



高等学校土木工程类“十二五”规划教材

财政部文化产业发展专项资金资助项目

Engineering Geology

工程地质学

曹文贵 刘晓明 张永杰 编著

湖南大学出版社

高等学校土木工程类“十二五”规划教材
财政部文化产业发展专项资金资助项目

工程地质学

(土木工程专业用)

曹文贵 刘晓明 张永杰 编著

湖南大学出版社

内 容 简 介

本书较系统介绍了工程地质学的基本原理、工程地质勘察的基本方法和工程地质学在工程建设中的应用。

全书由绪论和七章内容组成。绪论主要介绍工程地质学的基本概念及其学习的基本方法 with 要求；第一章介绍地球与地质作用的基本概念，主要包括地球及其基本性质、地质作用、地质年代与地层系统、地层接触关系与产状等基本知识；第二章主要介绍岩石及其工程地质性质；第三章介绍地质构造与岩体结构稳定性分析方法，主要包括各种主要地质构造及其与工程建设的关系、岩体结构与岩体工程地质性质以及岩体结构稳定性的赤平投影分析方法；第四章介绍地下水的基本知识，主要包括水文循环、地下水赋存条件及其物理化学性质、地下水运动规律、地下水分类以及地下水对工程建设的影响与防治方法；第五章介绍第四纪沉积物及其工程地质特征，主要包括风化作用、地表暂时流水的地质作用、河流的地质作用、湖泊的地质作用、海洋的地质作用、冰川的地质作用与风的地质作用及其产物的工程地质特征和防治措施与方法；第六章介绍常见地质灾害及防治，主要包括地震、滑坡与崩塌、泥石流和岩溶与土洞及其防治措施与方法；第七章介绍工程地质勘察的基本知识，主要包括工程地质勘察的任务与目的、勘察阶段与等级、工程地质勘察方法和工程地质勘察资料的整理过程与方法。

本书可作为高等学校土木工程专业本科教学用书，亦可供土木工程的设计、施工和管理人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程地质学/曹文贵, 刘晓明, 张永杰编著. —长沙: 湖南大学出版社, 2015. 2

(高等学校土木工程专业“十二五”规划教材)

ISBN 978-7-5667-0808-3

I. 工… II. ①曹… ②刘… ③张… III. ①工程地质—高等学校—教材 IV. ①TU942.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 039793 号



工程地质学

GONGCHENG DIZHI XUE

作 者: 曹文贵 刘晓明 张永杰 编著

策划编辑: 卢 宇

责任编辑: 黄 旺 龙思成 责任校对: 全 健 责任印制: 陈 燕

印 装: 虎彩印艺股份有限公司

开 本: 787×1092 16 开 印张: 13.5 字数: 321 千

版 次: 2015 年 3 月第 1 版 印次: 2015 年 3 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5667-0808-3/Tu·185

定 价: 32.00 元

出 版 人: 雷 鸣

出版发行: 湖南大学出版社

社 址: 湖南·长沙·岳麓山 邮 编: 410082

电 话: 0731-88822559(发行部), 88821315(编辑室), 88821006(出版部)

传 真: 0731-88649312(发行部), 88822264(总编室)

网 址: <http://www.hnupress.com>

电子邮箱: pressluy@hnu.edu.cn

版权所有, 盗版必究

湖南大学版图书凡有印装差错, 请与发行部联系

高等学校土木工程类“十二五”规划教材

丛书编委会

顾 问 周绪红

主 任 周先雁

副主任 邓铁军 陈伯望

编委会名单(按姓氏笔画排序)

王卫东	方 志	邓铁军	邢心魁	刘 杰
孙义刚	杨春峰	肖勇刚	宋固全	张 红
张 敏	陈伯望	陈金陵	陈秋南	陈燕菲
周书葵	周先雁	周 基	施 周	夏力农
黄小林	曹国辉	龚 鐳	谢方平	

参加编写院校

湖南大学	中南大学	中南林业科技大学
南昌大学	贵州大学	长沙理工大学
湖南城市学院	湖南农业大学	桂林理工大学
南华大学	湖南科技大学	湖南工业大学
贵州师范大学	桂林电子科技大学	贵州民族大学
沈阳大学	长沙学院	湖南工程学院
湖南科技学院	邵阳学院	湖南工学院

序

随着我国经济社会的快速发展,基本建设规模不断扩大,为土木工程的发展带来了千载难逢的契机,也对土木工程人才培养提出了更高的要求。目前,我国正在进行的土木工程基本建设的数量、规模在世界上首屈一指,一批大型、特大型工程项目不断上马和竣工,土木工程的发展正处于前所未有的高速发展时期。在这个重要的历史时期,高等工程教育承担着培养中国特色社会主义现代化建设高级专门人才的历史重任。

然而,我国土木工程人才培养在适应社会发展需要方面还存在较大差距。其一是课程体系和教学方法没有根本性的转变。近10年来,高等院校开展了大规模的教学内容和课程体系改革,推出了一批优秀教材和精品课程,取得了明显成效。但是,传统的课程体系、教学计划、培养模式并没有普遍深刻的变化,不同科类的知识依然相互分离,综合性的课程还不多见,理论与工程实践脱节的局面并未得到根本改善。其二是教学内容没有做到与时俱进和与世界先进水平接轨。随着工业化进程的加快和科技水平的发展,教学内容不断增加,教学要求不断提高,我们还是习惯于增加课程、增加学时,而忽视了课程的整合、融合、拓宽、更新和更加注重应用;在教学方法上依然以讲授为主,学生自主学习、自我体验、自由创造的环境还不具备,现代工程要求的多学科综合性、实践性、适应性的特征在人才培养的过程中体现得还远远不够。其三是人才培养质量与社会需求脱节。不同高校培养计划、课程设置千篇一律,缺少学校特色和行业特色,陷入“异校同质”的困局;尤其是近10年来,某些新升格的本科院校,在人才培养上盲目追求“研究型”、“系统性”和“理论性”,导致理论与实践、学习与应用严重脱节。因此,我们必须根据社会发展需求,依据各自高校和行业的固有特点,对培养目标进行科学定位,对教学内容和课程体系进行改革,并将改革成果体现在教材建设之中。

正是为了适应教学改革的要求,湖南大学出版社精心组织出版了这套“高等学校土木工程专业十二五规划创新教材”,作为“高校教材立体化出版及平台建设”和“中国工程教育在线”项目的子项目,由财政部资助并被列入新闻出版总署新闻出版业发展项目库重点项目。这套规划教材涵盖了土木工程专业各个专业方向的主要专业基础课程和专业课程,具有如下几个显著特点:一是紧扣发展。根据《国家中长期教育改革和发展规划纲要》和《高等学校土木工程本科指导性专业规范》精神以及土木工程专业评估的要求组织教材内容,力图在教材中反映新材料、新技术、新结构、新成果。二是强化应用。强调学生创新思维的训练,注重学生创新精神、创新能力和工程实践能力的培养,教材内容与现行国家规范、规程相结合,与国家的注册执业资格考试制度相结合。三是服务师生。围绕“教师教学需要”和“学生学习需要”两个中心点,秉持“体现内容的

前沿性、保持内容的整体性和系统性、兼顾内容的全面性与精练性、突出工程实践性”等原则，精心组织教材内容，同时对教材进行了立体化开发，包括纸质教材、电子书、电子课件、多媒体素材库和工程教育网站。

系列教材以主教材为中心，配套辅导教材、教师用演示文稿、电子资料（电子资料库）、教学网站等载体，提供包含主体知识、案例及案例分析、习题试题库及答案、教案、课件、学习软件、自测（考试）软件等内容的立体化教材。一方面，满足课程教学的需要；另一方面，面向工程教育，提倡以“能力为导向”的交互式学习方法，建立了教材配套的立体化资源，使得学生不仅可利用教材在课堂上学习知识，而且能够在课后进行更多的主动式、自主式学习。

教材建设是反映时代发展、体现教学内容和教学方法、培养适应社会需求人才的重要载体。这套教材的出版、发行和使用，将促进土建类课程、教材、教学内容和教学方法的改革，为人才培养模式创新做出有益的探索，从而进一步提高人才培养的质量。

周绪红

重庆大学校长 中国工程院院士
2014 年 10 月于重庆大学

前 言

工程地质学是土木工程（包括岩土工程、道路工程、桥梁工程、建筑工程和地下与隧道工程）重要的专业技术基础课程。本教材系土木工程专业系列本科教材之一，依据中华人民共和国住房和城乡建设部颁发的《高等学校土木工程本科指导性专业规范》要求，在吸取现有相关教材编写经验的基础上编写而成。

本教材编写时，力求内容全面、简明扼要，紧密结合土木工程的常见工程地质问题，最大限度地满足土木工程建设需要。在阐述基本概念和问题时，尽可能多地采用图表，并使内容条文化，使基本概念和问题的理解更加直观化，便于快速而准确地掌握工程地质学的基本理论与方法。同时，还力求注意工程地质学与后续课程的联系，但有些更深入的内容（如边坡稳定性分析、岩土变形与沉降计算等）未列入其中。

整个教材由绪论和七个章节内容组成。绪论主要介绍工程地质学的特点、任务和学习要求；第一章介绍地球初步知识、地质作用以及地层和岩层的基本概念；第二章重点介绍矿物与岩石的形成及其工程地质性质；第三章重点介绍地质构造、岩体工程地质性质以及岩体结构稳定性的赤平投影分析方法；第四章简要介绍地下水的基本知识；第五章介绍第四纪沉积物的形成原因及其工程地质特征；第六章重点介绍土木工程中几种常见不良地质现象的形成机理以及工程防治方法；第七章简要介绍土木工程地质勘察方法。

本教材由湖南大学曹文贵教授、刘晓明副教授以及长沙理工大学张永杰副教授共同编写。其中，绪论和第一、二、三章由曹文贵教授编写；第四章和第七章由刘晓明副教授编写；第五章和第六章由张永杰副教授编写；全教材由曹文贵教授负责统稿。

本教材编写过程中，参考了大量现有工程地质学教材（见本教材参考文献）和网络资料，并且得到了许多同行与老师的指导与帮助，在此表示诚挚的谢意。

鉴于编者水平所限，教材中不当之处在所难免，恳请读者批评与指正。

编 者

2015年3月

目 录

绪 论	(1)
1 工程地质学的概念	(1)
2 工程活动与地质环境	(1)
3 工程地质问题	(2)
4 工程地质的重要性	(2)
5 本课程学习方法与要求	(3)
第 1 章 地球与地质作用	(5)
1.1 地球及其特征	(5)
1.2 地球的主要物理性质	(8)
1.3 地质作用	(11)
1.4 地质年代与地层系统	(17)
1.5 岩层和地质结构面的产状	(23)
思考题	(26)
第 2 章 岩石及其工程地质性质	(27)
2.1 矿物及其特征	(27)
2.2 岩浆岩及其特征	(41)
2.3 沉积岩及其特征	(49)
2.4 变质岩及其特征	(55)
2.5 岩石的工程地质性质	(60)
思考题	(71)
第 3 章 地质构造与岩体结构稳定性分析	(72)
3.1 水平构造	(72)
3.2 单斜构造	(73)
3.3 褶皱构造	(75)
3.4 断裂构造	(81)
3.5 岩体结构与岩体的工程性质	(95)
3.6 岩体结构稳定性分析	(101)
思考题	(111)
第 4 章 地下水	(113)
4.1 水文循环	(113)
4.2 地下水赋存空间与岩土水理性质	(115)
4.3 地下水的物理性质与化学成分	(116)
4.4 地下水运动与规律	(119)

4.5	地下水的分类·····	(123)
4.6	地下水对工程建设的影响与防治·····	(129)
	思考题·····	(131)
第5章	第四纪沉积物及其工程地质特征·····	(132)
5.1	风化作用及残积土·····	(132)
5.2	地表流水的地质作用及坡积土、洪积土与冲积土·····	(137)
5.3	湖泊的地质作用及湖积土·····	(147)
5.4	海洋的地质作用及海积土·····	(148)
5.5	冰川的地质作用及冰碛土·····	(150)
5.6	风的地质作用及风积土·····	(151)
	思考题·····	(153)
第6章	常见地质灾害及防治·····	(154)
6.1	地震·····	(154)
6.2	滑坡·····	(165)
6.3	崩塌与岩堆·····	(170)
6.4	泥石流·····	(173)
6.5	岩溶·····	(178)
6.6	土洞与塌陷·····	(181)
	思考题·····	(183)
第7章	工程地质勘察·····	(184)
7.1	工程地质勘察的一般知识·····	(184)
7.2	工程地质调查与测绘·····	(187)
7.3	工程地质勘探·····	(189)
7.4	工程地质试验·····	(193)
7.5	工程地质勘察的资料整理·····	(195)
7.6	土木工程的主要工程地质问题和勘察要点·····	(198)
	思考题·····	(202)
	参考文献·····	(203)

绪 论

地球是人类赖以生存的自然环境,它在漫长地质作用下已形成了复杂的地质条件(如物质组成、地形地貌、地质构造等),并且还在不停地发生变化。人类为了改善生存环境,必将进行各类工程活动(如工程建设、资源开发等)。这些工程活动不仅与地球当前的地质条件及其变化紧密相关,同时也会改变地质条件,亦可能恶化人类生存的自然环境。因此,人类在利用和改造地球的工程活动过程中,必须尽可能使工程活动和自然地质环境之间保持和谐。为此,人类必须在深入了解二者之间关系的基础上,掌握保持二者和谐的理论与技术,于是,工程地质学就应运而生了。

1. 工程地质学的概念

工程地质学是地质学的分支学科,主要研究工程活动与地质环境之间的相互作用。它把地质学理论与方法应用于工程活动实践,通过工程地质调查及理论的综合研究,对工程所辖地区即工程场地的工程地质条件进行评价,解决与工程活动有关的工程地质问题,预测并论证工程活动区域内各种工程地质问题的发生与发展规律,并提出其改善和防治的技术措施,为工程活动的规划、设计、施工、使用及维护提供所必需的地质技术资料。

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部分基本内容。工程岩土学的任务是研究岩土的工程地质性质,及这些性质的形成原因和它们在自然或工程活动影响下的变化规律;工程地质分析的任务是研究工程活动中的工程地质问题,及这些问题产生的地质条件、力学机理和发展演化规律,以便正确评价和有效防治它们对工程活动的不良影响;工程地质勘察的任务是探讨工程地质调查研究的方法,以便有效查明有关工程活动的各种地质因素和地质条件。

由于工程活动涉及的行业和关注的领域不同,工程地质条件对这些工程活动的影响将存在很大的差异,不同行业或领域的工程活动所引起的工程地质问题也会不同。因此,不同行业或领域的工程地质学内容必然存在差异。实际上,工程地质学已经进一步细化为不同的分支,如环境工程地质学、海洋工程地质学、矿山工程地质学等。由于本教材重点讨论与土木工程(主要包括道路、桥梁、隧道与地下工程、房屋建筑等)建设行业有关的工程地质问题,故亦可称为土木工程地质学。

2. 工程活动与地质环境

工程活动和地质环境是工程地质学的主要研究对象。两者相互影响和制约,存在密切的关系,主要表现为如下两个方面:

①地质环境对工程活动的影响和制约是多方面的。工程活动的地质环境亦称为工程地质条件,它是与工程活动有关的地质条件的总和,主要包括岩土的工程性质、地形地貌、地质构造、水文地质、地质作用、自然地质现象和天然建筑材料等几个方面。对于一个具体的工程建设场地,工程地质条件是客观存在的,工程活动必须与地质环境相适应。地质环境直接影响工程建设的规划、设计、施工、使用和维护等多个方面。

②工程活动也会以各种形式影响地质环境。任何工程活动都会对相应地区的地质环境甚至生态环境产生不同程度的影响,例如,房屋会引起地基沉降;桥梁会使局部河段冲刷淤积发

生变化;大型水电大坝会引起上下游地区地质和生态环境的变化;边坡开挖会引起滑坡或泥石流等。

工程活动对环境往往都表现出不良的影响,在当前越来越重视环境保护的情况下,工程活动对环境的影响已成为人们普遍关注的问题。因此,如何保持工程活动与地质环境的和谐性也是工程地质学关注的极其重要的问题。研究人类工程活动与地质环境之间的这种相互制约关系,以使工程活动既能安全经济,又能合理开发和保护地质环境,这是工程地质学研究的基本任务。

3. 工程地质问题

一个特定建筑场地的地质环境即工程地质条件是客观存在的,它不以人们的意志为转移,不能随意改变;而在这个特定建筑场地进行的工程活动是人为现象,工程的类型、规模等都可以人为调控。但是,工程活动必须服从于地质环境。不同工程活动要求的工程地质环境是存在很大差别的,如果地质环境不能满足工程活动的要求,则由工程活动形成的工程建筑物在安全性、经济性和正常使用方面就会出现问題,这就是工程地质问题。一个建筑场地出现的工程地质问题随工程活动的不同而发生变化,因此,当谈及工程地质问题时,总是离不开工程活动。

一个建筑场地的工程地质问题一般包括两个方面:一是建筑场地的区域稳定问题,它关系到工程活动成败的全局,必须优先考虑并妥善处置,例如,山坡地区进行工程活动,山坡的稳定性是影响工程活动的全局问题,一旦处理不当,会导致工程活动发生事故甚至遭受毁灭性破坏;二是建筑结构或地基的局部稳定问题,这类问题往往是由组成建筑结构的岩土体或建筑基础地基岩土体达不到强度和变形要求引起的,只要改善局部岩土体工程地质性质即可使问题得到解决,它不影响工程活动的全局。

工程地质问题是工程活动成败的关键,它是工程地质学不可回避且须重点研究的问题。面对工程地质问题,必须考虑地质环境与工程活动的相互影响,采取综合的处治措施。

4. 工程地质的重要性

如前文所述,任何工程活动都是在特定的地质环境中进行的,所有工程活动的方式、规模和类型等都会受到工程活动场所地质环境的影响和制约。因此,任何工程活动开始之前,都必须首先开展工程地质工作,充分掌握工程活动场所的工程地质条件,论证与评价工程活动场所的稳定性、适宜性、不良地质现象及不良地质现象处治的技术决策和实施方案。

大量实践证明,工程地质工作做得好,工程的设计与施工就能顺利进行,工程的安全运营就能得到保证;相反,忽视工程地质工作,就会给工程建设带来不同程度的不利影响,轻则修改设计方案、增加工程建设投资和延误建设工期,重则使工程建筑物完全不能使用,甚至突然破坏,造成重大的经济损失和严重的人员伤亡。

当前国内外,重大工程建设中出现的问题甚至灾害性事故与工程地质有关的比例愈来愈高。这除了与工程地质工作的深度与质量不高有关以外,还与工程技术人员对工程地质资料认识不足以及设计与施工方案对工程地质条件的针对性不强都有紧密关系。

此外,工程地质学是土木工程等专业的专业基础课程,它是后续专业课程(例如,土力学、岩石力学、基础工程、路基工程、地下与隧道工程、地基处理等)的基础,不掌握工程地质学,无法进行后续专业课程的学习。

综上所述,工程地质的重要性不言而喻,这也是一个工程技术人员必须深入学习工程地质学的根本原因。

5. 本课程学习方法与要求

工程地质学的研究对象主要是复杂的地质体,它不仅关心这些复杂地质体的赋存条件即地质环境,而且在讨论工程地质问题时,又与具体的工程活动有紧密关系。

地质体是经过漫长地质作用形成的,在形成过程中经受了反复而复杂的持续地质营力的作用。地质体中不仅表现出既有的复杂地质现象,而且还在进一步发生变化。因此,地质现象的形成与演化都存在复杂的力学机理。

地质体一般深埋于地下,人们难以直接观察到全部地质现象,多数地质条件只能依据推测而得到,而且地质体中地质现象或地质条件的分布具有很大的随机性,这就使得地质现象或地质条件具有很大的不确定性或模糊性。

诸如上述种种原因,工程地质学具有自身的特点和规律。为了使工程地质学的学习取得较好的效果,须注意如下几个方面的问题:

①地质分析与力学分析相结合。工程地质学主要关注地质体中的地质现象与地质条件,工程地质学应该以地质分析为主,但是地质现象和地质条件的形成与演化都存在一定的力学原因,因此,采用地质与力学相结合的分析方法可以更有效地解决工程实际问题。

②定性与定量分析相结合。大部分地质现象和地质条件都非常复杂,限于目前研究水平,将其定量化非常困难,因此,工程地质学中经常采用定性分析方法。虽然定量分析地质现象和地质条件是一种进步,但是它目前只能应用于某些问题的研究。

③工程类比与实验相结合。实验方法是研究工程地质问题的一种可靠方法。然而,由于成本或实验条件问题,有时难以实施,这种情况下,采用工程类比法也是研究工程地质问题的有效方法。

④理论与实践相结合。很多地质现象和地质条件可以通过理论得到解释,但由于工程地质的复杂性,也有很多地质现象和地质条件不能得到理论解释或与理论存在偏差。因此,理论固然重要,但也要紧密联系实践,从实践中修正理论。

⑤关注地质环境与工程活动的紧密关系。工程地质学中讨论工程地质问题不能将地质环境与具体工程活动相脱离,因为即便在同一地质环境中进行不同的工程活动,产生的工程地质问题也是不同的。只有综合考虑地质环境与工程活动的相互制约关系,方能使工程建设顺利进行,而不至引发大的环境问题来危害社会。

⑥关注地质环境不具重复性的特点。地质环境和地质条件属于自然现象,不同地区经受的地质作用都是不同的,从而使不同工程场所的地质环境和地质条件都不具有重复性。因此,任何工程活动开始之前都必须首先进行工程地质工作,以查明地质环境和地质条件。

⑦关注逻辑性和系统性较差的特点。工程地质学是人们在长期工程实践中总结出来的经验与理论,由于地质环境和工程活动以及它们之间相互关系的复杂性,致使工程地质学理论的逻辑性和系统性较差,这就给学习工程地质学带来了困难。学习工程地质学应该特别强调对基本概念与理论的理解,并将其灵活应用于工程实践。

⑧关注学术争鸣。由于工程地质现象的复杂性,工程地质学中许多理论与概念目前都存在分歧,因此,在学习工程地质学时,要特别注意不同学术观点的差异。其目的在于吸取不同学术观点的优势,以解决实际工程问题。

本课程是土木工程专业的一门专业基础课。作为一名土木工程专业的本科生,在学习工程地质学课程后,应达到如下基本要求:

①掌握工程地质学的基础知识和基本理论,为学习专业课和开展相关问题的科学研究提

供必要的工程地质学知识与理论；

②懂得搜集、阅读和分析工程地质资料,并能正确地应用于工程设计、施工和管理；

③及时发现野外工程地质问题,做出合理的工程判断与评价,并在此基础上,提出可行的工程处理措施与方案；

④结合具体的工程实际,提出满足工程要求的工程地质勘察任务。

第 1 章 地球与地质作用

内容提要:

1. 地球及其构造特征和主要物理性质;
2. 地质作用及内外力地质作用的关系;
3. 岩层与地层及其地质年代;
4. 岩层产状及其测定方法。

地球是人类生存的场所,也是地质学和工程地质学研究的主要对象。在持续而漫长的地质作用下,地球不断发生变化和演变,形成了复杂的地形地貌和内部构造。这种复杂性直接影响土木工程建设的设计、施工和管理,因此,有必要对地球的构造特征、形成与演化的原因以及相关概念进行了解,这正是本章介绍的主要内容。

本章将重点介绍地球及其特征、地质作用、地质年代、地层接触关系和岩层或地层产状等基本概念。

1.1 地球及其特征

1.1.1 概述

地球是太阳系八大行星之一,它是一个椭球体,赤道半径约 6 378.137 km,极半径约 6 356.752 km。地球绕通过球心的地轴(即连接南北极的直线)自转,自转轴对着北极星方向的一端称为北极,另一端称为南极。在地球表面上,垂直于地球自转轴的大圆称为赤道,而连接南北两极的纵向线称为经线或子午线。通过英国伦敦格林尼治天文台(Royal Greenwich Observatory)原址的那条经线为 0°经线,亦称本初子午线。从本初子午线向东分作 180°,称为东经;向西分作 180°,称为西经。在地球表面上,与赤道平行的小圆称为纬线,赤道为 0°纬线,从赤道向南和向北分别分作 90°,赤道以北和以南的纬线分别称为北纬和南纬。

地球表面积约 5.1 亿 km²,其中,海洋约占 71%,陆地约占 29%。陆地和海洋在地表的分布很不规则,一般把大片陆地称为大陆或洲,大片海域称为海洋,散布在海洋或河湖中的小块陆地称为岛屿。陆地和海底都是高低不平的,陆地上有低洼的盆地,高耸的山脉,大陆平均高度约 840 m(以海平面为 0 m 标高计算)。我国喜马拉雅山的珠穆朗玛峰高约 8 848.13 m,是大陆上的最高山峰。海洋底也有高山和沟壑,太平洋中马利亚纳群岛附近的海底深约 10.96 km,是海洋中最深的地方,地球表面最大高差约 20 km。

1.1.2 地球构造圈层的划分

地球是由不同圈层构成的,包括外圈层和内圈层。

(1) 外圈层

地球外圈层包括大气圈、水圈和生物圈,它们的特点分别如下:

①大气圈:它是地球的最外圈层,其上界可达 1 800 km 或更高的空间。自地表到 10~

17 km的高空为对流层,所有的风、云、雨等天气现象均发生在这一层,它对地球上生物生长、发育和地貌的变化具有重大影响。大气的主要成分是 N_2 (约 78%) 和 O_2 (约 21%), 其次是 Ar (约 0.93%)、 CO_2 (约 0.03%) 和水蒸气等。大气圈除提供生物需要的 CO_2 和 O_2 等以外,还在适宜于生物生长的温度和湿度条件下,保护生物免受宇宙射线和陨石的伤害。约在 4 亿多年前,高空臭氧层的形成遮挡了大量对生物有害的紫外线,为生物的生长创造了必要的自然条件。

②水圈:它由海洋和陆地上的水和冰构成。水的总体积约为 14 亿 km^3 , 其中,海水约占 98%, 陆地水约占 1.9%。水圈中各部分水的成分不同,海水含盐度高,平均约为 35%, 以氯化物(如 $NaCl$ 和 $MgCl_2$ 等)为主;陆地水含盐度低,平均低于 1%, 以碳酸盐[如 $Ca(HCO_3)_2$] 为主。水受太阳辐射热的影响而不停地循环,由此形成了外力地质作用的动力,它们在运动过程中不断产生动能,促进地形地貌的变化,并对岩土工程性质产生极为重要的影响。

③生物圈:地球生物存在于水圈、大气圈下层和地壳表层的范围之中。生物富集的化学元素主要是 H、O、C、N、Ca、K、Na、Fe、Mg、Si、P、S、Al 等。生物圈质量很小,据估计相当于大气圈的 1/300、水圈的 1/7 000 或上部岩石圈的 1/1 000 000,但是生物圈对改变地球的地理环境却起着重要的作用,生物所产生的物质是人类重要财富。

(2)内圈层

依据地球内部放射性元素的蜕变速度,地球从产生到现在大约经历了 45 亿~60 亿年,在这漫长的地质历史中,地球经历了多次沧桑之变。由于地球内部物质不断发生分异作用,使地球内部形成了不同圈层,所以地球内圈层并非均匀的整体,其构造非常复杂。目前,了解地球内部构造只能依靠间接信息,最重要的间接信息是地震波在地球内部的传播速度,它不仅是划分地球内部圈层的基础,也是了解地球内部物质的密度、温度、熔点、压力等物理性质的重要依据。此外,还可依靠陨石、地幔岩石学以及高温高压实验等提供的间接信息推断地球内部的物质成分。

根据地震波在地球内部传播的速度资料(见图 1-1 和表 1-1),地球内部存在两个明显的一级界面。第一个界面在 30~80 km 深处,纵波(P 波)速度从 6.83 km/s 增加到 7.75 km/s,横波(S 波)速度从 3.66 km/s 增加到 4.35 km/s,称为莫霍洛维奇面(简称莫霍面,南斯拉夫学者 A. 英霍洛维奇于 1909 年首先发现);第二个界面在约 2 900 km 深处,纵波速度从 13.64 km/s 突然下降到 8.11 km/s,而横波不能通过此面,称为古登堡面(美国学者 B. Gutenberg 于 1914 年发现)。因此,将地球内圈层划分为三个圈层,即地壳、地幔和地核(见表 1-2),其特点如下:

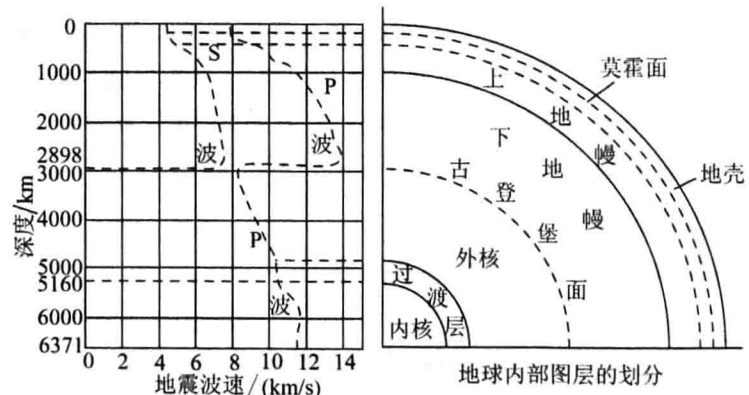


图 1-1 地震波在地球内部的传播速度

表 1-1 地震波在地球内部传播速度

深度/km	波速/(km/s)		界 面
	纵波(P)	横波(S)	
0	5.55	3.23	—莫霍面—
30~80(上)	6.83	3.66	
30~80(下)	7.75	4.35	
900	11.30	6.30	—古登堡面—
2 822	13.64	7.31	
2 900	8.11	横波不 能通过	
5 000	10.44		
5 200	9.72		
6 371	11.37		

表 1-2 地球内圈层物理状况

圈 层	深度/km	密度/(g/cm ³)	应力/大气压	温度/℃
地 壳	33(平均)	2.7	9 000	约 1 000
		2.9		
地 幔	984	3.32	382 000	约 1 500
	2 898	4.64		约 2 000
		5.66		
地 核	6 371	9.71	3 600 000	约 5 000
		17.90		

①地壳:莫霍面以上部分,是地球的坚硬外壳,由固体岩石组成,厚度变化范围很大,平均厚度约为 33 km,其体积约只有地球的 0.8%。组成地壳的岩石除地壳最表层有占岩石总量约 5%的沉积岩外,地壳上部岩石平均成分相当于花岗岩类岩石,其化学成分富含硅与铝,称为硅铝层;下部岩石平均成分相当于玄武岩类岩石,其化学成分除硅铝外,铁和镁相对增多,称为硅镁层。海洋底部主要是硅镁层,有的地方只有很薄的硅铝层或完全缺失硅铝层。

根据岩石和陨石的化学成分分析,地壳化学成分以 O、Si、Al、Fe、Ca、Na、K、Mg 和 H 等为主,这些元素在地壳中的平均质量百分比(称为克拉克值)见表 1-3,它们占地壳总质量的 98.13%,其中,氧几乎占了一半,硅占 1/4 多,其他近百种元素只占 1.87%。地壳中化学元素并非孤立、静止地存在,它们随自然环境的改变而不断变化。这些元素在一定的地质条件下,结合成具有一定化学成分和物理性质的单质或化合物,称为矿物,如石墨、石英和长石等。由一种或多种矿物组成的集合体,称为岩石,如花岗岩由石英、长石、云母等矿物组成,大理岩由方解石组成。因此,矿物和岩石是组成地壳的基本物质单位。

表 1-3 组成地壳主要化学元素的克拉克值

化学元素	符号	克拉克值	化学元素	符号	克拉克值	化学元素	符号	克拉克值
氧	O	49.13	硅	Si	26.00	铝	Al	7.45
铁	Fe	4.20	钙	Ca	3.25	钠	Na	2.40
钾	K	2.35	镁	Mg	2.35	氢	H	1.00

②地幔:介于莫霍面与古登堡面之间的部分,即地壳以下至约 2 900 km 深处的圈层,又称中间层。它的物质成分具有过渡性质,故又可称为过渡圈。按其物质成分和所处状态的不同,可分为上地幔(莫霍面至其下约 900~1 000 km 范围,主要由硅酸盐类物质组成,平均密度约 3.5 g/cm³,温度为 1 200 ℃~2 000 ℃,应力约达 0.4 GPa)和下地幔(莫霍面下约 900~1 000 km 深处至古登堡面范围,主要由铁、镍金属氧化物和硫化物组成,平均密度约 5.1 g/cm³,温度达

2 000 °C~2 700 °C,应力约达 150 GPa)。在上地幔上部,深约 50~250 km 的范围内,存在一个不连续的地震波低速度带,放射性元素大量集中,蜕变生热使这一带内有局部熔融状态的物质存在,一般认为可能是岩浆发源地。上地幔的下部范围,只有深源地震才能达到,其深度可达约 720 km。

③地核:自古登堡面至地心部分。地核又分为内核和外核,界面约在 5 200 km 深处,其组成物质为铁、镍金属氧化物和硫化物,故又称为铁镍核心,平均密度约 13 g/cm³,温度达 3 500 °C~4 000 °C,中心应力约达 360 GPa。

地球内部各圈层的物质运动是产生各种地质现象的内动力源泉,如地球内部,特别是地壳下部及地幔组成物质的运动可引起地壳运动。相应的化学变化和热力作用,又可进一步引起物质熔化形成岩浆,岩浆产生后,还将导致一系列其他运动和变化。因此,对地球内部各圈层的了解,有助于研究地球的形成和演化历史。

1.2 地球的主要物理性质

1.2.1 质量和密度

根据牛顿万有引力定律,可计算出地球的质量约为 5.98×10^{27} g,将其除以地球体积可得地球的平均密度约为 5.52 g/cm³。由于直接测出构成地壳各种岩石的密度为 1.5~3.3 g/cm³,还有密度为 1.0 g/cm³ 的水分布,因此,可推测地球内部物质密度更大,这已为地震波在地球内部传播速度的观测资料所证实。根据地震波与密度的关系,计算出地球内部密度随深度的增加而增加(见表 1-2),地心密度可达 16.0~18.0 g/cm³。

1.2.2 地应力

岩石和土是地球表层物质,在漫长的地质演变历史长河中,由于其自重和地质构造运动等原因使地壳物质产生了内应力效应,这种应力称为地应力或天然应力。地应力一般由自重应力和构造应力组成,它对土木工程尤其是地下工程存在很大影响,因此,人们对地应力的研究受到了广泛重视。

迄今为止,人们就地应力的认识提出了两种理论假说。其一,瑞士地质学家 Heim 于 1878 年提出了地应力的“静水压力”假说,认为地应力的垂直和水平分量相等,而且垂直分量等于岩石重度 γ 与埋深 H 的乘积;其二,苏联学者 A. Н. динник 按半无限体弹性空间自重应力场进行分析,认为垂直应力分量为 γH ,而水平应力分量为 $[\mu/(1-\mu)]\gamma H$ (μ 为岩石泊松比)。尽管这两种假说在一定程度上揭示了地应力形成的力学机理及其分布规律,然而,它们均与实际存在差距,其根本原因在于没有充分认识到地质构造应力对地应力的影响。于是,人们基于现场测试和统计分析对地应力进行了较深入研究,并通过现场地应力测量和地震波在地球内部传播速度的观测,获得了如下关于地应力分布的规律:

①地应力为压应力,基本上为铅直和水平方向。现场地应力测量及其统计分析表明,一个主应力并非总是铅直方向,其与铅直方向的夹角小于 30°,因此,一般近似认为一个主应力方向是铅直的,另外两个主应力是水平的。在埋深约为 2 700 m 范围内,铅直应力 σ_v 等于单位面积上覆岩层的重量即 $\sigma_v = \gamma H$,其随埋深呈线性增长关系,见图 1-2。虽然有些实测值与其有局部偏离,但总的来说还是基本符合上述规律的,特别是在地壳深部。绝大部分测量结果还表明地壳中的应力为压应力,极少出现张(或拉)应力的情况。