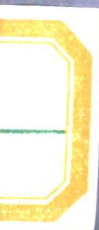


工程地质

主 编 曲力群 李 忠 苗喜德
主 审 贾贵廷

GONGCHENG DIZHI



中国铁道出版社

工 程 地 质

主编 曲力群 李 忠 苗喜德

主审 贾贵廷

中 国 铁 道 出 版 社

2002年·北京

(京)新登字 063 号



内 容 简 介

本书主要内容分普通地质学基础理论和工程地质学基础理论两大部分,共九章。

第一部分包括:第一章地球科学概论,第二章矿物和岩石,第三章地质构造,第四章地貌与第四纪,第五章地史;第二部分包括:第六章土、岩石和岩体的工程地质性质,第七章工程地质问题分析,第八章工程地质勘察,第九章通用术语等。

本书是高等院校土木工程及其相关专业的基础课程教材,广泛适用于水利水电工程、工业与民用建筑工程、公路与铁路交通工程、机场码头的建筑工程、国防工程等高等院校的本科和专科学生,也可作为研究生、教师和工程技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

工程地质/曲力群、李忠、苗喜德主编. —北京:中国铁道出版社,2002.3
ISBN 7-113-04538-3

I. 工… II. ①曲… ②李… ③苗… III. 工程地质 IV. P642

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 04179 号

书 名: 工程地质

著作责任者: 曲力群、李忠、苗喜德 主编

出版·发行: 中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑: 王俊法

封面设计: 陈东山

印 刷: 北京市燕山印刷厂

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 22.25 字数: 550 千字

版 本: 2002 年 3 月第 1 版 2002 年 3 月第 1 次印刷

印 数: 1—3 000 册

书 号: ISBN 7-113-04538-3/TU·689

定 价: 39.50 元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

前 言

本书是在我国加入世界贸易组织后考虑编写的,目的是为了加强高等院校土木工程及其相关专业本科和专科学生的理论水平和应用能力,特别是涉外工作能力。随着工程建设市场的国际化,要求工程人员不仅精通专业知识,而且能够熟练应用相关的外语知识进行沟通和工作,因此本书的第九章通用术语部分可以解决有关的涉外问题。

经过多年的教学工作,我们体会到必须广泛注意相关专业的动态情况,并且进行优势互补,才能有所成就,才能有所发展。因此,我们对有些问题进行了较详实的解剖,以便读者在涉足相关领域时能够借本书之力进行深入研究。由于教学学时所限,可以选择有针对性的内容进行讲授;同时可方便地了解相关领域的一些知识。

在本书的编写过程中,得到了有关院校(中国地质大学、石家庄铁道学院、石家庄经济学院等)的领导和同行的关心和大力支持,在此表示诚挚的谢意。

本书由石家庄铁道学院土木工程分院曲力群、李忠和图书馆苗喜德主编,参加编写的有:曲力群(绪论、第二章、第三章、第五章、第九章),李忠(第一章),苗喜德(第八章),杜学玲(第四章和第六章),陈祥军(第七章);苗喜德、赵春虎负责资料的收集和整理工作。全书由石家庄经济学院贾贵廷教授主审,并提出宝贵意见。

在编写过程中,耿彦青和马文勇两位同志进行了校核工作,在此一并表示感谢。

由于我们水平有限,时间仓促,本书难免有疏漏或不妥之处,诚望读者批评指正。

编 者

2002年2月

目 录

绪 论	(1)
-----------	-----

第一篇 普通地质学基础理论

第一章 地球科学概论	(6)
第一节 地球的物质组成	(6)
第二节 生物圈——大自然的精华	(13)
第三节 水圈——地表变化的主要媒介	(16)
第四节 地球的内部圈层	(27)
第五节 地磁与重力	(32)
第六节 岩石圈内部的物质转化	(38)
第二章 矿物和岩石	(47)
第一节 矿 物	(47)
第二节 岩 石	(61)
第三章 地质构造	(96)
第一节 褶 皱	(96)
第二节 节 理	(103)
第三节 断 层	(110)
第四章 地貌与第四纪	(121)
第一节 地貌与第四纪概论	(122)
第二节 主要陆地地貌及第四纪沉积	(131)
第三节 中国第四纪地层	(192)
第五章 地 史	(199)
第一节 地层划分对比及地质年代学	(200)
第二节 沉积岩相和古地理	(208)
第三节 历史构造分析与全球构造体系	(209)

第二篇 工程地质学基础理论

第六章 土、岩石和岩体的工程地质性质	(216)
第一节 土的工程地质性质	(216)
第二节 岩石的工程地质性质	(222)
第三节 岩体的工程地质性质	(225)
第七章 工程地质问题分析	(237)
第一节 区域稳定性分析	(237)
第二节 场地渗透稳定性分析	(248)
第三节 地基沉降与滑移稳定性分析	(253)

第四节 斜坡稳定性分析·····	(255)
第五节 地下洞室围岩稳定性分析·····	(266)
第八章 工程地质勘察 ·····	(278)
第一节 工程地质勘察的方法·····	(278)
第二节 工程建筑地区工程地质勘察·····	(280)
第九章 通用术语 ·····	(292)
第一节 岩土工程及有关学科·····	(292)
第二节 地球的构造·····	(292)
第三节 地 貌·····	(293)
第四节 矿物岩石·····	(294)
第五节 地质构造·····	(296)
第六节 外力地质作用及其产物·····	(297)
第七节 物 探·····	(298)
第八节 勘 探·····	(299)
第九节 通用图件·····	(302)
第十节 土的类别·····	(303)
第十一节 岩土物理性质·····	(305)
第十二节 岩土力学性质·····	(308)
第十三节 岩土试验·····	(312)
第十四节 土工计算·····	(314)
第十五节 地下洞室·····	(317)
第十六节 堤坝工程·····	(320)
第十七节 地基处理与岩土加固·····	(320)
第十八节 基 础·····	(322)
第十九节 振 动·····	(325)
第二十节 勘察阶段和分析评价·····	(327)
第二十一节 不良地质现象·····	(329)
第二十二节 地 震·····	(330)
第二十三节 水 循 环·····	(332)
第二十四节 地下水的类型·····	(333)
第二十五节 地下水赋存·····	(334)
第二十六节 地下水运动·····	(335)
第二十七节 水化学与水环境·····	(336)
第二十八节 水文地质调查与图件·····	(339)
第二十九节 地 热·····	(339)
第三十节 井 泉·····	(340)
第三十一节 水文地质试验与参数·····	(341)
第三十二节 水资源评价·····	(344)
第三十三节 水资源管理·····	(346)
参考文献 ·····	(348)

绪 论

工程建设是在各种地质环境中进行的。工程建筑物与地质环境之间,必然产生一定方式的相互关联和制约。地质环境对工程建筑物的制约,可以由一定的作用影响工程建筑物的安全稳定和正常运用,也可以由于某些地质条件欠佳而提高工程造价。工程建设又可以各种方式影响地质环境,使其产生程度不同、范围不一的变化。它在一定条件下,又会影响原有的和在建的工程建筑物的安全稳定和正常运用。所以,工程建设必须根据具体地质环境和工程建设方式、规模和类型,预见到其二者相互制约的基本形式和规律,才能合理有效地开发利用并妥善保护地质环境。工程地质学便是担负着这种任务的应用地质学。

工程地质学是地质科学的一个分支,是研究与工程规划、设计、施工和运用有关的地质问题的科学。它是在改造大自然的生产实践中发展起来的一门科学,因而在经济建设和国防建设中应用非常广泛,如水利水电建设、工业及民用建筑、公路铁路交通、机场码头、矿山开发及国防工程等,都需要进行工程地质工作。

运动是物质的存在方式。无论何时何地,都没有也不可能有不运动的物质。做为工程建筑物的环境、地基和材料的地壳,总是在内外地质作用和人类活动的影响下,不断地发展变化着;这种发展和变化,有时会很剧烈、很迅速。因此,在修建工程建筑物时,不仅要正确认识建筑物修建之前的地质条件和环境,还必须预测建筑物修建之后改变了的地质条件和环境。据此,应避免(减少)或根本改变这些地质问题的不良影响,或者充分利用其有益方面,使工程建设达到既经济合理又安全可靠的目的。

实践证明,凡是重视工程地质工作,在工程建筑物兴建之前,对建筑地区进行了周密的调查研究,掌握了这些地区地质条件的规律性,则修建的工程建筑物是成功的。例如,有的地区利用当地石灰岩溶洞的分布发育规律,变不利为有益,建成了既经济又安全、既能蓄水灌溉又可发电的地下水库。有的河流上的坝区经受多次地壳运动,地质条件极为复杂;但经过深入慎密的工程地质工作,查明了地质条件,并据以采取必要的工程措施,建成高达 100 m 余、库容几百亿立方米的大型重力坝,巍然屹立于峡谷之中,为我国社会主义建设发挥着巨大的作用。反之,任何忽视工程地质工作,或者孤立地、静止地对待建筑地区的地质问题,都将会给工程建设事业带来不同程度的恶果,轻则延误工期,修改设计,增加投资;严重者,建筑物即使尚能保持稳定,但却不能正常运用或完全不能发挥效益;更甚者,建筑物建成后会突然破坏,对人民的生命财产造成巨大的损失和危害。这些情况在世界建筑史上的实例是非常多的。据不完全统计,100 多年以来,世界上仅水坝这一种建筑物的破坏事件,就发生了五百多起,其中相当大的比率,是由于地质原因造成的。重力坝失事的原因中,由地质问题造成的占 45%,洪水漫顶的占 35%,其他水力及人为因素的占 20%。意大利的瓦依昂拱坝修建过程中,不理睬工程地质人员的多次建议,结果在 1963 年 10 月,水库左岸陡峭石灰岩山坡,产生巨大规模的滑动崩塌,使 1.5 亿 m^3 的库容全被填满;同时,库水漫坝,顺流冲下,造成 3000 多人死亡的严重事故。西班牙的蒙特一哈克水库,由于通过石灰岩溶洞地带漏水,致使水库无法蓄满。这些事例充分

说明,建筑地区的工程地质研究是规划、设计和施工的基础;没有高质量的工程地质勘察,不可能有合理的规划、设计和施工,也就不能保证建筑物经济合理、安全可靠和正常运用。威胁影响工程建筑的经济合理、安全可靠及正常运用的地质问题,最直接的便是在工程建筑地区可能出现的那些工程地质问题,即已有的自然地质条件在工程建筑物的影响下所产生的一些新的变化和发展。它是工程在建筑或运用期间发生的地质作用或问题,所以在工程建筑物修建和运用之前,便应给予预测、论证,并提出防治措施。这些工程地质问题是多种多样的,但总括起来不外乎三个方面。首先是地基在上部结构的荷载作用下所产生的大小不同的沉降变形问题。过量的或不均匀的沉降变形,会使建筑物发生裂缝、倾斜、坍塌,影响正常运用,甚至毁坏。其次是地基、斜坡或洞室围岩的稳定性问题。例如水坝地基的承载能力或抗滑强度过小,便会发生坝基滑移,危及坝体的安全和稳定。边坡开挖太缓,将大大增加开挖工程量,增加投资;过陡,便可能失稳破坏。隧道、地下厂房等工程,在开挖过程中或以后,破坏了地下岩体的原始平衡条件,有时也能增加新的荷载,其围岩便会出现一系列不稳定现象。对此,不给予可靠防治,便难能保障建筑物的正常运用。再其次是渗漏问题,如水库、渠道及坝基的渗漏会造成水量的大量损失,使水库或输水建筑物不能达到预期的目的。这种渗漏,有时还会影响地基、斜坡及围岩的稳定性。此外,还有天然建筑材料的储量和质量以及其他一些问题,也是与工程建筑密切相关的问题。

工程地质问题不是孤立、偶然发生的,它与建筑地区周边的自然条件和环境有着极为密切的必然联系。其形成、发展和变化,都是工程活动对这里自然地质条件影响的结果。因而,当预测并论证工程建筑地区的工程地质问题时,就必须从调查研究地质条件着手。这些直接或间接地影响工程建筑物的规划、设计、施工和正常运用的地质条件,也即与工程地质问题有关的地质条件,称为工程地质条件。它主要是地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质特征及物理地质现象等五个方面。地形一般只指地表高低、山坡缓陡和沟谷宽窄等;地貌还说明地形的形成时代、原因和过程,不同地貌单元能综合反映地区构造、岩性、水文地质特征及物理地质现象的差异。如平原地区,地形变化简单,土层较厚,地下水埋藏较浅;丘陵地区,地形波状起伏,坡积层发育;山岳地区,地形崎岖,山陡谷深,基岩裸露,崩塌频繁,这些都与建筑物位置和线路的选择有密切关系。地层岩性是工程地质工作研究的最基本对象,是工程地质问题形成、发展和变化的物质基础。任何建筑物都修建在由不同地层岩性构成的环境之内、地基之上或围岩之中。这些地层岩性的性质能否适应建筑物的要求,决定了一些工程地质问题的基本特性。地质构造也是工程地质工作研究的基本对象,尤其在基岩地区工程地质问题或多或少地都与地质构造有关。其中岩层褶曲、断层、节理和破碎带的产状、特征及分布,都是研究的重点。所以说,地质构造对影响建筑物沉降变形、安全稳定及渗漏途径等,大都有重要的控制作用。同时,它又是地貌、水文地质特征及物理地质现象的形成和发展的重要基础之一。水文地质特征系指地下水的形成、埋藏、分布、径流及水化学等条件。地下水是影响岩石强度、降低岩体稳定的重要物质因素。当其含有一定数量的特殊成份,如侵蚀性 CO_2 ,可直接对混凝土发生侵蚀,影响建筑物的安全。建筑地段及其邻近的水文地质特征,对水工建筑物的渗漏和水库回水是否危及邻近地区工农业生产问题,有决定性意义。物理地质现象(也称自然地质现象),如滑坡、崩塌、岩溶、泥石流、风沙移动、河岸冲淤等等,是一定地形地貌、地层岩性、地质构造和水文地质特征下的自然现象和作用。它或影响工程建筑物地基、边坡的稳定性,或直接危及工程建筑物本身的安全,或造成水工建筑物地区的大量渗漏。因此,必须查明这些物理地质现象的发生、发展规律和分布范围,并论证其危害程度。不良物理地质现象的发育,有时会成为工程建

筑物的位置或线路选择的关键问题。

实践证明,任何类型工程和工程建设的任何阶段,都必须把建筑地区工程地质条件的调查、研究,并对其进行深入细致的论证和阐明,做为工程地质工作的首要任务,这是工程地质工作的基础。据此,才可能较有成效地完成以下有关工程地质工作的一些实际任务。

1. 从工程地质观点,即从工程建筑物与自然地质体相互制约的角度出发,选择地质条件较好的建筑场地和适宜的建筑型式;

2. 在已选定的建筑场地及其周边,根据建筑物型式、规模和特点,从分析工程地质条件入手,预测并论证有关工程地质问题发生的可能性及其发展规模和趋势;

3. 建议改善、防治或利用建筑场地或环境中有关工程地质条件的措施;

4. 提供工程规划、设计、施工所需要的工程地质资料。

工程地质工作是工程建设事业中不可缺少的独立工种。从而,工程地质学早已在 20 世纪 30 年代做为地质学的分支,成为一个独立的学科。

工程地质学,按其研究对象和任务,又可分为五个组成部分,即工程岩土学、工程地质分析学、工程地质勘察学、区域工程地质学和环境工程地质学(见图 0-1)。

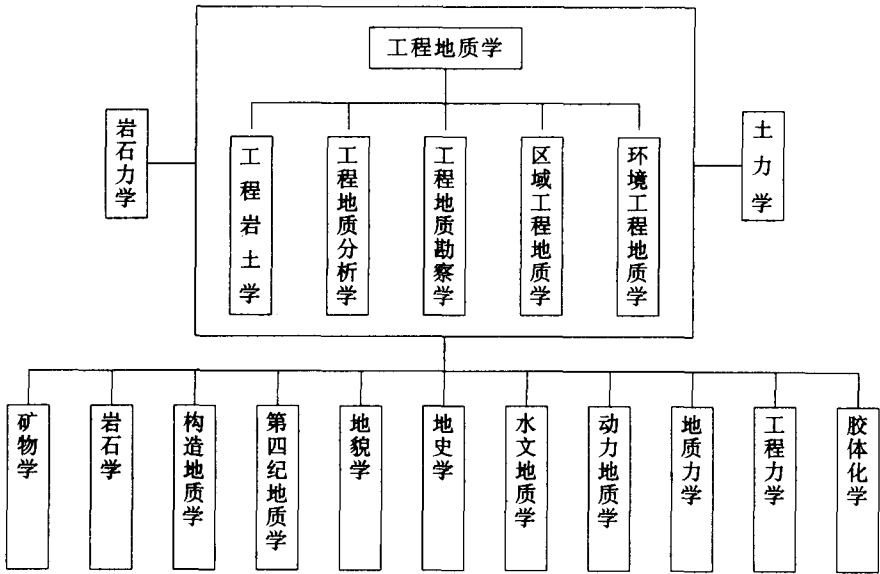


图 0-1 工程地质学的组成部分及其相关学科

工程岩土学,研究土和岩石的工程地质性质及其形成和变化规律,并探讨改善这些性质的途径。它是工程地质学基础部分。

工程地质分析学,研究工程地质条件环境与工程建设相互制约的主要形式——工程地质问题,研究它们产生的地质条件环境、力学机制、发展演化的趋势,以便正确论证和提供合理的防治措施方针。

工程地质勘察学,探讨为了给各种工程建筑提供充分工程地质依据所要勘察的工程地质内容,所应遵循的勘察程序和要求,所需采用的勘察方法和手段。

区域工程地质学,研究各种工程地质条件在空间上分布规律和特点。

环境工程地质学,是工程地质学或环境科学的一个分支;它是研究以经济-工程活动为中心的一定范围内天然作用与经济-工程活动形成的客观地质实体(工程地质环境)及其问题的

学科;为开发利用工程地质环境或防治其不利作用,提供科学依据。

任何学科都不会孤立地发展起来,是与其他学科发生一定联系而独立存在着。这种联系所涉及的范围与一门学科的研究对象和内容有关。就研究的对象和内容看,与工程地质学密切相关的主要学科,可用简单关系来说明。

工程地质研究的目的在于保障工程建筑物的安全和正常运用,因而也就决定了工程地质学的研究方式。它首先是自然历史分析法,在这种基础上辅以力学分析法、实验法和类比法。任何地质问题都是在其周围自然因素和自然条件的影响和制约下形成的,并不断地发展变化着,它们都是自然历史的产物。同一地质问题,在不同自然因素和自然条件的影响制约下,在不同的自然历史阶段或经历不同的自然历史过程,就有不同的性质或特征。所以,研究建筑地区某一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和变化,都必须首先研究其周围的其他自然因素和条件,在一定的历史阶段过程中对它的影响和制约作用和程度,才可能认识到它的形成原因和今后可能发展变化的趋势和程度。

单纯采用自然历史分析法,一般只能得到定性的论证,这对工程建筑物的设计和运用的要求来说是不够的,还需对一些工程地质问题尽量做出定量论证。因此,就应在自然历史分析法的基础上,再采用力学分析法和类比法。力学分析法要求适当简化一些自然条件,然后根据一定的理论分析进行计算,以预测某些工程地质问题发生的可能程度和发展的规模大小。类比法是对建设地区某些地质问题,应用那些已经研究过的类型和条件相同或相近的地质问题所得到的认识和经验来对比研究,得出定量论证的一种方法。这些定量论证地质问题的方法,都需要配合采用试验方法。通过室内试验或野外(原位)试验,可取得力学分析法所需要的岩土的物理、水理及力学性质的指标数据。模仿工程建筑物型式、规模及其对建筑地段地质条件的作用特征,进行不同比例的模拟或模型试验,可以直接得出用于工程设计、施工的定量论证。通过长期观察测量地质现象的发展速度的数据,也是一种用于定量论证地质问题的试验方法。工程地质工作中,必须综合应用这些研究方法,才能取得可靠的工程地质结论,完成工程地质工作的实际任务,并进一步发展工程地质科学。

工程地质学作为一门学科独立存在于现代水平的自然科学领域中。与其他一些科学发生发展的规律一样,是在漫长的人类历史过程里,由于社会生产的发展和需要的推动下,发生和发展起来的。

我们伟大的祖国,是一个历史悠久、文化发达的国家。远在春秋时代,由于农业及运输的需要,便修建了许多大型工程。鸿沟,始建于公元前 722 年,自河南省荣阳,引黄入淮。伍堰,始建于公元前 506 年,在江苏高淳县,沟通太湖与长江。举世闻名的大运河,南起杭州,北达北京附近的通县,全长 1782 km;其仪征至淮安一段,始建于公元前 485 年。世界驰名的古长城和都江堰,都兴建于战国时期,距今已两千多年。以后,历代人民还不断修建了许多规模巨大的桥梁、宫殿、庙宇,以及其他水利工程,其中大部分都是当时世界上的创举。可以断言,这些规模巨大的工程建设,对建筑地区的工程地质情况都会有必要的了解。所以,其中某些建筑物已正常运用数千年,至今巍然屹立。但在长期封建统治之下,科技知识得不到重视,致使这些人民智慧的结晶和宝贵的科学遗产,没有加以系统总结提高,有的甚至缺乏文字记载,长世沉沦。

建国以来在党的领导下,我国工程建筑事业蓬勃发展。50 年来,横拦江河峡谷,筑起了新安江、新丰江、刘家峡、三门峡、三峡等数以百计的巨型大坝;翻过丛山峻岭,跨越戈壁沙漠,修筑了宝成、黔桂、成昆、川黔、滇黔、鹰厦、焦枝、枝柳、兰新乃至京九等数万公里的铁路;长江天

铗,目前已架起若干座大桥;至于公路和大型厂房的修建,更是不计其数。在这些工程实践中,我国人民既运用了国内外工程地质经验和理论,又大大丰富了工程地质宝库,提高了工程地质应用水平。

我国幅员辽阔,包括有不同活动程度和发展趋势的大地构造单元,分布有不同性质的自然地理区域;这里又分布有差异很大的土和岩石,发育着各种类型的自然地质作用。它们都以不同方式和不同程度,影响工程的修建和运用。揭示这些地质问题的属性,掌握其发生和发展规律,都需要根据它们的特点,深入地进行区域性或各种类型的工程地质研究。例如,我国西北、华北和东北地区的黄土,南方各省广泛分布的红土和膨胀性、裂隙性的黏土等,还都未能完全充分地认识其独特的属性。蕴藏着极为丰富水能资源的广大山区广泛分布着坚硬及半坚硬岩石,由这些岩石构成的并包括有不同产状、尺寸、密度的错综复杂的结构面或软弱夹层的岩体,它们在特定自然条件下和在各种不同建筑物的作用下的稳定性,都还缺乏较深入的研究。岩溶问题是工程建筑的难题,对它的发育条件和分布规律,至今研究不足,这就往往无法保证这种地区的工程建筑收到预期的效益。

应该强调,在科学空前迅速发展、高能空前广泛利用的现代,人类活动不断在广阔范围内和巨大规模上改变着地壳表层的生产、生活环境,并使它已经或将要发生一些根本变化,因而它正推动着工程地质学不断地向前发展。近年来,从国内外工程地质学发展的趋势看,有一些新的特点。

随着人类生产发展的需要,工程地质学不断开拓出新的领域,如研究保护和改善环境质量的“环境工程地质学”,研究近海开采和其他海洋工程的“海洋工程地质学”等。

工程地质学的理论基础和研究方法,有由定性向定量发展的趋势。对工程地质问题,能以数据来定量地分析、论证和表达,以便直接应用于规划、设计、施工中去。利用航片和卫片的解译,研究区域稳定性和指导工程选点(线),已成为重要手段。还有利用超高倍电子显微镜、 γ 射线测角仪等观察微粒矿物的成份和晶体结构,以阐明某些岩石和土的强度本质;研究晶面的优势定向和探索岩石中微裂纹的分布,对岩石强度各向异性的影响和岩石破裂的控制规律,并且研究它们与岩体中宏观不连续面的关系等。

工程地质勘察,当前仍以钻探为主要手段,其基本发展趋势,是操作上全面机械化和自动化、机具的机械化以及其效能上的广泛适应性,尽量作到一机多能;工程地质物探发展比较突出的是弹性波探测和综合性测井。工程地质测试工作,就其发展的趋势,可概括为:①探测结合,利用某些物探方法探索地下地质结构特点的同时,又取得岩石和土的某些物理力学性质指标;②重视发展原位测试,为测得更有代表性的数据,使原位试件的尺寸逐渐加大,为迅速而节约地取得大量试验数据,较广泛采用静力触探、动力触探和十字板试验;③模拟试验的广泛应用;④室内常规试验,主要使操作、记录、数据处理和图表绘制自动化;⑤某些中间型试验的兴起,如岩石点荷载试验、裂隙面的便携式剪切盒试验、裂隙抗剪性能的巴顿试验等。它们无需专门制备形体规整的试件,仪器轻便,操作简单,室内和现场均可使用,较短时间内便可测得较多的数值。电子计算技术已用于工程地质学领域,如测试数据的数学统计、岩体稳定计算、资料的自动存储检索和处理,也能处理地质作用发生发展的全过程,并已发展为“数学地质”的新兴学科。

我国已成为 WTO 的成员,国内外的待建工程建设项目在向我们招手,为了适应全球经济一体化的需要,工程地质工作不论在理论上或实践上,都亟待迅速提高以与国际接轨,从而促进工程地质科学的新发展。

第一篇 普通地质学基础理论

普通地质学基础理论是工程地质课程的基础部分,也是运用有关工程地质的观点、理论和方法解决土木工程问题的基本工具。普通地质学基础理论主要有以下内容:地球科学概论、矿物和岩石、地质构造、地貌与第四纪和地史。

第一章 地球科学概论

掌握地球发展史的规律,对于学习和理解普通地质学基础理论并且建立工程地质的基本观点非常重要。本章主要内容有:地球的物质组成、生物圈、水圈、地球的内部圈层、地磁与重力、岩石圈内部的物质转化。

第一节 地球的物质组成

一、地球中的元素

地球是一个物质的世界。根据万有引力定律计算的结果,地球的质量近 $6 \times 10^{24} \text{ kg}$,几乎都集中在平均半径为 6 371 km 的固体地面以下,以岩石和金属的形态出现,其平均密度为 5.517 g/cm^3 。大气、水和生物体的总质量不足 0.1%,但占领的空间广大。密度分布愈向外愈小,特别是大气圈向上可以稀薄到使人误认为“真空”的程度。

今天地球上的物质存在形式可谓千姿百态,特别是出现生命以后,更是变得复杂多样,但它们都是由最简单的基本粒子所组成。首先是一个质子和一个电子组成结构最简单、也最轻的元素——氢。质子居于中心成为原子核,电子围绕原子核运动,犹如行星绕太阳;而质量分配也和太阳系相象,几乎全部质量都集中在原子核里,但这微不足道的电子却为这氢原子占据了比原子核大上亿倍的空间。当原子核中多了一个中子时,这个氢原子的质量加一倍;多两个,加两倍,但仍处于元素周期表上原来的位置,这样氢就有了相对原子质量为 1、2、3 的三种同位素。地球上的氢,99.985%是相对原子质量为 1 的氢。

按照宇宙始于大爆炸的设想,地球上多种多样的物质,都是从基本粒子聚变成氢开始的,然后是四个氢合成一个氦,氦再进一步合成其他元素。这样从轻元素到重元素,约在 150 亿年前的大爆炸后 50 万年~100 万年时,现今所有的元素就已通过核聚变而逐渐形成。元素的形成时期远比太阳系的起源早。根据现代物理、化学的理论与实验和观察的结果,太阳上目前仍在进行着氢合成氦的热核聚变,及其他天体化学现象。已经可以肯定,宇宙中的元素通过热核聚变反应,经历了从简单到复杂的形成演化过程。

物质世界的一切,不论是何种形态,归根到底,都可以说是从“一”开始,难怪不少当代科学家对两千多年前中国李耳“道生一,一生二,二生三,三生万物”的哲学思想,大为叹服。

人类社会的发展,工业兴起,加剧了对资源的需要,驱使人们去分析、研究矿物岩石的化学成份。19世纪末期,美国化学家克拉克(F. W. Clarke, 1847~1931)等人根据大陆地壳中的5159个岩石、矿物、土壤和天然水的样品分析数据,于1889年第一次算出元素在地壳中的平均含量数值(平均质量百分数),即元素的丰度,后人为了纪念这个创举,将它命名为克拉克值。地壳中各元素的丰度,依次为:氧(45.2%),硅(27.2%),铝(8%),铁(5.8%),钙(5.06%),镁(2.77%),钠(2.32%),钾(1.68%),钛(0.68%),氢(0.14%),锰(0.10%),磷(0.10%),其他所有元素(0.77%)。克拉克等采用的样品来自地面下16 km以内大陆地壳,后来被分析的样品则不仅有采自地壳的岩石,还有来自天外的陨石。加上采用其他方法,整个地球,乃至宇宙的元素丰度都有可能推知。1956年第一次算出了以硅原子数量为基数的元素的相对宇宙丰度,后来又按质量估算出92种元素在地球中含量的百分数。

据近年来的研究,组成整个地球的物质,按质量计算,各元素的丰度为:接近34.6%是铁,29.5%是氧,15.2%为硅,12.7%为镁,2.4%为镍,1.9%硫,2.2%为钙和铝,其他所有元素共占1.5%。地球中的铁和镍大部分以金属状态存在于地核中。组成地壳和地幔的物质,大部分是氧和硅,还有铝、铁、镁也较多。在地球的水圈中,以氧和氢为主。生物圈则主要为碳、氢、氧和氮。大气圈、水圈和生物体中的所有元素的质量和地球的总质量相比,不及千分之一,但它们的影响,特别是对人类的影响,快速而强烈,因为水和大气都极易流动,而生物圈更是地球上物质转换最为活跃的部分。

地球中的元素,大部分组成化合物或以单质的形式——矿物,聚集在岩石中。初看起来,它们似乎被固定在那里了,实际上随着岩石、矿物的破坏和重新形成而在无休止地迁移、变化着。从化学的角度来看,则元素在不断地改变着它们的存在场所或组合形式。在这迁移的过程中,可以使某些元素或化合物相对集中,也会使某些元素相对分散开来。当元素或化合物相对集中到能够具有经济价值并可被人所利用时,这些物质就称为矿产。可以说整个地球的历史,也就是元素在地球的各圈层间不断转移的历史。

二、自然界中的矿物

在地球科学中,把天然产出的、具有一定化学成份和物理特征的元素或化合物称为矿物,而把矿物的集合体称为岩石。但在实际生活中,两者不是一眼就能区别的,特别是有些岩石中的矿物颗粒极其细微,肉眼难以辨认,所以古人常分不清岩石和矿物,这并不奇怪。矿物与岩石的根本区别不在它们的外表,而在于矿物有确定的化学成份和一定形态的内部结构,无论是在什么地方产出,矿物的化学成份都是一致的。但岩石中各种矿物成份和化学成份含量的多少,只有大致的范围,可以说岩石是各种矿物的混合物。

像中国古代很重视玉,但并不知道它是什么成份,经过现代技术手段测定,才知道玉不是矿物,而是矿物的集合体,即岩石一类。这些矿物大多为透闪石($\text{Ca}_2\text{Mg}_5[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$)或阳起石($\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_5[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$)一类,成纤维状,非常细微,肉眼是分辨不出来的。它们紧密交织,牢牢地结合在一起,不仅坚硬而且韧性极强,所以帝王用它做传国玉玺。难以识别的细微矿物很多,像黏土中的许多矿物也是如此,看起来是一把泥土,其实里面含有多种矿物,用电子显微镜才能认出。

矿物也有较大的形体,可以用肉眼及简单的试验方法辨认。矿物一般都有自己固有的形

态,但在自然界产出时常不完整,只有部分矿物如水晶、金刚石、黄铁矿、方解石、黑云母、石棉等少数矿物易形成其固有的形态特征。除少数矿物是无色透明外,一般都有自己的颜色。不过含有杂质时本来的颜色会被改变。少数矿物的颜色鲜明,如辰砂(朱红色)、磁铁矿(铁黑色)、孔雀石(孔雀绿色)等也颇能引人注目。矿物粉末的颜色——条痕色常具有鉴定意义。矿物的透明度、硬度、密度、磁性;表面的光泽,以及受到打击碎裂后的形态——解理等等,都是识别它们的标志。少数矿物具有某些显著特征,像磁铁矿具磁性,能吸铁;金刚石坚硬无比(在所有矿物中硬度最大),而且光泽极强;方解石被击碎时,总是具有菱面体的解理面;有“愚人金”之称,表面呈现黄色的黄铁矿,在无釉的白色瓷板上能擦出黑绿色的条痕。上述矿物特征就成为它们的主要鉴别标志。需要注意的是,在自然界中,矿物常常不是作为单个矿物产出,而是聚集在一起成为集合体,或是分散在岩石中,因而鉴别起来难度很大。但矿物的各种常见特征,仍是鉴别的基础。

三、大气圈的物质组成

在西方,自古希腊学者把气视为构成物质的基本元素以来,许多人对它进行了长期的探索。在文艺复兴时期,达·芬奇已有了空气和真空的概念,能够用空气的运动来说明风的成因。伽利略通过实验证明了空气和其他物质一样有质量。后来,测量空气的温度、压力的仪表都制造了出来。不过,这时以为空气是一种单一的元素。到18世纪70年代,氮气、氧气相继发现,拉瓦锡(A. L. Lavoisier, 1743—1794)首次明确指出空气是氮气和氧气的混合物,随后氮和氩这类“惰性气体”以及空气中的其他几种成份也陆续被认识。包住地球的空气总称为大气,除了上述气体之外,还常含有固体尘埃和水分。

靠近海平面处的空气,在常温(15℃)下,除去其中的水分和尘埃不计,其密度为 $1.23 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$,其中的成份,按体积计算,约有78%是氮,21%是氧;按质量计算,75.51%是氮,23.15%是氧,1.28%是氩。其他气体无论按体积,还是按质量均不到0.1%。在高出海平面80~90 km以下的空间中,各种气体成份含量的百分数,与上述大体相同。这个空间内的大气质量占整个大气圈质量的99.999%以上,其余的质量虽微,但分布的空间可远至离固体地球表面几百万甚至几千万米以外。

高层大气的物质组成,从下到上分别以氮、氧、氮和氢为主,并从分子状态到以原子、离子的状态出现。因为用普通的观察方法难以认识,所以到20世纪初,人们还以为越过蓝天就进入了真空的境界。现在我们知道尽管那里的粒子极其稀薄,但却是与太阳及其他宇宙物质相互作用的敏感场所,能快速而强有力地对低层大气产生影响。

四、大气圈的分层

所有组成大气圈的物质,都要受到地球的重力、磁力的控制和太阳辐射,以及其他外来因素的影响。大气圈中的物质向固体地球表面聚集,愈靠近海平面密度愈大;大气中水蒸气、碳酸气和尘埃等较重成份的含量,也是高度愈低就愈多。大气的压力则随高度的增加而减小,在海平面上是105 Pa,到5000 m的高度就减为一半左右。在不同高度上,大气圈的温度也在有规律地变化。

根据大气圈在不同高度上温度的变化及其表现出来的特点,通常将它划分为如下几层:

对流层:贴近地面、最稠密的大气层,整个大气圈质量的75%集中在这里。对流层的平均厚度为11~13 km,赤道上可达17~18 km,在两极上则只有8~9 km,这是地球自转产生惯性

离心力作用的结果,使大气圈在赤道部位凸出。在对流层中,愈向高处,温度愈低。降低的数值在不同高度、不同地区、不同季节均有所不同,平均每升高 1000 m 约降低 6.5°C 。靠近海面的气温,平均约 15°C ,而在对流层顶部,一般降到 -50°C 以下。上下温度相差很大,可促使对流层中的大气不断运动,气体可产生垂向对流。大气圈中的水蒸气几乎全部集中在对流层中,特别是在高度 5 km 以下的空间内。因此风霜雨雪,寒潮热浪,种种天气现象都主要产生在对流层的下部。尘埃也主要是散布在这一层中。

平流层:为从对流层的顶面到海平面之上 55 km 一带,几乎占有大气圈质量的 25%。在平流层中,气温总体上是随高度增加而升高,到平流层顶部,温度从底部的 -80°C 以下,升到 0°C 左右。大气的垂直对流几乎没有,而是沿水平方向运动。这里几乎没有水蒸气和尘埃。飞机进入平流层时,尽管下面电闪雷鸣、风雨交加,这里总是晴空万里,可平稳飞行。在平流层上部,气温增加最快,因为这一带的大气中含臭氧较多。臭氧能吸收太阳辐射来的紫外线,使这里得到更多的热量。这些臭氧是在平流层边缘及其以上的稀薄空气中形成的由于它比普通的氧气重,下沉到平流层,使地球上 90% 的臭氧集中到平流层中。在 40 km 高度一带的大气层中,臭氧含量最多,但按体积计算也只不过占十万分之一左右。如把这些臭氧置于海面上常温(15°C)时的标准大气压力状态下,其厚度不过 3 mm 左右,但实际上从地面附近到几十千米的高空,都有臭氧分布。人们将大气圈中臭氧含量相对较多的部分,称为臭氧层,但它没有明确的边界,一般把它划定在高出海面 35~55 km 的范围。

中间层:越过平流层,大气圈的质量已所剩无几,但弥漫在空间中的仍然是稀薄的空气。温度再次随高度增加而下降,到中间层的顶部,即 80~90 km 的高度,已降到 -83°C 左右。中间层里再次出现显著的空气垂直对流运动,但这里的空气实在太稀薄了,又缺少水蒸气,所以不可能形成风和雨。

暖层:在中间层之上,温度转为直线上升。这里的大气更稀薄了,它的密度在底部已小到只有海面上空气的百万分之一;升到 120 km 的高度上,更减到只有百亿分之一了。而温度则迅速升高,在 300 km 高度,达到 1000°C 以上。暖层除底部氮的分子较多之外,主要为原子状态的氧所占据,如前所述,氧能吸收紫外线,得到许多热量,所以温度增加得很快,同时有电子脱离出来成为自由电子在空间中流动,原子变成了离子,即处于电离状态。所以这层也叫电离层。无线电短波发射出去,遇到电离层就会反射回地面,如此多次反复,就能传到很远的地方去。电离层对无线电波的传播是至关重要的。暖层的上部边界很不稳定,约在高 500~800 km 一带。

散逸层:也叫扩散层,在暖层之上,物质更为稀薄,继续以原子、离子状态出现,从低到高,分别以氧、氮和氢为主。这里气温高,带电粒子运动的速度快,受地球的引力作用又很小,还时刻都要受到太阳风的冲击和太阳电磁场的影响,上部边界模糊而不稳定,不断有粒子散失到太空中去。此层构成地球的外磁场,称为磁层。

五、大气圈中的物质转换

位于地球最外边的大气圈,很自然地成为地球与宇宙物质相互交换的前沿。地球诞生时,星云中的原始大气(氢、氦)早已散失殆尽。现在拥有的大气,其成份一般认为是从地球内部析出的。今天的火山喷发,喷出大量气体,就是这种析出作用还在发生的证据。火山喷出的气体主要是水蒸气。在没有臭氧层保护的地球历史早期,这些水蒸气在紫外线的作用下,可部分分解成氢和氧,相对原子质量较大的氧被地球的引力留下来,氢则大量散失到宇宙中去了。所

以,氢在今天的地球上含量极低。

地球的物质一方面有散失,另一方面也从宇宙得到补充,我们最容易看见的是流星的闯入——陨石飞进大气圈(每年约达250亿t)。陨石的绝大多数都变成气体或尘埃,加入到大气中去了,成为大气圈中尘埃的主要来源之一。只有极少数未燃烧尽的陨石才可撞击到地面上来。地球与宇宙之间的物质转换,从现阶段的情况来看,收入略大于支出。

地球自身各圈层间的物质也在转换,大气圈是进行这种转换最活跃的场所。地球上的氮气80%分布在大气中,它不易与别的物质发生化学作用,成为大气圈中较稳定的成份。不过,这稳定也是相对的。大气圈中的氮,向生物体、水、岩石和土壤中转移,同时也有氮从地球内部物质及腐烂生物遗体中析离出来,回归大气,但数量均甚微,远不能改变氮在大气圈中的地位。

地球上的氧,95%固定在岩石里面。还有许多存在于生物体内和溶解在水中,游离在大气中的氧气只是极少的一部分。人和动物都需要吸入氧气而呼出二氧化碳。通过燃烧石油、天然气、煤炭或薪柴而获取能量的过程中,也在消耗着氧气和产生出二氧化碳。地球表面广泛出现的氧化作用和碳酸化作用,则在使大气中的氧和二氧化碳转移到土壤、岩石和水中去。

绿色植物吸入二氧化碳,经过它的光合作用,二氧化碳中的碳被固定在植物体内,同时释放出氧气。幸亏有这种作用,近几千万年来,使氧和二氧化碳在低层大气中的含量,保持着大体上的收支平衡。现在地球上的碳,99.7%以上固定在碳酸盐岩石中,还有少量以煤和石油等化石燃料的形式出现。以二氧化碳的形式存在于大气中的碳,约占地球上碳总量的十万分之六。固定在岩石圈中的碳是经过亿万年积累而成的,与此相比较,人类通过开采煤和石油等,并使它们燃烧再成为二氧化碳回到大气中,这个速度就快得多。因此大气中二氧化碳含量的增加,已成为普遍关注的问题。

集中分布在对流层下部的水蒸气,主要来自海洋河湖等水体的蒸发,和植物叶面的蒸腾。水在大气中的含量,随高度的增加而减少,还受到温度变化的影响,一般是温度高时大气中的水蒸气可以增多。这些水蒸气有时凝结成细微的水滴悬浮在高空,这就是我们看到的云、雾。水在大气中的存在,可使天气变幻莫测。不过,这些水都是大气中匆匆的过客,一般停留不超过10天就又降落到江河湖海,大气圈其实也是一个水的转运站。总之,大气圈是氮、氧、碳、水等物质的重要转换场所。

六、大气的运动和多变的天气

整个大气圈的物质都在不停地运动。但长期以来,人们只对低层大气,主要是对流层的物质运动有所认识。直至因军事目的而发展起来了火箭技术,在第二次世界大战后火箭升空探测大气,人们这才知道,近地的高层空间,仍有以分子、原子或离子状态存在的气体,这里的大气运动,是人的感官所不能觉察的,需要用仪器测定才能显示得清楚。

不过,现代人一般关心的大气运动,仍是低层大气,主要是对流层中空气分子的运动。在对流层中,热空气因体积膨胀、密度降低而上升;冷空气则体积收缩、密度增高而下沉。袅袅的炊烟,能使我们看出这种垂直方向的运动,不过我们更能感觉到的是以水平运动为主的风。

七、大气圈对其他圈层的作用

大气在地球上密度最小、最易流动的,视若无形,比岩石软弱得无法比拟。然而,正是它对坚固的岩石造成了强烈的破坏。古人以为岩石是不会烂的,所以秦始皇要在山东琅研山上刻石记功,以求千秋万代永存。不过,琅研刻石上的字迹早已模糊不清,主要就是大气风化作

物理风化作用使岩石破碎,但岩石的化学成份并不改变。昼夜气温的差异,是引起物理风化的主要原因。白天岩石表面受到阳光照射,温度升高,体积膨胀,但由于岩石的热导率低,外面热了,体积已膨胀起来,而里面变化较小;在夜间,表面散热快于内部,外部已在收缩,里面还来不及适应。如此内外胀缩不一,长期作用,自然要导致岩石内颗粒间结构变得松散,以至岩石分崩离析。在干旱地区,因空气中缺少水分,吸热保暖能力很差,昼夜温差很大,这种温差物理风化作用特别显著,尤以沙漠、戈壁中为最甚(昼夜温差可达 $50^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$)。在高寒地区或寒温带交界处,存在于岩石裂隙中的水,因气温降低而结冰时,体积要膨胀 $1/11$,产生的压力可达 96 GPa ,气温升高后,冰又会融化,如此反复作用,对岩石的破坏自然相当强,这就叫冰劈作用,也是一种物理风化作用。岩石的裂隙水中如溶有盐类物质,它们的结晶和潮解,也能使岩石的结构变得疏松,发生物理风化。

$$4\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8] + 2\text{H}_2\text{CO}_3 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8 + 8\text{SiO}_2 + 2\text{K}_2\text{CO}_3$$

(钾长石) (高岭石) (蛋白石)

$$4\text{FeS}_2 + 15\text{O}_2 + 14\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2(\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}) + 8\text{H}_2\text{SO}_4$$

影响风化作用的强弱,虽然岩石本身的物理化学性质是基本的因素,但外界的大气环境对风化作用的进程更有决定性的意义。湿润多雨,则化学风化作用显著。如果气温高、湿度又大,化学风化作用会更强。干旱气候则使化学风化作用减弱,而以物理风化为主。

岩石风化的产物,除了溶解在水中的,还有大量碎屑,按照它们的粒度,即其颗粒直径的大小,常分为以下四大类:砾(大于2 mm),砂(2~0.05 mm),粉砂(0.05~0.005 mm),黏土(小于