

普通高等教育土木工程专业新形态教材

工程地质

(第2版)

宋高嵩 杨 正 主 编
林 莉 卢书楠 孙义强 副主编

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书共分为7章,主要描述工程地质和水文地质的基本知识、岩土的工程特性、地质作用与地质构造、工程地质灾害防治、工程地质分析以及各类地质问题对工程影响的防治、评价和对策。

本书可作为普通高等学校土木工程专业的工程地质教科书,并适合作为港口与海岸工程、机场工程、农田水利工程、道路与桥梁渡河工程以及桥隧等专业的教学用书,也是相关专业师生的参考工具。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

工程地质/宋高嵩,杨正主编.—2版.—北京:清华大学出版社,2023.9

普通高等教育土木工程专业新形态教材

ISBN 978-7-302-62833-0

I. ①工… II. ①宋… ②杨… III. ①工程地质—高等学校—教材 IV. ①P642

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2023)第035240号

责任编辑:秦娜 王华

封面设计:陈国熙

责任校对:赵丽敏

责任印制:沈露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-83470000 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市龙大印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:13.75

字 数:334千字

版 次:2016年1月第1版 2023年9月第2版

印 次:2023年9月第1次印刷

定 价:45.00元

产品编号:099622-01

前言 (第2版)

PREFACE

本书是普通高等学校土木工程专业的工程地质课程教材,也可作为港口与海岸工程、农田水利工程、机场工程、道路与桥梁渡河工程以及桥隧等专业的教学用书。由于土木工程的工程地质涉及范围相当广,包括建(构)筑物的地基、选址选线、边坡与边岸、地下工程的围岩介质与环境,以及各类工程的岩土工程等,皆与工程地质条件密切相关,加之我国国土辽阔,地质条件复杂,岩土的性质各异,使得工程地质这门工程技术基础课显得更为实用。

本书主要介绍工程地质基础理论与知识、土与岩石的工程性质、地质作用与地质构造、水文地质作用及防治、工程地质分析、工程地质灾害及其对各类工程的影响和整治等理论与技术,并着重考虑了基础工程、地下工程、建筑工程、港口、道路交通与市政建设等建设工程需要,强调地质与工程的结合以及定性定量的综合分析。本书在注重学科本身的系统性的同时,还力求充分反映近年国内外工程地质理论和实践的发展水平。

本书由哈尔滨理工大学宋高嵩、杨正担任主编,林莉、卢书楠、孙义强担任副主编,编写人员具体分工如下:第1章、第7章由林莉编写,第2章、第3章由宋高嵩编写,第4章及工程地质技能训练项目由杨正编写,第5章由卢书楠编写,第6章由孙义强编写。

本书的特色在于增加了思想政治教育的内容,旨在培养学生正确的人生价值观和爱国意识。另外,加强了地质基础、地质条件对工程的影响以及处理对策的理论和知识,注意启发学生独立思考和培养动手能力。在编写本书过程中得到许多同行教师的关心与支持,他们提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢。限于水平,本书难免有欠妥和错误之处,恳请读者不吝指正。

编者

2022年8月

清华大学出版社

前言 (第1版)

PREFACE

本书主要用作普通高等学校土木工程专业工程地质课程的教材,也可作为港口与海岸及桥隧、道路等专业的教材。由于土木工程的工程地质涉及范围很广,建(构)筑物的地基、选址选线、边坡与边岸、地下工程的围岩介质与环境,以及各类工程的岩土工程等,皆与工程地质条件密切相关,加之中国国土辽阔、地质条件复杂、岩土的性质各异,工程地质这门工程技术基础课显得更为实用。与土木工程相关的工程地质勘察行业也被称为岩土工程勘察,强调岩土与工程的密切关系。可见,工程地质在设计与施工中占有相当重要的地位。本书主要介绍地质基础理论与知识、岩土的工程性质、工程地质勘察、不良地质现象及其对各类工程的影响和整治等理论和技术,并着重考虑基础工程、地下工程、建筑工程、港口、道路交通与市政建设等建设工程需要,强调地质与工程的结合以及定性与定量的综合分析。在注意学科本身的系统性时,还力求充分反映近年国内外工程地质理论和实践的发展水平。

编者在本书中着重介绍了地质基础、地质条件对工程的影响,以及处理对策的理论和知识,注意启发学生独立思考和动手的能力。本书由哈尔滨理工大学宋高嵩、杨正担任主编,盖晓连、王洪枢、李晶担任副主编。编写人员具体分工如下:第1章、第2章由宋高嵩编写;第3章、第4章及实训项目由杨正编写;第5章由盖晓连编写;第6章由王洪枢编写;第7章由李晶编写;孙义强、周健、李长安等研究生负责插图绘制工作。在编写过程中,得到许多教师及相关从业者的关心与支持,他们提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢。限于编者水平,书中难免有欠妥和错误之处,恳请读者批评、指正。

编 者

2015年8月

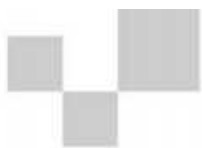
清华大学出版社

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 工程地质学的含义	1
1.2 工程地质学的研究内容	1
1.3 工程地质条件	2
1.4 工程地质问题	5
1.5 本课程的学习要求	6
本章学习要点	7
习题	7
第 2 章 土的工程特征	8
2.1 土的形成	8
2.2 土的组成	11
2.3 土的技术性质指标	16
2.4 土的分类	27
2.5 特殊土的特性	34
本章学习要点	45
习题	46
第 3 章 岩石的工程特性	47
3.1 地质作用	47
3.2 矿物	53
3.3 岩石	57
3.4 岩石的地质特性	72
本章学习要点	85
习题	85
第 4 章 水文地质作用	86
4.1 地下水的地质作用	86
4.2 河流的地质作用	97
本章学习要点	105

习题	106
第5章 地质构造与地质图	107
5.1 地质年代	107
5.2 地质构造运动	112
5.3 褶皱构造	114
5.4 断裂构造	119
5.5 地质图	127
本章学习要点	132
习题	132
第6章 工程地质灾害与防治	133
6.1 风化作用	133
6.2 滑坡与崩塌	139
6.3 泥石流	147
6.4 岩溶与土洞	150
6.5 地震	156
本章学习要点	168
习题	169
第7章 工程地质分析	170
7.1 工程地质原位测试	170
7.2 工程地质现场监测	184
7.3 工程地质勘探	186
7.4 工程地质勘察	191
本章学习要点	200
习题	201
工程地质技能训练项目	202
实训项目一 土的分类	202
实训项目二 土的密度测定	203
实训项目三 土的含水量测定	204
实训项目四 矿物的认识与鉴定	205
实训项目五 岩石的认识与鉴定	206
实训项目六 滑坡形成的原因及边坡治理措施	207
实训项目七 特殊土地基	208
实训项目八 阅读地质图	208
参考文献	211



第1章

绪论

1.1 工程地质学的含义

地质学是一门关于地球的科学。它的研究对象主要包括固体地球上的以下几方面。

- (1) 研究组成地球的物质,主要研究矿物学、岩石学、地球化学等分支科学。
- (2) 阐明地壳及地球的构造特征,即研究岩石或岩石组合的空间分布。这方面的分支学科有构造地质学、区域地质学、地球物理学等。
- (3) 研究地球的历史以及栖居在地质时期的生物及其演变。研究涉及古生物学、地史学、岩相古地理学等。
- (4) 地质学的研究方法与手段,如放射性核素地质学、数学地质学及遥感地质学等。
- (5) 研究应用地质学以解决资源探寻、环境地质分析和工程防灾问题。

地质学对人类社会担负着重大使命,主要有两个方面的内容:一是以地质学理论和方法指导人们寻找各种矿产资源,这是矿床学、煤田地质学、石油地质学、铀矿地质学等研究的主要内容;二是运用地质学理论和方法研究地质环境,查明地质灾害的规律和防治对策,以确保工程建设安全、经济和正常运行。

广义地讲,工程地质学(geotechnical engineering)是研究地质环境及其保护和利用的科学,狭义地讲,工程地质学是研究人类工程活动与地质环境相互关系的一门科学。

1.2 工程地质学的研究内容

工程地质学在工程建设和国防建设中应用非常广泛,由于它在工程建设中占有重要地位,从而早在 20 世纪 30 年代就获得迅速发展成为一门独立的学科。我国工程地质学的发展始于新中国成立初期。经过 60 多年的努力,现在不仅能适应国内建设的需要,而且开始走向世界,建立了具有我国特色的学科体系。

纵观各种规模、各种类型的工程,其工程地质研究的基本任务可以归纳为三方面:第一,区域稳定性研究与评价,是指由内力地质作用引起的断裂活动,地震对工程建设地区安全性的影响;第二,地基稳定性研究与评价,是指地基的牢固、坚实性;第三,环境影响评价,是指人类工程活动对环境造成的影响。具体来说工程地质学就是依据工程地质条件帮助工程选址(选线)和场地评价。

工程地质学的具体任务是:

(1) 评价工程地质条件,阐明地上和地下建筑工程兴建和运行的有利和不利因素,选定建筑场地和适宜的建筑型式,保证规划、设计、施工、使用、维修顺利进行。

(2) 从地质条件与工程建筑相互作用的角度出发,论证和预测有关地质问题发生的可能性、发生的规模和发展趋势。

(3) 提出防治地质灾害或利用工程地质条件的措施、加固岩土体和治理地下水的方案。

(4) 研究岩体、土体分类和分区及区域性特点。

(5) 研究人类工程活动与地质环境之间的相互作用和影响。

运用工程地质学在工程规划、设计以及解决各类工程与建筑物的具体问题时,必须开展详细的工程地质勘察工作。工程地质勘察的目的是为了取得有关建筑场地工程地质条件的基本资料 and 进行工程地质论证。

工程地质学的研究对象是复杂的地质体,所以其研究方法应是地质分析法与力学分析法、工程类比法与试验法的紧密结合。即通常所说的定性分析与定量分析相结合的综合研究方法。要查明建筑区工程地质条件的形成和发展,以及它在工程建筑物作用下的发展变化,首先必须以地质学和自然历史的观点分析研究建筑周围其他自然因素和条件,了解在历史过程中对地质条件的影响和制约程度,这样才有可能认识它形成的原因和预测其发展变化趋势。这就是地质分析法,它是工程地质学的基本研究方法,也是进一步定量分析评价的基础。对工程建筑物的设计和运用的要求来说,光有定性的论证是不够的,还要求对一些工程地质问题进行定量预测和评价。在阐明主要工程地质问题形成机制的基础上,建立模型进行计算和预测,例如地基稳定性分析、地面沉降量计算、地震液化可能性计算等。当地质条件十分复杂时,还可以根据条件类似地区已有资料对研究区的问题进行定量预测,这就是采用类比法进行评价。采用定量分析方法论证地质问题时需要采用试验测试方法,即通过室内或野外现场试验,取得所需要的岩土的物理性质、水理性质、力学性质数据。长期观测地质现象的发展速度也是常用的试验方法。综合应用上述定性分析与定量分析方法,才能取得可靠的结论,对可能发生的工程地质问题制定出合理的防治对策。

总之,工程地质学包括工程岩土学、工程地质分析和工程地质勘察三个基本部分,它们都已形成不同的分支学科。

工程地质学研究的内容有:

(1) 工程岩土学是研究土石的工程地质性质及其形成和在自然或人为因素影响下的变化情况。

(2) 工程地质分析是研究工程活动中存在的主要工程地质问题,分析这些问题产生的条件、力学机理和发展演变规律,以便正确评价和采取有效措施确保工程活动不受影响。

(3) 工程地质勘察是探讨和研究地质调查的手段与方法,以便探究影响工程活动的地质因素。

1.3 工程地质条件

为了保证工程地基稳定可靠,要求必须全面地研究地基及其周围地质环境的有关工程条件,以及当建筑物建成后某些地质条件可能诱发的工程地质问题。

工程地质条件是与人类活动有关的各种地质要素的综合,主要包括以下六大方面。

1. 地形地貌

地形地貌对建筑场地和线路的选择有直接影响。

(1) 地形是地表起伏和地物的总称,地表起伏的大势一般称为地势。我国地形剖面图如图 1.1 所示。大陆及海底的地势特征分别见表 1.1 及表 1.2。

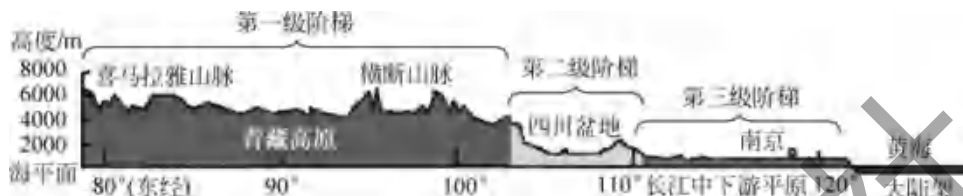


图 1.1 中国地形剖面图(沿北纬 32°)

表 1.1 大陆的地势特征

地 形		地 势 特 征
山地	低山	海拔 500~1000m
	中山	海拔 1000~3500m
	高山	海拔大于 3500m
平原		一般海拔小于 600m,地形起伏小于 50m
高原		海拔高于 600m,表面较平坦或有一定起伏的广阔地区
裂谷或大陆裂谷系		大陆上有一些宏伟的线状低地
丘陵		一般海拔在 500m 以下,相对高差 50~200m
盆地		四周是高原或山地,中间地平的地区叫盆地
洼地		高程在海平面以下的盆地

注:山地是指海拔高于 500m,地形起伏大于 200m 的地区。

表 1.2 海底的地势特征

地 形		地 势 特 征
海岭		海底山脉泛称海岭,地震海岭称为洋脊或洋中脊
海槽		海底的长条形洼地
海沟		海底的长条形洼地中较深且边坡较陡的地区
大洋盆地		约占海底面积的 45%,一般深 4000~5000m
岛屿		微型的大陆,火山岛
海山		大洋中比较孤立的水下山丘
大陆边缘	大陆架	平均坡度仅 $0^{\circ}07'$,平均宽度 50~70km
	大陆坡	平均坡度 4.3° ,平均宽度 28km
	大陆基(麓)	大陆坡与大洋盆地的过渡地带

(2) 地貌是地球表面的各种面貌,是不同的地质条件造就的,是各种内外力作用后的结果。地貌根据成因分类有喀斯特地貌、丹霞地貌、冰川地貌、雅丹地貌等,如图 1.2 所示。

2. 地层岩性

地层岩性是最基本的工程地质因素,包括它们的成因、时代、岩性、产状、成岩作用特点、



图 1.2 几种常见的地貌

(a) 丹霞地貌; (b) 喀斯特地貌; (c) 冰川地貌

变质程度、风化特征、软弱夹层和接触带以及物理力学性质等。岩性优劣关系到工程的安全经济。

3. 地质构造

地质构造也是工程地质工作研究的基本对象,包括褶皱、断层、节理构造的分布和特征。地质构造,特别是形成时代近、规模大的优势断裂,对地震等灾害具有控制作用,因而对建筑物的安全稳定、沉降变形等具有重要意义。几种典型的地质构造如图 1.3 所示。

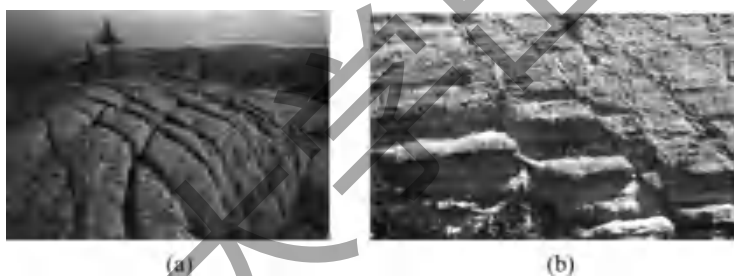


图 1.3 地质构造

(a) 裂隙; (b) 断层

按照成因,裂隙又可分为构造裂隙和非构造裂隙;断层根据两侧岩块的位移方向又可分为正断层和逆断层。

4. 水文地质条件

水文地质条件是重要的工程地质因素,包括地下水的成因、埋藏、分布、动态和化学成分等,这些因素直接影响岩土的稳定性的。

5. 不良地质作用

不良地质作用是现代地表地质作用的反映。它与建筑区地形、气候、岩性、构造、地下水和地表水作用密切相关。不良地质现象主要包括滑坡、崩塌、岩溶、泥石流、风沙移动、河流冲刷与沉积等,这对评价建筑物的稳定性和预测工程地质条件的意义重大。几种常见的不良地质作用如图 1.4 所示。

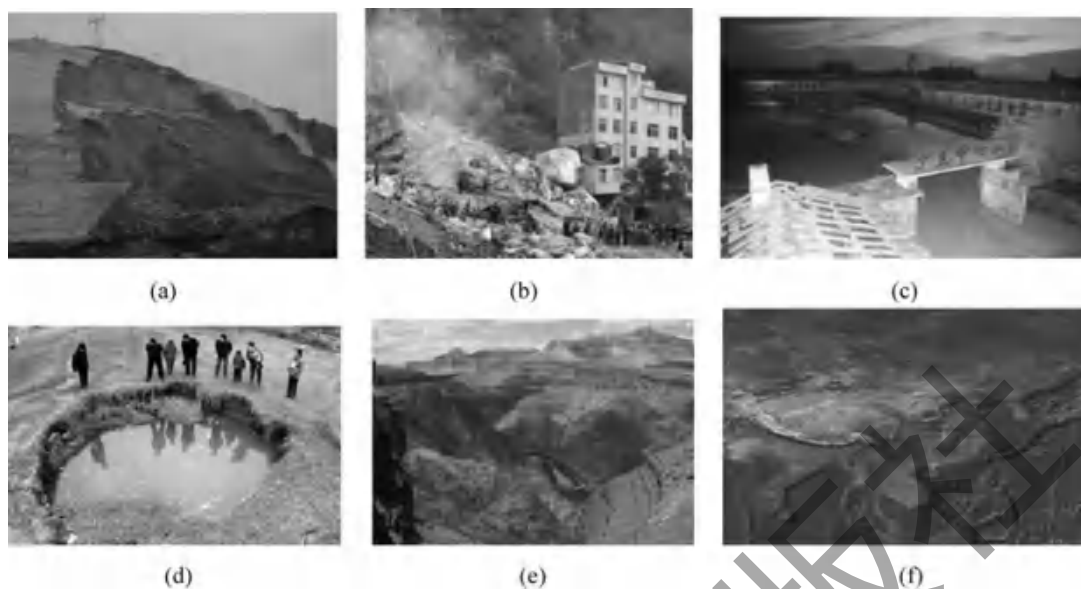


图 1.4 几种常见的不良地质作用

(a) 滑坡；(b) 崩塌；(c) 泥石流；(d) 地陷；(e) 河流侵蚀；(f) 荒漠化

6. 天然建筑材料

天然建筑材料应就地取材，因地制宜。

1.4 工程地质问题

自然的工程地质条件在工程建设和运行期间会产生新的变化，这种构成威胁和影响工程建筑安全的地质问题称为工程地质问题。由于工程地质条件复杂多变，不同类型的工程对工程地质条件的要求又不尽相同，所以工程地质问题是多种多样的。就土木工程而言，主要的工程地质问题包括地基稳定性、斜坡稳定性、洞室围岩稳定性以及区域稳定性，现分述如下。

(1) 地基稳定性问题：地基稳定性问题是工业与民用建筑工程常遇到的主要工程地质问题，它包括强度和变形两个方面。此外岩溶、土洞等不良地质作用和现象也会影响地基稳定，例如上海“莲花河畔景苑”在建楼房整体倒塌，如图 1.5 所示。铁路、公路等工程建筑则会遇到路基稳定性问题。



图 1.5 上海“莲花河畔景苑”在建楼房整体倒塌

(2) 斜坡稳定性问题: 自然界的天然斜坡是经受长期地表地质作用达到相对协调平衡



图 1.6 崩塌的巨石

的产物,人类工程活动尤其是道路工程需开挖和填筑人工边坡(路堑、路堤、堤坝、基坑等),斜坡稳定对防止地质灾害发生及保证地基稳定十分重要。斜坡地层岩性、地质构造特征是影响其稳定性的物质基础,风化作用、地应力、地震、地表水和地下水等对斜坡软弱结构面的作用往往会破坏斜坡稳定,而地形地貌和气候条件是影响其稳定性的重要因素。图 1.6 为铁路岩崩滑坡事故的图片。

(3) 洞室围岩稳定性问题: 地下洞室被包围于岩土体介质(围岩)中,在洞室开挖和建设过程中破坏了地下岩体原始平衡条件,使地质出现一系列不稳定现象,如围岩塌方(图 1.7)、地下水涌水等。在工程建设规划和选址时一般要进行区域稳定性评价,研究地质体在地质历史中受力状况和变形过程,做好山体稳定性评价,研究岩体结构特征,预测岩体变形破坏规律,进行岩体稳定性评价以及考虑建筑物和岩体围岩稳定所必需的工作。



图 1.7 2011 年 4 月 20 日甘肃兰新铁路隧道塌方

(4) 区域稳定性问题: 地震、震陷和液化以及活断层对工程稳定性具有决定性影响。自 1976 年唐山大地震后,区域稳定性越来越引起土木工程界的注意。对于大型水电工程、地下工程以及建筑群密布的城市地区,区域稳定性问题应该是需要首先论证的议程。

1.5 本课程的学习要求

组成建筑物地基的岩土层以及建筑物周围的地质环境绝大部分是自然的产物,也有少部分是人类活动所造成的,例如地基可能有杂填土,或地质环境恶化可能是人为开挖或水的排灌不合理而造成斜坡,发生滑坡等地质现象。但是,一旦建筑场地确定,建筑设计者只能按照该场地的地质条件和地质环境进行设计。为此,在建筑场址选址时,必须事先将该地的工程地质条件勘察清楚,充分研究分析,才能确定场址位置。选取较优的地质条件是建筑场地好的方案。当场址确定后,设计者必须按该地质条件和地质环境来设计,这时如发现地质问题就只能进行整治处理。可见,工程地质工作是很重要的,没有足够考虑工程地质条件而进行设计,是盲目的设计,会导致建设费用增高、工程量增大、施工期限拖长,而在个别情况

下,建筑物将发生变形或破坏,甚至被废弃使用。

在我国的技术分工中,工程地质勘察不是由土木工程设计人员进行,而是由工程地质技术人员进行的。所以土木工程人员应当对于工程地质勘察的任务、内容和方法有足够的知识。只有具备了工程地质方面的基础知识才能够正确地提出勘察任务和要求,才能正确地利用工程地质勘察的成果,较完整地考虑建筑中的地质条件和地质环境的因素,保证设计和施工人员合理进行设计与施工。

工程地质的内容是相当广泛的。本书着重讲述在土木工程中所涉及的最基本的工程地质问题理论和知识,其内容有:岩石和地质构造、土的工程特征、地下水、不良地质现象的工程地质问题、工程地质原位测试、工程地质勘察以及工程地质试验等。

对土木工程专业学生的学习本课程时的要求如下:

(1) 系统地掌握工程地质的基本理论和知识,能正确运用勘察数据和资料进行设计与施工。

(2) 能根据工程地质的勘察成果,运用已学过的工程地质理论和知识,进行一般的工程地质问题分析,对不良地质现象采取处理措施。

(3) 了解工程地质勘察的基本内容、方法和过程,各个工程地质数据的来源、作用以及应用条件,对一些中小型工程能够进行一般的工程地质勘察。

(4) 把学到的工程地质学知识与专业知识和其他课程知识密切联系起来,解决工程实际中的工程地质问题。

本章学习要点

(1) 工程地质是研究地质学应用问题的重要分支学科,土木工程防灾是工程地质的根本任务。

(2) 地基岩土的性质是保证地基稳定的基本条件。而建筑场地的地形性质、地下水、物理性质作用等地质环境因素往往对地基稳定性产生重要影响。

(3) 工程地质勘察是工程地质的重要研究方法和技术手段,其目的是为了查明场地基本工程地质条件并进行工程地质论证。

不忘初心:习近平总书记强调:“爱国,是人世间最深层、最持久的情感,是一个人立德之源,立功之本。”李四光等老一辈地质学家留下矢志报国、一心向党的动人故事,激励我们始终将服务国家的战略需求作为立身之基。

牢记使命:践行“绿水青山,就是金山银山”理念,探索人与自然和谐共生。

习题

1. 工程地质学的含义是什么?
2. 工程地质学的研究内容有哪些?
3. 什么是工程地质条件和工程地质问题?它们具体包括哪些内容?
4. 工程地质学的学习要求有哪些?



第2章

土的工程特征

在自然界,土的形成过程是十分复杂的,地壳表层的岩石在阳光、大气、水和生物等因素的作用下发生风化,从而崩解、破碎,再经流水、风、冰川等动力搬运作用,在各种自然环境下沉积,形成土体。因此通常说土是岩石风化的产物。严格来说,土是指第四纪以来岩石经风化、剥蚀、搬运、堆积作用形成的多相、分散、多孔的松散堆积物。

不同类型的土,工程性质相差很大,在工程建设中也应该采取不同的处理方法,尤其是一些特殊土,在进行工程建设时会产生特殊的工程地质问题,需进行适当的处理。因此,很有必要对土的工程性状进行深入的了解。

土的工程特征主要包括土的工程分类、第四纪土的地质成因及特征、土的物质组成、结构与构造、三相比例指标、无黏性土的性质、黏性土的物理特征、土的力学性质以及特殊土的工程评价等。

2.1 土的形成

1. 土的生成

土是由岩石经物理化学风化、剥蚀、搬运、沉积,形成固体矿物、流体水和气体的一种集合体(图 2.1)。

不同的风化作用形成不同性质的土,风化作用有下列三种:

1) 物理风化

岩石经受风、霜、雨、雪的侵蚀,温度、湿度的变化,发生不均匀膨胀与收缩,产生裂隙,崩解为碎块。这种风化作用只改变颗粒的大小与性状,不改变原来的矿物成分,称为物理风化。

由物理风化生成的土为粗粒土,如块碎石、砾石和砂土等,这种土总称为无黏性土。

2) 化学风化

岩石的碎屑与水、氧气和二氧化碳等物质接触时,逐渐发生化学变化,原来组成矿物的成分发生了改变,产生一种新的成分——次生矿物。这类风化称为化学风化。

经化学风化生成的土为细粒土,具有黏结力,如黏土与粉质黏土,总称黏性土。

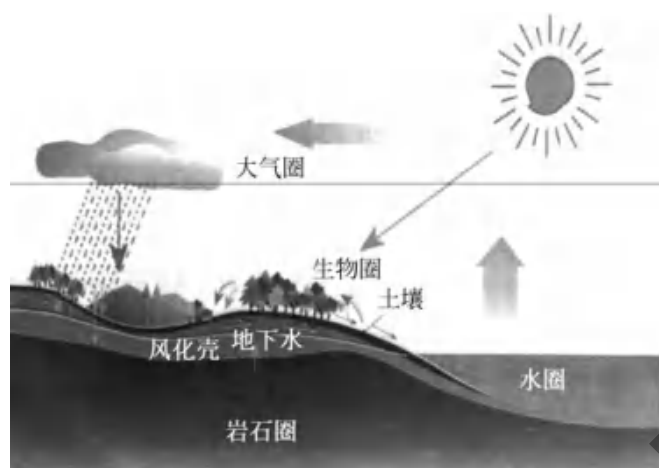


图 2.1 土的生成过程示意图

3) 生物风化

由于动物、植物和人类活动对岩体的破坏称为生物风化,例如,长在岩石缝隙中的树,因树根伸展使岩石缝隙扩展开裂。而人们开采矿山、石材,修铁路、打隧道,劈山修公路等活动形成的土,其矿物成分没有变化,属于生物风化。

2. 土的结构

土的结构是指土颗粒之间的相互排列和联结形式,分为单粒结构和集合体结构。

1) 单粒结构特征

单粒结构(single grained structure),也称散粒结构,是碎石(卵石)、砾石类土和砂土等无黏性土的基本结构形式,如图 2.2(a)所示。

2) 集合体结构特征

集合体结构(assembly structure),也称团聚结构或絮凝结构。对集合体结构,根据其颗粒组成、联结特点及性状的差异性,可分为蜂窝状结构和絮状结构两种类型。

当土颗粒较细(粒径在 0.02mm 以下)时,在水中单个下沉,碰到已沉积的土粒,因土粒间的分子引力大于土粒自重,则下沉的土粒被吸引不再下沉。依次一粒粒被吸引,形成具有很大孔隙的蜂窝状结构,如图 2.2(b)所示。

絮状结构主要是由更小黏粒联结形成的,是上述蜂窝状的若干聚粒之间,以面边或边边联结组合而成的孔隙更疏松、体积更大的结构,亦称为聚粒絮凝结构或二级蜂窝结构,如图 2.2(c)所示。

以上三种结构中,以密实的单粒结构工程性质最好,蜂窝状结构与絮状结构如被扰动破坏,则其强度低、压缩性高,不可用作天然地基。

3. 土的构造

在一定土体中,土的构造是结构相对均一的土层单元体的形态和组合特征,是指整个土层(土体)构成上的不均匀性特征的总和。常见土的构造有下列几种。

(1) 层状构造,是指土层由不同的颜色或不同粒径的土组成层理,一层一层互相平行,

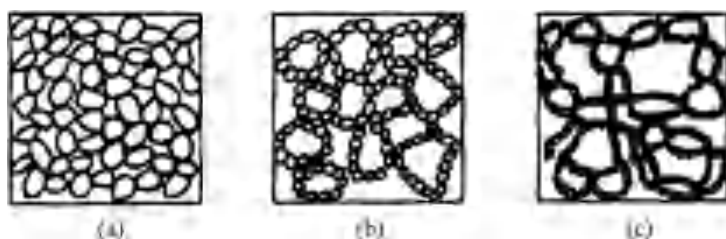


图 2.2 土的结构

(a) 单粒结构; (b) 蜂窝状结构; (c) 絮状结构

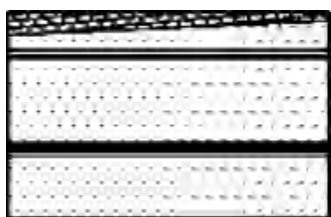


图 2.3 土的层状构造

平原地区的层理通常呈水平方向。这种层状构造反映不同年代不同搬运条件形成的土层,为细粒土的一个重要特征,如图 2.3 所示。

(2) 分散构造,是指土层中的土粒分布均匀,性质相近,如砂与卵石为层的分散构造。

(3) 结核状构造,是指在细粒土中混有粗颗粒或各种结核,如含礞石的粉质黏土、含砾石的冰碛黏土等,均属结核状构造。

(4) 裂隙状构造,是指土体中有很多不连续的小裂隙,某些硬塑或坚硬状态的黏土为此种构造。

通常分散构造的土工程性质最好。结核状构造土的工程性质好坏取决于细粒土部分。裂隙状构造中,因裂隙的强度低、渗透性大,故其工程性质差。

4. 土的特性

土与其他连续介质的建筑材料相比,具有下列三个显著的工程特性。

1) 压缩性高

反映材料压缩性高低的指标——弹性模量 E (土中称为变形模量),随着材料性质的不同而有极大的差别,如表 2.1 所示。

表 2.1 不同材料的弹性模量 E

材料	钢材	C20 混凝土	卵石	饱和细砂
E/MPa	$E_1 = 2.1 \times 10^5$	$E_2 = 2.6 \times 10^4$	$E_3 = 40 \sim 50$	$E_4 = 8 \sim 16$
比较	$E_1 \geq 4200E_3, E_2 > 1600E_4$			

当应力数值相同、材料厚度一样时,卵石的压缩性为钢材压缩性的数千倍;饱和细砂的压缩性为 C20 混凝土压缩性的数千倍,这足以说明土的压缩性极高。处于软塑或流塑状态的黏性土往往比饱和细砂的压缩性还要高很多。

2) 强度低

土的强度特指抗剪强度,而非抗压强度或抗拉强度。

无黏性土的强度来源于土粒表面的滑动摩擦和颗粒间的咬合摩擦;黏性土的强度除摩擦力外,还有黏聚力。无论摩擦力还是黏聚力,均远远小于建筑材料本身的强度,因此,土的强度比其他建筑材料(如钢材、混凝土等)低得多。

3) 透水性大

土的透水性就是指水在土孔隙中渗透流动的性能。由于土体中固体矿物颗粒之间有许多透水的孔隙,因此其透水性比木材、混凝土都大,尤其是粗颗粒的卵石或砂土,其透水性更大。

上述土的三个工程特性(压缩性高、强度低、透水性大)与建筑工程设计和施工关系密切,需高度重视。由于各类土的生成条件不同,它们的工程特性往往相差悬殊,下面分别加以说明。

(1) 搬运、沉积条件的影响:通常经流水搬运沉积的土优于风力搬运沉积的土。例如陕北榆林市靖边县一带,地表普遍存在一层粉细砂,是由内蒙古毛乌素沙漠经风力搬运、沉积下来的风积层。这种粉细砂松散,工程性质差,形成的风积层很疏松,不可作为天然地基。当地西北大风搬运量惊人,整个榆林市曾被砂淹没,三次南迁。

(2) 沉积年代的影响:通常土的沉积年代越长,工程性质越好。例如,第四纪晚更新世 Q_3 及其以前沉积的黏性土称为老黏性土,这种土密度大、强度高、压缩性低,是一种良好的天然地基。而沉积年代短的新近沉积黏性土,如在湖、塘、沟、谷、河漫滩及三角洲的新近沉积土以及5年以内的人工填土,强度低、压缩性高,工程性质不佳。

(3) 沉积的自然地理环境的影响:在同一时期、不同地区地层形成的沉积环境及水动力条件差别很大,沉积物来源也不尽相同,因此导致不同地区同一历史时期沉积同一深度土层,物理力学性质完全不同,进而其工程性质也存在较大的差异。

2.2 土的组成

土的三相组成是指土由固体矿物颗粒(固相)、水(液相)和气体(气相)三部分组成,如图2.4所示。那么位于同一地点的土体,其三相组成的比例是否固定不变呢?随着环境的变化,土的三相比比例组成也将随之发生变化。例如,天气的晴雨、季节变化、温度高低以及地下水的升降等,都会引起土体三相之间的比例产生变化。而土体三相比比例的变化,又会引起其状态及工程性质的差异,例如:

固体+气体(液体=0)为干土,此时黏土呈坚硬状态;

固体+液体+气体为湿土,此时黏土多为可塑状态;

固体+液体(气体=0)为饱和土,此时松散的粉细砂或粉土遇强烈地震,可能发生液化,使工程结构受到破坏;黏土地基受建筑荷载作用发生沉降,有时需几十年才能达到稳定。

由此可见,研究土的各项工程性质,需从最基本的组成土的三相(即固相、气相和液相)本身开始研究。

1. 土的固体颗粒

土的固体颗粒是土的三相组成中的主体,是决定土的工程性质的主要成分。

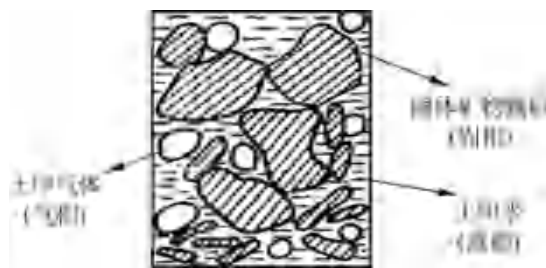


图 2.4 土的三相组成示意图

1) 土粒的矿物成分

土粒中的矿物成分分为三类: 原生矿物、次生矿物和有机质。

(1) 原生矿物是岩石经物理风化破碎但成分没有发生变化的矿物碎屑。常见的原生矿物有石英、长石、云母、角闪石、辉石、橄榄石、石榴石等。

(2) 次生矿物是母岩岩屑经化学风化, 改变原来的化学成分, 成为一种很细小的新矿物, 主要为黏土矿物。黏土矿物可分为下列三种。

① 蒙脱石: 两结构单元之间没有氢键, 相互的联结弱, 水分子可以进入两晶胞之间。因此, 蒙脱石的亲水性最大, 具有剧烈的吸水膨胀、失水收缩的特性。蒙脱石电镜下的照片如图 2.5(a) 所示。

② 伊利石: 又称水云母, 部分 Si-O 四面体中的 Si 为 Al、Fe 所取代, 损失的原子价由阳离子钾补偿。因此, 晶格层组之间具有结合力, 亲水性低于蒙脱石。伊利石电镜下的照片如图 2.5(b) 所示。

③ 高岭石: 晶胞之间有氢键, 相互联结力较强, 晶胞之间的距离不易改变, 水分子不能进入。因此, 高岭石的亲水性最小。高岭石电镜下照片如图 2.5(c) 所示。

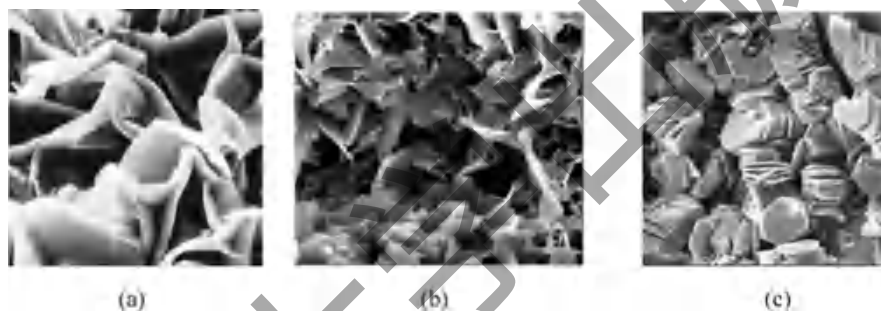


图 2.5 电镜下的黏土矿物
(a) 蒙脱石; (b) 伊利石; (c) 高岭石

(3) 在自然界的一般土中, 特别是淤泥质土中, 通常含有一定数量的有机质, 当其在黏性土中的含量达到或超过 5% (在砂土中的含量达到或超过 3%) 时, 就开始对土的工程性质产生显著的影响。

2) 土颗粒的大小及形状

自然界中土颗粒的大小相差悬殊, 例如, 巨粒土漂石粒径 $d > 200\text{mm}$, 细粒土粒径 $d < 0.005\text{mm}$, 两者粒径相差超过 4 万倍。颗粒大小不同的土, 它们的工程性质也各异。为便于研究, 把土的粒径按性质相近的原则分为 6 个粒组, 如表 2.2 所示。

表 2.2 土粒粒组的划分

粒 组 名 称		粒径范围 d/mm	一 般 特 征
漂石或块石颗粒		$d > 200$	透水性很大; 无黏性; 无毛细作用
卵石或碎石颗粒		$20 < d \leq 200$	
圆砾或角砾颗粒	粗	$10 < d \leq 20$	透水性大; 无黏性; 毛细水上升高度不超过粒径大小
	中	$5 < d \leq 10$	
	细	$2 < d \leq 5$	

续表

粒 组 名 称		粒 径 范 围 d/mm	一 般 特 征
砂 粒	粗	$0.5 < d \leq 2$	易透水；无黏性，无塑性，干燥时松散；毛细水上升高度不大（一般小于1m）
	中	$0.25 < d \leq 0.5$	
	细	$0.1 < d \leq 0.25$	
	极细	$0.075 < d \leq 0.1$	
粉 粒	粗	$0.01 < d \leq 0.075$	透水性弱；湿时稍有黏性（毛细力联结），干燥时松散，饱和时易流动；无塑性和遇水膨胀性；毛细水上升高度大；湿土振动时有水析现象（液化）
	细	$0.005 < d \leq 0.01$	
黏 粒		$d < 0.005$	几乎不透水；湿时有黏性和可塑性，遇水膨胀大，干时收缩显著；毛细水上升高度大，但速度缓慢

注：1. 漂石、卵石和圆砾颗粒均呈一定的磨圆形状（圆形或亚圆形）；块石、碎石和角砾颗粒都带有棱角。

2. 粉粒也称粉土粒，粉粒的粒径上限0.075mm，相当于200号标准筛的孔径。

3. 黏粒也称黏土粒，黏粒的粒径上限也以采用0.002mm为准。

至于颗粒的形状，有的土颗粒带棱角，表面粗糙，不易滑动，因而其抗剪强度比表面圆滑的高。

3) 土的粒径级配

自然界的土都是由大小不同的土粒组成。土粒的粒径由粗到细逐渐变化时，土的性质会相应地发生变化。土粒的大小称为粒度（granularity），通常以粒径表示。工程中通常以土中各个粒组的相对含量（指土样各粒组的质量占土粒总质量的百分数）来表示土的组成情况，称为土的粒度成分（granularity ingredient）或颗粒级配（grain grading）。

土的粒度成分或颗粒级配是通过土的颗粒分析试验测定的，常用的测定方法有筛分法（sieve analysis method）和沉降分析法（settlement analysis method）。

（1）筛分法试验是将风干、分散的代表性土样通过一套自上而下孔径由大到小的标准筛（筛子孔径分别为20mm、10mm、5mm、2.0mm、1.0mm、0.5mm、0.25mm、0.075mm），称出留在各个筛子上的干土重，即可求得各个粒组的相对含量。通过计算可得到小于某一筛孔直径土粒的累积质量及累计百分含量。此方法适用于粒径大于0.075mm的巨粒组和粗粒组。

（3）沉降分析法的理论基础是土粒在水（或均匀悬液）中的沉降原理。当土样分散于水中后，土粒下沉时的速度与土粒形状、粒径、（质量）密度以及水的黏滞度（viscosity）有关。此方法适用于粒径小于0.075mm的细粒组。

根据粒度成分分析试验结果，常采用粒径累计曲线（grain size accumulation curve）表示土的颗粒级配。该法是比较全面和通用的一种图解法，其特点为可简单获得定量指标，特别适用于几种土级配好与差的相对比较。粒径累计曲线法的横坐标为粒径，由于土粒粒径的值域很宽，因此采用对数坐标表示；纵坐标为小于（或大于）某粒径的土粒质量（累计百分数）含量，见图2.6。由粒径累计曲线坡度可以大致判断土粒均匀程度或级配是否良好。如曲线较陡，表示粒径大小相差不多，土粒较均匀，级配不良；反之，曲线平缓，则表示粒径大小相差悬殊，土粒不均匀，级配良好。

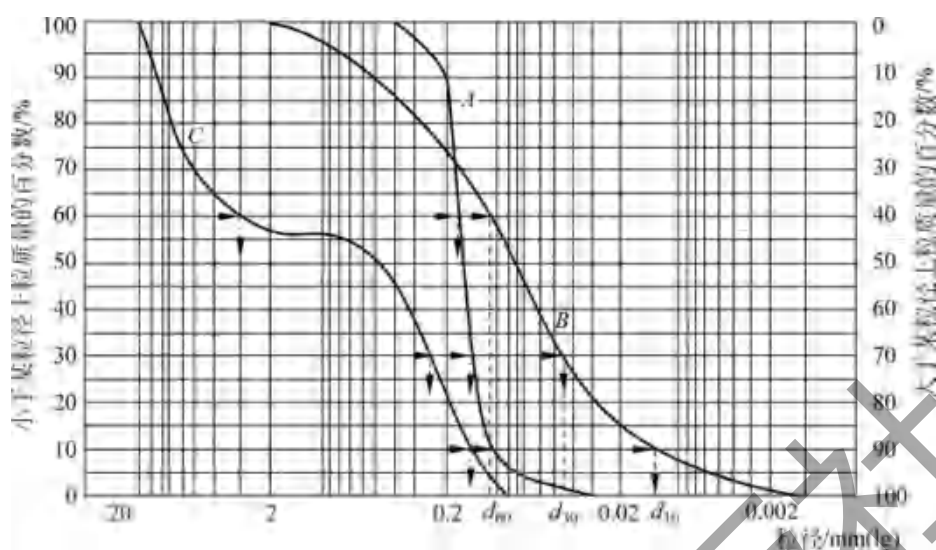


图 2.6 粒径累计曲线

例如,某工程的土样总质量为 1000g,经筛析后,知全部试样通过筛孔为 20mm 的筛,因此在横坐标为 10mm 处,其纵坐标为 100%,作为一试验点。依照此法,即可得到该土样的粒径级配曲线。

在粒径级配曲线上,纵坐标为 10% 所对应的粒径 d_{10} 称为有效粒径,纵坐标为 30% 所对应的粒径 d_{30} 称为中值粒径,纵坐标为 60% 所对应的粒径 d_{60} 称为限制粒径。 d_{60} 与 d_{10} 的比值称为不均匀系数 C_u (uniformity coefficient),即

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2.1)$$

不均匀系数 C_u 反映大小不同粒组的分布情况,即土粒大小或粒度的均匀程度。 C_u 越大,表示粒度的分布范围越大,土粒越不均匀,其级配越良好。在一般情况下,工程上把 $C_u < 5$ 的土看作均粒土,属级配不良,见图 2.7(b); $C_u > 10$ 的土,属级配良好,见图 2.7(a)。对于级配连续的土,采用单一指标 C_u ,即可达到比较满意的判别结果。但缺乏中间粒径 (d_{60} 与 d_{10} 之间的某粒组)的土,即级配不连续,累计曲线呈现台阶状,见图 2.7(c)。此时,仅采用单一指标 C_u 难以判定土的级配好与差。

曲率系数 C_c 作为第二指标与 C_u 共同判断土的级配,则更加合理。其值按式 (2.2) 计算:

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad (2.2)$$

一般认为,砾类土或砂类土同时满足 $C_u \geq 5$ 和 $C_c = 1 \sim 3$ 两个条件时,为级配良好;级配不同时满足 C_u 和 C_c 两个要求时,则为级配不良。

2. 土中的水

水是人类日常生活中不可缺少的物质,通常把水分为自来水、井水、河水与海水等。

土的孔隙中有水,水分子 H_2O 为极性分子,由带正电荷的氢离子 H^+ 和带负电荷的氧离子 O^{2-} 组成。黏土粒表面带负电荷,在土粒周围形成电场,吸引水分子带正电荷的氢离

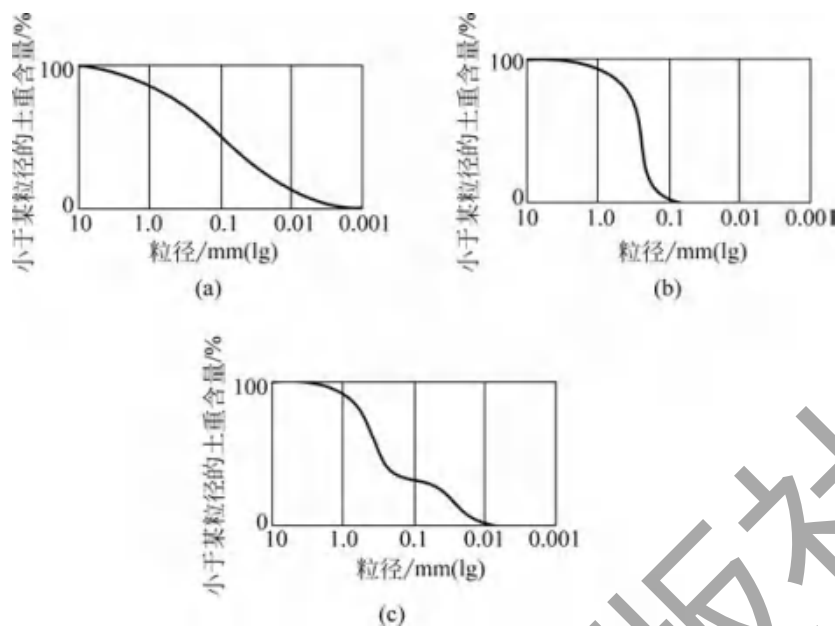


图 2.7 粒径累计曲线对比图

(a) 良好级配土; (b) 不良级配土; (c) 不连续级配土(缺乏中间尺寸土粒)

子一端,使其定向排列,形成结合水膜,如图 2.8 所示。土中的水可分为结合水、自由水、气态水和固态水。

1) 结合水

结合水分为强结合水和弱结合水。

(1) 强结合水又称吸着水,由黏土表面电分子力牢固吸引的水分子紧靠土粒表面,厚度只有几个水分子厚,小于 $0.003\mu\text{m}$ 。这种强结合水的性质与普通水不同,它的性质接近固体,不传递静水压力, 100°C 不蒸发,密度 $\rho_w = 1.2 \sim 2.4\text{g}/\text{cm}^3$,并具有很大的黏滞性、弹性和抗剪强度。当黏土只含强结合水时呈坚硬状态。

(2) 弱结合水又称薄膜水,这种水在强结合水外侧,也是由黏土表面的电分子引力吸引的水分子,其厚度小于 $0.5\mu\text{m}$ ($1\mu\text{m} = 0.001\text{mm}$),密度 $\rho_w = 1.0 \sim 1.7\text{g}/\text{cm}^3$ 。弱结合水也不传递静水压力,呈黏滞体状态,此部分水对黏性土的影响最大。

2) 自由水

自由水离土粒较远,在土粒表面的电场作用以外的水分子自由散乱地排列。自由水包括重力水和毛细水两种:

(1) 重力水位于地下水位以下,具有浮力的作用,可从总水头较高处向总水头较低处流动。

(2) 毛细水位于地下水位以上,受毛细作用而上升,粉土中孔隙小,毛细水上升高。

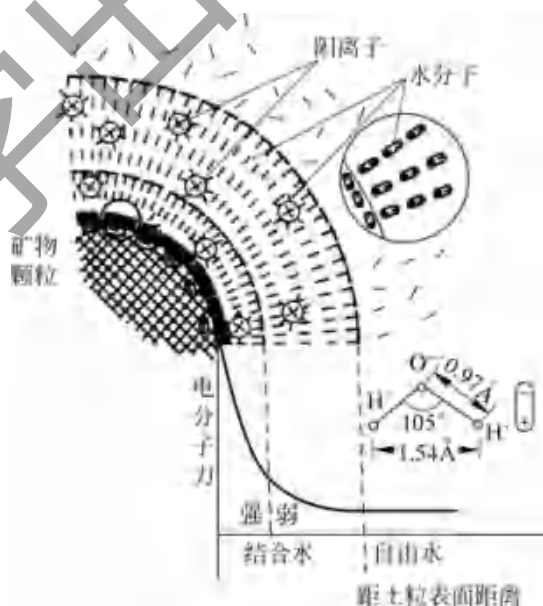


图 2.8 黏土矿物和水分子的相互作用

3) 气态水

气态水以水气状态存在,从气压高的地方向气压低的地方移动。水气可在土粒表面凝聚转化为其他各种类型的水。气态水的迁移和聚集使土中水和气体的分布状况发生变化,可使土的性质发生改变。

4) 固态水

当温度降至 0°C 以下时,土中的水主要是重力水冻结成固态水(冰)。固态水在土中起暂时的胶结作用,能提高土的力学强度,降低透水性。但温度升高固态水解冻后,变为液态水,土的强度急剧降低,压缩性增大,土的工程性质显著恶化。特别是土冻结成冰时体积增大,解冻融化为水时,土的结构变疏松,使土的性质更差。

3. 土中气体

土的固体颗粒之间的孔隙中,没有被水充填的部分都是气体。土中气体分为自由气体和封闭气泡两种。

自由气体是与大气相连通的气体,通常在土层受力压缩时即逸出,故对建筑工程无影响。

封闭气泡与大气隔绝,存在黏性土中,当土层受荷载作用时,封闭气泡缩小,卸荷时又膨胀,使土体具有弹性,这时将其称为“橡皮土”,使土体的压实变得困难。当土中封闭气泡很多时,土的渗透性将降低。

2.3 土的技术性质指标

土的技术性质指标反映土的工程性质的特征,具有很重要的实用价值。地基承载力数值的大小,与地基基础的设计和施工紧密相关。例如:地基粉土的孔隙比 $e=0.8$,含水量 $w=10\%$,则地基承载力特征值可达 200kPa ,通常多层房屋可用天然地基;若孔隙比 $e=1.6$,含水量 $w=70\%$,则地基承载力特征值很低,小于 50kPa ,为软弱地基,多层房屋无法采用天然地基,要考虑人工加固地基或采用桩基础。由此可见,孔隙比 e 和含水量 w 的数值大小,会影响建筑地基基础方案的制定,进而影响施工方法、工期、造价等。

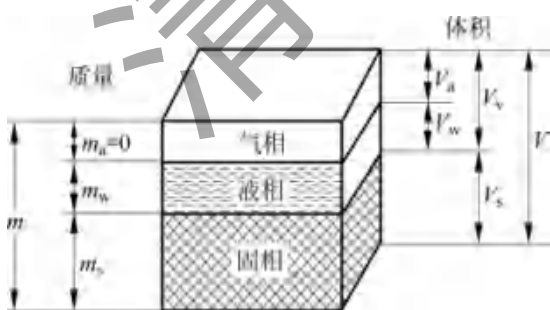


图 2.9 土的三相草图

前面已经定性地说明:土中三相之间相互比例不同,土的工程性质也不同。现在需要定量研究三相之间的比例关系,即土的物理性质指标的物理意义和数值大小。

为了便于阐述和标记,把自然界中土的三相混合分布的情况分别集中起来:固相集中于下部,液相集中于中部,气相集中于上部,并按适当的比例画出草图,左边标出各相的质量,右边标明各相的体积,如图 2.9 所示。图 2.9 中

符号的意义如下:

m_a ——土中气体的质量,忽略不计,等于 0;

m_w ——土中水的质量；

m_s ——土粒的质量；

m ——土的总质量， $m = m_s + m_w$ ；

V_s, V_w, V_a ——分别为土粒、土中水、土中气的体积；

V_v ——土中孔隙体积， $V_v = V_w + V_a$ ；

V ——土的总体积， $V = V_s + V_w + V_a$ 。

1. 土的基本性质指标

土的密度和重度、土粒相对密度及土的含水量(率)为土的基本物理性质指标,均由实验室直接测定。

1) 土的密度 ρ 和土的重度 γ

物理意义: ρ 为单位体积土的质量, g/cm^3 ; γ 为单位体积土所受的重力, 即 $\gamma = \rho g = 9.8\rho \approx 10\rho, \text{kN}/\text{m}^3$ 。

表达式:

$$\rho = \frac{\text{土的总质量}}{\text{土的总体积}} = \frac{m}{V} \quad (2.3)$$

常见值: $\rho = 1.6 \sim 2.2 \text{g}/\text{cm}^3, \gamma = 16 \sim 22 \text{kN}/\text{m}^3$ 。

测定方法: 土的重度一般用环刀法测定, 用一个圆环刀(刀刃向下)放在削平的原状土样面上, 徐徐削去环刀外围的土, 边削边压, 使保持天然状态的土样压满环刀容积内, 称得环刀内土样质量, 求得它与环刀容积之比, 即天然重度。

2) 土粒相对密度 $d_s (G_s)$

物理意义: 土中固体颗粒的密度与同体积 4°C 纯水密度的比值。

表达式:

$$d_s = \frac{\text{固体颗粒的密度}}{\text{纯水 } 4^\circ\text{C} \text{ 时的密度}} = \frac{\frac{m_s}{V_s}}{\rho_w(4^\circ\text{C})} \quad (2.4)$$

常见值: 砂土 $d_s = 2.65 \sim 2.69$; 粉土 $d_s = 2.70 \sim 2.71$; 黏性土 $d_s = 2.72 \sim 2.75$ 。

土粒相对密度 d_s 的数值大小取决于土的矿物成分。

测定方法: 土粒相对密度可在实验室内用比重瓶法测定。因同类土的相对密度值相差不大, 仅小数点后第2位不同, 若当地已进行大量土粒相对密度试验, 有时也可按经验数值选用。

3) 土的含水量(率) ω

物理意义: 土的含水量(率)表示土中含水的数量, 为土体中水的质量与固体颗粒质量的比值, 用百分数表示。

表达式:

$$\omega = \frac{\text{水的质量}}{\text{固体颗粒质量}} \times 100\% = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% \quad (2.5)$$

常见值: 砂土 $\omega = 0 \sim 40\%$; 黏性土 $\omega = 20\% \sim 60\%$ 。

当 $\omega = 0$ 时, 黏性土呈坚硬状态。

测定方法:土的含水量一般用烘干法测定。先称小块原状土样的湿土质量,然后置于烘干箱内维持 105°C 烘至恒重,再称干土质量,湿、干土质量之差与干土质量的比值就是土的含水量。

2. 土的松密程度的技术指标

1) 土的孔隙比 e

物理意义:土的孔隙比是土中孔隙体积与固体颗粒体积之比。

表达式:

$$e = \frac{\text{孔隙体积}}{\text{固体颗粒体积}} = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.6)$$

常见值:砂土 $e=0.5\sim 1.0$;黏性土和粉土 $e=0.5\sim 1.2$ 。

确定方法:根据 ρ 、 d_s 与 ω 实测值计算而得,在建筑工程中应用很广。

2) 土的孔隙度(率) n

物理意义:土的孔隙度(率)是土中孔隙所占体积与总体积之比,以百分数表示。

表达式:

$$n = \frac{\text{孔隙体积}}{\text{土体总体积}} = \frac{V_v}{V} \times 100\% \quad (2.7)$$

常见值: $n=25\%\sim 60\%$ 。

确定方法:根据 ρ 、 d_s 与 ω 实测值计算而得。

3) 土的饱和度 S_r

物理意义:土的饱和度表示水在孔隙中充满的程度,即土中水体积与土中孔隙体积之比,以百分数计。

表达式:

$$S_r = \frac{\text{水的体积}}{\text{孔隙体积}} = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad (2.8)$$

常见值: $S_r=0\sim 100\%$ 。

确定方法:根据 ρ 、 d_s 与 ω 实测值计算而得。

工程应用:砂土与粉土以饱和度作为湿度划分的标准,分为三种状态:稍湿($0\leq S_r\leq 50\%$);很湿($50\%< S_r\leq 80\%$)与饱和($80\%< S_r\leq 100\%$)。

3. 特殊条件下土的密度和重度技术指标

1) 土的干密度 ρ_d 和土的干重度 γ_d

物理意义:土的干密度为单位土体体积干土的质量 g/cm^3 。土的干重度为单位土体体积干土所受的重力,即 $\gamma_d = \rho_d g = 9.8\rho_d \approx 10\rho_d \text{ kN}/\text{m}^3$ 。

表达式:

$$\rho_d = \frac{\text{固体颗粒质量}}{\text{土的总体积}} = \frac{m_s}{V} \quad (2.9)$$

常见值: $\rho_d=1.3\sim 2.0\text{ g}/\text{cm}^3$; $\gamma_d=13\sim 20\text{ kN}/\text{m}^3$ 。

工程应用:土的干密度通常用作填方工程,包括土坝、路基和人工压实地基,是土体压

实质量控制的标准。

土的干密度 ρ_d (或干重度 γ_d) 越大, 表明土体压的越密实, 即工程质量越好。根据工程的重要程度和当地土的性质, 可设计规定一个合理的 ρ_d (或 γ_d) 数值。例如, 灰土地基压实的质量标准要求灰土的最小干密度为: 粉土灰土 $\rho_d = 1.55 \text{g/cm}^3$, 粉质黏土灰土 $\rho_d = 1.50 \text{g/cm}^3$, 黏土灰土 $\rho_d = 1.45 \text{g/cm}^3$ 。

2) 土的饱和密度 ρ_{sat} 和土的饱和重度 γ_{sat}

物理意义: 土的饱和密度为孔隙中全部充满水时, 单位土体体积的质量。土的饱和重度为孔隙中全部充满水时, 单位土体体积所受的重力, 即 $\gamma_{\text{sat}} = \rho_{\text{sat}} g = 9.8 \rho_{\text{sat}} \approx 10 \rho_{\text{sat}} \text{kN/m}^3$ 。

表达式:

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{\text{孔隙全部充满水的总质量}}{\text{土体总体积}} = \frac{m_s + m_w + V_a \rho_w}{V} \quad (2.10)$$

常见值: $\rho_{\text{sat}} = 1.8 \sim 2.3 \text{g/cm}^3$; $\gamma_{\text{sat}} = 18 \sim 23 \text{kN/m}^3$ 。

3) 土的有效重度(浮重度) γ'

物理意义: 土的有效重度为地下水位以下, 单位土体体积中土粒的重量扣除浮力后, 即单位土体体积中土粒的有效重量。

表达式:

$$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w \quad (2.11)$$

式(2.11)中, γ_w 为水的重度, 可取 10kN/m^3 。

常见值: $\gamma' = 8 \sim 13 \text{kN/m}^3$ 。

综上所述, 土的物理性质指标有土的密度 ρ 、土粒相对密度 d_s (G_s)、土的含水量 ω 、土的孔隙比 e 、土的孔隙率 n 、土的饱和度 S_r 、土的干密度 ρ_d 和土的饱和密度 ρ_{sat} , 一共 8 个物理性指标, 它们并非各自独立, 互不相关。其中 ρ 、 d_s (G_s) 和 ω 由实验室测定后得到, 其余 5 个物理性指标可以通过三相草图换算求得。

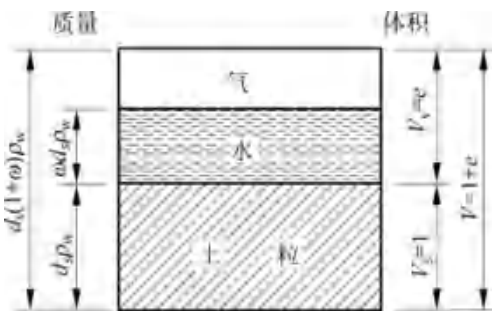


图 2.10 土的三相比例指标换算图

可采用三相比比例指标换算图(图 2.10)进行各指标间相互关系的推导, 设 $\rho_{w1} = \rho_w$, 并令

$V_s = 1$, 则 $V_v = e$, $V = 1 + e$, $m_s = V_s d_s \rho_w = d_s \rho_w$, $m_w = \omega m_s = \omega d_s \rho_w$, $m = d_s (1 + \omega) \rho_w$ 。推导如下:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{d_s (1 + \omega) \rho_w}{1 + e}$$

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} = \frac{d_s \rho_w}{1 + e} = \frac{\rho}{1 + \omega}$$

由上式得

$$e = \frac{d_s \rho_w}{\rho_d} - 1 = \frac{d_s (1 + \omega) \rho_w}{\rho} - 1$$

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V} = \frac{(d_s + e) \rho_w}{1 + e}$$

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{e}{1 + e}$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{m_w}{V_v \rho_w}$$

常见土的三相比例指标换算公式列于表 2.3 中。

表 2.3 土的物理性质指标常用换算公式及常见值

名称	符号	三相比例表达式	常用换算公式	常见的数值范围
土粒相对密度	d_s	$d_s = \frac{m_s}{V_{s1} \rho_w}$	$d_s = \frac{S_r e}{\omega}$	黏性土: 2.72~2.75 粉土: 2.70~2.71 砂土: 2.65~2.69
含水量(率)	ω	$\omega = \frac{m_w}{m_s} \times 100\%$	$\omega = \frac{S_r e}{d_s}; \omega = \left(\frac{\gamma}{\gamma_d} - 1 \right)$	黏性土: 20%~60% 砂土: 0~40%
重度	γ	$\gamma = \rho g = \frac{m}{V} g$	$\gamma = \gamma_d (1 + \omega); \gamma = \frac{d_s (1 + \omega)}{1 + e} \gamma_w$	16~22 kN/m ³
干重度	γ_d	$\gamma_d = \rho_d g = \frac{m_s}{V} g$	$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \omega}; \gamma_d = \frac{d_s}{1 + e} \gamma_w$	13~20 kN/m ³
饱和重度	γ_{sat}	$\gamma_{\text{sat}} = \rho_{\text{sat}} g = \frac{m_s + m_w + V_{a1} \rho_w}{V} g$	$\gamma_{\text{sat}} = \frac{d_s + e}{1 + e} \gamma_w$	18~23 kN/m ³
有效重度(浮重度)	γ'	$\gamma' = \rho' g = \frac{m_s - V_{s1} \rho_w}{V} g$	$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w; \gamma' = \frac{d_s - 1}{1 + e} \gamma_w$	8~13 kN/m ³
孔隙比	e	$e = \frac{V_v}{V_s}$	$e = \frac{\omega d_s}{S_r}; e = \frac{d_s (1 + \omega) \rho_w}{\rho} - 1$	黏性土和粉土: 0.5~1.2 砂土: 0.5~1.0
孔隙度(率)	n	$n = \frac{V_v}{V} \times 100\%$	$n = \frac{e}{1 + e}; n = 1 - \frac{\rho_d}{d_s \rho_w}$	黏性土和粉土: 30%~60% 砂土: 25%~45%
饱和度	S_r	$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\%$	$S_r = \frac{\omega d_s}{e}; S_r = \frac{\omega \gamma_d}{n}$	0%~50% 稍湿 50%~80% 很湿 80%~100% 饱和

注: 水的重度 $\gamma_w = \rho_w g = 1 \text{ t/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 9.81 \times 10^3 (\text{kg} \cdot \text{m}) / (\text{s}^2 \cdot \text{m}^3) = 9.81 \times 10^3 \text{ N/m}^3 \approx 10 \text{ kN/m}^3$

【例 2.1】在某住宅地基勘察中,已知一个钻孔原状土试样结果为:土的密度 $\rho = 1.80 \text{ g/cm}^3$,土粒相对密度 $d_s = 2.70$,土的含水量 $\omega = 18.0\%$,求其余 5 个指标。

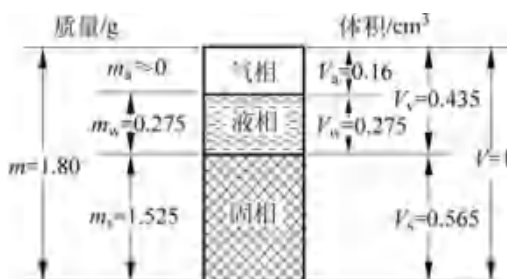


图 2.11 三相计算草图

【解】 (1) 绘制三相计算草图,如图 2.11 所示。

令 $V = 1 \text{ cm}^3$

已知 $\rho = \frac{m}{V} = 1.80 \text{ g/cm}^3$,故 $m = 1.80 \text{ g}$

已知 $\omega = \frac{m_w}{m_s} = 0.18$,故 $m_w = 0.18 m_s$

又知 $m_w + m_s = 1.80 \text{ g}$

$$\text{故 } m_s = \frac{1.80}{1.18} g \approx 1.525 g$$

$$\text{故 } m_w = m - m_s = (1.80 - 1.525) g = 0.275 g$$

$$\text{因此 } V_w = 0.275 \text{ cm}^3$$

$$\text{已知 } d_s = \frac{m_s}{V_s} = 2.70$$

$$\text{故 } V_s = \frac{m_s}{d_s} = \frac{1.525}{2.70} \text{ cm}^3 \approx 0.565 \text{ cm}^3$$

$$\text{孔隙体积 } V_v = V - V_s = (1 - 0.565) \text{ cm}^3 = 0.435 \text{ cm}^3$$

$$\text{气相体积 } V_a = V_v - V_w = (0.435 - 0.275) \text{ cm}^3 = 0.16 \text{ cm}^3$$

至此,三相草图中 8 个未知量全部计算出数值。

(2) 根据所求物理性质指标的表达式可得:

$$\text{孔隙比 } e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{0.435}{0.565} \approx 0.77$$

$$\text{孔隙率 } n = \frac{V_v}{V} \times 100\% = 0.435 \times 100\% = 43.5\%$$

$$\text{饱和度 } S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% = \frac{0.275}{0.435} \times 100\% \approx 63.2\%$$

$$\text{干密度 } \rho_d = \frac{m_s}{V} = 1.525 \text{ g/cm}^3, \text{干重度 } \gamma_d = 15.25 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{饱和密度 } \rho_{\text{sat}} = \frac{m_w + m_s + V_a \rho_w}{V} = (1.80 + 0.16) \text{ g/cm}^3 = 1.96 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{饱和重度 } \gamma_{\text{sat}} = 19.6 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{有效重度 } \gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = (19.6 - 10) \text{ kN/m}^3 = 9.6 \text{ kN/m}^3$$

上述三相计算中,若设 $V_s = 1 \text{ cm}^3$,与 $V = 1 \text{ cm}^3$ 计算可得相同的结果。

应当指出:三相计算是工程技术人员的一个基本功,要求熟练掌握。根据各物理指标的定义,利用三相草图,可以很方便地计算所需的物理指标。

4. 无黏性土的密实度技术指标

无黏性土一般指碎石土和砂土,粉土属于砂土和黏性土的过度类型,但是其物质组成、结构及物理力学性质主要接近砂土(特别是粉质砂土),故列入无黏性土的工程特征问题一并讨论。

无黏性土的紧密状态是判定其工程性质的重要指标,它综合反映了无黏性土颗粒的岩石和矿物组成、粒度组成(级配)、颗粒形状和排列等对工程性质的影响。工程中把以下指标作为划分密实度的标准。

1) 砂土密实度按天然孔隙比 e 划分

《岩土工程勘察规范》(2009 年版)(GB 50021—2001)、《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)中粉土密实度采用天然孔隙比 e 进行分类。如表 2.4 所示。

表 2.4 粉土密实度分类

土类	密实度		
	密 实	中 密	稍 密
粉土	$e < 0.75$	$0.75 \leq e \leq 0.90$	$e > 0.90$

我国 1974 年颁布的《工业与民用建筑地基基础设计规范》中曾规定以孔隙比 e 作为砂土密实度的划分标准,目前该规范已废止,新规范中已取消该划分标准。用天然孔隙比 e 一个参数判别砂土的密实度,应用方便,但无法反映土的粒径级配的因素。例如,两种级配不同的砂,一种为颗粒均匀的密砂,其孔隙比为 e'_1 ; 另一种级配良好的松砂,孔隙比为 e'_2 , 结果 $e'_1 > e'_2$, 即密砂的孔隙比反而大于松砂的孔隙比。

2) 按相对密实度 D_r 划分砂土密实度

为了克服上述用一个指标 e 对不同级配的砂土难以准确判别的缺陷,用天然孔隙比 e 与同一种砂的最松状态孔隙比 $e_{\max}$ 和最密实状态孔隙比 $e_{\min}$ 进行对比,看 e 靠近 $e_{\max}$ 还是靠近 $e_{\min}$,以此来判别它的密实度,相对密实度的表达式如下:

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (2.12)$$

当 $D_r = 0$, 表示砂土处于最松散状态; 当 $D_r = 1$, 表示砂土处于最密实状态。砂类土密实度按相对密实度 D_r 的划分标准,参见表 2.5。

表 2.5 按相对密实度 D_r 划分砂土密实度

密 实 度	密 实	中 密	松 散
D_r	$D_r > 2/3$	$2/3 \geq D_r > 1/3$	$D_r \leq 1/3$

根据三相比例指标间的换算, e 、 $e_{\max}$ 和 $e_{\min}$ 分别对应 ρ_d 、 $\rho_{d\min}$ 和 $\rho_{d\max}$, 由此得

$$D_r = \frac{\rho_{d\max}(\rho_d - \rho_{d\min})}{\rho_d(\rho_{d\max} - \rho_{d\min})} \quad (2.13)$$

从理论上讲,相对密实度的理论比较完整,也是国际上通用的划分砂类土密实度的方法。但测定 $e_{\max}$ (或 $\rho_{d\min}$) 和 $e_{\min}$ (或 $\rho_{d\max}$) 的试验方法存在原状砂土试样的采取问题,最大、最小孔隙比测定的人为因素很大,对同一种砂土的试验结果往往离散性很大。

3) 砂土密实度按标准贯入击数 N 划分

为了避免采取原状砂样的困难,在现行国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011) 和《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019) 中,均采用按原位标准贯入试验锤击数 N (简称标贯击数 N) 划分砂土密实度,分别见表 2.6 和表 2.7。

表 2.6 按标贯击数 N 划分砂土密实度

密实度	密 实	中 密	稍 密	松 散
标贯击数 N	$N > 30$	$30 \geq N > 15$	$15 \geq N > 10$	$N \leq 10$

注: 标贯击数 N 系实测平均值。