



重大工程扰动区特大滑坡灾害 综合防治理论与技术

吴树仁 宋 军 王 涛 等 著



科学出版社

重大工程扰动区特大滑坡灾害 综合防治理论与技术

吴树仁 宋 军 王 涛 等 著

“十二五”国家科技支撑计划课题（编号：2012BAK10B02）资助出版



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书围绕西北黄土城镇建设区、三峡库区和青藏高原交通干线等典型重大工程扰动区的特大滑坡灾害防治的若干关键问题,依托国内外重大工程滑坡空间数据库,在简要分析工程滑坡灾害放大效应基础上,分层次揭示不同类型特大工程滑坡灾害的孕灾背景、形成机理和成灾模式,研究提出重大工程滑坡主动减灾防灾理念及将有效预防、快速治理和主动减轻技术融合一体的综合防治技术体系,初步研发了4种快速锚固防治技术装备和工艺流程,构建了特大滑坡灾害综合防治技术信息交流平台及工程滑坡快速防治基地,编制黄土城镇区地质灾害风险评估技术指南,为国家重大工程和山区城镇建设中的特大滑坡灾害综合防治提供理论依据和技术支撑。

本书可供工程滑坡灾害调查、评价、防治与管理的工程技术人员、科研人员以及相关高等院校教师和研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

重大工程扰动区特大滑坡灾害综合防治理论与技术 / 吴树仁等著. —北京:科学出版社, 2018. 5

ISBN 978-7-03-057195-3

I. ①重… II. ①吴… III. ①建筑施工-基础(工程)-滑坡-处理
IV. ①TU753. 8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 083153 号

责任编辑: 韦 沁 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 北京东方人华科技有限公司

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>

北京汇瑞嘉合文化发展有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 5 月第一次印刷 印张: 26 1/4

字数: 622 000

定价: 298.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

著 者 名 单

吴树仁	宋 军	王 涛	石菊松
钟 建	汪华斌	朱立峰	辛 鹏
张 勇	梁昌玉	张小刚	石胜伟
胡 炜	孙 萍	曹春山	韩金良
石 玲	强 巴	周 博	王全成
程英建	吴 陶		

前 言

近年来, 由于我国重大工程规划、大型矿产资源开发和山区城镇建设处于快速发展时期, 随着我国重大工程建设不断向西部地质环境脆弱区推进, 大量水利电力、铁路、公路、油气管道和城镇基础设施的规划建设遇到了前所未有的工程地质和地质灾害问题。尤其在西南高山峡谷和西北黄土高原区, 发展空间有限, 使很多城镇规划和工程建设不得不在滑坡易发区选址, 如果不采取监测预警、风险评估与管理或工程治理等综合防治措施, 会造成巨大的损失, 但目前国内外缺少工程扰动区特大滑坡综合防治技术的指南, 且快速有效的防治技术方法亟待提高。在此背景下, 为了进一步贯彻落实《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》和《国务院关于加强地质工作的决定》的精神, 加强地质灾害防灾减灾科技工作, 2012年, 科学技术部启动了“十二五”国家科技支撑计划重点项目“地质灾害监测预警与风险评估技术方法研究(2012BAK10B00)”。

中国地质科学院地质力学研究所牵头组织多家科研院所和高校承担了计划项目课题“重大工程扰动区特大滑坡灾害防治技术与示范(2012BAK10B02)”, 综合运用野外调查、室内测试、数值及物理模型试验、风险评估等技术手段, 重点围绕黄土城镇建设区、三峡库区和川藏公路等典型工程扰动区, 开展了工程滑坡的孕灾背景、发育特征、形成演化机制及防治技术研究。跟踪对比国内外典型灾难性工程滑坡, 初步建立基于 ArcGIS 平台的国内外重大工程滑坡空间数据库; 研究提出了“有效预防、快速治理、主动减轻”三位一体的工程滑坡综合防治理念和技术方法体系; 初步揭示了宝鸡市区北坡、甘肃黑方台滑坡群及川藏公路 102 滑坡群的形成机理和失稳模式; 研发了 4 种快速锚固防治技术装备和工艺流程, 使重大工程滑坡快速防治关键技术取得显著进展; 初步完成三峡库区重大工程滑坡灾害综合防治技术方法的集成和优化; 提出川藏公路(318 国道)中坝段溜砂型滑坡灾害的综合防治技术; 在大型深层滑坡群机理的基础上, 提出宝鸡市北坡城镇扰动区重大工程滑坡综合防治技术; 研究编写了“黄土城镇建设区滑坡风险评估技术指南”(初稿); 初步建立了宝鸡市和三峡库区奉节县城两处工程滑坡综合防治技术研究示范基地。

本书是课题组多年科研成果的系统总结, 以重大工程滑坡综合防治的基础理论、关键技术、集成优化和应用示范为主线逐步展开。其中, 前言和第一章由吴树仁、石菊松和王涛著; 第二章由王涛、张小刚、张勇、朱立峰、辛鹏等著; 第三章由梁昌玉、辛鹏、王涛、石菊松、朱立峰、汪华斌、张小刚等著; 第四章由吴树仁、王涛、朱立峰、曹春山、石胜伟、张小刚、程英建等著; 第五章由宋军、石胜伟、张勇、吴陶等著; 第六章由汪华斌、张小刚、张勇等著; 第七章由吴树仁、韩金良、宋军、王涛、朱立峰等著; 第八章由吴树仁和王涛著; 附录由吴树仁、石菊松、王涛、辛鹏等著; 全书由吴树仁、王涛和石菊松统编定稿。由于不同重大工程类型的多样性以及滑坡形成演化与综合防治的复杂性, 加之时间仓促、作者研究水平有限, 书中难免有错漏和不足之处, 殷切希望同行专家和读者给予批评指正。

本书依托课题能够顺利完成是多方支持和帮助的结果。课题在实施过程中,自始至终得到科学技术部和国土资源部国际合作与科技司有关领导支持和帮助,特别是国土资源部科技与国际合作司高平副司长、21 世纪议程管理中心张巧显处长、国土资源部地质灾害应急技术指导中心殷跃平总工程师对本项研究给予大力支持;中国地质科学院地质力学研究所领导及相关职能部门对本项研究给予支持和帮助,在此表示衷心感谢。在课题评审与执行过程中,中国科学院陈祖煜院士、中国工程院王思敬院士、中国工程院卢耀如院士等提出了指导性的改进意见,在此特向各位专家表示衷心感谢。共同参与“重大工程扰动区特大滑坡灾害防治技术研究示范”课题的中国地质环境监测院张永双研究员、中国地质科学院地质力学研究所谭成轩研究员和张春山研究员、中国地质调查局西安地质调查中心张茂省研究员等给予了多方面的帮助。众多兄弟单位的领导和技术人员在野外调查和技术研讨过程中给予了大力支持,谨此向对本项研究提供指导帮助的所有领导、专家和全体课题组同仁表示衷心的感谢!

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 工程滑坡防治研究进展	1
1.2 存在的问题与趋势	8
1.3 综合防治研究思路	9
第二章 重大工程滑坡防治数据库建设	13
2.1 概述	13
2.2 工程滑坡类型及特征	13
2.3 工程滑坡防治数据库建设	34
2.4 典型工程扰动区滑坡概况	40
2.5 小结	77
第三章 重大工程滑坡形成机理与演化过程	78
3.1 概述	78
3.2 黄土高原城镇建设与灌溉区滑坡	78
3.3 三峡库区土石混合体滑坡	126
3.4 青藏高原交通干线区滑坡	143
3.5 小结	178
第四章 重大工程滑坡综合防治理论与技术	180
4.1 概述	180
4.2 重大工程滑坡主动减灾防灾理念	180
4.3 宝鸡城镇区滑坡综合防治技术	186
4.4 黑方台基于地下水控制的综合防治体系	200
4.5 三峡库区滑坡综合防治技术集成	231
4.6 川藏公路溜砂坡防治技术	236
4.7 小结	248
第五章 重大工程滑坡快速防治关键技术	249
5.1 概述	249
5.2 重大工程滑坡灾害快速勘查技术	249
5.3 重大工程滑坡灾害快速锚固技术	254
5.4 工程应用与示范	276
5.5 小结	285

第六章 重大工程滑坡防治技术优化与改良	286
6.1 概述	286
6.2 三峡库区特大滑坡防治技术适宜性	286
6.3 桩土耦合作用机理与优化设计	299
6.4 102 道班滑坡综合整治方案比选	322
6.5 川藏公路滑坡锚固结构病害与修复	330
6.6 小结	344
第七章 重大工程滑坡防治技术示范基地建设	345
7.1 概述	345
7.2 三峡库区奉节县城滑坡综合防治技术集成与研究示范基地	345
7.3 宝鸡市黄土城镇滑坡综合防治技术研究示范基地	349
7.4 小结	367
第八章 结论	369
参考文献	373
附录 黄土城镇建设区滑坡风险评估技术指南	384
引言	384
1 总则	384
2 术语和定义	386
3 基本要求与原则	388
4 滑坡风险评估主要技术方法	390
5 黄土城镇（场地）滑坡风险评估区划基本流程	393
6 重大单体滑坡灾害风险评估流程概述	402
7 风险评估的可靠性分析	410
8 风险评判与风险控制建议	412

第一章 绪 论

1.1 工程滑坡防治研究进展

1.1.1 国外研究进展

国外的工程滑坡防治研究总体经历了两个阶段，以下分别予以回顾。

1. 第一阶段

该阶段表现为采取以工程治理技术为主的被动防治措施阶段（郑颖人等，2007）。欧美国家多从岩土力学角度出发，研究滑坡地层的物理力学性质和稳定性分析（陈祖煜，1998），以便揭示滑坡机理、提出防治措施。苏联更加偏重于地质基础研究，强调滑坡的成因、分类和性质等，开展稳定性计算方法和防治措施研究。各国结合本国防治技术研究，也分别出版了代表性专著，经国内铁道部科学研究院西北研究所翻译出版（王恭先，2010），曾在国内广泛传播，包括日本的《崩塌、滑坡及防治》（山田刚二等，1980）、捷克的《滑坡及其防治》（扎留巴和门茨尔，1975）、苏联的《滑坡过程的基本规律》（叶米里扬诺娃，1985）以及美国的《滑坡的分析与防治》（美国公路局滑坡委员会，1987）等。根据工程治理措施分类，分别取得了以下进展。

1) 地下排水工程

（1）平孔排水：应用并改进在地面上机械施工使得效率高，造价比盲沟或盲洞低。仅在美国加利福尼亚州，从1940~1980年，作为一种经济的排水方法使用了 30×10^4 m的平孔排水。此外，在加拿大、日本、西欧、南美也得到广泛应用，如日本地附山滑坡就打平孔8400m。新西兰Clyde电站工程中对Brewery河滑坡在滑坡前缘作扶壁、垫层、挡水帷幕、在庫水位及滑面下作盲洞，为平孔排水的一个实例。平孔排水的作用在滑坡体内地下水分布尚不十分清楚时，在滑坡的后部和前部打平孔，降低地下水水位，减小孔隙水压力，减缓或暂时停止滑体的移动，为勘察和根治工程施工创造条件。作为一种永久排水工程可以单独使用，也可以和排水盲洞或竖井结合使用（王恭先，1998；王恭先等，2007）。

（2）虹吸排水：20世纪80年代以来在法国已用虹吸排水方法稳定了约100个滑坡。其最大优点是可以自流排水，降低滑坡地下水水位。它是一个密封的聚氯乙烯管系统。法国Dijon附近用虹吸排水稳定公路路堤和下伏不稳定斜坡的例子（王恭先，1998）。

2) 减重和反压工程

英国人Hutchinson提出“中性线”方法为减重和反压计算提供了理论依据。该方法是在滑坡断面上用稳定性计算，将滑坡上部土体移多少压于滑坡下部即可达到要求的稳定系数（王恭先，1998）。

3) 支挡工程

(1) 大截面抗滑桩: 20 世纪 60 年代以前, 国内外在滑坡防治中, 除了地表和地下排水工程以外, 支挡工程方面主要采用抗滑挡土墙和小直径抗滑桩 (王恭先等, 2007)。60 年代以来, 国外在治理大型滑坡中也开始应用大截面的抗滑桩 (柱), 如日本采用挖孔方法, 作直径 5.0 ~ 6.5m, 深 50 ~ 100m 的大型桩。相比而言, 国内的抗滑桩技术发展更早, 居于世界前列 (王恭先, 1998)。

(2) 微型桩群: 指直径小于 300mm 的插入桩或灌注桩。20 世纪 50 年代从意大利开始, 70 年代传入美国和其他国家, 早期主要用于房屋地基加固。80 年代以后迅速发展, 用于斜坡和滑坡加固。美国联邦公路局近期立项目研究微型桩的实施状况和设计方法 (王恭先, 1998)。

4) 物理化学方法

(1) 灌浆法: 始于美国, 利用化学灌浆稳定黏土滑坡, 其原理是利用阳离子的扩散效应, 由溶液中的阳离子交换土体的阳离子, 使滑体变得稳定。所用的溶液包含有石灰、三价金属阳离子、正磷酸钙、磷酸铵和氯化钙等。该方法主要用在小型滑坡中, 其耐久性需经时间考验。在英国得到应用和发展, 英国曾用水泥灌浆整治了一百多个滑坡, 结果显示该方法对黏土、细砂和粉土质滑坡治理特别有效。该方法随后又传到法国和联邦德国 (王恭先, 2010)。

(2) 焙烧法: 最早在 19 世纪末, 俄国曾在一铁路路堑坡脚挖坑道时, 用煤进行焙烧, 以期形成地下挡墙稳定滑坡; 后来苏联在尝试通过在滑带以下导洞内焙烧。目前, 许多国家利用气体或液体燃料进行钻孔焙烧的方法加固地基, 也逐步应用于滑坡治理 (王恭先, 2010)。

(3) 电渗排水: L. 卡萨格郎德·卡萨格兰德最先用电渗排水法加固一铁路路堑边坡, 后在美国、挪威均有应用, 也可用于基坑边坡加固。但是由于耐久性差, 仅作为临时稳定或加固措施, 在滑坡中应用不多 (王恭先, 2010)。

2. 第二阶段

近些年来, 国际滑坡防治技术进入发展的第二阶段, 逐渐趋于建立综合防治技术体系。工程治理技术日趋精准, 并照顾经济技术合理性, 并有新技术方法逐渐发展起来; 同时, 区域性的滑坡调查评价研究也越来越为普遍, 逐步形成了将滑坡工程治理与监测预警、风险管理相结合的综合防治技术体系的趋势。

1) 工程治理技术

工程治理的目标仍然为旨在保证滑坡能够保持长久的稳定状态, 并将安全系数作为实施治理工程的依据和检验标准。需要注意, 安全系数并非一成不变, 在治理工程设计和评估治理效果时, 不同情况下, 可以或高或低地调整安全系数的标准, 具体需要综合考虑滑坡的规模和类型、调查研究的程度、失稳可能造成的潜在风险以及岩土工程师的经验等因素 (Cornforth, 2005)。具体的治理技术的种类包括坡形改造、排水、支挡结构和坡体加固四大类 (Popescu and Sasahara, 2009), 相比传统技术大类差异不大。国际地科联滑坡工作组 (IUGS WG/L) 制定的滑坡治理措施建议表格 (表 1.1), 系统地总结了常用的滑坡治理技术措施 (Popescu, 2001)。

表 1.1 滑坡治理措施简表

序号	内容
1	坡形改造
1.1	清除滑坡源区物质（或者以轻质材料置换）
1.2	增加滑坡阻滑区的物质（反压马道或堆填压脚）
1.3	降低斜坡总坡度
2	排水措施
2.1	地表排水，将水引出滑动区之外（集水明沟或管道）
2.2	充填自由排水土工材料（粗粒填料或土工聚合物）的浅或深排水暗沟
2.3	粗颗粒材料构筑成的护坡挡墙（水文效应）
2.4	垂直钻孔（小口径）抽取地下水或自由排水
2.5	垂直钻孔（大口径）重力排水
2.6	近水平或近垂直小口径水井
2.7	集水隧洞、廊道或平峒
2.8	真空预压排水
2.9	虹吸排水
2.10	电渗析排水
2.11	种植植被（蒸腾排水效果）
3	支护结构
3.1	重力式挡土墙
3.2	木笼块石墙
3.3	鼠笼墙（钢丝笼内充以卵石）
3.4	被动桩、墩、沉井
3.5	原地浇筑混凝土连续墙
3.6	添加聚合物或金属条片等的加筋土挡墙
3.7	粗颗粒材料构筑成的护坡挡墙（力学效应）
3.8	岩质坡面防护网
3.9	崩塌落石阻滞或拦截系统（槽、栅栏或钢绳网）
3.10	抗侵蚀的保护性石块或混凝土块
4	坡体加固措施
4.1	岩体锚固
4.2	微型桩
4.3	土钉
4.4	锚索（有或无预应力）
4.5	灌浆
4.6	碎石桩、石灰桩、水泥桩
4.7	热处理

续表

序号	内容
4.8	冻结处理
4.9	电渗锚固
4.10	种植植被（根系强度的力学效应）

除了传统技术以外，一些新技术逐步发展起来，如由欧洲多国的企业以及意大利热亚那大学和比利时太空应用机构（SAS）共同实施的研发计划，将先进的太空机器人技术引进滑坡和高陡边坡加固中，研发了登山机器人代替工人在高危险滑坡和高陡边坡上作业；该项技术不仅保障了施工人员的安全，同时可以将治理经费降低达 30% ~ 80%（张燕，2004）。

2) 滑坡监测预警

往往从滑坡主体和诱发因素两方面入手，最为常见的滑坡诱发因素包括地震和降雨两种，鉴于至今难以准确地预测和预报地震事件，因此国内外重点开展了降雨型滑坡的监测预警研究和实践工作。国外的相关进展主要集中在 20 世纪 80 ~ 90 年代，一般通过日降雨量模型、前期降雨量模型和前期土体含水状态模型确定降雨诱发滑坡临界值，进而结合监测数据实现降雨型滑坡预警的目标。具有代表性的研究进展包括：Guidicini 等分析了巴西 9 个地区滑坡和降雨之间的统计关系（Guidicini and Iwasa, 1977）；Glade（1998）通过对新西兰惠林顿地区的滑坡和降雨资料进行研究，建立了确定降雨临界值的日降雨量模型、前期降雨量模型和前期土体含水状态模型；Caine（1980）研究揭示了全球不同地区降雨诱发滑坡的关系；Brand 等（1984）研究提出了香港地区降雨诱发滑坡的临界值；Mark 等利用 1982 年旧金山海湾滑坡和降雨数据建立了滑坡与降雨强度、持时的临界关系曲线（Mark and Newmen, 1988）；Ayalew（1999）分析揭示了埃塞俄比亚 64 个滑坡和降雨量的关系。

在具体的滑坡监测过程中，根据监测对象的不同，可以分为四大类，即位移监测、物理场监测、地下水监测和外部诱发因素监测。目前，一些新技术方法如 InSAR、三维激光扫描等已用于滑坡专业监测领域，监测数据的采集和传输也实现了自动化和远程化，监测和预警系统呈现逐步向 Web-GIS 发展的趋势。利用特定地区的滑坡易发性或危险性评估结果，结合降雨量临界值，可以设定不同的预警级别；通过区域布设一定数量的雨量站，监测雨量介于预报雨量，即可进行滑坡的预警预报（唐亚明等，2012）。

3) 滑坡风险评估和管理

滑坡风险评估和管理迄今经历了 30 多年的研究和发展，目前已成为国际上完善土体利用规划和限制滑坡灾害影响区发展的强有力工具，也是减少滑坡导致的潜在人员伤亡最为有效和经济的方式（Cascini, 2005）。新世纪以来，国际上越来越重视滑坡风险评估研究及其在减灾防灾战略上的推广应用。

美国地质调查局新世纪的减灾战略，把滑坡风险管理作为完善和推广的重要内容之一；意大利则在 Sarno 泥石流灾害事件之后的 1998 年，颁布了 180 号法令（即 Sarno 法令），首次以国家法律的形式确定了滑坡风险管理作为防治战略，通过土地利用规划

限制滑坡高风险地区的发展,降低滑坡风险;澳大利亚在2000~2008年3次修改完善出版滑坡风险评估技术指南,成为国际上最有影响的指南之一;欧盟启动了针对整个欧盟成员国的滑坡风险评估与管理技术方法的综合科技规划项目“Safeland”,其中欧盟有25个科研机构参与,旨在开发适用于地方、区域、欧洲和社会尺度的定量滑坡风险评估与管理的工具和战略,以便提升欧洲滑坡灾害预测和确定危险或风险区的能力(吴树仁等,2012)。上述进展使滑坡风险管理的基本内含、术语、技术框架、评估层次、滑坡编录和风险区划技术方法不断完善发展;特别是在滑坡编录、风险评估模型与技术方法、滑坡风险分区成果的误差分析和可靠性验证方法等方面取得了显著进展。

国际滑坡风险评估技术方法已逐步由定性评估过渡到以定量评估为主的阶段。定量评估在数据输入、分析流程及结果描述方面均不同于定性评估。与定性评估得到的权重指数、相对分级(如低、中、高)或者数值分类等不同,定量风险评估能够定量表达发生特定财产损失或人员伤亡的概率,及其评估的不确定性。定量风险评估对各类滑坡相关主体都具有重要意义,对科学家和工程师的研究和生产工作而言,可以提供较为客观和可重现的量化风险,不同区域或场地的评估结果也可进行横向对比;不仅如此,定量评估便于识别输入数据的缺陷和理解评估方法的局限性。对于滑坡风险管理者而言,定量评估可以进行成本-效益分析,并且为预先采取灾害管理和减缓措施提供依据(Corominas *et al.*, 2013)。但是也应注意到,定量评估并不一定比定性估算更加准确,如有时滑坡发生概率是基于主观判断计算出来的;不过好在通过定量评估更加便于地学专家、土地所有者及决策者之间的沟通和交流。

1.1.2 国内研究进展

长期以来,我国在滑坡灾害的认识和防治方面进行了大量的探索和研究,积累了丰富的经验,特别是近几十年来,随着我国铁路、公路、水电、城建等行业重大工程建设规模和范围的增大,出现了大量与工程建设相关的滑坡和高边坡治理工程(陈祖煜,1998;陈祖煜和汪小刚,1999),尤其是三峡库区地质灾害防治取得了显著的成就。这些工程实例,一方面,为工程建设者和研究人员积累了大量经验,并在防治技术方面取得了较大的进步,另一方面,由于地质条件的复杂性,工程扰动形成滑坡而引起的财产损失和人员伤亡仍不时发生,使得我国在重大工程扰动区的特大型滑坡早期识别、风险评估与管理、灾害治理等方面面临着新的挑战。

1. 水电工程区滑坡防治技术

自1959年法国60m高的马尔帕塞(Malpasset)薄拱坝左坝头发生滑动导致坝体破裂后,国际上先后有1961年湖南省柘溪水库塘岩光滑坡、1963年意大利瓦伊昂(Vajont)水库滑坡、2003年三峡库区千将坪滑坡等大型水库诱发的滑坡发生,这些水电工程区的滑坡与工程建设扰动密切相关。由于我国许多水电工程多在西部高山峡谷区建设,这些地区工程地质条件比较复杂,有些工程在施工中多次发生滑坡灾害并造成了重大的经济损失和人员伤亡。1961年3月6日,湖南省柘溪水库塘岩光滑坡,激起21m高的涌浪造成巨大损失和伤亡,是中国第一例水库滑坡。2003年7月13日,三峡水库初期蓄水至135m高

程 30 天时,诱发了千将坪滑坡,致死 24 人,摧毁 129 间民房和 4 个工厂,致 1200 人无家可归。

为了治理滑坡灾害,我国岩土工程、地质工程领域科技人员针对岩质高边坡的失稳机理和分析方法研究(黄润秋,2005)、边坡工程的控制爆破技术、高边坡的加固工程(陈祖煜和汪小刚,1999)以及综合监测预警预报(郑颖人,2010)等问题进行了系统研究并形成了一整套水电高边坡工程勘测、设计和施工的新技术,从而成功地解决了包括三峡链子崖危岩体(殷跃平等,1996)、小浪底工程在内的一批规模巨大的高边坡工程,其中三峡链子崖危岩体和小浪底工程均采用了预应力锚索加固方案,预应力最大可达 3000kN,均取得较好的治理效果。

三峡库区自 1997 年随着“长江三峡工程库区移民迁建新址重大地质灾害防治研究”重大科技项目和三峡库区 2、3 期地质灾害防治工程的实施,取得了显著的成效,出版了一系列重要的研究成果,如《长江三峡库区移民迁建新址重大地质灾害及其防治研究》(殷跃平,2004)、《三峡库区高切坡基础性研究丛书》等(伍法权等,2010),形成了较为全面成熟的地质灾害防治技术方法体系,在此基础上编制了全国技术规范《滑坡防治工程设计与施工技术规范》(中华人民共和国国土资源部,2006)。

2. 铁路、公路等线性工程区滑坡防治技术

由于铁路、公路等线性工程的线路里程长,特别是在西部地区,由于地质构造复杂、峡谷深切、活动断裂和地质灾害极其发育,部分线路不可避免地通过地质灾害高发区,甚至在古滑坡体和大型不稳定斜坡体中穿越。铁路方面,20 世纪 60 年代建成的成昆铁路,全线分布大型滑坡 183 处,治理 103 处,危岩 500 多处,崩塌落石 300 多处,在运营期连续不断发生边坡灾害,多次中断交通,为保证通车,地质灾害治理费用巨大。90 年代通车的南昆铁路分布有大型滑坡 20 多个,其中八渡车站修建在古滑坡体上,线路以路堑从滑坡的中后部通过,在铁路的修建过程中,诱导了古滑坡的复活变形,滑坡多次滑动,后期历时多年多次治理,治理费用过亿。2010 年 5 月 23 日沪昆铁路江西余江至东乡段的山体滑坡掩埋铁路,造成列车脱轨,死 19 人,伤 70 人,治理费用 1680 万元。

在公路方面,2003 年 5 月 11 日 1 时 55 分,贵州省黔东南苗族侗族自治州三穗县台烈镇台烈村三穗-凯里高速公路平溪特大桥 3#墩附近发生滑坡,造成 33 人死亡,2 人失踪,1 人受伤,16 间工棚被毁(殷跃平,2003)。云南大保公路 K399+685 大型红层滑坡先后经过两次勘察、多次调查以及 3 次加固治理,仍未得到彻底根治。在川藏公路西藏波密县境内通麦大桥北的 102 道班附近,在长约 3km 范围内,成群分布有大小滑坡 22 处,其中直接危害川藏公路且规模较大的滑坡 6 处,通常称作“102 道班滑坡群”,规模最大的 2#滑坡是“102 道班滑坡群”的主滑坡,通常称作“102 道班滑坡”(张小刚等,2013)。102 道班滑坡于 1991 年大规模滑动时,滑坡体积达 $510 \times 10^4 \text{ m}^3$,其前缘伸进帕隆藏布河床,直达对岸,阻断帕隆藏布 40 分钟,经后期河水冲刷和滑体表面侵蚀,目前残留滑坡体体积约 $267 \times 10^4 \text{ m}^3$,该滑坡历经多次治理,现今仍在滑动,并不时阻断交通和造成人车损毁。此外,台湾地区也发生多起公路滑坡灾难,如 2010 年台湾 3 号高速基隆滑坡冲垮高速公路,并引起人员伤亡。

在工程实践的同时,铁路、公路系统在防治经验、防治原则、防治技术和研究等方面

取得一系列成就(王恭先等, 2008), 如宝成线经验: “对症下药, 量体裁衣”, 根据此方法略阳已北滑坡得到根治; 成昆线经验: 对大型的边坡灾害进行绕避, 其中成昆线绕避了 80 处滑坡; 南昆线经验: 深化了预加固的理念, 对不绕避的大型的边坡灾害和高边坡采取预加固处理。高速铁路: 提高设计标准, 减少高边坡的数量。并形成了预防为主, 治早治小, 一次根治、不留后患, 因地制宜、技术先进, 动态设计、信息化施工等防治原则。在防治技术方面也取得了较大的成就, 从最开始 20 世纪 50 年代宝成铁路建设时采取抗滑挡墙+排水的治理措施; 到 60 年代在成昆线中首次使用了抗滑桩, 采用竖向排水孔和锚杆挡墙支护方式; 70 年代在太焦线中首次使用了抗滑明洞等; 目前, 在竖向钢管注浆技术和压浆锚柱等方面的研究较多, 并在京珠 108 滑坡治理和元磨高速中得到应用。

3. 城镇建设区滑坡防治技术

随着城市化进程的不断加快, 城市建设不可避免由平原区向沟壑地带的地质灾害易发、高发区延伸扩展, 使得这些地区地质灾害险情逐年增加。2005 年初, 丹巴县城后山出现明显的变形破坏迹象, 整个丹巴县城遭受滑坡的严重威胁, 并差点使整个县城毁于一旦。利用应急处置和变形控制技术, 对滑坡实施了应急处置和综合治理, 使滑坡变形迅即得到控制, 监测表明, 目前滑坡已处于稳定状态。自 1999 年开始, 截至 2008 年国土资源部共完成了 1640 个全国山区丘陵区地质灾害的调查与区划, 建立了以群策群防为主的地质灾害监测预警和防治的体系, 为实施地质灾害防治与管理提供宏观决策依据。2006 年开始, 中国地质调查局在 1:5 万地质灾害高易发区地质灾害详细调查的基础上, 先后开展了陕西延安、四川雅安和丹巴县的地质灾害风险评估与管理示范研究; 2008 年汶川地震后, 中国地质调查局启动了“西南山区城镇建设地质灾害风险管制方法与示范研究”, 随后科学技术部、水利部、民政部等相关部委及院校启动了一批与地质灾害风险管理相关的科研和生产项目, 形成国内围绕城镇安全的地质灾害风险研究的热潮。尤其是 2010 年, 频繁的重大地质灾害事件使得地质灾害风险评估与管理研究显得尤为迫切, 引起了政府部门的高度重视。

在滑坡监测预警方面, 国内近 10 年来取得了丰硕的研究和实践成果, 常规手段和新技术方法得到了综合运用。以三峡库区滑坡监测预警为例, 新老综合监测技术在滑坡局部静态变形监测工作中取得了代表性的进展。在常规监测技术方面, 主要包括: 垂直位移监测方法, 有几何水准、液体静力水准、微水准等; 水平位移监测方法, 有基准线法、导线法、前方交会法、近景摄影法和光电自动遥测监控等。应当注意, 这些技术存在诸多弊端, 受测区环境、天气状况、人为因素的影响较大, 人力物力的投入较大, 工作效率较低; 尤其当滑坡变形加速时, 现场工作人员的安全得不到保障; 因此, 滑坡监测技术方法的更新换代是大势所趋。在新的监测技术方面, 目前已经用到了测量智能机器人、地表裂缝相对位移监测、GPS 卫星定位监测、InSAR 技术、深部位移钻孔倾斜仪监测、地下水动态监测、滑坡推力监测和时域反射 (Time-Domain Reflectometry, TDR) 监测技术等(何明均和黄上, 2014)。同时, 国内在区域暴雨型群发地质灾害的时空监测预警、滑坡光纤传感等高新关键监测技术、简易型滑坡泥石流监测预报仪器研制等领域也取得了显著进步, 并在全国得到了推广应用(殷跃平和吴树仁, 2013)。此外, 物联网技术及 4G 移动网络技术更使地质灾害监测预警向智能化方向发展。也应注意到, 国内在滑坡监测预警方面尽

管已经取得了丰硕成果,但是统计结果表明,滑坡成功预警率却并不高,主要表现在成功预警实例中专业预警所占比例过低,而且在预警滑坡事件之外还发生了大量地质灾害。制约目前监测预警实效的主要问题在于滑坡隐患点的排查和识别问题,在未来的工作中应予以重点关注(唐亚明等,2012)。

在滑坡风险评估和管理方面,国内研究和实践工作整体起步晚于其他国家,但是与国际前沿进展的差距不断缩小。例如,香港滑坡风险研究处于世界领先水平,具备完备的滑坡编录数据库系统、形成了系统的滑坡风险评估、管理的技术体系和标准。在滑坡定量风险评估方面强调利用高精度的 LiDAR、InSAR、航空摄影等先进技术开展风险评估。中国大陆地区的滑坡风险研究晚于香港,不过近年来已逐步将滑坡空间预测模型与 GIS 系统结合,开发了基于 GIS 技术的滑坡危险性区划模块(戴福初和李军,2000;黄润秋等,2004;殷坤龙等,2007);提出了中国滑坡风险评估的层次结构、指标体系和技术流程,编制了相应的滑坡风险评估技术指南,提出了滑坡活动强度评价思路和方法(吴树仁等,2009),为中国滑坡风险评估技术推广奠定了基础。

1.2 存在的问题与趋势

国内外滑坡防治技术先进的有日本、意大利、澳大利亚等国家和中国香港等地区。日本强调以工程治理为主,香港重视斜坡的安全与风险管理,意大利、澳大利亚等将滑坡风险与土地利用相结合,通过立法从源头主动控制滑坡风险。总体上,日益重视依靠科技手段提高防灾减灾能力,不断增加防灾减灾科技投入,加大灾害基础理论研究力度,加强防灾减灾技术研发与应用,全面建设综合灾害风险防范科技体系。

国内近 20 年来,滑坡防治技术研究方面取得了显著的进展,但专门针对重大工程扰动区的特大滑坡灾害防治技术目前还没有较为成熟和系统的技术标准,主要表现在不同行业部门具有根据本行业工程建设的勘察、设计技术标准,这些标准中一般涉及滑坡防治的技术方法,但均相对简单或片面,往往重视工程治理,缺少涵盖早期识别、风险评估与管理、监测预警到工程治理的综合防治技术体系与指南,因此,需要进行集成创新研究,以适合满足重大工程建设中特大滑坡灾害防治需求。概括起来,国内针对工程滑坡综合防治技术的研究和实践,主要存在以下 4 方面的问题。

1) 缺少系统全面的国家滑坡防治技术指南

国内不同部门均有在工程建设领域涉及地质灾害防治技术的标准或规范,是工程建设施工技术标准或规范的部分内容,如水电工程、公路、铁路工程勘察设计规范等。目前,最为全面和权威的滑坡防治工程方面的标准为地质矿产行业标准《滑坡防治工程设计与施工技术规范》,缺少专门针对重大工程扰动区特大滑坡灾害防治的技术标准或指南。

2) 滑坡治理方案的集成与优化对比有待深入

滑坡防治技术的不断进步,使得人们在防治措施的选择上有更多的空间,然而在滑坡防治实践中,人们往往趋向于一种防治措施单独使用作为主体工程,缺乏优化对比分析和有效(程序化检验而不是经验)检验,不能根据滑坡的实际地质条件,因地制宜,使用多

技术的集成,充分发挥各防治措施的优势,对比选择相对优化的集成技术方案。

3) 缺少国家层面早期识别与风险评估技术标准

国际上滑坡灾害的防治已逐步从减轻灾害危险性走向减轻灾害风险与加强综合减灾软硬兼施的滑坡综合防治技术体系,尤为重视早期识别、风险评估与管理等技术方法的研究。如在地质灾害风险评估方面,目前还缺少国家层面的技术规范或标准,目前开展的地质灾害危险性与风险评估的成果多是概略性的成果,与社会经济发展对地质灾害风险管理的期待相比还相差甚远。

4) 缺少重大工程扰动区特大滑坡灾害防治技术信息交流平台

国内重大工程扰动区特大滑坡灾害防治技术研究,分别在国土资源部、铁路、公路、水电工程和城镇建设中取得很多显著进展,为国家减灾防灾和大规模工程技术作出了重大贡献,但是,相关信息交流缺乏比较畅通的平台,阻碍了重大工程扰动区特大滑坡灾害综合防治理论与技术方法体系的快速发展,急需从国家层面上系统总结不同行业、不同部门在重大工程扰动区特大滑坡灾害防治技术方面的成功经验、失败教训,建立相关数据库和信息交流平台,为全国推广应用新技术新方法,主动减轻重大工程扰动区特大滑坡灾害提供技术支撑。

1.3 综合防治研究思路

1.3.1 总体思路

本书总体研究思路:针对重大工程扰动区特大滑坡灾害特点,重点开展三峡库区、黄土城镇区、西南强烈构造活动区重大交通干线工程扰动区特大滑坡灾害形成机理与成灾模式研究、主动减灾防灾理论与技术方法研究、重大工程扰动区特大滑坡灾害前期识别与风险评估研究、综合防治技术方法集成优化研究、防治工程时效性和实用性数值模拟研究以及快速防治工程技术和特色新技术方法探索研究,结合三峡库区大型滑坡灾害防治工程技术示范、黄土城镇化工程扰动特大滑坡综合防治技术示范和川藏公路干线扰动区特大滑坡灾害防治技术与示范,集成研究重大工程扰动区特大滑坡灾害防治技术指南,为国家不同类型重大工程扰动区特大滑坡灾害综合防治工作提供技术支撑。主要研究内容包括以下5个部分。

1) 重大工程扰动区特大滑坡综合防治理论与技术方法研究

开展不同类型重大工程(黄土城镇、水电工程、交通干线)扰动区不同地质环境条件下(黄土高原、西南深切河谷区、西南高山峡谷区)典型滑坡的变形破坏机制分析(高边坡应力调整、长期时效变形、动荷载、蠕变等),建立工程地质力学模型,利用数值模拟与物理力学模型开展工程营力与降雨、地震耦合作用下特大滑坡灾害的成灾模式研究;有效预防、快速治理和主动减轻重大工程扰动区特大滑坡灾害技术方法研究;通过锚固效应和支挡结构的力学效应的数值物理模拟试验,对支护结构与岩土体之间的相互作用机理进行模拟和分析,为优化防治工程措施的设计参数提供科学依据。在系统