服务的。工程建设中提出的问題就是岩土工程需要研究的课题。岩土工程学科发展方向与土木工程建设发展态势密切相关。土木工程建设规模、持续发展的时间、结合地域的特殊性、工程地质条件的复杂性等都对 21 世纪岩土工程发展提出了新的要求和新的挑战。

第二章 土的物理力学性质

内容提示

土是岩石经物理风化和化学风化作用的产物,是由各种大小不同的土粒按各种比例组成的集合体。本章主要讨论土的物质组成以及定性、定量描述其物质组成的方法,包括土的三相组成、土的三相指标、黏性土的界限含水率、砂土密实度和土的工程分类等。

知识要点

1. 土的组成和三相比例指标的换算。
2. 土的颗粒特性。
3. 黏性土的物理特征。
4. 无黏性土的密实度。

基本概念和基本原理

一、土的组成及三相比例指标与换算

1. 土的三相组成

(1) 土的固相

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

原生矿物是在岩浆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形成的新矿物,主要分为黏土矿物和难溶盐类。难溶盐类有 MgCO_3 和 CaCO_3 。黏土矿物的主要代表性矿物为高岭土、伊利土和蒙脱土,其中蒙脱土亲水性最强,最不稳定,而高岭土最稳定。

土中的有机质是土风化过程中,复杂腐殖质以及动植物残体在微生物作用下的产物,如泥炭等。当土中的有机物含量超过一定量时,需判断有机物含量对工程的影响。

(2) 土的液相

土的液相是指存在于土中的水。按照水与土相互作用程度的强弱,可将土中水分为结合水、结晶水和自由水。

结合水是指处于土粒表面水膜中的水。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粒表面处,水分子和水化离子排列得非常紧密;在距离土粒表面较远地方的结合水为弱结合水,弱结合水的水分子排列不如强结合水紧密。结合水不能传递静水压力。

自由水包括毛细水和重力水。毛细水不仅受到重力作用,还受到表面张力的支配,能沿着土的细孔隙上升,从潜水面上升到一定高度;重力水在重力或压力差作用下能在土中渗流,对土颗粒和结构都有浮力作用。

(3) 土的气相

土的气相是指填充在土孔隙中的气体,可分为自由气体、密闭气泡和溶解气体。根据土中是否含气体可将土分为饱和土和非饱和土。含气体的土称为非饱和土;不含气体的土即土中的孔隙全部被水占据的土称为饱和土。

· 2. 土的三相比例指标

(1) 试验指标

1) 土的密度

土的密度(ρ)是指单位体积土的质量,可用下式计算:

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

式中: m 为土的质量; V 为土的体积。

由土的质量产生的单位体积的重力(W)称为土的重度 γ ,其单位为 kN/m^3 ,由下式表示:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \rho g \quad (2-2)$$

对天然土求得的密度称为天然密度或湿密度,相应的重度称为天然重度或湿重度。

2) 土粒相对密度

土粒相对密度(也称土粒比密度、土粒比重)是指土粒的质量与同体积水在 4°C 时的质量之比,即

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

式中: ρ_s 为土粒密度; m_s 为土粒的质量; V_s 为土粒的体积; ρ_w 为水在 4°C 时的密度。

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (2-4)$$

3) 土的含水率

土的含水率(ω)是指土中水的质量与土粒质量之比,可由下式计算:

$$\omega = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% \quad (2-5)$$

式中: m_w 为土中水的质量; m_s 为土粒的质量。

(2) 换算指标

1) 土的干密度 ρ_d 、饱和密度 ρ_{sat} 和有效密度 ρ

干密度是土的颗粒质量 m_s 与土的总体积 V 之比,可由下式计算:

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (2-6)$$

土的饱和密度是当土的孔隙中全部为水所充满时的密度,即全部充满孔隙的水的质量 m_w 与颗粒质量 m_s 之和与土的总体积 V 之比,可由下式计算:

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V} \quad (2-7)$$

式中: V_v 为土的孔隙体积; ρ_w 为水的密度(一般取 10^3 kg/m^3)。

单位土体积中土粒的质量扣除同体积水的质量后,即为单位土体积中土粒的有效质量,称为土的有效密度(又称浮密度),可由下式计算:

$$\rho = \frac{m_s - V_s \rho_w}{V} \quad (2-8)$$

用干密度、饱和密度和有效密度分别乘以重力加速度 g , 则为干重度 γ_d 、饱和重度 γ_{sat} 和有效重度 γ , 可由下列式各计算:

$$\gamma_d = \rho_d g \quad (2-9)$$

$$\gamma_{sat} = \rho_{sat} g \quad (2-10)$$

$$\gamma = \rho g \quad (2-11)$$

2) 土的孔隙比 e 和孔隙率 n

土的孔隙比是土孔隙的体积 V_v 与土粒体积 V_s 之比, 可由下式计算:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2-12)$$

土的孔隙率是土中孔隙的体积 V_v 与土的总体积 V 之比, 以百分数计, 可由下式计算:

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \quad (2-13)$$

3) 土的饱和度 S_r

土的饱和度是指土中孔隙中水的体积 V_w 与孔隙体积 V_v 之比, 以百分数计, 可由下式计算:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad (2-14)$$

(3) 三相比例指标的相互换算

土的三相比例指标之间可以相互换算。根据上述三个试验指标, 可以由换算公式求得全部计算指标, 也可以用某几个指标换算其他指标。这种换算关系见表 2-1。

表 2-1 三相指标的换算关系

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

二、土的颗粒特性

1. 土的粒度成分

土的大小称为粒度。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),它可用以描述土中不同粒径土粒的分布特征。

2. 粒度成分的表示方法

(1) 表格法

表格法是以表格形式直接表达各粒组的相对含量。表格法有两种表示方法,一种以累计含量百分比表示;另一种是以粒组表示。

(2) 累计曲线法

累计曲线法是一种图示表示方法,通常采用半对数纸绘制,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重量占总土重量的百分数。

在累计曲线上,可确定描述土的级配的两个指标。

不均匀系数

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2-15)$$

曲率系数

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} d_{10}} \quad (2-16)$$

式中: d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} 分别相当于累计百分含量为 10%、30%、60% 的粒径, d_{10} 称为有效粒径; d_{60} 称为限定粒径。

不均匀系数反映大小不同粒组的分布情况,曲率系数则是描述累计曲线整体形状的指标。当 $C_u = 5$, $C_c = 1 \sim 3$ 时,称为级配良好的土;当 $C_u < 5$, $C_c = 1 \sim 3$ 时,称为级配均匀的土;当 $C_u > 5$, $C_c < 1$ 或 $C_c > 3$ 时,称为级配不良的土。

(3) 粒度成分分析方法

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。这种方法适合于粗粒土,对很细的粒组却无法分离出来,这是因为工艺上无法生产出很细的筛布。根据最新标准,筛的最小孔径是 0.075 mm。

2) 水分法(沉降分析法)

水分法是根据土粒在悬浊液中沉降的速度与粒径的平方成正比来确定各粒组的相对含量的方法。这种方法适合于细粒土。

三、黏性土的物理特征

1. 黏性土的状态与界限含水率

根据土的含水率的不同,可将土分为流动状态、可塑状态、半固体状态、固体状态等几种状态。从一种状态变到另一种状态的分界点的含水率称为分界含水率。流动状态与可塑状态间的分界含水率称为液限 ω_L ;可塑状态与半固体状态间的分界含水率称为塑限 ω_p ;半固体状态与固体状态间的分界含水率称为缩限 ω_s 。

2. 塑性指数与液性指数

黏性土可塑性的大小可用土处在可塑状态的含水率变化范围来测量,从液限到塑限的含

水率变化范围越大,土的可塑性越好,这个范围称为塑性指数 I_p ,可由下式计算:

$$I_p = \omega_L - \omega_p \quad (2-17)$$

塑性指数习惯上用不带%的数值表示。

液性指数 I_L 是一个表示天然含水率与界限含水率相对关系的指标,可用来描述土的状态,由下式计算:

$$I_L = \frac{\omega - \omega_p}{\omega_L - \omega_p} \quad (2-18)$$

液性指数越大,表示土越软。可塑状态的土的液性指数在 0 到 1 之间,液性指数大于 1 的土处于流动状态;小于 0 的土则处于固体状态或半固体状态。

《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)规定,黏性土的状态应根据液性指数 I_L 分为坚硬、硬塑、可塑、软塑和流塑,并应符合表 2-2 的规定。

表 2-2 按液性指数确定黏性土状态

I_L 值	状态
$I_L \leq 0$	坚硬
$0 < I_L \leq 0.25$	硬塑
$0.25 < I_L \leq 0.75$	可塑
$0.75 < I_L \leq 1$	软塑
$I_L > 1$	流塑

3. 塑限和液限的测定方法

塑限 ω_p 是用搓条法测定的。把塑性状态的土在毛玻璃板上用手搓条,在缓慢的、单方向的搓条过程中水分渐渐蒸发,如搓到土条直径为 3mm 左右时,断裂为若干段,则此时的含水率即为塑限 ω_p 。

液限 ω_L 可用锥式液限仪或蝶式液限仪测定,另外,还可采用黏性土液、塑限联合测定仪测出塑限 ω_p 和液限 ω_L 。

四、无黏性土的密实度

1. 相对密实度

土的孔隙比一般可以用来描述土的密实程度,但砂土的密实度并不仅仅取决于孔隙比,在很大程度上还取决于土的级配情况。

当砂土处于最密实状态时的孔隙比称为最小孔隙比 $e_{\min}$;而砂土处于最疏松状态时的孔隙比则称为最大孔隙比 $e_{\max}$ 。砂土的相对密实度 D_r 可由下式计算:

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (2-19)$$

D_r 的范围在 0~1 之间。当砂土的天然孔隙比接近于最小孔隙比时,相对密实度 D_r 接近于 1,表明土处于最密实状态;而当土的天然孔隙比接近于最大孔隙比时,则表明土处于最松散状态,其相对密实度 D_r 接近于 0。

根据砂土的密实度可将土划分为密实、中密和松散三种状态。

2. 标准贯入试验

在工程实践中,通常用标准贯入试验来划分砂土的密实度。

标准贯入试验是用规定的锤重(63.5 kg)和落距(76 cm)把标准贯入器(带有刃口的对开管,外径 50 mm,内径 35 mm)打入土中,记录贯入一定深度(30 cm)所需的锤击数的原位测试方法。标准贯入试验的贯入锤击数反映土层的松密程度,是一种简便的测试手段。

根据标准贯入锤击数可将砂土划分为密实、中密、稍密和松散四种状态。

五、土的工程分类

1. 碎石土分类

碎石土是指粒径大于 2 mm 的颗粒含量超过总质量的 50% 的土,按粒径和颗粒形状可进一步划分为漂石、块石、卵石、碎石、圆砾和角砾。

碎石土的密实度一般用定性的方法由野外描述确定,卵石的密实度可按超重型动力触探的锤击数 N_{120} 划分。

2. 砂土分类

砂土是指粒径大于 2 mm 的颗粒含量不超过总质量的 50% 且粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量超过总质量的 50% 的土。砂土可再分为 5 个亚类,即砾砂、粗砂、中砂、细砂和粉砂。

3. 细粒土分类

粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量不超过总质量的 50% 的土属于细粒土。细粒土可划分为粉土和黏性土两大类。根据塑性指数,黏性土可再划分为粉质黏土和黏土两个亚类,见表 2-3。

粉土是介于砂土和黏性土之间的过渡性土类,它具有黏性土和砂土的某些特征。根据黏粒含量,可以将粉土再划分为砂质粉土和黏质粉土。

表 2-3 细粒土分类(GB 50007—2002)

塑性指数	土的名称
$I_p > 17$	黏土
$10 < I_p \leq 17$	粉质黏土
$I_p \leq 10$	粉土

4. 按塑性图分类

塑性图以塑性指数为纵坐标,液限为横坐标,如图 2-1 所示。图中有两条经验界限,斜线称为 A 线,它的方程为 $I_p = 0.73(\omega_L - 20)$ 。它的作用是区分有机土和无机土、黏土和粉土,A 线上侧是无机黏土,下侧是无机粉土或有机土。竖线称为 B 线,其方程为 $\omega_L = 40$,其作用是区分高塑性土和低塑性土。

在 A 线以上的土分类为黏土,如果液限大于 50,称为高塑性黏土 CH,液限小于 50 的土称为低塑性黏土 CL;A 线以下的土分类为粉土,液限大于 50 的土称为高塑性粉土 MH,液限小于 50 的土称为低塑性粉土 ML。在低塑性区,如果土样处于 A 线以上,而塑性指数范围在

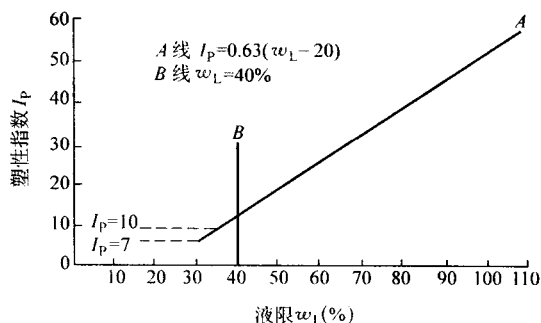


图 2-1 细粒土塑性图