



Environmental
Geotechnology

席永慧 著

环境岩土工程学



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

同济大学学术专著(自然科学类)出版基金资助

环境岩土工程学

席永慧 著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

环境岩土工程是岩土力学与环境科学密切结合的一门新兴学科。本书系统介绍了环境岩土工程在理论与实践方面的主要研究内容、研究方法及其新进展,主要从重金属离子的吸附、污染物在土壤多孔介质中的迁移、废弃物屏障系统设计、污染土的固化处理、重金属污染的生态处理、填埋场的稳定性分析、填埋场内部气体运移规律、高放射性核废料的地质深埋处置等方面展开。本书内容包含作者多年教学和科研成果的总结,试验数据丰富,分析详细,尤其注重研究成果向实际工程的应用转化。

本书可供土木工程、地质工程和环境工程等专业的学生和科研人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

环境岩土工程学 / 席永慧著. —上海: 同济大学出版社, 2019.6

ISBN 978-7-5608-8429-5

I. ①环… II. ①席… III. ①环境工程—岩土工程 IV. ①TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 151903 号

环境岩土工程学

席永慧 著

责任编辑 李 杰 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店、建筑书店、网络书店

印 刷 常熟市大宏印刷有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 15.75

字 数 393 000

版 次 2019 年 6 月第 1 版 2019 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-8429-5

定 价 98.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

序 言

土力学与环境问题相结合,是学科发展的必然。近日新闻连续报道了金沙江和雅鲁藏布江上游发生山体滑坡形成堰塞湖威胁下游数百万人民的生命财产安全的消息。滑坡是土力学中最经典的课题。山体滑坡发生的原因除与土体本身性质有关外,更与气象、植被生态、人类活动等环境因素有关。形成堰塞湖以后,还与水利抗灾等社会问题相关联。所以将土力学这门学科置于大环境中来考虑才大有作为。

自1925年太沙基出版第一本《土力学》著作以来,土力学这门学科发展很快,在发展过程中,不同阶段有不同的重点。二十世纪三十年代到五十年代,是土力学初创阶段,主要表现在理论领域内各类公式推陈出新,同时伴随着公式中所需指标的测定,土工试验仪器设计和试验方法也在不断改进和发展。从六十年代到七十年代,随着计算机的出现,土力学计算方法得到了迅速发展,计算方法的改进,推动了土力学理论进一步提高。

我国自改革开放以来,经济建设蓬勃发展,高楼大厦如雨后春笋般拔地而起。在超大超深基坑工程、软土地基的处理、地下铁道、大型港口码头、大跨度桥梁、高坝和水利枢纽、高速公路和机场等工程中,土力学这门学科发挥了巨大的作用。土力学为工程服务,与工程建设相结合,发展成为“岩土工程学”。这是学科发展的飞跃。

在为工程建设服务过程中,逐渐发现传统的土力学研究的范围不能涵盖实际遇到的问题。同济大学已故俞调梅教授团队开始研究在城市建设中打桩对周边环境的影响,开创了工程活动对周边环境研究研究的先河。

把土力学与环境问题结合起来研究,必须要提到美国里海大学方晓阳教授的贡献,在方教授的推动下,1983年和1985年在同济大学先后组织召开了两次“海洋岩土工程和近岸离岸结构”国际学术会议,1989年又举办了“第二届环境岩土工程”国际学术讨论会,这三次会议,极大地拓展了我国岩土工程学的视野,也是第一次提出了“环境岩土工程”的概念。传统的土力学这门学科随之深化,提高到了新的高度。

随着我国工业化建设的发展,许多新的问题不断出现,例如,大量有毒有害废弃物的处置问题,土地荒漠化和盐碱化问题,土壤的污染和毒化问题,放射性核废料的处理问题,山体滑坡及各类自然灾害等,人类的生存环境受到严重挑战,这也为环境岩土工程这门新学科提供了更大的发展空间。新学科的建立也就水到渠成了。

1987年,本人提出了“受环境污染土的基本性质的研究”,获得了这个领域的首个国家自然科学基金的支持。本书作者席永慧通过室内试验,对有毒有害离子在土壤中迁移规律的研究,提出了屏障隔离的概念,成功地应用在受硫酸根离子污染地基的处理设计中,克服了硫酸根离子对混凝土灌注桩腐蚀的难题,成为环境岩土工程学科第一个范例。1997年,本人总结了十多年的教学和科研成果,编著出版了《土力学与环境土力学》一书,全面阐述了环境岩土工程的概念,对教学和科研起到了很大的促进作用。

在这期间,国内学术界纷纷开展了这方面的研究。特别是浙江大学陈云敏教授结合杭州天子岭废弃物填埋场的处理工程,作出了卓越的贡献;东南大学、南京大学的科研团队,在污染土处理方面有独到的创新;上海勘察设计研究院、同济大学等单位开展了对上海受污染土壤的环境调查和土工处置技术研究。环境岩土工程这门学科,迎来了百花齐放的春天。

环境岩土工程这门学科,涉及面十分广泛,从事这门学科的工作者需要具备地质学、土质学、土壤学、农学、化学、环境学等方面的知识。必须打破隔行如隔山的观念,树立开放、跨行、互补的意识,使这门学科发展得更好。本书作者席永慧,自二十世纪八十年代末就开始从事环境岩土工程的研究和教学工作,把近三十年的成果汇集成书,为环境岩土工程这门学科添砖加瓦,是一件很有意义的事,这就是传承。

全书共有九章,纵观内容,具有以下几方面特点。

(1)第1章导论,虽然总体框架沿用《土力学与环境土力学》一书,但作者补充了大量国内外文献资料,说明作者有很强的文献阅读能力和对学科发展的掌控能力。

(2)第2章和第3章,是作者长期以来的科研成果,通过室内试验探索了离子在土壤中迁移的规律。室内试验工作十分繁重,一次试验至少要观察数月,甚至几年,还必须请化学分析人员配合,测定离子含量变化。这种基础性研究,要耐得住寂寞,在无现成仪器设备的条件下,能得到如此丰富的资料,实属不易,是花了大量心血取得的成果,具有重要的学术意义,在国内具有开创性作用。

(3)第4、5、7章的内容,主要是将研究成果向实际工程应用的转化。在实验室取得的成果基础上提出了屏障设计的理论和计算方法,并举出了应用实例。关于污染土的固化处理主要是针对重金属污染的问题。屏障设计理论具有创新意义。

(4)第8章是关于填埋场内部气体运移规律的研究。填埋场内部气体对填埋场的沉降和稳定性有直接的影响。由于边界条件和初始条件十分复杂。这一探索性研究具有重要的参考价值。

(5)第9章“高放射性核废料的地质深埋处置”的9.2节、9.3节主要参考陈光敬的文献。陈光敬1998年从同济大学地下系博士研究生毕业。从2001年起在西班牙和比利时主要从事高放核废料的地质深埋处置的热水力研究工作。

(6)关于第6章重金属污染土的生态处理,这部分内容不是作者研究的内容,是土壤学和农学方面的研究成果。引入这部分内容的目的何在?其一,环境岩土工作者,也必须懂一点土壤学和农学方面的知识,并了解不同领域的研究成果。其二,重金属离子都是带正电荷,而土颗粒是带负电荷,所以正离子被土颗粒吸附后,很难从土壤中清除出去,对于大面积或区域性受污染的土壤治理,工程措施无论在技术上还是经济上都很难做到,所以生物治理是最佳的选择。其三,生物治理还应深化,即要解决后续处理工作,也就是说,土壤中的重金属转移到植物本体之后,这些植物怎么处理,如果让它烂在土里,原位循环,那就毫无意义。如果进入食物链,危害就更大了。如何做到后续的无害化处理,还需要多学科的参与和交叉,如土壤学、农学、微生物学、环境工程、材料科学等。本章篇幅不大,但有其特殊的含义,也是作者用心所在。

编书是一项脑力劳动和体力劳动相结合的繁重工作。参加本书整理、编写工作的还有熊浩、王化祺、杨帆、郭丽南、卢丹阳等研究生,他们也都奉献了大量的精力。编书是大学教授的基本功,科学技术需要通过书籍来传承,所以这是一件十分有意义的事。希望本书对环境岩土工程这门学科的发展有所贡献。

胡中雄

2018年10月

目 录

序言

第1章 环境岩土工程学导论 1

- 1.1 概述 / 1
- 1.2 大环境岩土工程中的若干问题 / 4
- 1.3 废弃物污染造成的若干环境岩土工程问题 / 15
- 1.4 人类工程活动造成的若干环境岩土工程问题 / 26

第2章 重金属离子的吸附研究 33

- 2.1 概述 / 33
- 2.2 吸附研究所用的原材料 / 34
- 2.3 粉煤灰、黏土、粉质黏土、膨润土对金属镍离子的吸附研究 / 37
- 2.4 粉煤灰、黏土、粉质黏土、膨润土对金属锌离子的吸附研究 / 42
- 2.5 粉煤灰、黏土、粉质黏土、膨润土对金属镉离子的吸附研究 / 46
- 2.6 粉煤灰、黏土、粉质黏土、膨润土对金属铅离子的吸附研究 / 50
- 2.7 黏土、粉质黏土、粉煤灰和膨润土对金属离子的吸附总结 / 54
- 2.8 固化水泥土对金属铜离子的吸附研究 / 55
- 2.9 吸附影响因素讨论 / 60

第3章 污染物在多孔介质中的迁移 66

- 3.1 概述 / 66
- 3.2 污染物在多孔介质中的迁移理论和模型 / 67
- 3.3 污染物在土壤中迁移系数的试验研究 / 79
- 3.4 污染物在水泥土屏障中迁移系数的实验室测定 / 91

第4章 废弃物屏障系统设计理论及实例 103

- 4.1 概述 / 103
- 4.2 废弃物屏障设计的理论和方法 / 103
- 4.3 废弃物屏障系统设计及污染物修复实例 / 112

- 4.4 防渗屏障服役性能的评价方法 / 124
- 4.5 本章小结 / 126

第5章 污染土的固化处理 127

- 5.1 概述 / 127
- 5.2 固化技术的分类 / 127
- 5.3 固化效果的测试方法 / 129
- 5.4 重金属单离子污染土固化试验研究 / 133
- 5.5 重金属双离子污染土固化试验研究 / 148

第6章 重金属污染土的生态处理 155

- 6.1 概述 / 155
- 6.2 土壤环境与人的关系 / 156
- 6.3 重金属污染现状及其特性 / 159
- 6.4 植物对重金属的吸收积累 / 160
- 6.5 植物修复重金属污染的土壤 / 163

第7章 填埋场的稳定性分析 167

- 7.1 填埋场稳定性的破坏类型 / 167
- 7.2 降雨入渗作用下填埋场的稳定性分析 / 168
- 7.3 地震作用下填埋场的稳定性分析 / 173

第8章 填埋场内部气体运移规律 182

- 8.1 概述 / 182
- 8.2 填埋场的沉降变形 / 186
- 8.3 填埋气体的特性 / 191
- 8.4 填埋气体运移规律的分析 / 203
- 8.5 解析算法实例分析 / 210

第9章 高放射性核废料的地质深埋处置 218

- 9.1 概述 / 218
- 9.2 热-水-力-气耦合分析理论框架 / 230
- 9.3 瑞典 Äspö 地下实验室大型原位“原型仓库”试验 / 236

第1章 环境岩土工程学导论

1.1 概述

1.1.1 环境岩土工程学的形成和发展

环境岩土工程学是一门新兴学科，它既是一门应用性的工程学，又是一门社会学。它是把技术和经济、政治、文化相结合的跨学科的新型学科。它的产生是社会发展的必然结果。

不同的历史阶段，人们对工程活动的评价标准是不一样的。很早以前，工程活动主要是满足个人或家庭的需要；随着社会的发展，评价标准逐渐扩大，除满足个人和家庭需要外，还应满足部落、国家和民族的利益。例如，四川成都平原的都江堰水利工程，治理水害，造福了一方；又如，为了民族的安危，抵御异族的侵略，动员了千百万劳动力修起了万里长城；也有统治者为了经济文化交流，开凿了南北大运河；等等。

进入近代社会，如果评价标准只停留在局部利益上，可能会得到适得其反的结果，人们非但从中得不到任何好处，反而还会损害自身的利益。例如，盲目地开伐森林、破坏草地，造成水土流失、气候失调、土地毒化等，给人类自身带来更多的灾难。据瑞典国际开发署和联合国机构调查，由于环境恶化，在原有的居住环境中已无法生存而不得不迁徙的“环境难民”全球达2 500万之多。历史的教训是举不胜举的。因此，现代社会对人类工程活动的评价标准已经冲破了国界线，要求增强环境意识，共同思考人类赖以生存的地球的状况，让世界各国人民携手保护环境。

当今世界的环境，可归纳为十大问题：①大气污染；②温室效应加剧；③地球臭氧层减少；④土地退化和沙漠化；⑤水源短缺、污染严重；⑥海洋环境恶化；⑦“绿色屏障”锐减；⑧生物种类不断减少；⑨垃圾成灾；⑩人口增长过快。由于环境条件的恶化，迫使人类意识到自我毁灭的危险，对人类活动的评价标准也随之不断扩展，所以新的学科也就不断地出现，老的学科不断地组合。环境岩土工程学就是在这样的背景下发展起来的。

追溯本学科发展的历史，1925年太沙基(K. Terzaghi)发表了第一本土力学经典著作，开始把力学和地质学结合起来，解决了许多工程实际问题；直到20世纪50年代，才形成了土力学与基础工程这门学科；70年代，人类对环境问题的认识有了一个飞跃，环境意识日益增强，环境保护的热潮在全球日渐兴起，这种日益增强的环境保护意识，孕育了环境岩土工程学的产生；到80年代，随着社会的发展，原来的学科范围已不能满足社会的要求，随着各种各样地基处理手段的出现，土力学基础工程领域有所扩大，形成了岩土工程新学科；进入90年代，设计者考虑的问题不单单是工程本身的技术问题，而是以环境为制约条件，因此，不仅是岩土工程学科，包括其他的学科，如力学、化学、生物学、土壤学、医学等各自都感到力不从心了。例如，大型水利建设，必须考虑上下游生态环境的变化、上游边坡的坍塌、地震的诱发等；又如，采矿和冶炼工业的尾矿库，它的淋滤液有可

能造成地下水的污染,引起人畜和动植物的中毒。大量工业及生活废弃物的处置、城市的改造、人们居住环境的改善等,需考虑的问题不再是孤立的,而是综合的,不再是局部的,而是全面的。因此,岩土工程师面对的不仅是解决工程本身的技术问题,还必须考虑工程对环境的影响问题,所以岩土工程必然要吸收其他学科,如化学、土壤学、生物学中的许多内容来充实自己,使之成为一门综合性和适应性更强的学科,这就是环境岩土工程新学科形成的基础。

1.1.2 环境岩土工程学的定义

1981年在斯德哥尔摩召开的第10届国际土力学与基础工程学术会议上第一次提出并定义了“环境岩土工程”这一学科术语。1986年4月21—23日在美国宾夕法尼亚州里海大学土木工程系方晓阳教授主持召开的第1届环境岩土工程国际学术研讨会上,方晓阳教授将环境岩土工程定位为“跨学科的边缘学科”,覆盖了在大气圈、生物圈、水圈、岩石圈及地质微生物圈等多种环境下土和岩石及其相互作用的问题。同年方晓阳教授出版了《环境岩土工程》专著,指出传统的土力学和岩土工程研究缺乏对环境岩土性质影响的考虑,而实际上,岩土工程问题正是由环境、化学和生物作用等造成的。20世纪90年代初,美国土木工程师学会(ASCE)的岩土工程分会,意识到岩土工程活动中的环境问题日益突出,开始酝酿改变其所办刊物 *Journal of Geotechnical and Engineering* (《岩土工程学报》) 的名称,以使其包含更广泛的岩土环境的内容,并于1997年正式更名为 *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* (《岩土与环境工程》),自此“环境岩土工程学”正式诞生(党进谦等,2007)。1989年在上海同济大学召开了第2届国际环境岩土工程研讨会,美国北卡罗来纳大学 Vincent Ogunro 教授、美国里海大学 Hsai Yang Fang 教授参加了本次研讨会。第1届国际环境岩土工程大会1994年在加拿大埃德蒙顿召开。第8届环境岩土工程大会于2018年在浙江大学召开。

环境岩土工程自1981年提出至今,学术界倾注了大量的精力,进行了广泛的研究。由于各学者的理解不同,对环境岩土工程的定义不一。除方晓阳教授1986年给出的定义外,国内环境岩土领域的开拓者胡中雄(1990)认为,环境岩土工程是研究应用岩土工程的概念进行环境保护的一门学科;龚晓南(2000)指出,环境岩土工程是岩土工程与环境科学密切结合的一门学科,它主要是应用岩土工程的观点、技术和方法为治理和保护环境服务。我国环境岩土工程领域的院士陈云敏(2003)将环境岩土工程定义为:以环保理念为出发点,脱胎于岩土工程,融合了多学科的一门新兴学科。“以环保理念为出发点”是环境岩土工程学科根本所在,生命力所在;“脱胎于岩土工程”说明环境岩土工程学科是从传统岩土工程发展而来,但有别于传统岩土工程;“融合了多学科”说明环境岩土工程是一门交叉学科;“新兴学科”突出了环境岩土工程学科的前沿性。

环境岩土工程学的研究目标是保护和改善地质环境,创造美好的环境,降低人类对环境的危害,阻止自然灾害危害人类,保证各类工程安全、持久运行。它所研究的问题不单是力学问题,在多数情况下是化学或生物学的问题。所以,环境岩土工程学是一门高度综合的交叉性学科,综合运用各学科的观点、技术和方法,分析、评价和预测人类活动与岩土环境之间的相互作用和影响,治理和保护岩土环境,保证工程活动与环境的可持续协调发展。

环境岩土工程的任务:以岩土工程技术为主要手段来改善或解决人类各种活动对环境

造成的负荷。这样的任务定位有助于合理地确定环境岩土工程学科所涉及的范围，不致太大或太小，并与现有的防灾学科区别开来。如垃圾填埋场的建设、土壤污染的修复、废弃物的有效利用等公认的环境岩土工程学科研究范围，均可被认为“以岩土工程为主要手段来改善或解决人类各种活动对环境造成的负荷”。“以岩土工程技术为主要手段”突出了岩土工程在环境岩土工程中的主导地位（陈云敏等，2003）。

1.1.3 环境岩土工程学研究的内容和分类

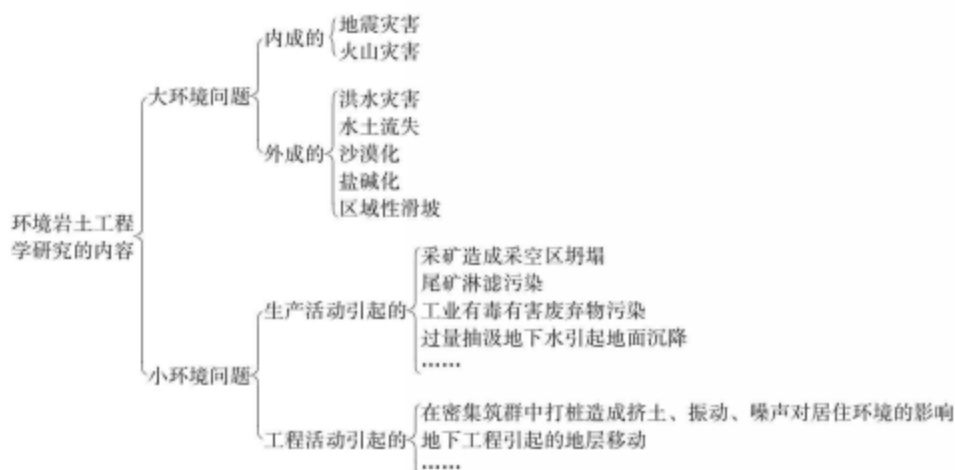
环境岩土工程学是岩土工程与环境科学密切结合的一门新学科，它主要是应用岩土工程的观点、技术和方法为治理和保护环境服务。所以，这门学科的视野十分广阔，就目前涉及的问题来分，可归纳为两大类：

第一类是人类与自然环境之间的共同作用问题。这类问题的动因主要是由自然灾变引起的，如风灾、洪灾、震灾、火山、海啸、土壤退化、区域性滑坡等。这些问题通常泛指为大环境问题。

第二类是人类的生活、生产和工程活动引起的与环境之间的共同作用问题。它的动因主要是人类自身。例如，采矿造成采空区坍塌发生的突然陷落，尾矿的淋滤对地下水的污染，过量抽汲地下水引起的地面沉降，有毒有害废弃物对人类危害，等等。有关这方面的问题统称为小环境岩土工程问题。

表 1-1 具体列出了环境岩土工程学研究的内容及分类，从表中可以看出，大环境和小环境之间是有联系的，例如，大环境中的水土流失、洪水灾害等问题，也可能是由于人类不负责任的生产和工程活动破坏了生态环境造成的；人类的水利建设也可能会引发地震；等等。

表 1-1 环境岩土工程学研究内容及分类



从表 1-1 中还可以看出，环境岩土工程问题要比单纯的技术问题复杂得多。许多标准涉及方方面面，例如，对于有毒有害物质的污染问题，医疗卫生部门提出对人的健康危害标准，生物学家应有对动植物危害的标准，材料分析专家应考虑对建筑物保护的标准，等等，从而制定出一系列的法律和法规。

德国在城市固体废物立法管理方面一直处于世界领先地位。其在 1972 年就制定实施了

《废弃物处理法》，当时主要用以解决如何处理废弃物的问题，该法于1986年进行修订，强调采用节约资源的工艺技术和可循环的包装，把避免废弃物的产生作为废弃物管理的首要目标。1991年，德国政府制定了《电子废物条例》，规定了电子产品的生产厂家、进口商承担接受废弃电器电子产品，生产厂家承担“生产者责任制”，即应承担减少废弃物产生和废弃物处置的责任。同年颁布了《包装废弃物处理法》，要求商品包装要尽可能减少并回收利用，以减轻填埋和焚烧的压力。1994年，德国颁布《循环经济和废物处置法》，规定对废物管理手段首先是避免产生，同时要对已产生的废物进行循环使用和最终资源化处置（张霞，2007）。2005年，德国联邦议会通过《关于电器电子产品销售、回收和环境无害化处置管理法令》，促进废弃电器电子产品的再使用、回收、再利用与其他再生利用，从而减少废弃物与废弃电器电子产品中有害物质的处置量（李冬梅等，2016）。德国在大力开发利用废弃物资源法律政策的保障下，已经实现了由单纯污染治理到废弃物循环再生的战略转变。尤其是垃圾回收和废弃物资源再循环已经成为垃圾废弃物治理的主导方向。为鼓励居民分类收集生活垃圾，提高生活垃圾的回收再利用率，德国政府还实行了一套独特的生活垃圾处理双轨制，并成立了“双向回收体系”的协会，推动了垃圾废弃物处理进程的健康稳定发展（唐浩，2012）。

美国制定了《固体废弃物处理法案》（1965年）、《资源恢复法》（1970年）、《资源保护及回收法案》（1970年）和《危险及固体废弃物修正案》（1984年、1988年、1996年）。此外，美国还在一些具体领域制定了许多重要法案，如《有毒物质控制法案》（1976年）、《全国饮料容器重复使用和回收法案》（1994年），以及《含汞可充电电池管理法案》（1996年）（张霞，2007）。

日本是世界固体废弃物处置相关立法比较完善的典型。日本的立法重点在于促进固体废弃物的循环使用，其主要立法有：《固体废弃物管理和公共清洁法》（1970年制定、1991年修订）、《资源再生利用促进法》（1991年）、《促进建立循环社会基本法》（2000年）、《资源有效利用促进法》（2001年）和绿色采购法（2001年）（张霞，2007）。

欧盟也很重视固体废弃物处理的立法。例如，1975年欧共体理事会通过了《废物指令》，明确要求成员国应采取适当措施，鼓励废弃物的预防、再生和加工，并确保废弃物的处理不会危及环境和人类健康。2004年8月，欧盟《电子垃圾处理法》正式出台，要求生产商、进口商和经销商必须负责回收、处理进入欧盟市场的废弃电器和电子产品，并要求电器和电子产品不得含有铅、汞、镉等6种有害物质（张霞，2007）。

1.2 大环境岩土工程中的若干问题

大环境岩土工程主要是指人与自然之间的共同作用问题。多年来，人类在采用岩土工程的方法来抵御自然灾变对人类造成的危害方面已经积累了丰富的经验。我国是一个历史悠久的文明古国，在与自然灾害的斗争中，留下了很多宝贵的经验。

1.2.1 洪水泛滥

江河切割山谷在大地上奔流，包括整个流域内的大小支流，构成一套洪水的排放系统。河流的水系是气候、地形、岩石和土壤等条件构成的很微妙的平衡体系。河流又是一个泥沙搬运系统，从上游和各条支流夹带的泥沙在下游河床内沉积下来。河床两侧及其泛

滥区称为流域环境。如果上游或支流流域内的森林植被遭到破坏,大量水土流失,河床淤积,贮水量减少,洪水发生时,水灾就不可避免,将给人类的生命财产造成严重的损失。美国在1937—1973年之间,平均每年在洪水水灾中丧生大约80人,平均财产损失2.5亿美元;亚洲地区统计表明,每年约有15.4万人死于洪水灾害。

大多数河流洪水是与总降雨量的大小、分布以及流域内渗入岩石、土壤的速度有关。特别是随着建筑事业的发展,地面被大量建筑物、道路和公园等所覆盖,雨水渗入量大大减少,洪水的淹没高度相对会增加,因此城市防洪就显得特别重要。

大城市通常位于重要河流沿岸,由于城市建设的需要,河道通常被限制在一定范围内,增加了排洪的困难。为了防止洪水,往往在河道两侧修筑很高的防洪墙,反过来又会影响上游排洪。

对于重要的城市还应该进一步绘制出洪水影响的环境图,通过这些资料,可以辅助合理的建筑规划,加强洪灾预报,减少人员伤亡和财产损失。

洪水治理是一项综合性的环境工程,为了减少这一灾变现象对人类的威胁,至少应考虑以下几个方面的问题:

(1) 流域环境的整治

保护森林草原,减少水土流失、整治河床,清除淤泥泥沙、合理开拓河床断面。

(2) 完善洪水调节系统

合理修建水库,加强洪水的贮存和排放管理、修建调节水闸、必要的分洪系统。

(3) 加强监督和警报系统

完善并加强气象、水文监督和警报系统。

1.2.2 区域性的滑坡及其相关现象

由土和岩石构成的边坡,表面似乎是静止稳定的,实际上它是一个不断运动着的逐渐演变的体系。边坡上的物质以某一速度向下移动,其速度可以从难以察觉的蠕动直到以惊人的速度突然崩塌。

滑坡及其相关的现象有泥石流、泥石流、雪崩和松散堆积物的崩落等。这类现象的规模有大有小,少则几十方土,大则成千上百万方土坍塌。大规模土体滑动具有灾难性的破坏作用,它所造成的生命财产损失是惊人的。

滑坡发生的原因是多方面的,而且是综合性的。边坡本身就有向下滑动的倾向,在自然或人为因素的促使下而失去平衡。这些因素归纳起来有:

(1) 自然因素:①风化;②暴雨;③地震;④海浪。

(2) 人为作用:①植被破坏;②挖方和填方不合理;③施工不合理,如施工用水浸湿坡脚、打桩、爆破振动等。

滑坡及其有关现象,作为大环境的一部分,它不仅是一种工程现象,更多的是一种自然现象(基坑边坡除外),对环境的影响非常密切,对人类造成的威胁十分严重,某些区域性的滑动是一种难以抗拒的灾难。小规模滑坡虽然影响小,但常阻塞交通,损坏建筑物,而且发生的频率很高,特别是在雨季,造成很多的不良影响。表1-2列出了美国一部分多发性地区小型滑坡造成的损失和人员死亡统计。这些数字仅说明直接损失的费用,就此而论也是十分巨大的。

表 1-2

美国几种滑坡类型及其发生的频率

滑动类型	主要地区	历史上 滑动次数	频 率		估计财产损失 (万美元)	死亡人 数/人
			每 260 km ²	每 104 000 km ²		
岩石滑坡 岩块塌落	阿巴拉契山脉高原	数百次	—	每 10 年 1 起	3 000	42
岩层突然 塌落和岩 石崩塌	中部和西部广大地区, 科罗拉多高原, 怀俄明山区, 加利福尼亚南部, 华盛顿和俄勒冈山区	数千次	山区平均每年 10 起, 高原地区每年 1 起	山 区 每 年 100 起, 高原地区每年 10 起	32 500	188
	阿巴拉契高原	数千次	每 10 年 1 起	每年 70 起	35 000 (主要是公路、铁路)	20
	加利福尼亚沿海和北部山区	数百次	每 10 年 1 起	每年 10 起	3 000	—
突发性 滑坡	缅因州、康涅狄格州河谷, 赫狄森山谷, 芝加哥红河, 阿拉斯加南部山区	约 70 次	每 100 年 1 起	每年 1 起	14 000	103
	长岛, 阿拉斯加中部谷地、怀俄明州、南部科罗拉多山区	数百次	每 50 年 1 起	每年 1 起	3 000 (主要是公路、铁路)	—
	密西西比和密苏里谷地, 华盛顿州东部和爱达华州南部	数百次	每 10 年 1 起	每年 1 起	200	—
	阿巴拉契山脉	约 100 次	—	每年 1 起	<100	—
松散堆积 物流动和 泥石流	阿巴拉契山区	数百次	每 100 年发生 1 群 (每群 10 起)	每 15 年发生 1 群	10 000	89

来源: Disaster Preparedness, Office of Emergency Preparedness, 1972.

区域性的大滑坡给人类带来的灾难不亚于地震。1967 年 1 月 22 日晚, 巴西发生一起严重的滑坡灾难, 大暴雨持续了 3.5 h 以后, 194 km² 范围内大量滑坡和土的流动, 造成 1 700 人丧生, 损坏了公路, 影响了交通。泥石流洗劫过的土地堆积物达 4 m 厚。

1970 年, 美国弗吉尼亚州山区, 松散堆积物坍塌, 地震引起的连锁反应, 大量泥沙从 3 660 m 处呼啸而下, 其速度超过 300 km/h 冲向山脚下居民区, 造成 20 000 人丧生。

1963 年 10 月 9 日, 意大利瓦昂特 (Vaiont) 水坝发生一起严重的事故。据报道, 瓦昂特水坝是世界上最高的薄拱坝, 顶面高 267 m。灾难发生时, 巨大无比的滑动土体达 2.38×10^8 m³, 从山顶沿北坡以 95 km/h 的速度滑入库区, 轴线方向长达 1.8 km, 导致 2 500~2 600 人死亡 (黄润秋, 2007)。土体迅速移动引起的巨大负压力推动山谷南岸的土体爬高超过水库面达 250 m, 滑动伴随着强大的气流、水、岩土流引起的地震, 在好几千米外都能探测到。90 m 高的波浪横扫坝的拱座, 下游 1.5 km 处波浪仍有 70 m 高。滑坡监测数据显示, 9 月前, 边坡的蠕变率每星期小于 1 cm, 后来增加到 25 cm/d, 滑坡发生前两天发展到 100 cm/d。工程师们在 10 月 8 日前一直没有认识到是大面积区域性滑动, 以为只是一个小型滑坡, 而在坡上吃草的动物早在 10 月 1 日前已经预感到灾难的来临而成群地迁移。

滑坡发生的原因是综合性的, 首先是不利的地质条件, 包括具有张开的裂隙和洞穴的软质石灰岩和黏土夹层, 岩层向水库倾斜, 地形非常陡峭; 其次是水库蓄水, 山谷岩层中水压力增加, 地下水回流、浸润, 使土的抗剪强度降低; 再次, 9 月份以后连续暴雨, 滑

坡体重量增加,导致滑坡发生。

捷克斯洛伐克曾发生过一起灾难性的滑坡,是由人为因素和不利的地质条件引起的。1960年,一场暴雨过后,地下水位上升,灾难性滑坡发生了,滑动土体达 $2 \times 10^7 \text{ m}^3$,在一个月內移动了150 m,威胁着数座城镇。

中国是一个滑坡灾害极为频繁的国家,其中大型和巨型滑坡占有重要地位,尤其是在中国的西部地区,大型滑坡更是以规模大、机制复杂、危害大等特点著称,在全世界范围内具有典型性和代表性。特别是20世纪80年代以来,随着经济建设的恢复与高速发展及自然因素的影响,滑坡灾害呈逐年加重趋势。1983年3月7日17时30分,我国甘肃东乡族自治县酒勒山南坡发生一起黄土滑坡,滑体宽700~1 100 m,山体竖直下滑180~210 m,滑动土体5 500多万立方米,山体崩落,从山巅直至山脚,冲到1 600 m远的地方,山下原来的田野顷刻变成了一大片黄土堆场。

根据灾害发生过程中不同部位物质运动及堆积特征,可将崩塌滑坡划分为3个区域:崩塌区、滑坡区和堆积区,如图1-1所示。

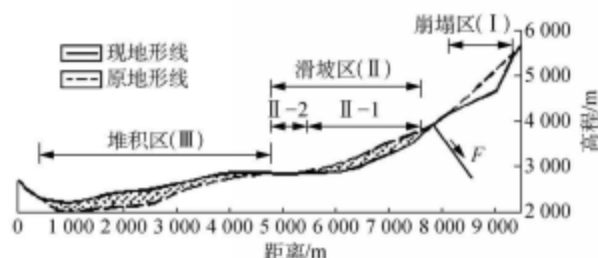


图 1-1 某特大型山体崩塌滑坡剖面图

区域性的自然滑坡是一种严重的灾害,要阻止这种灾害的发生是十分困难的。从环境岩土工程的观点来看,要减少此类的危害和损失,必须重视具体工程和环境的治理相结合,既要考虑局部稳定又要考虑区域性稳定。目前常用的处理边坡稳定性的概念和方法仍是有效的手段,但特别强调:①加强区域性气象条件的研究,掌握暴雨的强度、洪水发生的频率等资料;②加强区域性的绿化、造林,改良土壤,减少水土流失;③当有局部滑坡发生时,要及时整治,防止扩大酿成区域性的滑动;④加强监测和预警工作,虽然这类灾害有时很难抗拒,但区域性滑坡发生之前,或多或少都会有一定的预兆,及时报警可减少生命和财产的损失;⑤加强对土工和工程地质的勘察工作。美国洛杉矶对山前建筑物遭滑坡灾害的调查表明,1952年以前没有进行有关岩土工程技术工作,遭损坏的建筑物比例达10%;1952年以后对岩土工程技术工作提出一定要求,遭损坏的建筑物比例降至1.3%;1963—1969年,对岩土工程技术工作有详细要求,遭损坏的建筑物比例降至0.15%。

1.2.3 地震灾害

地震是一种危害性很大的自然灾害。地球是一个不停地运动着的体系。岩圈的外层碎成几大板块和许多小板块,这些板块做相对移动,由于挤压、滑动和摩擦,在岩层内部会形成惊人的应力,当应力超过岩层强度时,岩层发生破坏,通过地震,岩层内能量得到大量释放。岩层在地应力作用下发生应变,沿着薄弱带破碎就形成断层。岩层破碎过程中沿着断层移动产生地震波,这就是记录到的地震。这些波在地层中传播(主波和次波),与此同时,主波和次波混合着沿地表传播,称为面波。面波对建筑物最起破坏作用。

地震的危害包括一次影响和二次影响两部分。一次影响是由地震直接引起的，如由地裂引起猛烈的地面运动，有可能产生很大的永久位移。

二次影响如沙土的液化、滑坡、火灾、海啸、洪水、区域性地面下沉或隆起以及地下水位变化等。1906年，旧金山地震，80%的损失是因火灾造成的。1923年，日本关东大地震，14.3万人死亡，其中40%死于火灾。1960年5月22日，智利发生8.5级大地震，造成的损失主要是由海啸引起的。海啸横扫太平洋，巨浪直驱日本，将大船掀上陆地的房顶， $2.5 \times 10^5 \text{ km}^2$ 范围内发生地面变形，变形带长达1 000 km，宽210 km，海底隆起达10 m，而陆地沉陷了2.4 m。1970年，秘鲁地震，7 000人丧生，其中2 000人死于滑坡和塌方。地震造成的煤气管道破裂、电线断裂引起火灾，由于供水和交通系统损坏，地震火灾很难控制。

地震及其伴随的灾害对人类的危害是相当严重的，特别是一些大地震，造成的生命财产损失非常惊人。1976年7月28日3时42分，我国唐山发生了7.8级大地震，相当于400枚广岛原子弹在距地面16 km处的地壳中猛烈爆炸，一座百万人口的工业城市被夷为平地。震波影响到大洋彼岸，美国阿拉斯加州大地上下晃动了大约1/8 in (约3.75 mm)。

1995年1月17日5时46分，发生在日本的7.2级神户大地震，震中在大阪湾的淡路岛，影响遍及半个日本。神户与大阪两座现代化大城市陷于瘫痪，阪神高速公路高架桥倾倒，交通中断，神户市内浓烟滚滚，火光冲天。地震引起的崩塌和地面陷落，人员伤亡和财产损失难以估量。

我国四川省汶川县于2008年5月12日14时28分发生了8.0级强震，大地颤抖，山河移位，满目疮痍，这是1949年以来破坏性最强、波及范围最大的一次地震，地震重创约50万 km^2 的中国大地，直接严重受灾地区达10万 km^2 。因为发生在山区，汶川地震诱发的地质灾害、次生灾害，如山体崩塌（图1-2）、堰塞湖（图1-3）、山体滑坡、泥石流比唐山地震大得多、严重得多。在2008年5月至2010年8月两年多的时间内，在地震重灾区发生了超强泥石流（图1-4）和洪水灾情（图1-5）。



图 1-2 地震引发的山体崩塌



图 1-3 唐家山堰塞湖



图 1-4 绵竹清平 2010 年 8 月受泥石流袭击



图 1-5 重建中的映秀镇遭遇特大洪水

地震对于人类而言是一种可怕的自然灾害，许多科学工作者正致力于研究如何来预测地震和减少由此造成的损失。目前大致有以下几方面的工作：

(1) 研究地层的构造，特别是断层的特性以及断层的活动状态。通过这一研究来预估地震区的范围以及发生地震的可能性。

(2) 研究表层岩性对地震的反应。当地震波从震源传播至地面，表层性质不同，对地震的反应也不同。如果表层是很坚硬的岩石，地震反应比一般的土层弱得多。如果表层是饱和且密实度不高的粉细砂，在地震波作用下很容易发生液化。根据不同的反应情况，划分成不同的地震区域，供建筑场地选择和上部结构设计参考。

(3) 研究地震的监测和地震的预报。美国、日本、中国等优秀的科学家都相信，人类最终一定能够进行长期的地震预报。准确的地震预报可以极大地减少人员伤亡和财产的损失。

我国是地震多发的国家，历年来已经积累了丰富的地震先兆经验，自 1966 年 3 月 8 日邢台发生 6.8 级强烈地震后，总结得到了以下经验：

(1) 小震密集→平衡→大震，小震后平衡时间越长，地震震级越高。

(2) 六级以上大地震的震中区，震前一至三年半时间内往往是旱区，旱后第三年发震时，震级要比旱后第一年内发震大半级，这一现象称为“旱震关系”。

(3) 监视小震活动、地应变量、重力值、水氡观测值、地磁、海平面变化以及动物反应等进行综合分析。

(4) “空区”指标预测中长期地震。空区是指地震孕育过程中，由小震所包围或部分包围的、处于断裂活动构造带上的无震区域。

我国科学家根据上述经验，成功预报了 1975 年 2 月 4 日的地震，辽宁南部 100 多万人撤离了他们的住宅和工作地点，仅仅在两个半小时之后，即 7 时 36 分，海城被 7.3 级强烈地震击中。在六个市、十个县的震区，受灾面积 $5.08 \times 10^6 \text{ m}^2$ ，损毁农村民房 86.7 万间，死亡人数占全区人口的 0.16%。这是人类地震史上成功预测地震而减少损失的奇迹。

1.2.4 火山灾害

火山活动也是一种灾害性自然现象，如果火山爆发在人口稠密地区附近，可能是一场大灾难。引起火山活动的原因通常与地壳的构造运动有关。大部分活动性火山都处在地球板块构造接合部，在这些地方，岩浆因岩圈板块相互作用发生蔓延或下沉，所以活动性火山 80% 集中在太平洋火山环周围，见表 1-3。

表 1-3 世界上活动性火山分布

地区	活动性火山的百分比/%	地区	活动性火山的百分比/%
太平洋	79	印度洋群岛	1
西太平洋	45	大西洋	13
北美和南美	17	地中海、小亚细亚	4
印度尼西亚群岛	14	其他	100
中太平洋群岛（夏威夷、萨摩亚群岛）	3		

来源：Disaster Preparedness, Office of Emergency Preparedness, 1962.

火山通常分成三种类型：隐藏型（死火山）、混合型和穹顶型（活动型）。隐藏型火山

数量最多，它的特性是不活动，地层是由二氧化硅（ SiO_2 ）含量比较低（约 50%）的岩浆构成的，大部分分布在夏威夷群岛，部分分布在西太平洋和冰岛。混合型火山通常有一美丽的圆锥外形，岩层组成 SiO_2 含量中等，约为 60%，火山活动的特点是爆发时有混合物和岩浆流，这类火山是危险的。穹顶型火山，它的特点是具有 SiO_2 含量很高的黏滞岩浆，爆发时构成一个火山穹顶，具有很大的危险性。

火山活动的影响主要包括两部分：一是火山爆发时喷出的熔岩流和火山屑的烟雾云；二是二次灾害，如泥石流和火灾。

1. 熔岩流

地下熔岩上升，从火山口流出。 SiO_2 含量低的熔岩流，通常不是喷发性的，只是从火山口溢出；而 SiO_2 含量高的熔岩流，是爆炸性喷出。熔岩流的流动速度有些很快，大多数具有黏滞性，移动很慢。熔岩流流动缓慢时，居民很容易躲避。

熔岩流具有两种压力类型：一种是岩浆具有垂直压力差；另一种是由流动冲量造成的压力。因此，学者提出了三种方法来引导熔岩流，使其不任意毁坏房屋和有关设施。这三种方法是：①构筑导墙；②水力冷却；③投掷炸弹。

2. 火山碎屑

火山爆发时，大量的喷出物进入大气。喷出有两种形式：一种是火山灰喷出，含有大量岩块、天然玻璃屑和气体，从火山口喷入高空；另一种是火山灰流，喷出物从火山口急速流出。火山喷出物对人类影响有五个方面：①毁坏植被；②污染地面水，使水的酸度增加；③建筑物屋顶超载而毁坏；④影响人和动物的健康，吸入火山灰会导致人和动物的呼吸道和肺部受损以及眼睛发炎；⑤影响航空，如 2014 年 9 月 14 日，冰岛巴达本加火山再度爆发，有毒有害气体对法国北部空气造成污染，空气中可吸入颗粒的浓度明显上升，而且几乎全部都是硫酸盐颗粒（中国网，2014），2010 年冰岛火山爆发，火山灰进入平流层，致使飞机发动机受到磨损，一度使得欧洲航空停飞数天。

火山灰流的速度很大，可达 100 km/h，而且温度很高，若流过人口稠密区就会导致大灾难。例如，1902 年 5 月 8 日，马提尼克培雷火山爆发，火山灰流呼啸着流过西印第斯镇，瞬间 3 万人丧生。

3. 泥石流和火灾

泥石流和火灾是火山活动的次生灾害，由于火山喷出物温度极高，常会导致山顶冰川和积雪融化，伴随着产生洪水和泥石流。炽热的火山灰使建筑物燃烧。泥石流和火灾的破坏程度取决于火山活动的程度和规模。

1.2.5 水土整治

随着人口的增长以及工业化的发展，全球范围内的水土流失和土地沙漠化是一个极其重要的环境工程问题。特别是在我国，生态赤字给环境带来了威胁。《中国资源、生态环境预警研究》报告指出：“中国是一个典型的低收入大国，正处在有史以来基数最大、幅度最高、增长最快的人口倍增台阶的中点，在保留量大面广的落后农村的条件下，急剧推进它的工业化，因而同时产生了大规模的生态破坏与十分严重的环境污染问题。治理能力远远赶不上破坏的速度。”水土流失是中国生态环境最突出的问题之一。上游流失，下游淤积。1949 年初，我国水土流失面积为 $1.16 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。水利部在 2010—2012 年开展的第一次全国水利普查显示，我国水土流失面积 294.91 万 km^2 ，占国土总面积的 30.72%（水