

普通高等学校教材

第四版

ONGCHENG DIZHI FENXI YUANLI

工程地质分析原理

张倬元 王士天 王兰生 编著
黄润秋 许强 陶连金



地质出版社

普通高等学校教材

工程地质分析原理

第四版

张倬元 王士天 王兰生 编著
黄润秋 许 强 陶连金

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书系统论述了如何分析与评价人类工程活动中经常遇到的一些主要工程地质问题,包括区域稳定性、工程岩(土)体稳定性问题,与地下水渗流有关及与河、海、湖侵蚀堆积有关的工程地质问题,并用专门章节论述了岩体的结构特征,天然应力状态及岩体在加、卸荷载的动荷载下的变形破坏机制。

本书采用地质分析与力学机制分析并重、定性评价与定量评价相结合的工程地质问题分析与评价的技术途径,反映了现代工程地质学在地质学与土力学、岩体力学等结合的基础上,广泛吸收数学、力学的最新成就,充分运用现代测试技术与现代计算技术,沿多学科交叉与综合的途径发展的趋势。

本书供高等院校工程地质专业学生使用,也可作为工程地质技术与管理人员的实用工具书。

图书在版编目(CIP)数据

工程地质分析原理 / 张倬元等编著. —4版. —北京:地质出版社,2016.1

ISBN 978-7-116-09636-3

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第021302号

Gongcheng Dizhi Fenxi Yuanli

责任编辑:李惠娣

责任校对:王洪强

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

电 话:(010) 66554528(邮购部);(010) 66554579(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

传 真:(010) 66554582

印 刷:北京纪元彩艺印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

印 张:31.25

字 数:800千字

印 数:1—5000册

版 次:2016年1月北京第4版

版 次:2016年1月北京第1次印刷

审图号:GS(2016)11号

定 价:49.80元

书 号:ISBN 978-7-116-09636-3

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

序

1981年,本书以高校水文地质工程地质专业试用教材的方式由地质出版社出版;1994年,作为地质矿产类规划教材再版;2009年又作为国家级规划教材出版第三版;此版为本书历时35年的第四个版本。35年来,本书先是作为水文地质工程地质专业本科生,继而作为工程地质专业硕士、博士研究生学习工程地质学的主要教材。

我国在高校设立水文地质工程地质本科专业始于1952年,我作为高校工程地质学教师始于1954年。这样一本主要教材何以滞后二十余年才得以出版面世?其根本原因在于17年亦步亦趋地学习苏联和十年“文革”使高校停止招生长达6年。

作为高校一名工程地质学教师,我始终将工程地质学教材建设视为需要优先完成的重要任务。1954年在北京地质学院,我承担的首项任务就是参与校改苏联波波夫编写的《工程地质学》中文版译稿,以便由地质出版社及时出版应教学之急需。1956年在长春地质学院,我作为主译人员之一,将苏联工程地质专家诺沃日洛夫编写的《工程地质学》讲稿译成中文,由该学院自行印刷作为本科生教材。1960~1961年在成都地质学院,我与王士天老师合作,以1959年再版的苏联波波夫编写的《工程地质学》为主要参考书,编写了以论述与人类工程活动有关的动力地质作用为主要内容的《工程动力地质学》教学讲义。1964年,中国工业出版社出版了《工程动力地质学》。我们终于有了自编的、而非译自苏联的工程地质学主要课程的教材。

1965年中至1966年中,我带领成都地质学院水文地质工程地质系部分四年级学生和几位教师参加了大渡河龚嘴水电站初步设计阶段工程地质勘察和“现场设计”大会战。该坝段基岩为被多组结构面(不连续面)切割成块状岩体的晋宁期花岗岩,其中一组缓倾角裂隙对校核坝基抗滑稳定性有重要意义,这就是设计人员要求勘察人员予以查明并提供必要参数的“缓倾角裂隙问题”。基岩河床之上还覆有30余米至40余米厚的覆盖层,为了降低设计坝高,勘察人员需要选出覆盖层最薄的坝址,这就是“深厚覆盖层问题”。这二者是该坝段早已有之的工程地质问题。我们参加会战之后,先在上坝址右坝肩一个缓倾坡外的张开裂隙之上,发现了总体积达 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的“蠕滑变形体”。继而在下坝址左坝肩一个总体上缓倾坡外、陡倾与缓倾交替的阶梯状张开裂隙之上,发现了一个总体积约为上坝址变形体两倍的“蠕滑拉裂变形体”。两者对坝肩稳定性都有较大影响,引起勘察设计人员的高度重视。库区勘察也有重大新发现,一个被前期库区工程地质测绘人员判定为地堑式的断块,竟然被王兰生老师发现是一个成因机制极其费解的基岩切层滑坡,其残留总体积高达 $5000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。备用厂房区也有重大发现,通过对一大片完全由峨眉山玄武岩块、碎石组成的第四纪地层的调查研究,发现了总体积超过 $10000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的超大型高速基岩滑坡——天官堡滑坡。该滑坡发生于大渡河一条支流的右岸、由峨眉山玄武岩组成的顺倾坡(dip slope)之上,玄武岩似层面倾角 24° 。近坡顶处,滑坡下滑产生的主断壁(main scarp)清晰可见。主断壁之下,还有一个保留原岩结构的滑动块体。而滑坡体的绝大部分都转化为块碎石,块碎石堵塞了该溪流并爬上溪流左岸高处。显然这些地质现象都是高速基岩滑坡“碎屑流化”的地质记录。上述诸“工程地质问题”的提出或发现,使我深刻意识到:基于地质学、土质、土力学的苏联的《工程地质学》并不适用于中国,必须改弦易辙走自主创新之路,编写适用于中国的《工程地质学》教材。很可惜,始于1966年中的十年“文革”使我们虚掷了6年的宝贵光阴。

1972~1976年,以推荐方式入学、学制3年的工农兵学员的培养,是我们自主创新教材编写

的起步,从十年“文革”中争取了4年时间。1972年我偕同王士天老师走访了多个已建水电站,探索这些水电站在勘察、设计、施工、竣工运营过程中,遇到了哪些工程地质问题,给我印象最为深刻的是:新丰江水电站的6.1级水库诱发地震灾害,新安江水电站的库岸崩滑灾害。这使我们深刻认识到:地质环境会制约工程活动,而工程活动又会反作用于地质环境,诱发强烈的地震灾害,或频发的库岸崩滑。返校之后,王士天与王兰生两位老师通力合作,于较短时间之内,编写出了《主要工程地质问题的分析与评价》的教学讲义用于取代《工程动力地质学》,作为学员们学习工程地质学的教材。这本打印的教学讲义,理应视为《工程地质分析原理》的雏形。我和我的同事们都深刻意识到,岩石力学在培养我国工程地质科技人才中的重要性,但苦于无适用的教学参考书。我和孔德坊、王士天、王兰生老师合作,将欧美等多国专家分章合著的*Rock Mechanics in Engineering Practice*译成中文,译名为《工程实用岩石力学》。虽然该译著直到1978年才由地质出版社出版,但却也为《工程地质分析原理》第一版的编写及时提供了最重要的参考书。工农兵学员的培养方式是:“开门办学,教育与生产劳动相结合”。这就要求我们经常带领学员们参加生产实习。我们多次带领学员们参加四川多个中小型水库的工程地质勘察,发现并解决了多个工程地质问题。1975年,王士天老师带领几位教师和部分学员,进行了三峡库区工程地质测绘,首次发现三峡库区有为数众多的大型基岩滑坡。所有这些发现,都为《工程地质分析原理》第一版的编写积累了丰富的资料。

1977年恢复高考后,开始招收水文地质工程地质专业本科生,以及继之而来的1978年底的改革开放,催生了、也使我们得以在较短时间内完成了《工程地质分析原理》第一版的编写。

恢复高考首先加快了我们的教材建设的步伐。1978年7月,地质部教育司召开了地质院校统编教材会议,决定出版统编教材以应教学之急需。鉴于成都地质学院已有试用多年的《主要工程地质问题的分析与评价》的教学讲义,会上又提出《工程地质分析原理》的较为详细的编写提纲。会议决定,由成都地质学院编写《工程地质分析原理》。

改革开放,既大大地扩展了我们的视野,也深深地启迪了我们的思路。在我国的“文革”时期,堪称地球科学的革命性学说——“板块构造学说”诞生并迅速被欧美地球科学界所接受。改革开放后,这一学说传入我国,也得到我国地球科学界的广泛认同。这一学说为环太平洋地震带和地中海—喜马拉雅地震带的地震成因机制给出了令人信服的解释。我们当时正在编写的《工程地质分析原理》理所当然地接受了这一学说。1980年,我得到联合国教科文组织的资助,赴美考察其工程地质研究现状。因为修建了众多核电站,他们对活动断层的研究;对地震危险性概率分析方法的研究;为了保护地质环境,对高放射性核废料处置的研究;以及对岩体重力蠕变的研究,给我的启迪最为深刻。他们的某些研究成果被纳入了我们当时正在编写的教材之中。对地质环境保护的重视,也成为我们和他们之间的共识。

我和王士天、王兰生两位老师历时近三年的通力合作,《工程地质分析原理》第一版终于于1981年由地质出版社出版。它系统论述如何分析与评价人类工程活动中经常遇到的一些主要工程地质问题,包括区域稳定性问题、岩(土)体稳定性问题、与地下渗流有关的工程地质问题以及与侵蚀淤积有关的工程地质问题几个大的方面。为了深刻理解区域稳定性和岩体稳定性的力学机制,还在前3章分别论述了地壳岩体结构特征、地壳岩体的天然应力状态和岩体变形破坏机制。

这是一部自成新体系的教材。其所分析与评价的工程活动中经常遇到的地质环境与工程活动相互制约的主要形式或主要工程地质问题,既包括地质环境制约工程,影响工程的选址、结构选型、稳定性评价、施工方法、维护措施以及工程造价等方面的问题;也包括工程活动对地质环境的反作用(系统反馈),如水库诱发地震、库岸崩滑、地面沉降等“环境效应”问题。首次以研究人类工程活动与地质环境之间相互制约关系;以便在工程活动中合理开发和有效保护地质环境,作为工程地质学的基本任务。也就是说其基本任务不再仅限于为具体建设工程服务,而是扩大为“协调人地关系”。它以各具特定结构的非均质、各向异性的岩体为主要研究对象;以不同优势方位不连续面

的组合为控制岩体变形破坏的几何边界条件；以地应力场为岩体最重要的赋存环境。自然地质作用或人类工程活动诱发的地应力场变化，是引起岩体变形直至失稳破坏的主控因素。也就是说，岩体的稳定性与具有自组织行为的地应力场紧密相关。岩体的变形与破坏过程，既取决于岩体的岩性和结构特征，也取决于它所处的地应力场及其变化。岩体中局部不连续面的形成和延伸发展，层状岩体的弯曲，均属岩体变形，都是极其缓慢的时效变形（time-dependent deformation）；一旦局部不连续面相互贯通，此贯通不连续面之上的岩体立即失稳破坏，且多为突发性事件。岩体变形的发生和发展，必然引起地应力场的不断调整或应力重分布，而地应力场的调整又反馈于岩体变形，促使其不断发展直至最终失稳破坏，这就是累进性破坏（progressive failure）。本教材第一版的面世表明，我们所期望的：始于野外现场原型调研、经模型抽象—变形破坏机制分析—评价预测、终于防治措施建议的工程地质系统研究理论和方法体系已经初步形成。

改革开放建立了学位制度。1979年，我开始培养硕士研究生；1984年，我被国务院学位委员会批准为博士生导师，至1991年，孔德坊、王士天、王兰生三位教授相继被国务院学位委员会批准为博士生导师。我们这个学术集体，培养研究生的途径，都是在导师指导下，由硕士或博士研究生承担并完成重大工程地质问题研究，写出有所创新的论文并通过答辩。在此期间先后完成“龙羊峡水电站近坝库岸大型高速滑坡形成机制及库岸稳定性问题研究”“黄河拉西瓦水电站高边坡稳定性的系统工程地质研究”“二滩电站右坝肩绿泥石—阳起石化玄武岩带岩体力学特性及强度预测”研究。同时，在科学研究和研究生培养中的其他重要发现还有：平推式滑坡的发现；经过模型模拟证实的铜街子水电站浅表生结构的发现；向家坝水电站马步坎浅表生结构的发现等。1988年，成都地质学院工程地质博士点被评为国家重点学科；1989年，又经国家主管部门批准，使用世界银行贷款建立“地质灾害防治与地质环境保护”国家重点学科专业实验室，该实验室逐渐成为我国培养高学位工程地质科技人才的重要基地。培养十数位至数十位硕士、博士研究生，需要有合适的教材或教学参考书。于是，我们着手对《工程地质分析原理》第一版进行必要的修改与补充，力求其能与国际国内工程地质学当时的发展水平相适应，使之符合作为研究生教材的基本要求。保持第一版中五篇十五章的总框架不变，但对一、二、三、四、五、九、十章都做了重大修改与充实，其他各章也做了适当的修改与补充。1994年，《工程地质分析原理》的第二版由地质出版社出版。

本书第二版，将相似材料模型模拟和数值模拟作为重现变形破坏发展全过程和验证变形破坏的力学机制的实证手段，将原位监测作为变形发展信息反馈和破坏预报预警手段，纳入了工程地质问题分析与评价的理论方法体系之中。它以现代广义系统科学为主导思想方法，以大系统的开放性、自组织动态演化为核心，完善了始自现场原型调研、经模型抽象—变形破坏机制分析—模拟再现—监测反馈与预警—评价预测、终于防治措施建议的工程地质问题分析与评价的理论方法体系。

进入21世纪，我国在工程地质条件极其复杂的西部地区，设计和施工了为数众多的高坝、大型地下洞室群、航空港和高等级交通线路。工程地质工作者面对不断涌现的新工程地质问题，进行了成效卓著的研究，从而大大促进了工程地质学科的发展。这些年又是重大地质灾害的多发年。地震灾害有：2001年我国东昆仑8.1级特大地震；2004年印尼特大地震及引发的海啸；2008年我国四川汶川8.0级特大地震。大型滑坡灾害有：2000年易贡特大型堵江滑坡；2004年四川宣汉天台乡滑坡；2008年，汶川地震触发和诱发的大型滑坡更是难以数计，仅较大型堵江滑坡就多达36个，总体积超过 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的大光包滑坡更是受到国内外工程地质学者的广泛关注。工程地质工作者在防灾、减灾、排险和治灾方面付出了艰辛劳动，同时也从另一方面推动了工程地质学科的发展。还应特别指出的是：实时精确测定地面点位置的全球定位系统（GPS），用于测定局部地区乃至全球地壳的相对运动，可以获得高精度、大范围、准实时的地壳运动定量数据，使短时间内得出大范围地壳运动速度场成为可能。以GPS观测成果求解活动断层错动速率有良好的应用前景。将GPS用于活动构造和地震地质研究，使区域稳定性研究得以快速发展。

更新内容使之与工程地质学最新发展水平相适应,是编写本书第三版的首要目标。第一、二、四、五、八、九、十、十二章都做了较大的修改和充实,同时也将工程地质学的基本任务表述为:“研究人类工程活动与地质环境之间相互制约关系,以便在工程活动中合理开发、有效保护地质环境和防治地质灾害”。为了与本书作为高等院校工程地质专业主要教学用书相适应,删繁就简,力求以清晰阐述工程地质学的基本概念、基本原理和基本分析方法为主,是本次修订的另一个重要目标,为此作者们也做了应有的努力。这里需要稍加说明的是:教育部的学科目录本科生阶段并无工程地质专业,硕士和博士研究生阶段也只设有“地质工程”专业,工程地质专业从何而来?工程地质学是国内国际地球科学界公认的应用性分支学科,它植根于地质学,应用(服务)于土木工程和采掘工程,也应用于环境科学,是这三个学科间的边缘学科。它的绝大多数基本概念、基本原理、基本分析方法来自于地质学,也有一部分来自于岩石力学和土力学。而“地质工程”学科的内涵从来没有明确界定,易与岩土工程(geotechnical engineering)相混淆;将之更正为工程地质专业极其必要。2009年,本书第三版由地质出版社出版。

本书的前三版一贯主张:将现场原型调查研究作为工程地质问题分析与评价的起点,只有敏于观察地质现象,善于解读地质记录,符合实际的概念模型才能得以形成。这与张咸恭教授所倡导的:中国工程地质学“以工程地质条件查明为基础;以工程地质问题分析为核心;以工程地质评价为目的”完全一致。也与台湾大学李锡堤教授所主张的:“工程地质学的精髓在于野外地质调查”相符合。

本书第一版和第二版均由张倬元执笔绪论、四、五、六、七、十二、十三章,并承担全书统稿;王士天执笔二、八、十、十一章;王兰生执笔一、三、九、十四、十五章。本书的第三版,仍由张倬元执笔绪论、四、五、六、七、十二、十三章并承担全书统稿;由王兰生执笔三、八、九、十四章;黄润秋执笔第一章;许强执笔二、十一、十五章;陶连金执笔第十章。

自本书第三版出版面世,迄今已将近7年。在此期间,我国大型工程建设事业,仍以较高速度发展。21世纪将是地下空间利用的世纪,已经成为岩土工程界的共识。人类工程活动对地壳表层的扰动,也呈与时俱进之势。相当多的大学,都在本科生和研究生培养阶段,设置了“地质工程”专业,从而对本书的需求也与日俱增。去年年初,地质出版社提出建议:以本书第三版为基础,内容基本上不做改写与增补,但必须改正图、表、文字中的错误,增补所有参考文献的全部信息,出版本书的第四版。我们接受了这一建议,我也主动承担了这一任务。赵建军、赵伟华、刘明、王运生、李渝生、韩爱果、陈强、吉锋、张强、孙书勤、夏敏协助我完成此项任务。除了按照出版社提出的问题尽可能地做了必要的修改与增补外,还改写了第七章和第十四章的个别段落;还将岩体中的空隙水压力这一术语改为间隙水压力(interstitial water pressure的正确译名)。这一改动之所以必要,是因为土体中的孔隙、岩体中岩块之间的间隙,都是空隙,空隙水压力也应包括孔隙水压力和间隙水压力,而且空、孔同音,用语言表述时往往使两个不同术语混淆不清。改动之后,岩体中只有间隙水压力,土体中则仅有孔隙水压力(pore water pressure)。前者是面力,后者则是体力。这些改错、增补、改写和改动,就是本书第四版对第三版的改进。

我们谨向本书所引用的参考文献的作者们表示感谢,他们的成果为撰写本书提供了基础。感谢本书责任编辑李惠娣博士,她的辛勤劳动为本书的改进提供了方向。感谢协助我完成此项任务的工程地质教研室的诸位老师,他们的辛勤劳动,使本书得到了应有的改进。感谢巨能攀博士和成都理工大学地质工程创新实验班2012级和2013级的全体同学,他们向我提供了多个需要改正的问题。

对本书内容的批评和建议,请发至以下电子邮箱:zzy260121@163.com。

张倬元

2016年1月10日

目 录

序

绪 论..... (1)

第一篇 区域稳定性及岩体稳定性分析的几个基本问题

第一章 地壳岩体结构特征的工程地质分析..... (6)

第一节 基本概念及研究意义..... (6)

第二节 岩体的结构特征及主要类型..... (8)

第三节 岩体原生结构特征的岩相分析..... (13)

第四节 岩体结构构造改造的地质力学分析..... (17)

第五节 结构面的特征描述及统计分析..... (21)

主要参考文献..... (35)

第二章 地壳岩体的天然应力状态..... (38)

第一节 基本概念及研究意义..... (38)

第二节 岩体天然地应力状态的形成及其类型..... (39)

第三节 我国地应力场空间分布的一般规律..... (45)

第四节 地壳表层地应力状态的复杂性..... (50)

第五节 区域地应力场及岩体地应力研究..... (60)

主要参考文献..... (65)

第三章 岩体的变形与破坏..... (67)

第一节 基本概念及研究意义..... (67)

第二节 岩体在加荷过程中的变形与破坏..... (72)

第三节 岩体在卸荷过程中的变形与破坏..... (87)

第四节 岩体在动荷载条件下的变形与破坏..... (91)

第五节 岩体变形破坏过程中的时间效应..... (96)

第六节 间隙水压力在岩体变形破坏中的作用..... (101)

第七节 岩体变形破坏的地质力学模式..... (105)

主要参考文献..... (107)

第二篇 与区域稳定性有关的工程地质问题

第四章 活断层的工程地质研究..... (110)

第一节 基本概念及研究意义..... (110)

第二节	活断层的类型和活动方式·····	(112)
第三节	活断层的长度和断距·····	(118)
第四节	活断层的错动速率和重复错动间隔·····	(121)
第五节	活断层活动的时空不均匀性·····	(130)
第六节	活断层区规划设计建筑物的原则·····	(133)
第七节	活断层的调查监测与研究·····	(137)
	主要参考文献·····	(144)
第五章	地震的工程地质研究·····	(146)
第一节	基本概念及研究意义·····	(146)
第二节	地震及地震波的基础知识·····	(147)
第三节	我国地震地质的基本特征·····	(156)
第四节	地震区划及地震危险性分析·····	(166)
第五节	场地地震反应及地震小区划·····	(174)
第六节	地震区抗震设计原则·····	(188)
	主要参考文献·····	(191)
第六章	水库诱发地震活动的工程地质分析·····	(193)
第一节	基本概念及研究意义·····	(193)
第二节	水库诱发地震活动性变化的几种典型情况·····	(195)
第三节	水库诱发地震的共同特点·····	(206)
第四节	水库诱发地震的诱发机制·····	(210)
第五节	产生水库诱发地震的地质条件·····	(215)
第六节	水库诱发地震工程地质研究的基本原则·····	(217)
	主要参考文献·····	(219)
第七章	地震导致的区域性砂土液化·····	(221)
第一节	基本概念及研究意义·····	(221)
第二节	地震时砂土液化机制·····	(223)
第三节	区域性砂土地震液化的形成条件·····	(227)
第四节	砂土地震液化的判别·····	(233)
第五节	砂土地震液化的防护措施·····	(239)
	主要参考文献·····	(242)
第八章	地面沉降与地裂缝的工程地质分析·····	(243)
第一节	基本概念及研究意义·····	(243)
第二节	地面沉降与地下水开采·····	(247)
第三节	地面沉降与地裂缝·····	(255)
第四节	地面沉降与地裂缝的防治与调研·····	(263)
	主要参考文献·····	(268)

第三篇 与岩(土)体稳定性有关的工程地质问题

第九章 斜坡岩(土)体稳定性的工程地质分析	(270)
第一节 基本概念及研究意义	(270)
第二节 斜坡岩体应力分布特征	(273)
第三节 斜坡的变形与破坏	(276)
第四节 斜坡变形破坏机制与演化	(280)
第五节 斜坡破坏后的运动学	(295)
第六节 斜坡变形破坏与内外营力的关系	(301)
第七节 斜坡稳定性评价与预测	(315)
第八节 防治斜坡变形破坏的原则及主要措施	(323)
主要参考文献	(328)
第十章 地下洞室围岩稳定性的工程地质分析	(332)
第一节 基本概念及研究意义	(332)
第二节 地下开挖后围岩应力的重分布	(333)
第三节 围岩的变形与破坏	(337)
第四节 地下洞室围岩稳定性评价	(342)
第五节 维护地下洞室围岩稳定性的支护措施	(356)
主要参考文献	(359)
第十一章 地基岩体稳定性的工程地质分析	(360)
第一节 基本概念及研究意义	(360)
第二节 地基岩体内的应力分布特征	(362)
第三节 坝基岩体的变形与破坏	(365)
第四节 坝基(肩)岩体稳定性的工程地质评价	(377)
第五节 改善坝基稳定性的措施	(388)
主要参考文献	(391)

第四篇 与地下水渗流有关的工程地质问题

第十二章 岩溶及岩溶渗漏的工程地质分析	(393)
第一节 基本概念及研究意义	(393)
第二节 碳酸盐溶蚀的物理化学原理	(394)
第三节 岩溶发育的基本条件	(400)
第四节 岩溶发育的阶段性及其发育历史	(407)
第五节 岩溶渗漏分析	(414)
第六节 岩溶区修建水库的措施与防渗处理	(420)
第七节 岩溶区的地面塌陷灾害	(422)

主要参考文献·····	(424)
第十三章 渗透变形的工程地质分析·····	(426)
第一节 基本概念及研究意义·····	(426)
第二节 土石渗透变形的产生条件·····	(429)
第三节 渗透变形可能性的判定·····	(433)
第四节 渗透变形的防治措施·····	(438)
主要参考文献·····	(440)

第五篇 与侵蚀淤积有关的工程地质问题

第十四章 河流侵蚀、淤积的工程地质分析·····	(441)
第一节 基本概念及研究意义·····	(441)
第二节 河流水动力学特征·····	(442)
第三节 水流对河床的作用及河床稳定性·····	(445)
第四节 河床演变的某些基本规律·····	(449)
第五节 水库淤积及坝下游河床再造·····	(460)
第六节 河流开发治理的一般原则·····	(464)
主要参考文献·····	(466)
第十五章 海(湖)边岸磨蚀与堆积的工程地质分析·····	(468)
第一节 基本概念及研究意义·····	(468)
第二节 波浪和岸流的一般特征·····	(468)
第三节 海(湖)边岸磨蚀与堆积的基本规律·····	(472)
第四节 水库边岸再造及滑体涌浪预测·····	(479)
第五节 海(湖)边岸及沿岸建筑物的防护措施·····	(486)
主要参考文献·····	(489)

绪 论

一、人类工程活动与地质环境的相互关系

人类工程活动都是在一定的地质环境中进行的，二者之间必然产生特定方式的相互关联和相互制约。

地质环境对人类工程活动的制约是多方面的，既可以表现为以一定作用影响工程建筑物的稳定和正常使用，也可表现为以一定作用影响工程活动的安全，还可表现为由于某些地质条件不具备而提高了工程造价，视地质环境的具体特点和人类工程活动的方式和规模而异。例如，在活动断层和强烈地震区修建各类工程建筑物，如果建筑场地选择不当或建筑物类型、结构设计不合理，就会由于断层活动或伴随断层活动产生的强烈地震使建筑物损坏或毁坏。在石灰岩地区修建水工建筑物，如未能查明溶蚀洞穴的分布规律并采取适当措施，轻则造成大量库水漏失，重则造成水库完全不能蓄水，使建筑物不能正常使用。进行地表开挖，无视地质条件的特点或对边坡稳定性判断失误，有时会引起大规模的崩塌或滑坡，不仅增加工程量、延长工期和提高造价，甚至会危及施工者的安全。如果工程活动是在岩（土）体中开挖地下洞室，显然洞室本身的稳定性及支撑结构、施工方法、施工的正常工作条件及施工人员的安全，都受周围地质环境的制约。地质环境可以通过两种不同的方式影响工程造价。一种往往是由于建筑场地选择不当，为了在复杂条件下保证建筑物的安全，如不对威胁建筑物的地质因素采取某种处理措施，就必须采用更为复杂的建筑物结构。例如，在淤泥质软弱地基上修建高层建筑，由于没有可靠的天然地基，或者是采用人工改良地基或者是采用更为复杂的箱形基础，以保证建筑物不致因强烈不均匀沉降而毁坏，工程建筑物的造价因此而提高是显而易见的。另一种情况是选择了当地不能提供充分天然建筑材料的建筑物型式。例如，在天然产出砂砾石很少的地区修建混凝土坝，本来可以选用混凝土方量小的轻型结构，却选用了大体积的重力坝，如不从远处运来天然砂砾作为骨料，就必须制造人工骨料，建筑物造价的大大提高也是不可避免的。

人类工程活动又会以各种方式影响地质环境。例如，房屋建筑物引起地基土层的压密，又如桥梁改变局部水流条件从而使局部河段的侵蚀淤积规律发生变化等。由于人类工程活动规模愈来愈大，所以它对地质环境的影响早已超出局部场地的范围而波及广大区域。例如，大量抽汲地下水或其他地下流体，降低了土体中的空隙液压，结果引起大范围的地面沉降，使沉降区已有建筑物的正常工作条件受到严重影响。又如，修建高坝形成大水库，大区域的水文动态和水文地质条件因此改变，往往引起区域性的坍岸或浸没；有时库尾淤积还会引起支流泄水不畅，造成更大区域的地下水回水，如属黄土地区还会进一步引起大区域的湿陷。在某些地区还会产生由水库诱发的地震，较强的水库诱发地震往往会使较大区域内的建筑物受到危害。

由此可见,由于地质环境不同和人类工程活动的类型和规模不一,工程活动与地质环境之间的相互关联相互制约有多种形式,主要是两者之间某种形式的相互作用,也有不属于相互作用的某种方式的相互制约,例如,因不具备某些地质条件而提高了工程的造价。不能根据具体地质环境和工程活动方式预见两者之间相互制约的基本形式,不但不能合理开发(或利用)地质环境以致影响工程活动的安全与经济,甚至会使广大区域的地质环境发生恶化,致使大范围内的大量已有建筑物受到不良影响。所以,研究人类工程活动与地质环境之间的相互制约,以便合理开发和有效保护地质环境,防治可能发生的地质灾害,就是作为一门科学的工程地质学的基本任务。随着人类日益大规模地改造自然环境,改造世界上有名的多泥沙河流、改造沙漠等终究会付诸实践,而只有掌握地质规律,按客观规律办事,才能因势利导达到有效地改造地质环境的目的。所以,有效改造地质环境也是工程地质学将要面临的重要任务。

二、工程地质学的研究对象与分科

工程地质学的上述基本任务,必然要求对工程活动的地质环境,或称为工程地质条件,进行深入研究。一般认为,工程地质条件包括岩石和土的性质、地质构造、地貌、水文地质条件、自然地质现象和天然建筑材料等方面,但其中最根本的是岩石和土的性质,因为作为建筑物地基或环境的总是具有一定成分和性质的土或岩石或它们的组合,所以它们与工程活动有关的属性,是决定人类工程活动与地质环境相互制约的形式和规模的基本条件。这些属性通称土石的物理力学性质或工程地质性质。研究岩(土)体性质的形成和它在自然或人类活动影响下的变化,是工程地质学的专门分支之一——工程岩土学的任务。

在查明工程地质条件基本特征的基础上,要进一步研究工程活动与地质环境相互制约的一些主要形式,或称主要工程地质问题。分析这些问题产生的地质条件、力学机制及其发展演化规律,以便正确评价和有效防治它们的不良影响,是工程地质学另一专门分支——工程地质分析的基本任务。

上述两个专门分支学科是工程地质学的理论基础。将这些工程地质学理论用于解决工程实际问题,保证与人类工程活动的规划、设计、施工、使用、维修等有关的地质因素均能有效查明和妥善处理,需要在总结过去实践经验基础上探讨调查研究方法,这是工程地质学另一专门分支——工程地质勘察的任务。

如果将地质环境比作一个机体,由于工程活动而引起机体产生各种变化,则工程岩土学所研究的对象可以比作生理研究,工程地质分析则可比作病理研究,而工程地质勘察则相当于诊断研究,它们的研究对象各有侧重,构成工程地质学完整链条上的3个主要环节。

由于工程地质条件有明显的区域性分布规律,因而工程地质问题也有区域性分布的特点,研究这些规律和特点的专门分支称为区域工程地质学。

进入20世纪80年代,人们已充分认识到人类的工程活动或其他经济活动已经成为改变地表面貌、改变环境的强大营力,其规模和速度甚至超过了自然营力。如果不认识到人类赖以生存的大环境——岩石圈表层、水圈、大气圈、生物圈这一大系统的各子系统之间的内在联系、相互作用和环境发展演化的客观规律,人类活动就会不自觉地破坏或恶化环境,于是,人类活动的环境效应受到了高度重视。为了防止人类工程活动对地质环境的不利影响,就需要定量预测人类活动干预下地表岩土体的变形破坏过程,预测各种工程活动可能产生的

环境效应,研究各种地质灾害的区域性成灾规律和危险性分析评价(hazard assessment)方法,研究区域的、城市的或重大工程的地质环境评价的原则和方法,以便达到合理开发利用和保护改善环境的目的。以上述环境工程地质问题的研究评价为主要内容的环境工程地质学就逐渐成长为工程地质学的一个新的分支学科。

三、工程地质分析的基本方法

如上所述,工程地质分析的研究对象是地质环境与人类工程活动相互制约的一些主要形式,即主要的工程地质问题,其中以两者之间的相互作用为主;研究它们产生的地质条件、成因机制,探讨它们的发展演化趋势,以便正确评价和提供合理的防治措施。

显然它所研究的都是地质问题,都有其产生的特定的地质环境或地质条件。岩溶渗漏就是一个明显的例证,作为渗漏通道的洞穴管道体系,是可溶性岩石在一定的水循环交替条件下溶蚀作用长期发展的结果。不了解地区地质构造、地貌、水文地质条件、河谷发育历史,就不能正确判定洞穴体系的发育程度和空间分布规律,也就不能正确判定渗漏的可能性及其严重程度,所提供的防渗措施当然不可能是合理的。斜坡岩体的变形破坏也是一定地质条件下长期发展演化的地质过程,包括斜坡形成过程中岩体的卸荷回弹、岩体中应力重分布、岩体中结构面的表生改造、蠕变性时效变形、局部破坏以致失稳滑落,而且在整个过程中始终与周围地表水、地下水、风化营力、地震等因素的作用相联系而发展。脱离了地质环境,脱离了与周围因素的联系,无视其长期发展变化的全过程,就不能对斜坡的稳定性现状做出合理的判断,而斜坡的稳定性现状只不过是斜坡演化过程中的一个片断,是过去发展历史的结果及将来发展演化的起点,所以不理解其现状,也就不能对其未来的发展趋势做出正确的预测。

由此可见,既然绝大多数工程地质问题都涉及特定地质环境中地质体的发展演化过程,所以,研究这些问题必须首先以地质学的观点、自然历史的观点分析地质体与周围因素相互作用的特定方式,随时间发展演化的历史及其发展的阶段性,从全过程和内部作用机制上把握其形成、演化、现状及未来发展趋势,也就是说首先进行地质过程的机制分析。其所得结果虽然是定性的,但因为它往往是区域性或趋势性规律,所以对工程活动的规划选点、可行性研究,或者说工程活动的战略布局,有重要的指导意义。同时,它又是进一步定量评价的基础。

工程地质分析为人类工程活动服务这一明确目的,就必然要求对主要工程地质问题进行定量评价,以便为工程设计或防护措施设计提供必要的参数或定量数据。在信息技术迅速发展、各种测试手段不断完善的今天,对地质过程的研究已不再局限于传统的、建立在现象描述基础上的定性分析、定性评价,而是在定性评价的基础上,将地质学对现象的研究与现代岩石力学、数学、力学、计算机科学和现代测试技术有机地结合起来,尽最大可能地提取地质体发展演变过程的内部信息;尽最大可能地实现地质参量或岩体力学参量的定量描述和定量表达;尽最大可能地实现地质体演变全过程的模拟再现,以达到对地质体变形破坏演变过程及其所代表的稳定性状态和未来的发展趋势进行半定量以至定量的评价和预测。也就是说要进行地质过程的机制分析——定量评价。在阐明主要工程地质问题形成机制的基础上,建立一些简化模型进行必要的定量计算与预测,诸如地面沉降量计算,地震砂土液化可能性计算,斜坡稳定性、坝基稳定性计算,预测斜坡破坏时间的计算等。由于地质条件十分复杂,

有时还必须用类比法进行定量评价,也就是根据条件类似地区已有工程地质问题的观测资料,对研究中的问题进行定量预测,例如水库岸边再造带宽度预测就多采用这种评价方法。

定性与定量评价相结合的地质过程的机制分析——定量评价,按下述程序或层次进行。

评价的起点和基石是原型的工程地质研究和概化模型的建立。任何形式的地质环境与工程活动间的相互作用,都可以在自然界找到其类似的作用,或者说大自然是包罗万象的地质作用未经任何简化的原型模拟实验室。作用长期发展的结果就可以出现各种地质现象,现象就是地质作用过程的记录。不同地质环境条件中产生的现象,不同作用方式产生的现象,作用不同发展阶段产生的现象都会有所不同。通过仔细观察、对比,结合地质环境进行分析,就可以将现象产生的空间(地质环境)条件和时间序列区分出来,这样就可以透过现象认识其产生的原因和内部作用过程,也就是形成机制。由于现象的不完备性和认识的局限性,从现象提取的内部作用过程信息也是不完备的,甚至是片面的,需要进一步验证。通过现象分析所建立的尚待验证的机制模型就是概化模型。

为了运用数学、物理、力学理论和方法验证并完善对地质作用形成机制和发展演化全过程的认识,首先必须通过实验以获得岩体力学性态的定量描述(即岩体力学参量)及应力—应变本构模型,亦即通过实验研究建立岩体力学模型。

基于正确的岩体力学模型和参量的物理模拟和数值模拟分析,可以在短时期内重现作用发生发展的全过程,经与原型和现象观测相对照(反馈对照),如能达到拟合,即可验证概化模型,使之上升为系统全面的内部作用过程的理性认识,或者说成为理论模式。其中物理模拟多用以获取特征点的物理量(例如变形、应力等),数值模拟则可获得全场的物理量并可用以模拟运动过程或演化过程,两者配合使用可以得到更好的效果。

经过物理、数值模拟获取了边界条件、强度参数、影响因素及敏感因素等方面的信息,即有助于选择适当的计算方法进行定量计算,做出定量评价或预测。基于定量评价和预测,就可以确定合理的防治对策、设计整治方案并付诸实施。

四、工程地质分析原理的内容及学习方法

本课程通过一些主要工程地质问题的成因、发展历史、力学机制分析与定量评价,讨论工程地质分析的基本原理。

主要工程地质问题有区域稳定性问题、岩(土)体稳定性问题、与地下渗流有关的工程地质问题以及与侵蚀淤积有关的工程地质问题4个方面。

区域稳定性问题讨论在特定的地质条件中产生的,并影响到广大区域的工程地质问题,包括活断层、地震、水库诱发地震、地震砂土液化和地面沉降。掌握这些问题的规律性,对规划选场,或者说对地质环境的合理开发与有效保护,具有重要意义。某些自然(物理)地质现象的区域性分布规律,则在以后的有关章节讨论。

岩(土)体稳定性问题论述斜坡、洞室、地基岩(土)体稳定性的成因发展历史分析和力学机制分析,主要用于具体场地的稳定性评价,但在开发与保护地质环境中也有意义,特别是对研究斜坡、洞室围岩(土)体的稳定性有重要意义。

与地下渗流有关的工程地质问题包括岩溶及岩溶渗漏的工程地质分析和渗透变形的工程地质分析两章。前者以保证水工建筑物正常工作为目的,后者主要讨论渗流作用下土体的稳定性。

与侵蚀淤积有关的工程地质问题，包括河流侵蚀、淤积的工程地质分析和海（湖）边岸磨蚀与堆积的工程地质分析两章，前者对改造河流、后者对开发海洋都有重要意义。

岩体结构特征及其变形破坏机制，是进行区域稳定性和岩体稳定性分析的基础理论。所以本书一开始首先对此问题进行了必要的论述。决定岩体变形破坏的主导因素是岩石材料的性质、岩体结构特征、岩体的应力状态、孔隙裂隙中水和时间因素。岩石材料是工程岩土学讨论范围，所以本书第一章首先对岩体结构特征进行地质历史的、力学的和统计的分析。第二章讨论岩体应力状态的总背景和地壳岩体的天然应力状态。第三章讨论岩体的变形与破坏，其中包括了岩体变形破坏中的孔隙水压力效应和时间效应。

学习本课程的目的是熟悉各种主要工程地质问题，并掌握对它们进行分析评价的基本原理和方法，以便在今后工作中能根据具体地质条件和人类工程活动特点，对主要工程地质问题进行合理的分析与评价并提供恰当的处理措施。实践经验证明，工程建筑物因地质原因产生问题主要是由于分析判断失误。所以，最重要的是学会具体问题具体分析，而不是记忆某些条文。

本书的第七、八、十四、十五章可以作为“工程地质专门问题”选修课的讲授内容。如果学时不足，第六章也可以考虑采用这种处理方式。

第一篇 区域稳定性及岩体稳定性 分析的几个基本问题

第一章 地壳岩体结构特征的工程地质分析

第一节 基本概念及研究意义

岩体 (rock mass) 通常指地质体中与工程建设或与地质灾害发生有关的那部分岩石, 它处于一定的应力状态, 被各种结构面所分割。

岩体具有一定的结构特征, 它由岩体中不同类型的结构面及其在空间的分布和组合状况确定。因此, 其基本组成是结构面和由结构面所围限的岩块 (block)。岩体则是岩块的集合。

所谓结构面, 系指岩体中具有一定方向、力学强度相对较低、两向延伸 (或具一定厚度) 的地质界面 (或带)。例如, 岩层层理、软弱夹层、各种成因的断裂、裂隙等。由于这种界面中断了岩体的连续性, 故又称为不连续面 (discontinuities)。结构面在空间的分布和组合可将岩体切割成不同形状的结构体 (图 1-1)。

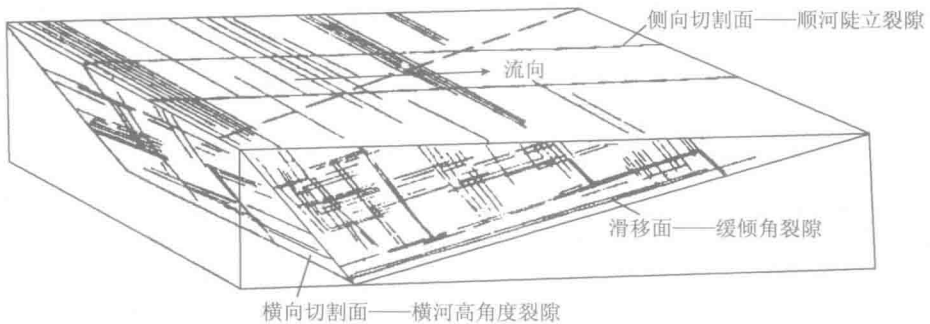


图 1-1 岩体及其基本组成

岩体的结构特征是在漫长的地质历史发展过程中形成的。它以特定的建造 (如沉积岩建造、火成岩建造和变质岩建造) 为其物质基础。建造确定了岩体的原生结构特征; 而岩体所经历的不同时期、不同程度的构造作用改造以及浅表生作用 (epigenic processes; 如卸荷、