



高职高专路桥类专业规划教材

GAOZHI GAOZHUAN LUQIAOLEI ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI

土力学 地基与基础

胡雪梅 吕玉梅 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



高职高专路桥类专业规划教材

GAOZHI GAOZHUAN LUQIAOLEI ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI

土力学 地基与基础

主 编 胡雪梅 吕玉梅
副主编 任俐璇
参 编 杨 蘅 徐静涛
主 审 杨 平



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

本教材编写过程中兼顾了高职高专学生能力培养的需要,以必需、够用为度。内容包括土力学和地基基础两部分。土力学部分包括土的物理性质及工程分类、土中水的运动规律、土中应力计算、基础沉降计算、地基土抗剪强度、土压力计算与土坡稳定分析。地基基础部分着重学习运用土力学理论解决工程设计中的地基基础问题,内容包括天然地基上刚性浅基础、桩基础及其他深基础、地基处理等内容。土工试验是本课程的重要教学环节,为了加深对土质性能的了解,教材安排了土工试验指导,规范地描述了相关土工试验的知识。

本教材适用于路桥专业的高职高专学生及相关技术应用人员。

图书在版编目(CIP)数据

土力学地基与基础/胡雪梅,吕玉梅主编. —北京:中国电力出版社,2009
高职高专路桥类专业规划教材
ISBN 978-7-5083-8364-4

I. 土… II. ①胡…②吕… III. ①土力学-高等学校:技术学校-教材②地基-高等学校:技术学校-教材③基础工程-高等学校:技术学校-教材 IV. TU4

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第005229号

中国电力出版社出版发行

北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>

责任编辑:王晓蕾 关童 责任印制:陈焊彬 责任校对:李楠

北京市同江印刷厂印刷·各地新华书店经售

2009年5月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·13.25印张·331千字

定价:28.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

本社购书热线电话(010-88386685)

前 言

《土力学地基与基础》是道路桥梁工程技术及相关专业的一门技术基础课，课程具有较强的实践性。本教材着重论述土力学和地基基础的基本概念、基本原理和分析计算方法，同时力求突出训练学生的实践技能，加强对学生的基础知识和基本能力的培养，提高学生的综合素质。

教材包括土力学和地基基础两部分内容，土力学部分内容包括土的物理性质及工程分类、土中水的运动规律、土中应力计算、基础沉降计算、地基土抗剪强度、土压力计算与土坡稳定分析；地基基础部分着重学习运用土力学理论解决工程设计中的地基基础问题，内容包括天然地基上刚性浅基础、桩基础及其他深基础、地基处理等内容。土工试验是本课程的重要教学环节，为了加深对土质性能的了解教材安排了土工试验指导，规范地描述了相关土工试验的知识。

本教材针对路桥专业的高职高专学生及相关技术应用人员而编写。编写过程中兼顾了高职高专学生能力培养的需要，根据路桥专业的职业岗位要求从内容的广度和深度进行把握，以必需、够用为度；同时考虑到教材内容的稳定性与超前性，以“土体、地基与基础一体化”的宏观思维为指导，介绍成熟稳定的技术和理论知识，全面反映了公路行业已颁布实施的最新规范标准，如《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG D63—2007)、《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)等。教材的编写体现了实用、新颖、鲜活、可读的特点，内容上以问题、任务为切入点，在具体土工问题的分析解决策略中展开基本知识和原理。在每一章的开头，提出本章知识要点和学习要求，单元结束后提供本章小结、思考题和习题，便于学生自学与练习。教材在最后一章安排了公路土工试验检测内容，强调了理论与实训教学的一体化和对学生试验技能的培养。

本书第2章、第9章和第11章由南京交通职业技术学院胡雪梅编写，第1章、第3章和第7章由山东交通职业学院任俐璇编写，第4章和第10章由石家庄铁路职业技术学院吕玉梅编写，第5章和第6章由南京交通职业技术学院杨衢编写，第8章由吉林交通职业技术学院徐静涛编写。全书由胡雪梅统稿，南京林业大学土木工程学院杨平教授主审。

由于作者水平有限，书中错误与不妥之处在所难免，敬请读者提出宝贵意见，以便改正。

编 者

目 录

前 言

| | |
|---------------------|----|
| 第1章 绪论 | 1 |
| 1.1 土力学与地基基础的概念 | 1 |
| 1.2 本课程的任务与学习要求 | 2 |
| 1.3 本学科的发展简介 | 2 |
| 第2章 土的物理性质及工程分类 | 4 |
| 2.1 土的三相组成和土的结构 | 4 |
| 2.2 土的粒组和颗粒级配 | 7 |
| 2.3 土的物理性质指标 | 9 |
| 2.4 土的物理状态指标 | 13 |
| 2.5 土的击实性 | 15 |
| 2.6 土的工程分类 | 18 |
| 本章小结 | 24 |
| 复习思考题 | 25 |
| 习题 | 25 |
| 第3章 土中水的运动规律 | 27 |
| 3.1 土的毛细性 | 27 |
| 3.2 土的渗透性 | 29 |
| 3.3 土在冻结过程中水分的迁移和积聚 | 35 |
| 本章小结 | 37 |
| 复习思考题 | 38 |
| 习题 | 39 |
| 第4章 土体中的应力 | 40 |
| 4.1 概述 | 40 |
| 4.2 自重应力的计算 | 40 |
| 4.3 基底压力计算 | 42 |
| 4.4 附加应力的计算 | 45 |
| 本章小结 | 52 |
| 复习思考题 | 52 |
| 习题 | 52 |
| 第5章 土的压缩性及变形计算 | 54 |
| 5.1 土的压缩性 | 54 |
| 5.2 地基最终沉降量计算 | 60 |
| 5.3 饱和土体渗透固结的概念 | 68 |

| | |
|-------------------------------|------------|
| 本章小结 | 72 |
| 复习思考题 | 73 |
| 习题 | 73 |
| 第6章 土的抗剪强度与地基承载力 | 74 |
| 6.1 概述 | 74 |
| 6.2 土的强度理论与强度指标 | 74 |
| 6.3 强度指标的测定方法 | 77 |
| 6.4 地基承载力 | 81 |
| 本章小结 | 90 |
| 复习思考题 | 90 |
| 习题 | 90 |
| 第7章 土压力与土坡稳定 | 91 |
| 7.1 概述 | 91 |
| 7.2 静止土压力计算 | 92 |
| 7.3 朗金土压力理论 | 94 |
| 7.4 库伦土压力理论 | 100 |
| 7.5 土坡稳定分析 | 107 |
| 本章小结 | 109 |
| 复习思考题 | 110 |
| 习题 | 110 |
| 第8章 天然地基上刚性浅基础 | 111 |
| 8.1 概述 | 111 |
| 8.2 基础埋置深度的选择 | 116 |
| 8.3 刚性浅基础尺寸的拟定 | 118 |
| 8.4 地基与基础的验算 | 120 |
| 8.5 天然地基刚性浅基础的施工 | 128 |
| 本章小结 | 132 |
| 复习思考题 | 132 |
| 习题 | 133 |
| 第9章 桩基础及其他深基础 | 134 |
| 9.1 桩基础概述 | 134 |
| 9.2 单桩容许承载力的确定 | 138 |
| 9.3 基桩内力和位移计算 | 146 |
| 9.4 桩基础设计计算步骤 | 151 |
| 9.5 桩基础的施工 | 155 |
| 9.6 其他深基础简介 | 161 |
| 本章小结 | 164 |
| 复习思考题 | 165 |
| 习题 | 165 |

| | |
|--------------------------------|-----|
| 第 10 章 地基处理 | 167 |
| 10.1 软弱地基处理概述 | 167 |
| 10.2 换土垫层法 | 169 |
| 10.3 挤密压实法 | 171 |
| 10.4 排水固结法 | 175 |
| 10.5 高压喷射注浆法 | 178 |
| 10.6 特殊土地基及其处理 | 180 |
| 本章小结 | 182 |
| 复习思考题 | 185 |
| 第 11 章 土工室内试验 | 186 |
| 11.1 土的三项基本物理性质指标测定 | 186 |
| 11.2 界限含水量试验 (液限塑限联合测定法) | 190 |
| 11.3 击实试验 | 193 |
| 11.4 土的固结试验 (快速单轴固结仪法) | 198 |
| 11.5 直接剪切试验 (黏质土的快剪试验) | 201 |
| 本章小结 | 205 |
| 复习思考题 | 205 |
| 参考文献 | 206 |

第1章 绪 论

1.1 土力学与地基基础的概念

土是一种天然的地质材料,它是由地壳表层的岩石经过风化、搬运和沉积过程后形成的。由于其形成年代、生成环境及物质成分不同,工程特性也复杂多变。例如我国沿海及内陆地区的软土,西北、华北等地区的黄土,高寒地区的永冻土以及分布广泛的红黏土、膨胀土和杂填土等,其性质各不相同。因此,在建筑物设计前,必须充分了解、研究建筑场地相应土层的成因、构造、地下水情况、土的工程性质、是否存在不良地质现象等,对场地的工程地质条件作出正确的评价。

土力学是利用力学的基本原理和土工测试技术,研究土的物理性质以及受外力后发生变化时土的应力、变形、强度和渗透特性的一门学科,即是研究土的工程性质和在力系作用下土体性状的学科。一般认为,土力学是力学的一个分支,但由于土具有复杂的物理成因和工程特性,因此目前在解决土工问题时,尚不能像其他力学学科一样具备系统的理论和严密的数学公式,而必须借助经验、现场试验以及室内试验以进行理论计算。所以,土力学是一门强烈依赖于实践的学科。

所有的建筑物都建造在一定的地层(土层或岩层)上。通常把直接承受建筑物荷载影响的那一部分地层称为地基。未经过人工处理就可以满足设计要求的地基称为天然地基。如果地基软弱,其承载力不能满足设计要求时,则需对地基进行加固处理,例如采用换土垫层、深层密实、排水固结、化学加固、加筋土技术等方法进行处理,称为人工地基。

基础是将各种荷载传递给地基的建筑物的下部结构(图1-1),一般应埋入地下一定的深度,进入较好的地层。根据基础的埋置深度不同可分为浅基础和深基础。通常把埋置深度不大(3~5m),只需经过挖槽、排水等普通施工程序就可以建造起来的基础称为浅基础;反之,若浅层土质不良,必须把基础埋置于深处的好地层时,就得借助于特殊的施工方法,建造各种类型的深基础(如桩基、墩基、沉井和地下连续墙等)。

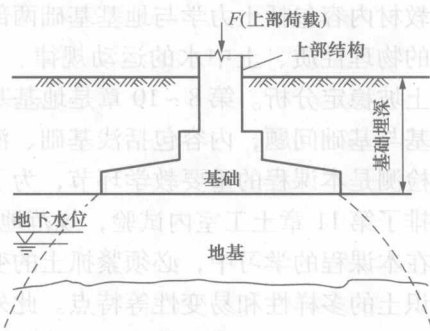


图1-1 地基及基础示意图

地基与基础受到各种荷载作用后,将产生一定的应力和变形,为保证结构物的正常使用和安全,地基与基础必须具有足够的强度和稳定性,变形也应该在容许的范围内。根据地基土的具体情况、上部结构的要求和荷载特点,选用合适的基础类型,并合理地进行基础设计与施工,是我们应该重点解决的问题。

地基与基础是建筑物的根本,统称为基础工程,其勘察、设计和施工质量的好坏将直接

影响到建筑物的安危、经济和正常使用。由于基础工程是在地下或水下进行,因此施工难度大。在桥梁工程中,基础工程造价占总造价的比重大。当采用深基础或人工地基时,其造价和工期所占的比例更大。此外,基础工程为建筑的隐蔽工程,一旦失事,不仅损失巨大,且补救十分困难,因此地基与基础的设计与施工十分重要。

在道路与桥梁的工程实践中存在着大量的与土有关的工程技术问题。道路工程中,土是修筑路堤的基本材料,同时它又是支承路堤的地基。路堤的临界高度和边坡坡度与土体的抗剪强度和土坡稳定性有关。为了获得具有一定强度和良好水稳定性的路堤,需要采用压实的施工方法,其施工质量控制依赖于土的击实特性;挡土墙设计中需要进行土压力的计算。随着高速公路建设的突飞猛进,对路基的沉降控制提出了很高的技术要求,研究土的压缩性与沉降和时间的关系是解决问题的关键。土基的冻胀和翻浆在我国的北方地区是非常突出的问题,防治冻害需要研究土中水的运动规律。土质改良后的稳定土是目前广泛运用的基层材料,还有各种软土地基的处理都是建立在土力学基础之上的。

在桥梁工程中,基础工程造价高,经济、合理的桥梁基础设计需要依靠于土力学基本理论的支持;对于超静定结构的大跨度桥跨结构,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;软土地区高速公路建设中的“桥头跳车”是影响工程正常使用和技术难题,这些问题均涉及基础的沉降、填土的压实控制和软基的加固处理等知识。

1.2 本课程的任务与学习要求

“土力学地基与基础”是道路与桥梁专业的主干课程之一,课程内容涉及工程地质学、结构设计和施工等多个学科领域,内容广泛,综合性、实践性较强。课程的任务是通过学习土的应力、变形、强度和地基基础设计计算,掌握土力学基本原理与土工测试技术,学习本课程不仅为学习其他专业课打下基础,更是为今后从事路桥专业技术工作,解决有关地基与基础工程技术问题奠定良好的基础。

教材内容包括土力学与地基基础两部分。第2~7章是土力学的基本理论部分,内容包括土的物理性质、土中水的运动规律、土中的应力、变形性质、地基土的抗剪强度和土压力、土坡稳定分析。第8~10章是地基基础内容,主要学习运用土力学理论解决工程设计中的地基与基础问题,内容包括浅基础、深基础、软弱地基及特殊土地基的处理方法等内容。试验检测是本课程的重要教学环节,为了加深了解土质的性能和掌握土工试验检测方法,教材安排了第11章土工室内试验,规范地描述了相关土工试验的知识。

在本课程的学习中,必须紧抓土的变形、强度和稳定性问题这一重要的线索,并特别注意认识土的多样性和易变性等特点。此外,尚应掌握有关的土工试验技术及地基勘察技能,对建筑场地的工程地质条件作出正确的评价,才能运用土力学的基本知识去正确解决地基基础中的疑难问题。因此,在学习时需要注意理论联系实际,提高自己分析问题和解决问题的能力。

1.3 本学科的发展简介

由于生产的发展和生活中的需要,人类很早就已创造了自己的地基基础工艺。我国的都

江堰水利工程、举世闻名的万里长城、隋朝南北大运河、黄河大堤、赵州石拱桥以及遍布全国各地的宏伟壮丽的宫殿和寺院等，都是由于奠基牢固，即使经历了无数次的强烈地震、强风都安然无恙。由于当时生产力发展水平的限制，“土力学”还未能成为系统的科学理论，直到18世纪中叶，人们对土在工程建设方面的特性，尚停留在感性认识阶段。18世纪工业革命以后，大规模的城市建设和水利、铁路的兴建，大大促进了土力学理论的产生和发展。1773年，法国库伦根据试验，创立了著名的土的抗剪强度公式和土压力理论；1857年，英国朗金通过不同的假设，提出了另一种土压力理论；1885年，法国布辛尼斯克求得了半无限弹性体在垂直集中力作用下，应力和变形的理论解答；1922年，瑞典费伦纽斯为解决铁路塌方，研究出土坡稳定分析法。这些理论和方法，至今仍在广泛的使用。1925年，美国科学家泰沙基发表土力学专著，至此土力学成为一门独立的学科。1936年以来，已召开了十多届国际土力学和基础工程会议，涌现了大量论文、研究报告和技术资料，很多国家定期出版土工杂志。世界各地也都召开了类似的专业会议，总结和交换本学科的研究成果。

近60年来，随着我国社会的大发展，土力学地基基础学科经历了迅速的发展。全国各地有关生产、科研单位和高等院校总结实践经验，开展现场测试、室内试验和理论研究，在解决工程实践问题的同时也为土力学的理论研究作出了突出贡献。近年来，世界各地高土坝（坝高大于200m）、高层建筑与核电站等巨型工程的兴建和强烈地震的发生，促使土力学进一步发展。有关单位积极研究土的本构关系、土的弹塑性及黏弹性理论和土的动力特性。同时，各单位研制成功了各种各样的勘察、试验与地基处理的设备，如自动记录的静力触探仪、现场孔隙水压力仪、大型三轴仪、振动三轴仪、真三轴仪、流变三轴仪、深层搅拌器、塑料排水插板机等，为土力学研究和地基加固提供了良好的条件。随着我国基础建设的向前发展，对地基基础要求日益提高，我国土力学地基与基础学科也必将得到更新、更大的发展。

第2章 土的物理性质及工程分类

● 本章的知识要点

1. 了解土的三相组成，掌握土的粒组和颗粒特征，明确粒组划分和判断土级配好坏的标准。
2. 定义土的物理性质指标，学会物理性质指标的换算；描述土的物理状态指标，学会用指标来判断土的物理状态。
3. 描述土的击实性，定义压实度指标，说明土击实性的影响因素。
4. 描述《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)和《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG D63—2007)对土的工程分类。

2.1 土的三相组成和土的结构

地球表层的整体岩石，在大气中经受长期的风化作用后形成形状不同、大小不一的颗粒，这些颗粒在不同的自然条件下堆积或经过搬运沉积，即形成通常所说的土。因此，可以说土是由各种岩屑、矿物颗粒（称为土粒）组成的松散堆积物，它是由各种大小不同的土粒混杂组成的集合体。同时，它又是一种分散体，是由土的固体颗粒（固相）、存在于土粒间孔隙中的水（液相）和空气（气相）构成的三相体系。由于三相性质的差异，三相物质的相对比例不同及三相间相互作用，共同反映了土的物理性质和物理状态的不同。而描述土的物理性质及状态的指标，是进行各种土的分类和确定土的工程性质的重要依据。

2.1.1 土的三相组成

土由固相、液相和气相三部分组成。固相部分即为土粒，由矿物颗粒或有机质组成，构成土的骨架；液相部分为水及其溶解物；气相部分为空气和其他气体，如土中孔隙全部被水充满时，称为饱和土；孔隙中仅含空气时，称为干土。饱和土和干土都是两相体系。一般在地下水位以上和地面以下一定深度内的土的孔隙中兼含空气和水，此时的土体属三相体系，称湿土。

1. 土的矿物成分和有机质

(1) 土的矿物成分。土粒是组成土的最主要部分。土粒的矿物成分是影响土的性质的重要因素。矿物成分按成因可分为两大类：

1) 原生矿物。是岩石经过物理风化作用形成的碎屑物，如石英、长石、云母等。

2) 次生矿物。岩石经化学风化作用而形成的新矿物成分，其中数量最多是黏土矿物。常见的黏土矿物有高岭石、蒙脱石、伊利石。石英、长石是砂、砾石等无黏性土的主要矿物成分，呈粒状。黏土矿物是组成黏性土的主要成分，颗粒极细，呈片状或针状，具有高度的分散性和胶体性质，其与水相互作用形成黏性土的一系列特性，如可塑性、膨胀性、收缩

性等。

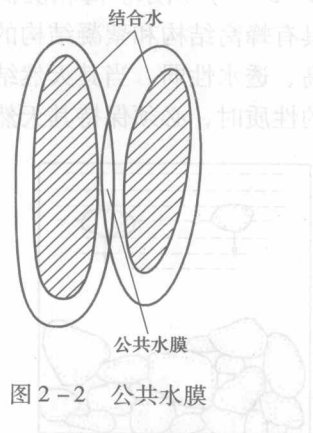
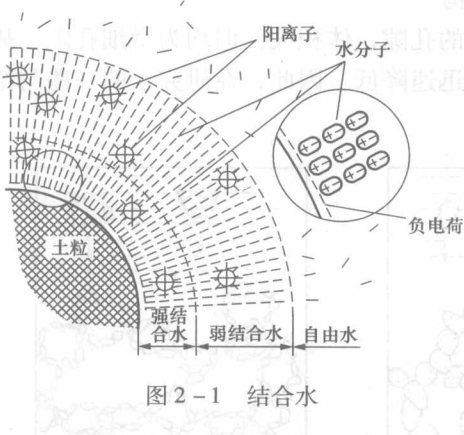
(2) 土中的有机质。在岩石风化以及风化产物搬运、沉积过程中,常有动物、植物的残骸及其分解物质参与沉积,成为土中的有机质。有机质易于分解变质,故土中有机质含量过多时,将导致地基或土坝坝体发生集中渗流或不均匀沉降。因此,在工程中常对土料的有机质含量提出一定的限制,筑坝土料一般不宜超过5%,灌浆土料小于2%。

2. 土中的水

土孔隙中的液态水,根据它与土粒表面的相互作用情况,主要分为两种类型:结合水和自由水。

(1) 结合水。结合水是指附着于土粒表面成薄膜状的水。一般情况下,土粒表面大多带有负电荷,并在周围形成静电引力场,吸引着周围极性水分子(因水分子为极性结构,故称极性水分子)和水化阳离子,如图2-1所示。紧靠土粒表面,吸附力高达几千千帕的结合水称强结合水,其性质接近于固体,密度很大,不能传递静水压力。在强结合水外围,吸附力稍低的一层结合水称弱结合水。它的水膜厚度稍大,故占结合水的绝大部分。但它仍不能传递静水压力,只能以水膜形式由厚处向薄处缓慢移动。弱结合水对黏性土的影响最大。

由于结合水的存在,细颗粒,特别是黏粒之间将形成公共水膜(图2-2),从而使土粒间产生一定的联结,这种联结随土的湿度而变化。当土的湿度减小,水膜变薄,相邻土粒彼此吸引力加强;反之,当湿度提高,水膜增厚时,颗粒将被挤开,以致不存在公共水膜而失去联结。这种水膜联结,一般认为是黏性土具有黏性、可塑性和强度的主要原因。



(2) 自由水。土孔隙中除了结合水以外的水都是自由水,它包括毛细水和重力水。

1) 毛细水。受土粒的分子引力以及水与空气界面的表面张力而存在,并运动于毛细孔隙中的水。一般存在于地下水位以上,由于表面张力作用,地下水沿着土的毛细通道逐渐上升,形成毛细水上升带。毛细水上升高度和速度决定于土的孔隙大小和形状、粒径和水的表面张力等。一般来说,卵石上升高度接近于零,砂土数十厘米,黏性土可达数百厘米。

2) 重力水。受重力作用而运动的水,它对土产生浮力,使土的重度减少;渗透水流能使土产生渗透力,使土引起渗透变形;还能溶解土中的水溶盐,使土的强度降低,压缩性增大。

3. 土中气体

土中的气体存在于土孔隙中未被水所占据的部分,包括封闭气体与大气相连通的气体。与大气连通的气体受外力作用时,易被挤出,对土的工程性质影响不大。封闭气体多存在于黏性土中,不易逸出,使土的渗透性降低、弹性与压缩性增大,所以封闭气体对土的性质有较大的影响。

2.1.2 土的结构与构造

1. 土的结构

很多试验资料表明,同一种土,原状土和重塑土样的力学性质有很大差别。这就是说,土的结构和构造对土的性质有很大的影响。土的结构是指土中颗粒排列的状况,与土的矿物成分、颗粒形状和沉积条件有关,主要有以下三种基本类型:

(1) 单粒结构。在沉积过程中,较粗的土粒互相支承并达到稳定,形成单粒结构如图 2-3 (a) 所示。单粒结构为碎石土和砂类土的结构特征。单粒结构可以是疏松的,也可以是紧密的。就一般而言,此种结构的土的孔隙都比较大、透水性强、压缩性低、强度较高。

(2) 蜂窝结构。蜂窝结构主要是由粉粒或细砂粒组成的。据研究,粉粒在水中沉积时,基本上是以单个土粒下沉,当碰到已沉积的土粒时,由于土粒之间的分子引力大于其重力,因此土粒就停留在最初的接触点上不再下沉,逐渐形成链环状团粒,构成较疏松的蜂窝结构,如图 2-3 (b) 所示。

(3) 絮凝结构。微小的黏粒大都呈针片状或片状在水中长期悬浮,并在水中运动时,形成小链环状团粒而下沉,这种小链环碰到另一小链环被吸引,形成大链环状的絮凝结构,如图 2-3 (c) 所示。海相沉积的黏土常具有此结构。

具有蜂窝结构和絮凝结构的土,土粒间有大量的孔隙,体积大,但均为微细孔隙,故压缩性高、透水性弱。当其天然结构破坏时,强度会迅速降低。因此,在研究土的一些与结构有关的性质时,必须保持其天然结构不受破坏。

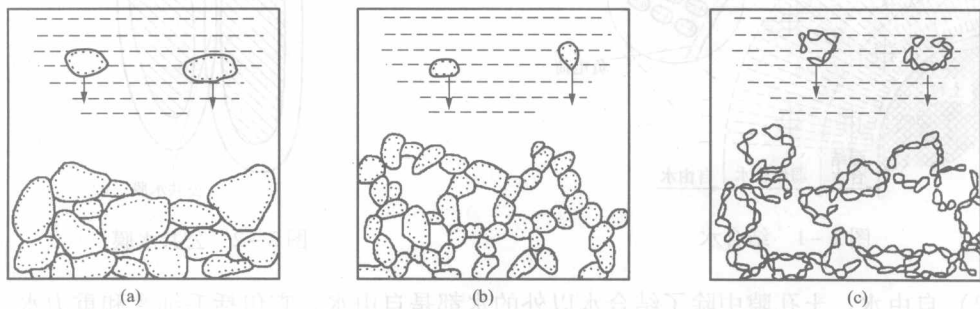


图 2-3 土的结构

(a) 单粒结构; (b) 蜂窝结构; (c) 絮凝结构

2. 土的构造

土的构造是指同一土层中,土粒或土粒集合体之间相互关系的特征,如土的层理、裂隙及大孔隙等宏观特征,也称为宏观结构。土的构造的最主要特征就是成层性,即层理构造。它是在土的生成过程中,由于不同阶段沉积的物质成分、颗粒大小或颜色不同,而沿竖向呈现的成层特征,常见的有水平层理与交错层理。

2.2 土的粒组和颗粒级配

2.2.1 土的粒组

土是岩石风化的产物,是由无数大小不同的土粒组成,其大小相差极为悬殊,性质也不相同。为了便于研究,工程上通常把工程性质相近的一定尺寸范围的土粒划分为一组,称为粒组。粒组与粒组之间的分界尺寸称界限粒径。工程上广泛采用的粒组有漂石粒、卵石粒、砾粒、砂粒、粉粒和黏粒。

对粒组的划分,各个国家甚至一个国家的各个部门都有不同的规定。图2-4为《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)中规定的粒组划分。

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|--|-------------|--|-------|--|---|--|---|--|-----|--|------|--|-------|--|-------|--|
| 200 | | 60 | | 20 | | 5 | | 2 | | 0.5 | | 0.25 | | 0.075 | | 0.002 | |
| 巨粒组 | | | | 粗粒组 | | | | | | | | 细粒组 | | | | | |
| 漂石 (块石) | | 卵石 (小块石) | | 砾(角砾) | | | | 砂 | | | | 粉粒 | | 黏粒 | | | |
| | | | | 粗 | | 中 | | 细 | | 粗 | | 中 | | 细 | | | |

图2-4 粒组划分图

2.2.2 土的颗粒级配

自然界的土常包含几种粒组。土中各粒组的相对含量(用粒组质量占干土总质量的百分数表示),称土的颗粒级配。土的颗粒级配可以通过颗粒分析试验确定。

1. 颗粒分析试验

测定土中各粒组颗粒质量占该土总质量的百分数,确定粒径分布范围的试验称为土的颗粒大小分析试验,简称“颗分”试验。常用试验方法有筛分法和密度计法两种。

(1) 筛分法。筛分法适用于粒径大于0.075mm的土粒。即用一套孔径大小不同的标准筛,从上到下按粗孔到细孔的顺序叠好,将已知重量的风干、分散的土样过筛,把各粒组分分离出来,并求出含量百分数。

(2) 密度计法。密度计法适用于分析粒径小于0.075mm的土粒。它主要利用土粒在静水中下沉速度不同(粗粒下沉快,而细粒下沉慢)的原理,可把不同粒径的土粒区别开来。其步骤是先分散团粒、制备悬液,然后用密度计测定悬液的密度,再根据司笃克斯(Atokes)定律建立粒径与沉速的关系式,算出各粒组含量的百分率。

如果土中同时含有粒径大于和小于0.075m的土粒时,则需联合使用上述两种方法。试验方法可参阅《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)。

2. 土的级配曲线

颗粒分析试验的成果,常用颗粒级配累计曲线表示,如图2-5所示。图中横坐标表示粒径(用对数尺度),纵坐标表示小于某粒径的土粒质量占总质量的百分率。

颗粒级配累计曲线既可看出粒组的范围,又可得到各粒组的质量分数。

3. 颗粒级配指标

常用的判别土颗粒级配良好与否的指标有两个,即不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 。见式

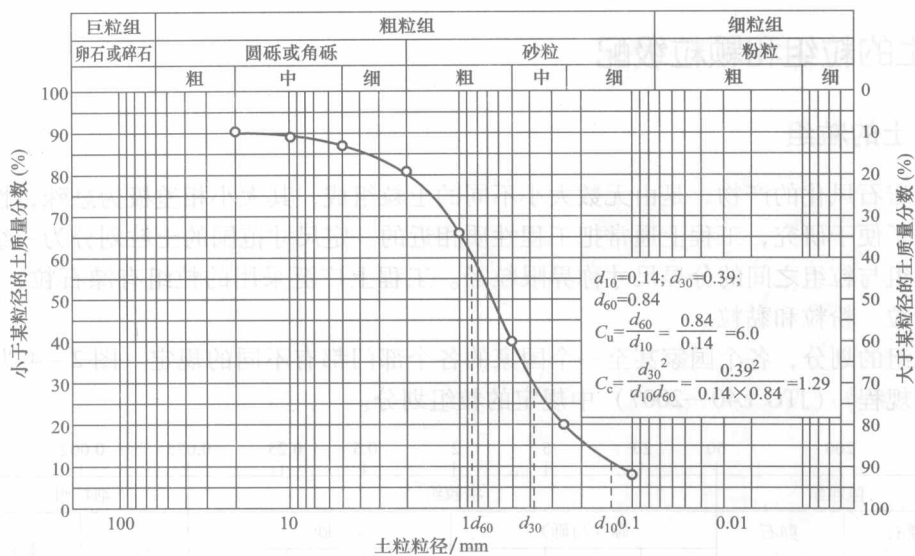


图 2-5 颗粒级配累计曲线

(2-1) 和式 (2-2)。

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2-1)$$

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

式中 d_{10} , d_{30} , d_{60} ——级配曲线纵坐标上小于某粒径质量分数为 10%、30%、60% 所对应的粒径值；

d_{10} ——有效粒径；

d_{60} ——控制粒径。

不均匀系数 C_u 反映曲线的坡度，表明土粒大小的不均匀程度，其值越大，曲线越平缓，说明土粒越不均匀，即级配良好；其值越小，曲线越陡，说明土粒越均匀，即级配不良。一般认为不均匀系数 $C_u \geq 5$ 为良好级配， $C_u < 5$ 为不良级配。

曲率系数 C_c 反映的是颗粒级配曲线分布的整体形态，表示粒组是否缺失的情况。当 $1 < C_c < 3$ 时，表明土粒大小的连续性较好；也即 $C_c < 1$ 或 $C_c > 3$ 时的土，颗粒级配不连续，缺乏中间粒径。

因此，在土的工程分类中，用不均匀系数 C_u 及曲率系数 C_c 两个指标判别颗粒级配的优劣。《公路土工试验规程》(JTG E40—2007) 中规定：级配良好的土必须同时满足两个条件，即 $C_u \geq 5$ 且 $1 < C_c < 3$ 。如不能同时满足这两个条件，则为级配不良的土。

级配良好的土，粗、细颗粒搭配较好，粗颗粒间的孔隙被细颗粒填充，易被压实到较高的密实度，因而，该土的透水性小、强度高、压缩性低。反之，级配不良的土，其压实密度小、强度低、透水性强而渗透稳定性差。

土粒组成和级配相近的土，往往具有某些共同的性质，所以，土粒组成和级配可作为土的工程分类和筑坝土料选择的依据。

2.3 土的物理性质指标

上述土中三相的特性及其相互作用,对土的工程性质有重要的影响,但多是定性分析。而土中三相之间的比例关系,能定量说明土的物理性质。因此,称为土的基本物理性质指标,包括土粒的相对密度,土的含水率、密度、孔隙比、孔隙率和饱和度等。

为便于研究这些指标,通常把本来互相分散的三相分别集中起来,绘出土的三相图(图2-6)。

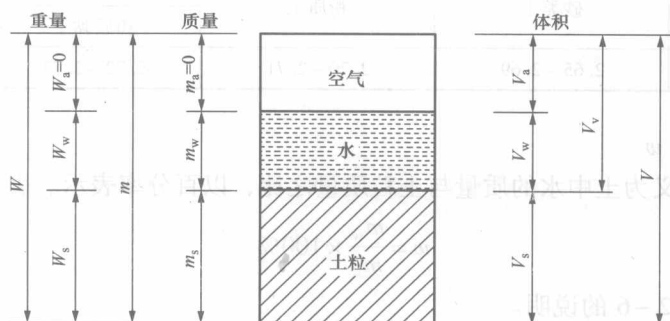


图2-6 土的三相草图

图2-6中各符号的意义如下： W 表示重量， m 表示质量， V 表示体积，下标a表示气体，下标s表示土粒，下标w表示水，下标v表示孔隙。如 W_s 、 m_s 、 V_s 分别表示土粒重量、土粒质量和土粒体积。

2.3.1 三项基本物理性质指标

三项基本物理性质指标是指土粒相对密度 C_s 、土的含水率 w 和密度 ρ ，一般由实验室直接测定其数值。

1. 土的密度 ρ 与重度 γ

土的密度定义为单位体积土的质量，用 ρ 表示，其单位为 g/cm^3 。表达式如下：

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-3)$$

式中参数见图2-6的说明。

天然状态下土的密度变化范围较大。一般黏性土 $\rho = 1.8 \sim 2.0 \text{g}/\text{cm}^3$ ；砂土 $\rho = 1.6 \sim 2.0 \text{g}/\text{cm}^3$ 。土的密度常用环刀法测定。

土的重度也称为容重，定义为单位体积土的重量，用 γ 表示，单位为 kN/m^3 。表达式如下：

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (2-4)$$

式中 g ——重力加速度， $9.807 \text{m}/\text{s}^2$ 。

2. 土粒相对密度

土粒相对密度为土粒的质量与同体积 4°C 时纯水的质量之比。表达式如下：

$$G_s = \frac{m_s}{V_s \rho_w} \quad (2-5)$$

式中 ρ_w ——4℃时纯水的密度，取 $\rho_w = 1.0 \text{ g/cm}^3$ 。

土粒相对密度是个无量纲指标，其值取决于土粒的矿物成分和有机质含量，变化范围不大，在 2.60~2.75 之间。土中含有机质较多时，土粒相对密度将显著减小。一般土粒相对密度参考值见表 2-1。土粒相对密度可用比重瓶法测定。

表 2-1 土粒相对密度参考值

| 土的名称 | 砂类土 | 粉质土 | 黏性土 | |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | | 粉质黏土 | 黏土 |
| 土粒相对密度 | 2.65~2.69 | 2.70~2.71 | 2.72~2.73 | 2.74~2.76 |

3. 土的含水率 w

土中含水率定义为土中水的质量与土粒质量之比，以百分率表示。表达式如下：

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% \quad (2-6)$$

式中参数见图 2-6 的说明。

含水率一般采用烘干法测定。

含水率反映土的干湿程度，变化范围很大，从干砂接近于零，一直到饱和黏土的百分之几百。一般说来，同一类土（尤其是细粒土），当其含水率增大时，其强度就下降。

上述三个指标可用试验方法直接测定，具体试验方法参阅教材第 11 章。其他指标可由上述换算，称换算指标。

2.3.2 换算指标

1. 土的饱和重度 γ_{sat}

土孔隙中充满水时的单位体积重量，称为土的饱和重度 (kN/m^3)，表达式如下：

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{W_s + V_v \gamma_w}{V} = \rho_{\text{sat}} g \quad (2-7)$$

式中 $V_v \gamma_w$ ——充满土中全部孔隙的水重；

γ_w ——4℃时纯水的重度，取 $\gamma_w = 9.8 \text{ kN/m}^3$ 。

2. 土的浮重度 γ'

土在地下水位以下，受到水的浮力作用时单位体积的重量，称为土的浮重度，也称有效重度 (kN/m^3)，表达式如下：

$$\gamma' = \frac{W_s + V_v \gamma_w - V \gamma_w}{V} = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = \rho' g \quad (2-8)$$

式中 ρ' ——土的浮密度，也称有效密度或水下密度，单位为 g/cm^3 。

3. 土的干重度 γ_d

土在完全干燥状态下的单位体积的重量，称为土的干重度 (kN/m^3)，表达式如下：

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \rho_d g \quad (2-9)$$