



21世纪全国本科院校土木建筑类**创新型**应用人才培养规划教材

土质学与土力学

主 编 刘红军

提供电子课件

- 借鉴先进的国际工程教育理念
- 参考卓越工程师教育培养计划
- 以工程实践能力培养为核心
- 加强学生的综合能力培养



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校土木建筑类创新型应用人才培养规划教材

土质学与土力学

主 编 刘红军
副主编 韩春鹏
参 编 郭国梁 成华雄



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

前 言

本书以《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)》文件精神为指导,借鉴先进的国际工程教育理念,参考卓越工程师教育培养计划,结合大众化教育实际,以工程实践能力培养为核心,以加强综合能力培养为目标编写而成。

“土质学与土力学”是土木工程专业一门重要的专业主干课程,在土木工程专业的人才培养中起着重要的作用,同时它又是一门实践性很强的学科。特别是近30多年以来,随着我国土木建筑事业的大发展以及土力学计算理论和工程实践的不断深入,土质学与土力学的分析计算理论与应用技术发展越来越快,相应涉及的范围越来越广,积累了许多宝贵的资料。

随着我国经济、社会的快速发展,逐年加大了基础工程建设的投入,社会对土木建筑类人才需求量会逐渐增多;同时,随着我国土木工程、交通工程等相关工程的大量进行,社会对高校的相关专业学生的应用能力和实践能力越来越看重,并提出了较高的要求。为此,高等教育已逐步由培养研究型人才向培养应用型人才和复合型人才转变,以适应经济和社会发展的需要。

本书为适应应用型人才的培养目标,从实用和易用两方面入手,用较简洁易懂的文字结合图片和实例讲解知识点,本书在编写时注重理论联系实际,并遵循课程教学规律,由浅入深、循序渐进,并辅以类型丰富的习题,从而使学生的学习成果得到巩固和加强。此外,本书在编写时非常注重对学生工程实践能力的培养,每章都配有工程实例、例题及相关的试验内容。本书在编写的过程还紧密结合最新的相关规范,注重编写内容及计算方法的更新。

本书各章编写分工如下:绪论、第3章、第7章、第9章由五邑大学刘红军编写;第1章、第8章由东北林业大学韩春鹏编写;第4章、第5章、第6章由齐齐哈尔大学郭国梁编写;第2章、第10章由建材广州地质工程勘察院成华雄编写。全书由刘红军统稿。

由于作者水平有限,编写时间仓促,所以书中疏漏和不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者
2013年1月

目 录

| | | | |
|--------------------------------|----|---------------------------|-----|
| 第 0 章 绪论 | 1 | 4.2 土的自重应力计算 | 74 |
| 本章小结 | 5 | 4.3 基础底面的压力分布与计算 | 76 |
| 习题 | 5 | 4.4 地基附加应力的计算 | 79 |
| 第 1 章 土的物理性质及工程分类 | 6 | 4.5 其他条件下的地基应力计算 | 97 |
| 1.1 土的形成及特性 | 7 | 4.6 影响土中附加应力分布的因素 | 100 |
| 1.2 土的三相组成 | 12 | 本章小结 | 102 |
| 1.3 土的三相物理指标 | 13 | 习题 | 103 |
| 1.4 土的物理状态 | 19 | 第 5 章 土的压缩性与地基沉降 | |
| 1.5 土的结构与构造 | 24 | 计算 | 105 |
| 1.6 土的工程分类 | 26 | 5.1 概述 | 106 |
| 本章小结 | 31 | 5.2 土的压缩试验及压缩性指标 | 107 |
| 习题 | 31 | 5.3 地基最终沉降实用计算方法 | 115 |
| 第 2 章 黏性土的物理化学性质 | 34 | 5.4 饱和黏性土地基沉降与时间的 | |
| 2.1 键力的基本概念 | 35 | 关系 | 129 |
| 2.2 黏土矿物颗粒的结晶结构 | 36 | 本章小结 | 138 |
| 2.3 黏土颗粒的胶体化学性质 | 38 | 习题 | 139 |
| 2.4 黏性土工程性质的利用和改良 | 42 | 第 6 章 土的抗剪强度 | 142 |
| 本章小结 | 44 | 6.1 概述 | 143 |
| 习题 | 44 | 6.2 土的抗剪强度理论 | 144 |
| 第 3 章 土中水的运动规律 | 46 | 6.3 抗剪强度指标的测定方法 | 150 |
| 3.1 概述 | 47 | 6.4 饱和黏性土的抗剪强度 | 157 |
| 3.2 土的毛细性 | 47 | 6.5 无黏性土的抗剪强度 | 164 |
| 3.3 土的渗透性 | 51 | 6.6 影响抗剪强度的主要因素 | 165 |
| 3.4 二维渗流、流网及其工程应用 | 61 | 本章小结 | 170 |
| 3.5 土的冻胀性 | 66 | 习题 | 171 |
| 本章小结 | 69 | 第 7 章 土压力理论 | 173 |
| 习题 | 70 | 7.1 概述 | 174 |
| 第 4 章 土中应力计算 | 72 | 7.2 静止土压力计算 | 177 |
| 4.1 概述 | 73 | 7.3 朗肯土压力理论 | 178 |
| | | 7.4 库仑土压力理论 | 188 |
| | | 7.5 几种特殊情况下的库仑土压力 | |
| | | 计算 | 196 |

| | | | |
|----------------------------|------------|-------------------------|------------|
| 本章小结 | 202 | 9.4 按原位试验确定地基承载力 | 240 |
| 习题 | 202 | 9.5 按规范方法确定地基承载力 | 244 |
| 第 8 章 土坡的稳定分析 | 205 | 本章小结 | 252 |
| 8.1 土坡稳定分析的意义 | 206 | 习题 | 253 |
| 8.2 无黏性土坡的稳定分析 | 207 | 第 10 章 土在动荷载作用下的 | |
| 8.3 黏性土坡的稳定分析 | 208 | 力学性质 | 254 |
| 本章小结 | 225 | 10.1 概述 | 255 |
| 习题 | 226 | 10.2 土的动强度和变形特性 | 256 |
| 第 9 章 地基承载力 | 227 | 10.3 砂土振动液化 | 263 |
| 9.1 概述 | 228 | 10.4 土的压实性 | 268 |
| 9.2 临塑荷载及临界荷载计算 | 230 | 本章小结 | 274 |
| 9.3 极限承载力计算 | 233 | 习题 | 275 |
| | | 参考文献 | 276 |

第 0 章 绪 论

1. 土质学与土力学的研究对象

土质学与土力学是将土作为建筑物的地基、材料或介质来研究的一门学科，主要研究土的工程性质以及土在荷载作用下的应力、变形和强度问题，为设计与施工提供土的工程性质指标与评价方法、土的工程问题的分析计算原理，是土木工程专业的主干课程。

土质学是从工程地质学范畴里发展起来的，它是从土的成因与成分出发，研究土的工程性质的本质与机理。对土在荷载、温度及湿度等因素作用下发生的变化作出数量上的评价，并根据土的强度、变形机理提出改良土质的有效途径。

土力学是从工程力学范畴里发展起来的，它把土作为物理-力学系统，根据土的应力-应变-强度关系提出力学计算模型，用数学力学方法求解土在各种条件下的应力分布、变形以及土压力、地基承载力与土坡稳定等课题。同时根据土的实际情况评价各种力学计算方法的可靠性与适用条件。

土质学和土力学是两门关系非常密切的学科，在发展的过程中相互渗透、互相结合。在工程学科范围内，把土的微观与亚微观结构的研究和土的应力-应变-强度关系的研究结合起来，把土的变形、强度机理和土的工程性质指标结合起来，进一步说明力学现象的本质，为近代计算技术在土力学中的应用提供比较切合实际的计算模型，以解决比较复杂的工程问题。从工程的要求出发，将土质学与土力学紧密结合起来学习是有好处的，有利于定性和定量研究的结合，更全面地理解土的工程问题的特点。

2. 土质学与土力学的发展简史与现状

土质学作为一门独立学科，始于 20 世纪。早期土质学的著作如 Приклонский 的《土质学》和 Пенсов 的《黏性土的工程性质》，系统地论述了土质学的原理，为土质学的进一步发展奠定了基础，也对我国有很大的影响。近代的著作如黄文熙的《土的工程性质》和 Mitchell 的 *Fundamentals of Soil Behavior* 代表了从两个不同的角度深入研究土的工程性质所达到的新水平。

18 世纪欧洲工业革命开始开启了土力学的理论研究，使土力学理论体系逐渐形成并发展为一门独立的学科，这一阶段称为土力学的理论提高阶段。1773 年库仑 (C. A. Coulomb, 法国) 根据试验创立了砂土的抗剪强度理论，并在 1776 年发表的挡土墙土压力理论是土力学的开始。1857 年朗肯 (W. J. M. Rankine, 英国) 借助土的极限平衡分析建立了朗肯土压力理论。达西 1856 年 (Darcy, 法国) 根据对两种均匀砂土渗透试验结果提出了渗透定律。1885 年布西奈斯克 (J. Boussinesq, 法国) 提出的表面竖向集中力在弹性半无限体内部应力和变形的理论解答，至今仍在土力学有关课题中广泛使用。

20 世纪初，一些重大土木工程事故的发生，如德国的桩基码头大滑坡、瑞典的铁路坍方、美国的地基承载力问题等，对地基问题提出了新的要求，推动了土力学理论的发

展。例如普朗德尔(Prandtl, 1920年)发表了地基滑动面的数学公式。由彼德森(Peterson, 1915年)提出,以后又由费伦纽斯(W. Fellenius, 1936年)、泰勒(Taylor, 1937年)等发展了的计算边坡稳定性的圆弧滑动法等,就是这一时期的重要成果。

土力学作为一门独立的学科,一般认为是从太沙基(K. Terzaghi)总结前人的研究成果,提出了一维固结理论,并于1925年出版第一本《土力学》专著开始。太沙基把当时零散的有关定律、原理、理论等按土的特性加以系统化,形成了土力学的基本理论框架,从而使土力学成为一门独立的学科。因此,太沙基被认为是土力学的奠基人。太沙基指出土具有黏性、弹性和渗透性,按物理性质可把土分成黏土和砂土,并探讨了它们的强度机理,建立了有效应力原理,从而可真实地反映土力学的本质,使土力学确立自己的特色,成为土力学学科的一个重要指导原理,极大地推动了土力学的发展。1943年他还出版了《理论土力学》,之后与Peck合著的《工程实用土力学》是对土力学的全面总结。

土力学作为一门独立学科发展至今可以分为两个发展阶段。第一阶段从20世纪20年代到60年代,称古典土力学阶段,也是土力学快速发展阶段。例如费伦纽斯(W. Fellenius, 1927年)、泰勒(D. W. Taylor, 1937年)、毕肖普(A. W. Bishop, 1955)等建立和完善了圆弧稳定分析法。1942年B. B. 索科洛夫斯基建立了散体静力学。1948年B. A. Barron提出了砂井固结理论,1941年M. A. Biot发表了三维固结理论和动力方程,有效应力原理得到了广泛的推广应用等。1957年D. C. Drucker提出了土力学与加工硬化塑性理论,对土的本构研究起到了很大的推动作用。在本阶段,土体被视为线弹性体、刚塑性体、连续介质或分散体。在太沙基理论基础上,形成以有效应力原理、渗透固结理论、极限平衡理论为基础的土力学理论体系,研究土的强度与变形特性,解决地基承载力和变形、挡土墙土压力、土坡稳定等与工程密切相关的土力学课题,对弹塑性力学的应用也有了一定认识。在这一阶段,土力学得到了完善、充实和提高。

第二阶段从20世纪60年代开始,称为现代土力学阶段。其主要代表人物和理论有K. H. Roscoe, D. C. Fredrond等。1963年剑桥大学的K. H. Roscoe等人提出了状态边界面概念,据此创立了著名的剑桥弹塑性模型,突破了先前弹性介质模型和刚塑性模型的局限,标志土力学进入了崭新的现代发展阶段。这一阶段改变了古典土力学中把各受力阶段人为割裂开来的情况,把土的应力、应变、强度、稳定等受力变化过程统一用一个本构关系加以研究,从而更切合土的真实性状。此后几十年,土力学的研究取得了多方面的重要进展,例如:土体非线性和弹塑性本构模型研究和应用,非饱和土渗流固结变形理论与强度理论的研究(1993年D. C. Fredrond和H. Bahardjo发表了《非饱和土力学》),土的渐近破坏理论和损伤力学模型研究,砂土的液化和动力固结模型的研究,土的微观力学模型研究,土与结构相互作用研究以及数值分析与模拟方法的研究,等等。作为岩土力学界四年一届的盛会—国际土力学与岩土工程会议(1999年以前称为土力学与地基基础会议),至2009年已开了17届。1999年国际土力学与基础工程协会(ISSMFE)更名为国际土力学与岩土工程协会(ISSMGE)。

国内学者在这方面也做了不少工作,例如南京水利科学研究所提出的弹塑性模型。由于本构关系对计算参数的种类和精度要求更高,因此也推动了测试和取样技术的发展。虽然这种方法目前还未广泛在工程中应用,也无法替代简化的和经验的传统方法。但它代表土工研究的发展趋势,促使土力学发生重大变革,使土工设计和研究达到新的水平。

由于土体的复杂性,许多计算理论和公式都做了许多简化和假设。尽管这些理论尚有

不完善之处,但它仍是解决工程问题的重要依据。在长期的工程实践中发挥着不可替代的作用。从土木工程的发展和相关学科的进步考虑,国内外学者认为21世纪土力学的发展具有以下特点。

(1) 进一步汲取现代数学、现代力学的成果和充分利用计算机技术,深入研究土的非线性、各向异性、流变等特性,建立新的更符合土体特性的本构模型和计算方法。

(2) 充分考虑土和土工问题的不确定性,进行风险分析和优化决策,岩土工程的定值设计方法逐步向可靠度设计转化。

(3) 对非饱和土的深入研究,充分揭示土粒、水、气三相界面的表面现象对非饱和土力学特性的影响,建立非饱和土强度变形的理论框架。

(4) 土工测试设备和测试技术将得到新的发展。高应力、粗粒径、大应变、多因素和复杂应力组合的试验设备和方法得到发展,原位测试、土工离心试验等得到更大应用,计算机仿真成为特殊的土工试验手段,声波法、 γ 射线法、CT识别法等也将列入土工试验方法的行列。

(5) 环境土力学得到极大的重视。由开矿、抽水、各种岩土工程活动造成的地面沉降和对周围环境的影响及防治继续受到重视。污染土和污染水的性质和治理,固体废料深埋处置方法中废料、周围土介质和地下水的相互作用以及污染物的扩散规律等研究将大大加强。沙漠化、盐碱化、区域性滑坡、洪水、潮汐、泥石流、地震等大环境问题也将进入土力学的研究范畴。

(6) 土质学的研究进一步深入,用微观和细观的手段,研究和揭示岩土力学特性的本质。

(7) 人工合成材料的应用。人工合成材料在排水、防渗、滤层、加筋等方面已得到很好的应用,但设计理论和方法还很不完善,其相互作用机理的了解尚很初步,对这种复合材料的深入研究将给土力学研究增加新的内容。

3. 土质学与土力学的学习内容

尽管人们对土的性质已有了比较深入的了解,也取得了前所未有的工程应用成就。然而,土作为自然历史的产物,它的许多性质人们无法预先控制,如土的受荷历史、沉积时的自然地理环境,因此土质学与土力学还不是一门纯理论的学科。21世纪人类正面临资源和环境严峻现实的挑战,有许多问题需要土质学和土力学知识来解决,仍需要全面地深化对土的认识。从这个意义而言,土质学和土力学的主要研究内容包括土的物理性质及工程分类、黏性土的物理化学性质、土中水的运动规律、土中应力计算、土的压缩性与地基沉降计算、土的抗剪强度、土压力理论、土坡的稳定分析、地基承载力、土在动荷作用下的力学性质。也可将其分为两部分内容:第一部分是关于土的基本性质的试验、分析以及基本规律的介绍;第二部分是关于土的应力、变形、强度理论及土工问题基本分析方法的内容。

第1章土的物理性质及工程分类主要介绍土的物质组成与干湿、疏密状态的指标试验和计算,以及利用土工指标对土进行分类的方法。

第2章黏性土的物理化学性质主要讨论土粒表面与水的相互作用所引起的一系列物理化学现象及其工程意义。

第3章土中水的运动规律主要研究土的渗透特性和冻结时土中水分的迁移与积聚机理。土中水的存在是土区别于其他材料的重要因素。土中水的渗流、土的渗透破坏、水的浮力以

及土的冻胀和翻浆是工程设计与施工必须考虑的问题，也是许多工程事故的主要原因。

第4章土中应力计算主要研究在外荷载作用下，土中应力状态的变化及其实用计算方法。这种应力的变化通常是造成土体变形或强度破坏的内在原因；在沉降计算时则需要计算土中附加应力沿深度的变化。这一章为后面几章的学习提供关于应力分布的基础知识和计算附加应力的方法。

第5章土的压缩性与沉降计算主要介绍压缩性指标的试验方法和建筑物沉降计算方法。沉降的计算与控制是地基基础设计的重要内容，过大的沉降与不均匀沉降常常是影响工程安全与正常使用的主要原因。此外，还介绍了分析沉降与时间关系的饱和土固结理论。

第6章土的抗剪强度主要讨论土的极限平衡理论、土的抗剪强度指标的试验方法与指标的工程应用。土的抗剪强度是土力学的重要课题之一，包括地基承载力、土压力和边坡稳定在内的土体稳定性验算都需要正确测定与正确应用土的抗剪强度指标。

第7章土压力理论主要讨论静止、主动与被动土压力的基本概念、朗肯土压力理论和库仑土压力理论的基本原理及实用计算方法，特别在各种特殊条件下土压力的计算方法。

第8章土坡的稳定分析主要介绍均质土和层状土的土坡稳定分析的几种实用方法，讨论在各种工程条件下土坡稳定计算需要考虑的一些特殊问题。

第9章地基承载力主要讨论地基破坏的三种模式，介绍地基临界荷载和极限荷载理论公式的基本概念和实用计算表达式，同时还介绍了规范给出的确定地基承载力的实用经验方法。

第10章土在动荷载作用下的力学性质讨论了土的动强度、动模量的基本概念与试验方法，介绍饱和粉细砂土和粉土的液化机理与液化判别方法，讨论了填土压实控制的原理与压实性指标的工程应用。

4. 土质学和土力学与土木工程专业之间的关系及相关案例

从事土木工程的技术人员在工程实践中将会遇到大量的与土有关的工程技术问题。土在工程中的应用概括起来有三个方面的：①作为建筑物的地基；②作为填筑材料；③作为周围环境的介质。下面以两个典型案例说明土质学和土力学与土木工程专业之间的关系。

1) 加拿大特朗斯康谷仓

加拿大特朗斯康谷仓如图0.1所示，平面呈矩形，南北向长59.4m，东西向宽23.5m，

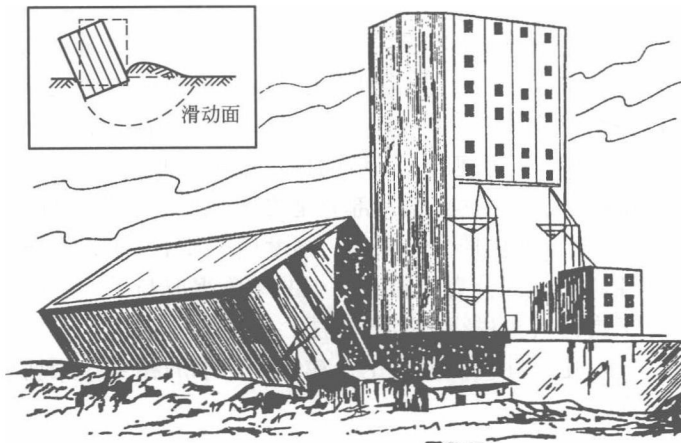


图0.1 加拿大特朗斯康谷仓地基破坏示意图

谷仓高 31m，容积 36368m^3 ，由 5 排共计 65 个圆筒形的筒仓组成。基础为钢筋混凝土筏板，厚 0.6m，埋深 3.66m。粮仓于 1911 年动工，1913 年秋完工，谷仓自重 200MN，相当于装满谷物后满载总重量的 42.5%。当年 10 月装谷子约 3200m^3 时，发现谷仓 1h 内下沉 30cm，没有引起重视，任其发展，24h 之内，谷仓西段下沉 7.3m，东段抬升 1.5m，整个谷仓倾斜 27° 。这是历史上少数几个发生地基整体失稳的著名案例之一。

2) 意大利比萨斜塔

闻名世界的意大利比萨斜塔，如图 0.2 所示，始建于 1173 年，至 1370 年最终竣工，历经近 200 年，其间几度中断又几度复工。塔身呈圆筒形，共 8 层，高 55m，全塔总重量约为 145MN。塔身建立在深厚的高压缩性土之上，地基的不均匀沉降导致塔身发生倾斜，塔顶偏离塔心垂线的水平距离达 5.27m，倾斜达 93‰，高于我国地基基础规范允许值的 18 倍之多，是典型的地基不均匀沉降引起建筑物倾斜的著名案例。

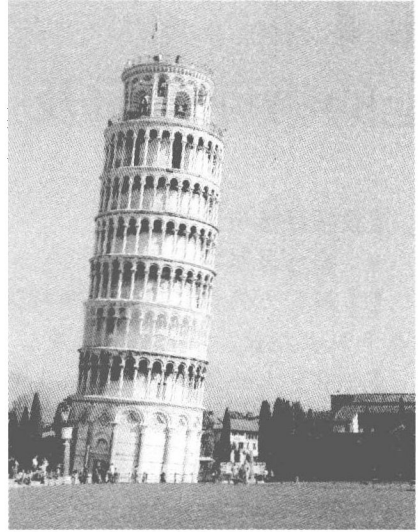


图 0.2 意大利比萨斜塔倾斜照片

本章小结

本章主要介绍了土质学与土力学的研究对象、土质学与土力学的发展简史与现状、土质学与土力学的学习内容、土质学和土力学与各专业之间的关系及相关案例。通过对本章的学习，重点要了解土质学与土力学所讲述的主要内容，理解土质学和土力学与土木工程专业之间的关系及学习土质学与土力学的目的和意义。

习 题

简答题

1. 什么是土质学？什么是土力学？两者有何区别与联系？
2. 土质学与土力学的研究内容有哪些？
3. 简述土质学与土力学的发展简史与现状。

第1章

土的物理性质及工程分类

【教学目标与要求】

● 概念及基本原理

【掌握】土的特性；土的颗粒级配；土的三相比例指标；土的界限含水率；土的塑性指数和液性指数；土的相对密度。

【理解】土的结构与构造；土的工程分类。

● 计算理论及计算方法

【掌握】土的三相比例指标计算；土的塑性指数、液性指数计算；土的相对密度计算。

● 试验

【掌握】土的密度、含水率及土粒密度测定试验；土的液塑限测定试验。

【理解】土的颗粒分析试验。



导入案例

案例：甘肃舟曲泥石流事故(图 1.1)

2010年8月7日22时许，甘南藏族自治州舟曲县突降强降雨，县城北面的罗家峪、三眼峪土体含水率迅速增大，形成泥石流下泄，由北向南冲向县城，造成沿河房屋被冲毁，泥石流阻断白龙江、形成堰塞湖。舟曲“8·8”特大泥石流灾害中遇难1434人，失踪331人。

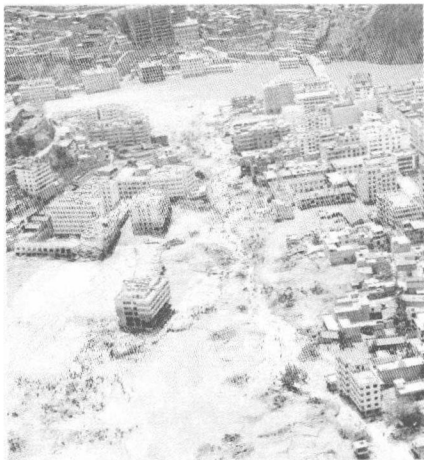


图 1.1 甘肃舟曲泥石流事故

土是由岩石经过物理风化和化学风化作用后的产物，是由各种大小不同的土粒按各种比例组成的集合体，土粒之间的孔隙中包含着水和气体，因此，土是一种三相体系。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、土的颗粒特征、土的三相比例指标、黏性土的界限含水率、砂土的密实度和土的工程分类。这些内容是学习土质学与土力学所必需的基本知识，也是评价土的工程性质以及分析与解决土的工程技术问题的基础。

1.1 土的形成及特性

1.1.1 土的形成

地球表面的整体岩石，在大气中经受长期的风化、剥蚀后形成形状不同、大小不一的颗粒，这些颗粒在不同的自然环境下进行堆积，或者经搬运和沉积而形成沉积物，即形成了土。土是一种集合体。土粒之间的孔隙中包含着水和气体，因此土是一种三相体。

岩石和土在不同的风化作用下形成不同性质的土。风化作用主要有物理风化、化学风化和生物风化。

(1) 物理风化。岩石经受风、霜、雨、雪的侵蚀以及温度、湿度变化的影响，产生不均匀的膨胀与收缩破碎，或者运动过程中因碰撞和摩擦破碎，这种只改变颗粒大小和形状，不改变矿物颗粒成分的现象，称为物理风化。只经过物理风化形成的土是无黏性土，一般也称为原生矿物。

(2) 化学风化。母岩表面破碎的颗粒受环境因素的作用而产生一系列的化学变化，改变了原来矿物的化学成分，形成新的矿物——次生矿物。经化学风化生成的土为细粒土，具有黏结力，成分主要是黏土颗粒及大量的可溶性盐类。

(3) 生物风化。由植物、动物和人类活动对岩体产生的破坏称为生物风化。

1.1.2 土的特性

1. 土粒粒组的划分

自然界的土都是由大小不同的土粒组成。土粒的大小称为粒度，通常以粒径表示。天然土体的粒度变化悬殊，大的超过几十厘米，小的只有千分之几毫米，形状也不相同。不同粒度组成的土，其性质上有很大的差别。如砂、卵石等粗粒土多为浑圆或棱角状的石英颗粒组成，粒度较粗，具有较大的透水性而无黏性；而黏土的颗粒组成主要为颗粒细小的黏土矿物，形状为片状或针状，粒度极细，具有黏滞性而透水性低。因此，工程上常把大小、性质相近的土粒划分为一组，称为粒组，划分粒组的分界尺寸称为界限粒径。粒组之间的分界线是人为划分的，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，甚至一个国家的不同部门有不同的规定。我国的粒组划分原则上是将土分为六大粒组即漂石或块石、卵石或碎石、圆砾或角砾、砂粒、粉粒和黏粒，但各行业的界限粒径有所不同，表 1-1 我国规范规定的粒组划分标准。

表 1-1 我国规范规定的粒组划分标准

| 粒组 | 《土的工程分类标准》 (GB/T 50145—2007) | | 《公路土工试验规程》 (JTG E40—2007) | | | |
|----|---------------------------------|-------------|------------------------------|-------------|----|------------|
| | 颗粒名称 | 粒径范围(mm) | 颗粒名称 | 粒径范围(mm) | | |
| 巨粒 | 漂石(块石) | >200 | 漂石(块石) | >200 | | |
| | 卵石(碎石) | 60~200 | 卵石(碎石) | 60~200 | | |
| 粗粒 | 砾粒 | 粗砾 | 20~60 | 砾(角砾) | 粗砾 | 20~60 |
| | | 中砾 | 5~20 | | 中砾 | 5~20 |
| | | 细砾 | 2~5 | | 细砾 | 2~5 |
| | 砂粒 | 粗砂 | 0.5~2 | 砂粒 | 粗砂 | 0.5~2 |
| | | 中砂 | 0.25~0.5 | | 中砂 | 0.25~0.5 |
| | | 细砂 | 0.075~0.25 | | 细砂 | 0.075~0.25 |
| 细粒 | 粉粒 | 0.005~0.075 | 粉粒 | 0.002~0.075 | | |
| | 黏粒 | ≤0.005 | 黏粒 | ≤0.002 | | |

2. 土的颗粒级配

土的颗粒大小及其组成情况，通常用土中各个不同粒组的相对含量(各粒组干土质量的百分比)来表示，称为土的颗粒级配，它可用以描述土中不同粒径土粒的分布特征。

土的颗粒级配常用的表示方法有表格法、累计曲线法和三角坐标法。

表格法是以列表形式直接表达各粒组的相对含量，表格法有两种表示方法：一种是以累计含量百分比表示的(表 1-2)；另一种是以粒组表示的(表 1-3)。累计百分含量是直接由试验求得的结果，而以粒组表示的土粒分析结果则是由相邻两个粒径的累计百分含量之差求得的。

表 1-2 颗粒分析的累计百分含量表示法

| 粒径 d_i (mm) | 粒径小于等于 d_i 的累计百分含量 p_i (%) | | |
|------------------|--------------------------------|-------|-------|
| | 土样 A | 土样 B | 土样 C |
| 10 | — | 100.0 | — |
| 5 | 100.0 | 75.0 | — |
| 2 | 98.9 | 55.0 | — |
| 1 | 92.9 | 42.7 | — |
| 0.50 | 76.5 | 34.7 | — |
| 0.25 | 35.0 | 28.5 | 100.0 |
| 0.10 | 9.0 | 23.6 | 92.0 |

(续)

| 粒径 d_i (mm) | 粒径小于等于 d_i 的累计百分含量 p_i (%) | | |
|------------------|--------------------------------|------|------|
| | 土样 A | 土样 B | 土样 C |
| 0.075 | — | 19.0 | 77.6 |
| 0.010 | — | 10.9 | 40.0 |
| 0.005 | — | 6.7 | 28.9 |
| 0.001 | — | 1.5 | 10.0 |

表 1-3 颗粒分析的粒组表示法

| 粒组 (mm) | 土样 A | 土样 B | 土样 C |
|-------------|------|------|------|
| 10~5 | — | 25.0 | — |
| 5~2 | 1.1 | 20.0 | — |
| 2~1 | 6.0 | 12.3 | — |
| 1~0.5 | 16.4 | 8.0 | — |
| 0.5~0.25 | 41.5 | 6.2 | — |
| 0.250~0.100 | 26.0 | 4.9 | 8.0 |
| 0.100~0.075 | 9.0 | 4.6 | 14.4 |
| 0.075~0.010 | — | 8.1 | 37.6 |
| 0.010~0.005 | — | 4.2 | 11.1 |
| 0.005~0.001 | — | 5.2 | 18.9 |
| <0.001 | — | 1.5 | 10.0 |

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)表示某一粒径大小，纵坐标表示小于某一粒径的土粒的百分含量。表 1-2 中的三种土样用累计曲线法表示 (图 1.2)。

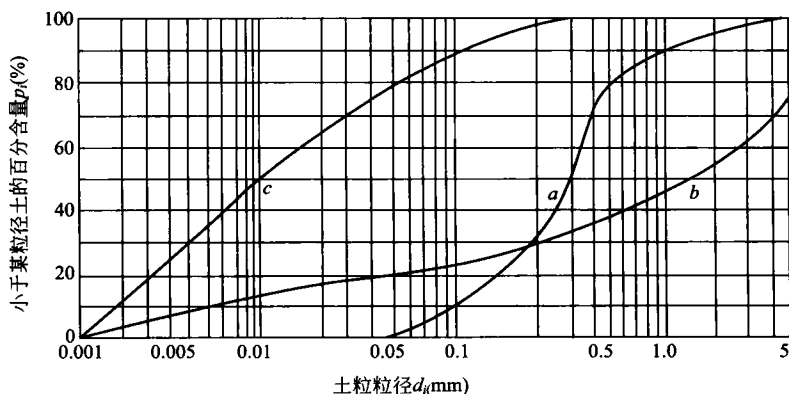


图 1.2 土的累计曲线

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

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

曲率系数

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

式中： d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} ——分别相当于累计百分含量为 10%、30%、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 反映的是大小不同粒组的分布情况， $C_u < 5$ 的土称为匀粒土，级配不良； C_u 越大，说明粒组分布范围越广，但如果 C_u 过大，可能缺失中间粒径，属不连续级配，故需同时用曲率系数 C_c 来评价。曲率系数 C_c 是描述累计曲线整体形状的指标，工程中，当同时满足 $C_u \geq 5$ 和 $C_c = 1 \sim 3$ 时，土的级配良好，为不均匀土。

三角坐标法也是一种图示法，利用等边三角形内任意一点至三个边的垂直距离恒等于三角形之高 H 的原理，用以表示组成土的三个粒组的相对含量，即图中的三个垂直距离可以确定一点的位置。三角坐标法只适用于划分为三个粒组的情况，如图 1.3 所示土样 C 被划分为砂土、粉土和黏土粒组，图中过 m 点分别向三条边做平行线，得到 m 坐标分别为：黏粒含量 28.9%，粉粒含量 48.7%，砂粒含量 22.4%，三粒组之和为 100%。

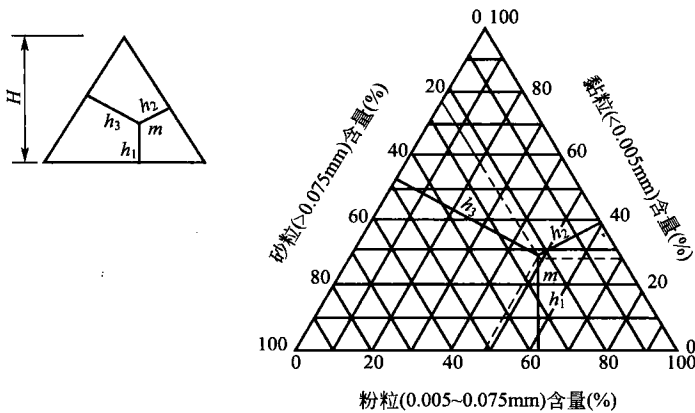


图 1.3 三角坐标图

上述三种土粒组成的表示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各粒组的含量，但很难直观比较大量土样之间颗粒级配的差别。累计曲线法能用一条曲线表示一种土的颗粒组成，而且可以在一张图上同时表示多个土样的颗粒组成，因此能直观地比较各土样之间的颗粒级配状况，目前在土的颗粒分析试验成果整理中大多采用累计曲线法。三角坐标法能用一点表示一种土的颗粒组成，在同一张图内也可以同时表示多个土样的颗粒组成情况，便于进行土料的级配设计，但只能进行三个粒组成分的比较。三角坐标图中不同的区域表示土的不同组成，因而还可以用来确定颗粒级配分类的土名。

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

3. 土的颗粒分析方法

土的颗粒分析可采用土的颗粒分析试验方法，简称筛分试验，它可分为筛分析方法（简称筛分法）和沉降分析法。对于粒径大于 0.075mm 的土粒可采用筛分法，而对于粒径小于 0.075mm 的土粒则必须用沉降分析法来分析土的颗粒组成。

筛分法是用一套不同孔径的标准筛把各种粒组分离出来，与建筑材料的粒径级配筛分石料试验一样的，但很细的粒组无法直接用筛分试验分离出来。我国现行标准，最小孔径的筛孔为 0.075mm，相当于美国 ASTM 标准的 200 号筛即在 1 平方英寸（1 英寸 = 25.1mm 面积上有 200 个筛孔），这是在国际上比较通用的标准。在采用最小孔径的筛进行筛分试验时应当采用水筛的方法，如此才能把联结在一起的细颗粒分开。通过 0.075mm 的土粒用筛分法则无法再加以细分，需要采用沉降分析法进行颗粒分析。将筛分法和沉降分析法的结果综合在一起，就可以得到完整的以累计百分含量表示的土的颗粒级配，见表 1-2。

沉降分析法依据司笃克斯(stokes)定律进行测定。当土粒在液体中靠自重下沉时(图 1.4)，较大的颗粒下沉较快，而较小的颗粒下沉较慢。一般认为，对于粒径为 0.2~0.002mm 的颗粒，在液体中靠自重下沉时做等速运动，这符合司笃克斯定律。但实际上，由于土粒并不是球形颗粒，因此采用司笃克斯定律计算得到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的直径，称为水力直径。

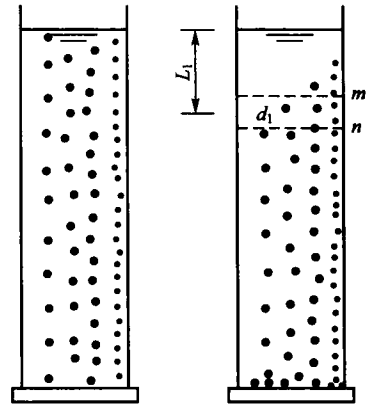


图 1.4 土粒在悬液中的沉降

沉降分析测定悬液密度的方法有两种，即密度计法（比重计法）和移液管法。密度计法是将一定量的土样（粒径小于 0.075mm）放在量筒中，然后加纯水，经过搅拌，使土的大小颗粒在水中均匀分布，制成一定量的均匀浓度的土悬液（1000mL），静悬液，让土粒沉降，在土粒下沉过程中，用密度计测出在悬液中对应于不同时间的不同悬液密度，根据密度计读数和土粒的下沉时间，就可以计算出小于某一粒径的颗粒占土样的百分数。移液管法是根据司笃克斯定律计算出某粒径的颗粒自液面下沉到一定深度所需要的时间，并在此时间间隔用移液管自该深度处取出固定体积的悬液，将取出的悬液蒸发后称干土质量，通过计算此悬液占总悬液的比例来求得此悬液中干土质量占全部试样的百分数，具体试验方法可见有关试验标准。

4. 土粒的形状

土粒的形状是多种多样的，卵石接近于圆形而碎石具有颇多棱角；砂是粒状的而黏土颗粒大多是扁平的。土粒形状对于土的密实度和土的强度有显著影响，棱角状的颗粒互相嵌挤咬合形成比较稳定的结构，强度较高；而磨圆度好的颗粒之间容易滑动，土体的稳定性比较差。

土粒的形状与土的矿物成分有关，也与土的成因条件及地质历史有关。云母是薄片状而石英砂却是颗粒状的；未经长途搬运的残积土的颗粒大多呈棱角状，而在河流下游沉积的颗粒大多磨圆度较高。

描述土粒的形状一般用肉眼观察鉴别的方法，或借助电子显微镜扫描照片采用计算机

图像处理的方法研究土粒的几何参数；还有用体积系数和形状系数描述土粒的形状，这些指标只能用于定性的评价。

体积系数 V_c 。

$$V_c = \frac{6V}{\pi d_m^3} \quad (1-3)$$

式中： V ——土粒体积(mm^3)；

d_m ——土粒的最大粒径(mm)。

V_c 越大，土粒越接近于圆形。圆球状土粒的 $V_c = 1$ ；立方体土粒的 $V_c = 0.37$ ；棱角状土粒的 V_c 则更小。

形状系数 F

$$F = \frac{AC}{B^2} \quad (1-4)$$

式中： A 、 B 、 C ——土粒的最大、中间和最小粒径。

1.2 土的三相组成

土是由固体颗粒(固相)、液体(液相)、气体(气相)三部分组成的三相体。固体部分为土粒，由矿物颗粒或有机质组成，构成土的骨架。骨架间有许多孔隙，为水和气体所填充。这三个组成部分本身的性质及它们之间的比例关系和相互作用决定土的物理性质。

土的三相组成比例并不是恒定的，它随着环境的变化而变化。土的三相组成比例不同，土的状态和工程性质也随之各异。当土中只有固体和气体时，液相为零，土为干土，此时黏土呈坚硬状态，砂土呈松散状态；当土中三相都存在时，土体属于非饱和土，此时黏土多为可塑状态；当土体只含有固体和液体时，土体为饱和土。粉细砂或粉土遇地震作用，可能产生液化，黏土地基受到建筑荷载作用发生沉降需几年甚至几十年才能稳定。

1.2.1 土中固体颗粒

土的固相物质包括无机矿物颗粒和有机质，是构成土的骨架最基本的物质。土中的无机矿物成分又可以分为原生矿物和次生矿物两大类。

原生矿物是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化学风化作用后所形成的新矿物，如三氧化二铝、三氧化二铁、次生二氧化硅、黏土矿物以及碳酸盐等。次生矿物按其与水的作用程度可分为易溶的、难溶的和不可溶的，次生矿物的水溶性对土的性质有着重要的影响。黏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，土的工程性质也随之不同。

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，有些矿物分解成为次生的黏土矿物。黏土矿物是很细小的扁平颗粒，表面具有极强的与水相互作用的能力，颗粒越细，表面积越大，亲水的能力就越强，对土的工程性质的影响也就越大。