

岩石力学与  
工程研究著作 丛书

# 灾害环境下重大工程 安全性的基础研究

◎谢和平 冯夏庭 等著



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

岩石力学与工程研究著作丛书

# 灾害环境下重大工程 安全性的基础研究

谢和平 冯夏庭等 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书为国家 973 项目“灾害环境下重大工程安全性的基础研究”研究工作的系统总结,全书共 9 章,主要围绕灾害环境下重大工程安全性研究中的关键科学问题,在系统介绍国内外相关研究成果的基础上,从地质赋存环境与地质灾害成因,内外动力耦合作用下地质灾害演化机理及应用,不同尺度地质体力学特性及力学行为研究,多场耦合作用下岩土力学特性与模型及应用,灾害环境中岩体应力传递与能量释放规律,近断层地震作用下重大工程的动力响应分析方法,工程体与地质体相互作用机理与整体稳定性研究,重大工程结构在地震作用下破坏过程模拟,灾害环境下重大工程安全性分析评估、时空预测方法与系统研究九个方面系统阐述了理论与实验相结合、宏观与细观相结合、确定性与不确定性相结合、经验与分析相结合的危害环境下重大工程安全性综合研究方法及其在水电、交通、铁路、矿山、地质灾害防治、桥梁建设等工程领域的应用。

本书内容丰富,涉及多个工程领域,可供地质工程、水电工程、采矿工程、交通工程、结构工程、岩土工程、地下工程等相关专业的科研人员、工程技术人员和研究生借鉴参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

灾害环境下重大工程安全性的基础研究/谢和平,冯夏庭等著. —北京:科学出版社,2008

(岩石力学与工程研究著作丛书)

ISBN 978-7-03-023112-3

I. 灾… II. ①谢…②冯… III. ①自然灾害—影响—工程地质—研究  
②工程地质—安全性—研究 IV. P642

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 152084 号

责任编辑:刘宝莉 周 炜 张 丽 / 责任校对:朱光光

责任印制:刘士平 / 封面设计:王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2009 年 1 月第 -- 版 开本: B5(720×1000)

2009 年 1 月第一次印刷 印张: 67 3/4

印数: 1—2 500 字数: 1 323 000

定价: 150.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

## 《岩石力学与工程研究著作丛书》编委会

名誉主编:孙 钧 王思敬 钱七虎 谢和平

主 编:冯夏庭

副主编:何满潮 黄润秋 周创兵

秘书长:黄理兴 刘宝莉

编 委:(以姓氏汉语拼音字母顺序排列)

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 蔡美峰 | 曹 洪 | 戴会超 | 范秋雁 | 冯夏庭 |
| 高文学 | 郭熙林 | 何昌荣 | 何满潮 | 黄宏伟 |
| 黄理兴 | 黄润秋 | 金丰年 | 景海河 | 鞠 杨 |
| 康红普 | 李 宁 | 李 晓 | 李海波 | 李建林 |
| 李世海 | 李术才 | 李夕兵 | 李小春 | 李新平 |
| 廖红建 | 刘汉东 | 刘汉龙 | 刘宝莉 | 刘泉声 |
| 吕爱钟 | 栾茂田 | 莫海鸿 | 潘一山 | 任辉启 |
| 余诗刚 | 盛 谦 | 施 斌 | 谭卓英 | 唐春安 |
| 王 驹 | 王金安 | 王明洋 | 王小刚 | 王学潮 |
| 王芝银 | 邬爱清 | 徐卫亚 | 杨 强 | 杨光华 |
| 岳中琦 | 张金良 | 赵 文 | 赵阳升 | 郑 宏 |
| 周创兵 | 周德培 | 朱合华 |     |     |

## 《岩石力学与工程研究著作丛书》序

随着西部大开发等相关战略的实施,国家重大基础设施建设正以前所未有的速度在全国展开:在建、拟建水电工程达 30 多项,大多以地下洞室(群)为其主要水工建筑物,如龙滩、小湾、三板溪、水布垭、虎跳峡、向家坝等,其中白鹤滩水电站的地下厂房高达 90m、宽达 35m、长 400 多 m;锦屏二级水电站 4 条引水隧道,单洞长 16.67km,最大埋深 2525m,是世界上埋深与规模均为最大的水工引水隧洞;规划中的南水北调西线工程的隧洞埋深大多在 400~900m,最大埋深 1150m。矿产资源与石油开采向深部延伸,许多矿山采深已达 1200m 以上。高应力的作用使得地下工程冲击岩压显现剧烈,岩爆危险性增加,巷(隧)道变形速度加快、持续时间长。城镇建设与地下空间开发、高速公路与高速铁路建设日新月异。海洋工程(如深海石油与矿产资源的开发等)也出现方兴未艾的发展势头。能源地下储存、高放核废物的深地质处置、天然气水合物的勘探与安全开采、CO<sub>2</sub> 地下隔离等已引起政府的高度重视,有的已列入国家发展规划。这些工程建设提出了许多前所未有的岩石力学前沿课题和亟待解决的工程技术难题。例如,深部高应力下地下工程安全性评价与设计优化问题,高山峡谷地区高陡边坡的稳定性问题,地下油气储库、高放核废物深地质处置库以及地下 CO<sub>2</sub> 隔离层的安全性问题,深部岩体的分区碎裂化的演化机制与规律,等等,这些难题的解决迫切需要岩石力学理论的发展与相关技术的突破。

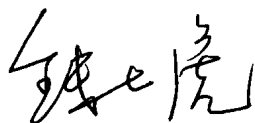
近几年来,国家 863 计划、国家 973 计划、“十一五”国家科技支撑计划、国家自然科学基金重大研究计划以及人才和面上项目、中国科学院知识创新工程项目、教育部重点(重大)与人才项目等,对上述科学与工程技术的攻克陆续给予了有力资助,并针对重大工程在设计和施工过程中遇到的技术难题组织了一些专项科研,吸收国内外的优势力量进行攻关。在各方面的支持下,这些课题已经取得了很好很好的研究成果,并在国家重点工程建设中发挥了重要的作用。目前组织国内同行将上述领域所研究的成果进行了系统地总结,并出版《岩石力学与工程研究著作丛书》,值得钦佩、支持与鼓励。

该研究丛书涉及近几年来我国围绕岩石力学学科的国际前沿、国家重大工程建设中所遇到的工程技术难题的攻克等方面所取得的主要创新性研究成果,包括深部及其复杂条件下的岩体力学的室内、原位实验方法和技术,考虑复杂条件与过程(如高应力、高渗透压、高应变速率、温度-水流-应力-化学耦合)的岩体力学特性、变形破裂过程规律及其数学模型、分析方法与理论,地质超前预报方法与技术,工

程地质灾害预测预报与防治措施,断续节理岩体的加固止裂机理与设计方法,灾害环境下重大工程的安全性,岩石工程实时监测技术与应用,岩石工程施工过程仿真、动态反馈分析与设计优化,典型与特殊岩石工程(海底隧道、深埋长隧洞、高陡边坡、膨胀岩工程等)超规范的设计与实践实例,等等。

岩石力学是一门应用性很强的学科。岩石力学课题来自于工程建设,岩石力学理论以解决复杂的岩石工程技术难题为生命力,在工程实践中检验、完善和发展。该研究丛书较好地体现了这一岩石力学学科的属性与特色。

我深信《岩石力学与工程研究著作丛书》的出版,必将推动我国岩石力学与工程研究工作的深入开展,在人才培养、岩石工程建设难题的攻克以及推动技术进步方面将会发挥显著的作用。



2007年12月8日

## 《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

近二十年来,随着我国许多举世瞩目的岩石工程不断兴建,岩石力学与工程学科各领域的理论研究和工程实践得到较广泛的发展,科研水平与工程技术能力得到大幅度提高。在岩石力学与工程基本特性、理论与建模、智能分析与计算、设计与虚拟仿真、施工控制与信息化、测试与监测、灾害性防治、工程建设与环境协调等诸多学科方向与领域都取得了辉煌成绩。特别是解决岩石工程建设中的关键性复杂技术疑难问题的方法,973、863、国家自然科学基金等重大、重点课题研究成果,为我国岩石力学与工程学科的发展发挥了重大的推动作用。

应科学出版社诚邀,由国际岩石力学学会副主席、岩石力学与工程国家重点实验室主任冯夏庭教授和黄理兴研究员策划,先后在武汉与葫芦岛市召开《岩石力学与工程研究著作丛书》编写研讨会,组织我国岩石力学工程界的精英们参与本丛书的撰写,来反映我国近期在岩石力学与工程领域研究取得的最新成果。本丛书内容涵盖岩石力学与工程的理论研究、试验方法、实验技术、计算仿真、工程实践等各个方面。出版时间计划为2007~2011年,分期分批出版。到2007年底,已有二十多本专著列入出版计划。

本丛书编委会编委由58位来自全国水利水电、煤炭石油、能源矿山、铁道交通、资源环境、市镇建设、国防科研、大专院校、工矿企业等单位与部门的岩石力学与工程界精英组成。编委会负责选题的审查,科学出版社负责稿件的审定与出版。

在本套丛书的策划、组织与出版过程中,得到了各专著作者与编委的积极响应;得到了各界领导的关怀与支持,中国岩石力学与工程学会理事长钱七虎院士特为丛书作序;中国科学院武汉岩土力学研究所冯夏庭、黄理兴研究员与科学出版社刘宝莉、沈建等编辑做了许多繁琐而有成效的工作,在此一并表示感谢。

“21世纪岩土力学与工程研究中心在中国”,这一理念已得到世人的共识。我们生长在这个年代里,感到无限的幸福与骄傲,同时我们也感觉到肩上的责任与重大。我们组织编写这套丛书,希望能真实反映我国岩石力学与工程的现状与成果,希望对读者有所帮助,希望能为我国岩石力学学科发展与工程建设贡献一份力量。

《岩石力学与工程研究著作丛书》

编辑委员会

2007年11月28日

## 前 言

随着我国西部大开发战略的实施,以南水北调、西电东送、西气东输、青藏铁路为标志的各类大型基础设施正以前所未有的速度在西部地区营建。到2020年,我国将重点建设3.5万km高等级公路,还准备兴建川藏铁路、滇藏铁路。未来10年间,我国将在西部营建10~20个世界级大型水利水电工程,南水北调西线一期工程也正在进行前期勘察与规划设计。这些工程建设规模巨大,为世界所罕见,具体表现为200~300m级高坝,1000m级高陡边坡,10~70km级深埋长隧道,大跨度、高边墙、洞室纵横交叉的大型地下洞室群和长大桥梁等。

我国西部地区具有全球最独特、最复杂的地质构造。第四纪以来,印度板块向欧亚板块俯冲与挤压,致使青藏高原以9.5mm/a的速度快速隆升,波及范围横跨西部大部分地区,由此派生出最强烈的现代地壳活动和高地应力场,从而形成高原与高山峡谷的地形地貌、复杂的地质构造、脆弱的地质环境和发育的活动断裂。我国西部活动断裂共371条,总长度2.8万km,大多集中在三江流域。高烈度地震区也主要集中在西部,西部共有11个8.5级、45个8级、208个7.5级和478个7级潜在震源区。因此可以说,西部地质环境的特殊性是我国其他地区不可比拟的,强烈的构造活动也是世界上其他地区所没有的;另外,全球气候变化导致厄尔尼诺和拉尼娜现象频繁出现,极端天气或气候事件越来越频繁地发生,使得地质灾害发生的频度高、强度大、范围广、种类多,且呈现大型、群发和突发的特点。

——2000年4月9日发生的西藏波密境内的易贡滑坡,3亿 $m^3$ 的滑坡体由5520m高程的雪山高速下滑,历时约10min,滑程8000m,堵塞了易贡藏布江,形成了坝高54m的堰塞湖。这种规模的滑坡曾于1900年发生了一次。又如1965年11月22日突然发生云南禄劝马鹿塘大滑坡,经历了7次滑动过程,历时24h,行程约6km,搬运土石量达4亿 $m^3$ ,后果十分严重。1982年7月17日发生的四川云阳鸡扒子滑坡给长江航运造成了严重的危害,为整治滑坡及疏通航道耗资达数百万元。1985年6月12日新滩滑坡再次复活,毁灭了千年古镇新滩,造成巨大的经济损失。2000年6月6日四川古蔺发生崩塌、滑坡、泥石流,出现规模大小不等的灾害点几百个,古蔺南部约20个乡镇、208个村、39 047户、16万人受灾,造成直接经济损失1.82亿元。20世纪90年代后期,随着我国工程建设的大范围展开,地质灾害发生的频率迅速增长,造成的死亡人数也相应增加,据不完全统计,1990~1995年平均每年死亡372人,1996~2000年平均每年死亡1156人,地质灾害给国民经济造成的损失达200亿元/a。特别值得提出的是,三峡库区已查明1000多个



滑坡体,国家已投资 100 亿元进行治理。

——1955 年 9 月 23 日,云南永仁—四川会理一带发生 6.8 级地震,两县共倒塌房屋 15 000 余间,震裂 10 000 余间;金沙江两岸很多村寨覆没,沿岸及其山沟中山岩大量崩塌。1976 年 8 月 16 日和 23 日,在四川北部松潘、平武之间相继发生了两次 7.2 级的强烈地震,使松潘、平武、南坪、文县等县遭到破坏,震区处于强烈上升的剥蚀区,岩石破碎、风化严重,加之震后连续暴雨,崩塌、滚石、泥石流等灾害严重,使得交通阻塞,河流壅塞,房屋被砸坏或冲垮,大量农田被毁坏。2003 年 7 月 21 日与 10 月 16 日,云南大姚连续两次发生 6.1 级地震,受损严重,房屋倒塌、拉裂,震中地区局部陷落喷沙冒水,局部山体滑坡,部分房屋倒塌损坏,民房、学校、民政福利设施、水利、电力、交通、通信、市政设施受到严重破坏。2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级特大地震发生于青藏高原东缘龙门山断裂带,强烈地震波在 20min 内传遍了全世界,引发的地质灾害呈现范围广、程度深、危害大、持续长等特点,为新中国成立以来破坏性最强、波及范围最大的地震,重灾面积达 10 万  $\text{km}^2$ ,巨大的滑坡、崩塌、泥石流造成大量建筑物和民房倒塌,大量人员伤亡,公路、铁路、桥梁、通信等大量基础设施被摧毁,造成直接经济损失 8451 亿元。2008 年 8 月 30 日,攀枝花—会理发生 6.1 级地震,造成四川、云南两省 80 余万人受灾,倒损民房 25.8 万余间,成昆铁路一度中断,攀枝花 3 座大型桥梁受损,凉山 3 座水库开裂,基础设施损毁严重。

——地震和岩爆造成的隧道及地下工程破坏也十分严重,如 1976 年的唐山大地震,造成了大量地下通道、煤矿巷道和人防工程的破坏。1923 年的日本关东大地震,致使邻近约 25 条隧道受到严重破坏。1930 年日本伊豆发生 7.0 级地震,使正在修建的丹那铁路隧道在穿越丹那断层带(宽 40m)处的排水导洞错开 2.40m,也使惠那山公路隧道排水洞产生水平向错动 2.39m、竖向错动 0.6m。1906 年美国旧金山 8.3 级地震,使奈特 1 号隧道沿圣安德烈斯断层产生 1.37m 的水平位移,相邻的奈特 2 号隧道支架断裂、顶部坍塌。另外,深部开采与开挖,也易诱发岩爆地质灾害。1995 年 9 月南非 Carletonville 金矿发生岩爆(震级 3.6),距震源约 400m 的巷道遭受严重破坏。美国 Lucky Friday 金属矿的一次岩爆也造成了巷道严重破坏(埋深超过 700m,震级 3.6~4.2)。德国鲁尔矿区的一条煤巷因附近岩爆的影响在一天之内底板鼓起量达 0.8m,两帮移出 0.5m。我国天生桥水电站、二滩水电站的引水隧洞开挖期都发生过不同程度的岩爆。岩爆发生的频度和烈度随着应力(埋深)的增加而显著增加。据不完全统计,在南非,岩体开挖过程中,每千人现场工作人员中因岩爆和岩崩引起的伤亡人数达 11~13 人。

总之,我国西部地区地质条件复杂,频发的地质灾害势必严重威胁重大工程的安全,同时,重大工程的建设又会影响脆弱的地质环境、触发地质灾害,如澜沧江前期开发的漫湾水电站,施工后产生了多个大型滑坡,花费了上亿元的治理费用。

1959年12月法国 Malpasset 坝的破坏及1960年意大利 Vajont 坝库岸的滑坡,使生命、财产遭受巨大损失。其原因都不是坝体本身的问题,而是水库蓄水后诱发地质灾害,导致工程本身失效,这两起灾害事故直到今天仍是人们关注地质环境的经典案例。因此,如何处理重大工程建设与脆弱地质环境之间的关系,保障重大工程建设与运营过程中的安全性,减少重大工程对环境的扰动和破坏,做到环境友好,是摆在我们面前亟待解决的问题。

纵观我国西部在建和即将兴建的一系列重大工程,其特点可概括为:工程规模特别巨大,地质环境极为恶劣,工程活动非常强烈,地质灾害十分严重。这些重大工程建设必将面临若干前所未有的深层次的科学问题和技术难题,已建的重大工程也将受到地质灾害的潜在威胁。如不妥善解决,将会造成严重的工程诱发灾害和重大人员伤亡与财产损失。尽管包括我国在内的世界各国对地质灾害环境下重大工程的安全性都极为重视,但每年在我国乃至世界各地发生的地质灾害及其对工程设施的破坏和由此而造成的损失仍十分巨大,在相关的关键性科学问题上没有突破性进展。究其原因,突出表现在以下三个方面:一是已有研究没有将地质灾害融入地质环境和自然演化的大系统中加以全方位的综合研究,而往往采用孤立的、局部的、个案的研究方法,从而限制了对地质灾害的自然演化模式和发生发展机制的共有规律性研究;二是地学、力学和工程科学在深层次上的交叉结合不够,表现为数据不完备的复杂地质系统与理论严密的力学模型之间相互脱节,地学描述的大尺度定性方法与力学分析的精细定量方法衔接得不好,必须新的学术思想下发展非单一介质的多尺度、多场耦合的力学建模和计算分析方法;三是灾害体与工程结构相互作用的研究与应用不够,现有岩土工程结构设计和施工大都沿用建筑结构的确定性设计与施工方法,在给定的初始条件、边界条件和材料参数下进行确定性设计,而地质体是一种特殊的介质,对工程而言,其初始条件、边界条件、物理力学参数具有随机性和不确定性。因此,仅针对结构本身的材质和形式的研发,而不将工程结构纳入灾害系统中协同考虑的传统方法,在西部地区将难以奏效。

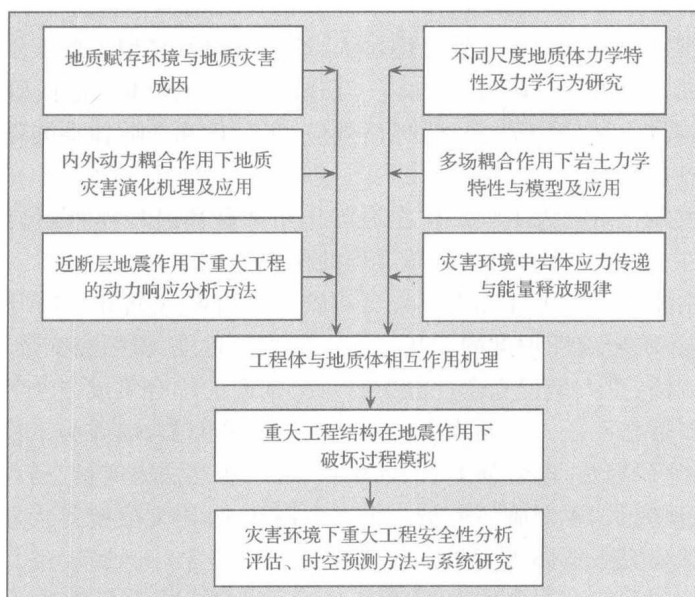
因此,为保证西部重大工程的顺利兴建和安全运营,迫切需要在若干科学理论和技术领域有所突破,迫切需要组织全国精锐研究力量进行超前研究。特别是针对高原、高山峡谷特殊环境和复杂地质条件、自然灾害频发地区的重大基础设施建设中高陡边坡、深埋长隧洞、大型地下硐室及高坝的安全性问题,急需通过地学、力学、信息科学和工程科学的交叉综合分析,围绕灾害环境下地质体与工程结构相互作用的机理与规律核心主题,在灾害环境下重大工程安全性的5个关键科学问题:①复杂工程地质体结构及其力学特性的多尺度建模理论和方法;②多场耦合对复杂地质体的影响规律及其引起灾变的机理;③灾害环境作用下工程地质体变形破坏过程及突发性灾害的成灾机理;④地质工程系统在灾变过程中的响应模式与自

适应性机理和规律;⑤灾害的时空预测理论与工程的安全防护原理——开展系统深入地创新性研究,以期有所突破。

为此,2002年6月,王思敬院士、郑哲敏院士、程国栋院士、谢和平院士和冯夏庭研究员等专家联合向国家科技部建议设立“973”项目“灾害环境下重大工程安全性的基础研究”。2002年12月获得国家科技部的批准,谢和平院士和冯夏庭研究员担任首席科学家。中国科学院武汉岩土力学研究所、中国矿业大学(北京)、四川大学、中国科学院地质与地球物理研究所、中国科学院力学研究所、中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、国家地震局地球物理研究所、河海大学、清华大学、中南大学、上海交通大学等多个单位的近百名科研人员依托岩土力学与工程国家重点实验室、煤炭资源与安全开采国家重点实验室、水力学与山区河流开发保护国家重点实验室、中国科学院工程地质力学重点实验室、冻土工程国家重点实验室、水文水资源与水利工程科学国家重点实验室、水沙科学与水利水电工程国家重点实验室等国家和部门科研平台,以地质为基础、以力学为方法、以监测模拟为手段、以工程为目的,采用经验、实验、理论和数值模拟相结合,宏观与细观相结合,确定性与随机性、不确定性相结合的方法在以下9个方面开展了历时6年的研究工作:①复杂工程地质体的多尺度结构及其赋存环境研究;②内外动力耦合作用下地质灾害的演化及其对工程安全的影响;③不同尺度地质体结构力学特性及力学行为研究;④地质体的多场耦合效应和冻融灾害及其对工程稳定性影响的研究;⑤灾害发生过程中应力传递与能量释放规律及其自适应调控研究;⑥强地震下重大工程的动力响应及其对工程结构影响规律研究;⑦多因素相互作用下地质工程系统的整体稳定性研究;⑧灾害环境下重大工程安全性的时空预测与分析评估系统研究;⑨考虑功能蜕化的重大工程结构在地震作用下破坏过程模拟与控制方法。研究建立了灾害环境下重大工程安全性的分析理论与方法,主要体现在通过现场调查与监测、实验与测试、物理模拟与数值仿真,揭示了不同尺度地质环境地质成因与内外动力对地质灾害的作用和规律;认识了多场耦合环境下不同尺度岩土介质力学特性并建立力学模型;在充分认识岩体变形破坏本质的基础上,提出了能量耗散与能量释放分析新方法;建立了考虑工程体-地质体相互作用的两体力学模型,提出了工程体-地质体接触界面分析新方法;在研究灾害的时间域(选址、设计、施工、运行)、空间域(细观机理、宏观现象、工程尺度,定性到定量)及二者之间的关系基础上,分析了地质体与结构体相互作用规律;提出了灾害过程模拟的新方法,建立灾害环境下重大工程安全性评价与时空预测方法和系统,并已经在南水北调西线、红水河龙滩水电站、金沙江虎跳峡水电站、金沙江溪洛渡水电站、澜沧江小湾水电站、黄河拉西瓦水电站、雅砻江锦屏 II 级水电站、大渡河瀑布沟水电站、四川紫坪铺水利工程、红沿河核电站等水电与核电工程、川藏公路、青藏铁路、苏通长江公路大桥、沪蓉西高速公路长大隧道及特大桥、金川矿山开采工程、引黄工程等国家重大

工程建设和安全运营中获得了成功应用,产生了良好的社会效益。应该指出的是,西部重大工程的巨大规模,地质构造的复杂性、地质灾害频发性和诱发因素的多样性,使得本项目的研究工作始终面临巨大挑战,项目研究人员虽经艰苦努力,在研究时段内取得了若干有创新性的研究成果,但在灾害环境下重大工程安全性的认识方面仍然是有限的,许多问题仍有待深入研究,特别是5·12四川汶川大地震给灾害环境下重大工程安全性研究提出了许多新问题、新课题。项目研究人员将在已有研究成果的基础上,广泛吸纳国内外先进理论与方法,针对这些新问题、新课题开展坚持不懈的努力,以期全面系统构建灾害环境下重大工程安全性的研究体系。

本书为项目研究工作的系统总结,全书围绕灾害环境下重大工程安全性研究的主线,按下图所示结构由9章组成。



本书的主要结构

第1章介绍了地质赋存环境与地质灾害成因,主要包括地质赋存环境与地质灾害成因数据库的建立、注重地质灾害成因的共性和差异性的时间空间分布、信息熵等的研究,以及典型实例分析。

第2章主要介绍内外动力耦合作用下地质灾害演化机制及应用,包括内外动力的类型、耦合作用与描述、区域性规律、几种典型滑坡的演化机理及人类工程活动下影响规律分析。

第3章主要介绍不同尺度地质体力学特性及力学行为研究,包括强调不连续、

非均质、流固耦合的不同尺度地质体的定量化描述,结构面探测的新方法及多尺度的离散元计算模型。

第4章主要介绍多场耦合作用下岩土力学特性与模型及应用,包括岩土介质的渗流、温度、化学腐蚀特性,结构面的渗流特性,应力-水流耦合,温度-渗流-应力等耦合模型及其分析的有限元方法与细胞自动机方法等,以及冻融灾害的影响规律等。

第5章主要介绍灾害环境中岩体应力传递与能量释放规律,重点是岩石尺度的实验室实验,包括动静载荷作用下岩石破坏的能量机制与损伤演化规律、基于能量原理的新强度理论和破坏准则、岩石及节理变形破坏的能量传递与耗散规律、岩体不规则结构面的分形模型与分形重构、岩石孔隙结构的分形统计模型与能量耗散模拟、岩爆及冲击地压的能量机制及调控方法等。

第6章主要介绍近断层地震作用下重大工程的动力响应分析方法,包括近断裂地震的描述、震源模拟、非一致地震输入、地表断裂及典型工程实例。

第7章主要介绍工程体与地质体相互作用机理与整体稳定性研究,包括地质体、工程体及其相互作用概念描述、界面效应、工程体和地质体共同作用规律、整体稳定性的监控技术等。

第8章主要介绍重大工程结构在地震作用下破坏过程模拟,包括结构地震倒塌模拟的软件、理论、实例,土体破坏过程的模拟等。

第9章主要介绍灾害环境下重大工程安全性分析评估、时空预测方法与系统研究,包括描述围岩破坏程度的新指标——破坏接近度、模拟灾变形成过程的物理细胞自动机方法、重大工程安全性分析与时空预测的综合集成方法等。

本书主要著作责任人为谢和平院士和冯夏庭研究员,编委为丁桦研究员、刘西拉教授、李世海研究员、李晓研究员、周宏伟教授、杨志法研究员、杨春和研究员、鞠杨教授、盛谦研究员、曾静副研究员。全书由谢和平、冯夏庭统筹策划与安排,课题负责人与相关研究人员参与了相应章节的编写。

衷心感谢项目专家组专家郑哲敏院士、王思敬院士、葛修润院士、何满潮教授和科技部973项目咨询专家陈运泰院士、丁国瑜院士、王乃举研究员、崔鹏研究员、胡春宏教授级高级工程师在本项目研究工作中给予的关怀与指导,感谢国家科技部、教育部、中国科学院有关部门给予的指导与支持,感谢项目各参与单位及黄河勘测设计有限公司,黄河上游水电开发有限公司拉西瓦建设分公司,四川紫坪铺开发有限责任公司,国电大渡河流域水电开发有限公司,龙滩水电开发有限公司,二滩水电开发有限责任公司,龙羊峡水力发电厂,中国水电顾问集团中南、西北、华东、成都、昆明勘测设计研究院,甘肃金川集团有限公司,香港大学,美国 University of California at Berkeley、University of Illinois at Urbana-Champaign、National Science Foundation,法国 University of Joseph Fourier,德国 Technical

University of Clausthal, 加拿大 University of British Columbia、University of Calgary、Natural Sciences & Engineering Research Council of Canada 等单位给予的大力支持,感谢项目全体研究人员在项目研究过程中所付出的艰苦努力,感谢所有为本项目顺利完成和本书出版提供支持的专家与朋友。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏及不足之处,衷心希望读者批评指正。

谈和平 题

国家 973 项目“灾害环境下重大工程安全性的基础研究”首席科学家

2008 年 8 月

# 目 录

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

前言

|  |    |
|--|----|
| <b>第 1 章 地质赋存环境与地质灾害成因</b> .....           | 1  |
| 1.1 引言 .....                               | 1  |
| 1.1.1 地质灾害及其所赋存地质环境研究的意义 .....             | 1  |
| 1.1.2 地质灾害的共性及差异性问题的思考 .....               | 3  |
| 1.1.3 关于地质灾害防治对策的思考 .....                  | 4  |
| 1.1.4 科学问题与研究方法 .....                      | 5  |
| 1.2 中国西部地质背景概述 .....                       | 7  |
| 1.2.1 中国西部大地构造单元的简述 .....                  | 7  |
| 1.2.2 藏东南地质灾害及其地质背景 .....                  | 8  |
| 1.2.3 地质背景与自然环境的基础地位 .....                 | 15 |
| 1.3 中国大陆浅层地壳实测地应力分布规律研究.....               | 16 |
| 1.3.1 以往研究的概述 .....                        | 16 |
| 1.3.2 垂直应力随埋深的分布规律 .....                   | 17 |
| 1.3.3 水平主应力随埋深的分布规律 .....                  | 18 |
| 1.3.4 不同岩性地应力分布规律的统计分析 .....               | 21 |
| 1.4 川藏公路八宿—林芝段地质灾害成因和防治对策.....             | 27 |
| 1.4.1 研究意义 .....                           | 28 |
| 1.4.2 研究方法和技术路线 .....                      | 28 |
| 1.4.3 地质灾害发生机理分析和研究区的工程地质分区 .....          | 29 |
| 1.4.4 地质灾害概念概念的提出及其在然乌—东久段地质灾害评价中的应用 ..... | 42 |
| 1.4.5 八宿—林芝段滚石灾害的工程地质分区与风险分析 .....         | 48 |
| 1.4.6 面状碎屑流(溜砂坡)的成灾模式分析 .....              | 62 |
| 1.4.7 102 滑坡隧道避滑对策的研究 .....                | 66 |
| 1.5 南水北调西线一期工程区地质灾害信息数据库和电子图系.....         | 75 |
| 1.5.1 南水北调西线一期工程区的概况 .....                 | 75 |
| 1.5.2 ArcGis 8.3 介绍及系统设计原则 .....           | 76 |
| 1.5.3 数据库建库方法 .....                        | 77 |

|            |                             |            |
|------------|-----------------------------|------------|
| 1.5.4      | 图层划分                        | 79         |
| 1.5.5      | 数据库管理系统设计与开发                | 79         |
| 1.6        | 金沙江上游泥石流灾害的空间分布及其成因研究       | 80         |
| 1.6.1      | 研究背景                        | 81         |
| 1.6.2      | 研究区域概况                      | 81         |
| 1.6.3      | 泥石流的空间分布                    | 82         |
| 1.6.4      | 古泥石流的沉积特征                   | 85         |
| 1.6.5      | 年代学研究                       | 88         |
| 1.6.6      | 结论与讨论                       | 90         |
| 1.7        | 紫坪铺库区断层分布规律统计分析             | 90         |
| 1.7.1      | 研究背景                        | 90         |
| 1.7.2      | 地质概况                        | 91         |
| 1.7.3      | 断层分布规律统计分析                  | 91         |
| 1.7.4      | 主要结论                        | 94         |
| 1.8        | 重大地质工程三维建模可视化分析             | 94         |
| 1.8.1      | 复杂地质条件下三维地质建模方法             | 94         |
| 1.8.2      | 信息集成管理与可视化分析系统开发及在龙滩水电站的应用  | 97         |
| 1.9        | 关于滑坡降雨预报方法的研究               | 98         |
| 1.9.1      | 问题的提出                       | 98         |
| 1.9.2      | 由外因(降雨)预测预报滑坡的哲学依据          | 99         |
| 1.9.3      | “由天预报地”的若干思考                | 100        |
| 1.9.4      | 滑坡预测预报的概率模型                 | 102        |
| 1.9.5      | 基于双因素分级叠合的降雨型滑坡时空预报方法       | 103        |
| 1.9.6      | 可用于“由天预报地”的移动电话网络技术         | 108        |
| 1.10       | 边坡治理新技术研究                   | 108        |
|            | 参考文献                        | 112        |
| <b>第2章</b> | <b>内外动力耦合作用下地质灾害演化机制及应用</b> | <b>120</b> |
| 2.1        | 引言                          | 120        |
| 2.2        | 滑坡的时空分布与内外动力作用的关系           | 123        |
| 2.2.1      | 内外动力耦合的区域地质环境               | 123        |
| 2.2.2      | 滑坡空间分布特征                    | 127        |
| 2.2.3      | 滑坡时间分布特征                    | 128        |
| 2.2.4      | 滑坡灾害与地球内外动力作用的关系            | 129        |
| 2.3        | 滑坡滑带的形成与内外动力作用关系            | 130        |
| 2.3.1      | 大型滑坡滑带的发育特征                 | 131        |



|            |                              |            |
|------------|------------------------------|------------|
| 2.3.2      | 滑带形成演化的阶段性                   | 132        |
| 2.3.3      | 滑带形成演化过程与模式                  | 132        |
| 2.3.4      | 滑带形成演化过程中的内外动力耦合机制           | 137        |
| 2.4        | 基于内外动力耦合作用的滑坡危险性区划           | 141        |
| 2.4.1      | 自然斜坡结构探测、地质力学机制与稳定性          | 141        |
| 2.4.2      | 自然斜坡变形破坏的内外动力学因子             | 147        |
| 2.4.3      | FCJ-GIS 内外动力区划模型及斜坡灾害危险度评价方法 | 149        |
| 2.5        | 典型滑坡发育演化史及其稳定性分析方法           | 153        |
| 2.5.1      | 古滑坡发育演化的历史地质分析方法             | 153        |
| 2.5.2      | 新生型水库滑坡的成因机制与判别方法            | 156        |
| 2.5.3      | 蓄水-降雨联合作用下滑坡稳定性分析方法          | 158        |
| 2.5.4      | 基于强度折减的滑坡稳定性三维分析方法           | 162        |
| 2.6        | 堆积层滑坡体的工程地质力学特性研究            | 170        |
| 2.6.1      | 堆积体的成因类型和分类                  | 170        |
| 2.6.2      | 土石混合体力学特性的试验研究               | 174        |
| 2.6.3      | 土石混合体力学特性的数值分析               | 176        |
| 2.6.4      | 工程应用——土石混合体滑坡稳定性分析           | 180        |
|            | 参考文献                         | 182        |
| <b>第3章</b> | <b>不同尺度地质体力学特性及力学行为研究</b>    | <b>185</b> |
| 3.1        | 地质体及其基本特性                    | 185        |
| 3.2        | 两类地质体特性的主要描述方法               | 187        |
| 3.2.1      | 岩体力学主要特性                     | 187        |
| 3.2.2      | 土石混合体力学特性                    | 189        |
| 3.3        | 描述地质体的力学模型                   | 190        |
| 3.3.1      | 刚性块体面-面接触模型                  | 190        |
| 3.3.2      | 规则可变形、可断裂块体模型                | 198        |
| 3.3.3      | 任意可变形块体模型                    | 208        |
| 3.3.4      | 多尺度离散元计算方法及不同尺度地质体间相互作用方式    | 213        |
| 3.3.5      | 裂隙网络渗流模型                     | 239        |
| 3.4        | 地质体力学模型的典型应用                 | 245        |
| 3.4.1      | 土石混合体非均匀材料的计算方法              | 245        |
| 3.4.2      | 基于波动理论与物探技术的地质体力学特性探测方法      | 264        |
| 3.4.3      | 节理动态闭合变形性质及应力波在节理处的传播特性研究    | 277        |
| 3.4.4      | 节点位置随机模型及应用                  | 285        |
|            | 参考文献                         | 302        |