

岩溶山区特大崩滑灾害 成灾模式与早期识别研究

李 滨 冯 振 张 勤 赵超英 闫金凯 等 著



科学出版社

岩溶山区特大崩滑灾害成灾模式 与早期识别研究

李 滨 冯 振 张 勤 赵超英 闫金凯 等 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书对我国西南岩溶山区特大崩滑灾害的成灾模式与早期识别进行了深入的研究,介绍了最新理论研究成果。全书共八章,涉及岩溶山区特大崩滑灾害发育特征、破坏机制与成灾模式、稳定性评价、高速远程滑坡碎屑流动力学分析、灾害监测预警和危险区划方法等。开展了岩溶山体典型崩滑基本类型、形成地质环境与发育特征分析,采用大型物理模型试验、数值模拟、力学数学解析、运动学分析等技术方法,提出了近水平层状、斜倾厚层状、陡倾层状三类灰岩山体崩滑失稳模式和地质力学评价模型,研究了大型崩滑灾害启动后高速远程动力学分析模型与方法,探索了InSAR技术、GPS技术、LiDAR技术、地面三维激光扫描技术在复杂山区的适用性问题,并建立了典型灾害监测示范。

本书图文并茂,理论与实践相结合,可供广大从事地质灾害防治、工程地质、岩土工程、环境地质、城镇建设等领域的科研和工程技术人员参考,也可供有关院校和科研机构的广大教师、科技人员、研究生等参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

岩溶山区特大崩滑灾害成灾模式与早期识别研究/李滨等著. —北京:科学出版社, 2016. 9

ISBN 978-7-03-049855-7

I. ①岩… II. ①李… III. ①岩溶区-山区-土崩滑塌-地质灾害-灾害防治-研究 IV. ①P694

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 214894 号

责任编辑: 张井飞 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 耕者设计工作室

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 9 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 9 月第一次印刷 印张: 17 1/4

字数: 403 000

定价: 169.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

本书其他作者

(按姓氏笔画排序)

王 利	王 磊	王文沛	王国章	王晨辉
邢爱国	朱 武	朱赛楠	刘朋飞	李德均
张天贵	贺 凯	高 杨	褚宏亮	潘利宾

序

西南岩溶山区山体多呈现出中上部厚层—巨厚层灰岩地层陡峭，下部页岩、泥岩地层平缓的“靴状”地貌形态，加之下部煤层、铝土矿层的开采普遍，成为我国特大岩质崩滑灾害的高发区，发生过多起灾难性崩滑灾害，造成重大人员伤亡。岩溶山区大型崩滑灾害地质结构与灾害链动力过程复杂，地质模型概化、早期识别与空间预警预测难度大，防范岩溶山区特大崩滑灾害造成的群死群伤事故是减灾防灾的重中之重。

近年来，李滨博士等针对岩溶山区特大崩滑灾害成灾模式与早期识别等关键科学问题，开展了山体典型崩滑基本类型、形成地质环境与发育特征分析，结合模型试验、数值模拟、力学分析等技术方法，提出了多种岩溶山体崩滑失稳模式和地质力学评价模型，探索了大型崩滑灾害启动后高速远程动力学分析模型与方法，研究了InSAR技术、GPS技术、LiDAR技术、地面三维激光扫描技术在复杂山区的适用性问题，并建立典型灾害监测示范。研究成果积极服务于山区城镇重大地质灾害减灾防灾工作，发挥了很好的支撑作用，一批年轻骨干也在服务于国家重大需求中成长起来了。

本书理论与实践相结合，介绍了我国西南岩溶山区特大崩滑灾害成灾模式与早期识别的最新理论研究成果，也将推动特大型岩质滑坡的早期识辨方法、监测预警技术、风险评估技术的研究更上一层楼。我非常乐意为本书作序，希望作者持之以恒，取得更加丰硕的成果。

国际滑坡协会主席



2016年7月

前 言

云贵高原东南部岩溶山区位于中国地形第二级阶梯向第三级阶梯的过渡带,地质环境复杂,人类工程活动强烈,是我国特大碳酸盐岩崩滑灾害的高发区,发生过大量灾难性崩滑灾害,造成了重大人员伤亡。岩溶山区大型崩滑灾害不仅体积大,地质结构复杂,地质模型难以概化,早期识别与监测预警能力差,而且灾害链后破坏动力过程复杂,导致空间预测难度加大,群死群伤灾难仍不断发生。因此,如何防范岩溶山区特大崩滑灾害造成的群死群伤事故,是该地区减灾防灾的重中之重。

针对岩溶山区特大崩滑灾害成灾模式与早期识别等关键科学问题,作者团队开展了碳酸盐岩山体典型崩滑基本类型、形成地质环境与发育特征分析,结合大型物理模型试验、数值模拟、力学数学解析、运动学分析等技术方法,提出了近水平层状、斜倾厚层状、陡倾层状三类碳酸盐岩山体崩滑失稳模式和地质力学评价模型,探索了大型崩滑灾害启动后高速远程动力学分析模型与方法,研究了 InSAR 技术、GPS 技术、LiDAR 技术、地面三维激光扫描技术在复杂山区的适用性问题,并建立了典型灾害监测示范。在上述成果总结梳理基础上形成本书,以期为岩溶山区特大崩滑灾害早期识别与监测提供科技支撑。

本书共分八章内容,具体内容与主要研究人员如下:

第1章集成总结了岩溶山区的典型地质灾害破坏模式与发育特征,提出了滑移顺层滑坡、斜倾视向顺层滑坡、逆向层状倾倒崩滑、压裂-溃屈崩塌和滑移-拉裂崩塌等主要地质灾害类型。本章由李滨、冯振、张天贵、潘利宾等执笔。

第2章系统分析了近水平层状高陡危岩压裂溃屈崩塌破坏机理,提出了塔柱状危岩崩塌底部岩体损伤劣化的力学模型。本章由贺凯、冯振、王文沛等执笔。

第3章验证了斜倾厚层灰岩山体“后部块体驱动-前缘关键块体瞬时失稳”视倾向滑动地质力学模型,分析了碳质页岩的矿物成分、物理特性与强度特性以及与大型崩滑灾害的关系。本章由冯振、李滨、闫金凯、朱赛楠等执笔。

第4章系统分析了地下采矿诱发陡倾层状横向斜坡倾倒崩滑的失稳机理,提出了倾倒破坏-剪切滑移的力学分析模型。本章由李滨、王文沛、王国章、冯振等执笔。

第5章系统研究了岩溶山区高速远程滑坡碎屑流的运动堆积特征,从动力学角度揭示了高速远程滑动的原因。本章由邢爱国、高杨、王国章、冯振、李滨等执笔。

第6章开展了岩溶山区城镇地质灾害调查与危险区划,探讨了机载激光雷达技术在复杂地质环境条件下地质灾害早期调查、排查与识别工作中的适用性,提出了基于成灾机理的羊山区场镇地质灾害危险性定量评价。本章由王磊、褚宏亮、李滨、冯振、贺凯、高杨等执笔。

第7章开展了岩溶山区地质灾害 InSAR 调查与识别技术方法研究,介绍了大范围地质

灾害的调查识别和监测的技术路线与方法。本章由张勤、赵超英、王利等执笔。

第8章开展了岩溶山区典型地质灾害监测示范工作,提出GPS实时动态定位技术在灰岩山区特大地质灾害进行动态变形监测的技术方法。本章由张勤、王利、赵超英、褚宏亮等执笔。

全书由李滨、冯振统稿完成。

本专著的成果是在国土资源大调查项目(1212011220140、12120114079101)、国家自然科学基金项目(41302246、41472295)、“十二五”科技支撑专题(2012BAK10B01-03)等项目资助下完成的。

在本书撰写过程中,特别感谢国土资源部地质灾害应急技术指导中心殷跃平研究员的指导,为研究倾注了大量心血,无私的为作者提供技术指导,培养青年人成长。

在本书撰写过程中,感谢中国地质调查局文冬光研究员、张作辰研究员、郝爱兵研究员、李铁锋研究员、李晓春研究员、石菊松研究员、曹佳文博士对本书的指导,并给予了宝贵的意见。感谢国家自然科学基金委熊巨华研究员给予本项研究的帮助。感谢重庆市国土与房屋管理局彭光泽处长、马飞处长、黎力处长、王磊处长等和武隆县、南川区国土与房屋管理局、重庆市高新工程勘察设计院有限公司等给予了多方面的指导和帮助。感谢长安大学彭建兵教授、范文教授、李喜安教授、门玉明教授、郑书彦教授、祁晓丽高工、张惠霞高工的帮助。感谢长江水利委员会长江科学院龚壁卫教授、胡波博士、李波博士,山东大学李术才教授、薛翊国教授、张乐文教授、宁凯硕士,中国科学院地质与地球物理研究所李晓研究员、李守定研究员和香港科技大学吴宏伟教授等为本项研究提供了先进的试验条件和技术帮助。感谢黄波林研究员、高幼龙研究员、张楠博士、赵瑞欣博士、祁小博高工、徐永强博士、王洪工程师、闫慧工程师、杨飞工程师等的帮助。借此机会,特向对本项研究提供帮助、支持和指导的所有领导、专家和同行表示衷心的感谢!

本书完成之际,作者尤其感谢中国地质科学院地质力学研究所的龙长兴研究员、徐勇研究员、赵越研究员、侯春堂研究员、马寅生研究员、余佳处长、康艳丽高工、冯卉高工、张学科工程师给予本项研究的帮助;感谢吴树仁研究员、张永双研究员、谭成轩研究员、张春山研究员、杨为民研究员、石玲研究员、张鹏博士、姚鑫博士、王涛博士、郭长宝博士、孙萍博士、辛鹏博士等给予的野外工作指导和技术支持。

本书凝聚了全体执笔作者和参研人员的共同心血,在完成之际,特向大家致以衷心的感谢。

由于学术水平所限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2016年7月于北京

目 录

序	
前言	
绪论	1
0.1 研究背景	1
0.2 国内外研究现状	2
0.3 工作思路	5
0.4 主要成果	6
第1章 岩溶山区典型崩滑灾害的发育特征	9
1.1 岩溶山区崩滑灾害地质发育特征	9
1.1.1 研究区地质背景	9
1.1.2 工程地质岩组与特性	10
1.1.3 水文地质结构特征	16
1.2 典型崩滑灾害变形破坏模式	17
1.2.1 斜倾层状山体崩塌滑坡-碎屑流	17
1.2.2 陡倾逆向层状滑坡-碎屑流	19
1.2.3 层状岩质斜坡崩塌	19
1.3 崩滑灾害形成条件与影响因素	22
第2章 近水平层状高陡山体崩塌失稳机理研究	25
2.1 岩溶山区近水平层状高陡危岩变形破坏特征	26
2.1.1 重庆望霞危岩变形破坏特征	26
2.1.2 贵州鱼洞村危岩变形破坏特征	29
2.1.3 重庆甄子岩危岩变形破坏特征	31
2.2 近水平层状高陡危岩压裂溃屈机理分析	36
2.2.1 甄子岩崩塌运动特征分析	36
2.2.2 甄子岩崩塌破坏机理	42
2.3 近水平层状高陡危岩压裂溃屈的力学机制	43
2.3.1 力学解析与稳定性评价	44
2.3.2 甄子岩危岩崩塌算例分析	47
2.4 近水平层状高陡危岩压裂溃屈数值分析	48
2.4.1 有限差分模型的建立	48
2.4.2 模型参数选取	49

2.4.3	数值模拟结果与分析	49
2.4.4	地下采空模拟	54
2.5	近水平层状高陡危岩压裂溃屈的离心模型试验	56
2.5.1	土工离心模型试验原理	56
2.5.2	甌子岩塔柱状危岩崩塌试验方案	57
2.5.3	模型制备与监测	58
2.5.4	试验结果分析	60
2.6	近水平层状高陡山体压裂溃屈崩滑早期识别特征	65
2.7	小结	65
第3章	斜倾厚层岩质滑坡视向滑动机理研究	67
3.1	斜倾厚层岩质滑坡发育特征	67
3.2	斜倾厚层岩质滑坡历史形变特征	70
3.3	斜倾厚层岩质滑坡主控因素强度特征	74
3.3.1	软弱夹层的演化特征	75
3.3.2	软弱夹层流变特性	85
3.4	斜倾厚层岩质滑坡土工离心模型试验	88
3.4.1	试验过程	88
3.4.2	块体位移分析	89
3.4.3	裂缝监测分析	89
3.4.4	滑坡过程分析	90
3.5	斜倾厚层岩质滑坡视向滑动的三维离散元模拟	92
3.5.1	模型建立与参数选择	92
3.5.2	重力作用下的长期缓慢滑移变形模拟	93
3.5.3	地下采空情况模拟	95
3.5.4	软弱夹层软化模拟	96
3.6	小结	97
第4章	陡倾层状岩溶斜坡崩滑失稳模式研究	99
4.1	陡倾层状斜坡破坏特征分析	99
4.1.1	鸡冠岭崩滑地质环境背景	102
4.1.2	鸡冠岭陡倾层状斜坡特征	109
4.1.3	鸡冠岭斜坡破坏模式	111
4.2	陡倾层状斜坡破坏的离心模型试验	112
4.2.1	离心模型	112
4.2.2	试验结果及分析	114
4.3	陡倾层状斜坡变形三维有限元数值模拟	116
4.3.1	数值模型	117
4.3.2	材料参数	118
4.3.3	地下采矿情况	119

4.3.4	自然状态下陡倾层状斜坡变形特征	121
4.3.5	地下采空诱发陡倾层状斜坡崩塌的过程分析	122
4.4	陡倾层状斜坡极限平衡解析	134
4.4.1	层状斜坡倾倒破坏二维极限平衡分析	134
4.4.2	层状岩体倾倒破坏三维受力分析	138
4.4.3	鸡冠岭山体稳定性极限平衡分析	140
4.5	陡倾层状斜坡失稳早期识别特征	145
4.6	小结	147
第5章	岩溶山区崩滑碎屑流动力致灾特征分析	149
5.1	高速远程滑坡碎屑流动力学分析	149
5.1.1	高速远程滑坡碰撞运动特征	150
5.1.2	碰撞理论	153
5.1.3	等效流体理论	159
5.2	高速远程滑坡碎屑流碰撞铲刮灾害链	163
5.2.1	鸡冠岭崩滑碎屑流基本特征	163
5.2.2	鸡冠岭崩滑碎屑流动力特性模拟	169
5.3	高速远程滑坡碎屑流液化效应	177
5.3.1	贵州关岭岗乌高速远程滑坡-碎屑流	177
5.3.2	云南镇雄赵家沟高速远程滑坡-碎屑流	183
5.4	小结	193
第6章	岩溶山区城镇地质灾害危险区划	194
6.1	羊角场镇高精度机载激光雷达调查	194
6.1.1	调查方案	194
6.1.2	数据处理与分析	195
6.2	羊角场镇地质灾害发育特征	198
6.2.1	羊角场镇地质灾害基本类型	199
6.2.2	羊角场镇滑坡发育特征	199
6.2.3	羊角场镇危岩崩塌发育特征	201
6.3	羊角场镇地质灾害危险区划	205
6.3.1	大巷危岩失稳运动过程分析	205
6.3.2	基于 DAN 动态数值模拟技术的羊角场镇危险区划	211
6.4	小结	213
第7章	岩溶山区地质灾害 InSAR 调查与识别	214
7.1	基于遥感技术的地质灾害调查	214
7.1.1	高相干点 InSAR 滑坡识别技术	216
7.1.2	超短基线集 InSAR 时间序列监测技术	217
7.2	区域地质灾害动态调查与识别	219
7.2.1	羊角场镇秦家院子滑坡	222

7.2.2	碑垭乡大路边滑坡	224
7.2.3	土坎镇五龙村滑坡	225
7.2.4	羊角艳山红村堰湾滑坡	226
7.3	小结	228
第8章	岩溶山区典型地质灾害监测示范	229
8.1	重庆武隆羊角场镇地质灾害监测预警示范	229
8.1.1	危岩体 GPS 高精度监测技术路线	229
8.1.2	危岩体 GPS 和 InSAR 监测网的布设	230
8.1.3	羊角场镇滑坡危岩体 GPS 静态监测结果及分析	231
8.1.4	羊角场镇滑坡危岩体 GPS 实时动态监测结果及分析	236
8.1.5	羊角场镇危岩体 InSAR 监测结果	240
8.2	重庆南川甑子岩大型危岩体 GPS 动态变形监测	241
8.2.1	甑子岩危岩体 GPS 高精度监测技术路线	241
8.2.2	甑子岩危岩体 GPS 高精度监测技术方案	241
8.2.3	甑子岩危岩体 GPS 实时动态监测结果及分析	243
8.3	重庆武隆鸡冠岭北侧危岩三维激光扫描监测示范	245
8.3.1	危岩三维激光扫描监测	246
8.3.2	三维激光扫描技术优势及局限性	248
8.4	小结	249
主要参考文献		250

绪 论

0.1 研究背景

受燕山运动的影响,我国西南岩溶山区多形成 NNE—NE 走向的褶皱山体,经长期强烈的抬升运动与河流侵蚀,褶皱的两翼及核部山体呈现出中上部厚层—巨厚层碳酸盐岩地层陡峭,下部页岩、泥岩地层平缓的“靴状”地貌形态,加之下部煤层、铝土矿层的开采,成为我国大型层状岩质崩滑灾害的高发区,发生过多起重大灾难性崩滑灾害,给山区居民生命财产与国家重大工程安全带来巨大的损失和隐患。近年来,由于极端气候与人类工程活动的加剧,重庆、云南、贵州等岩溶山区的重大崩滑地质灾害仍频繁发生,如表 0.1 所示。这些大型崩滑灾害不仅体积大、地质结构与模型复杂、早期识别难度大,而且灾害孕育形成与启动力学机制研究不足,后破坏动力过程复杂,导致空间预测难度大,群死群伤灾难仍不断发生。

表 0.1 我国岩溶山区典型特大崩滑灾害实例

典型崩滑灾害名称	时间	体积/万 m ³	伤亡或财产损失
重庆武隆鸡冠岭崩塌	1994. 04. 30	400	造成 36 人伤亡,乌江断航 90 余天
贵州印江岩口滑坡	1996. 09. 18	180	形成了 3900 万 m ³ 堰塞水库,淹没了上游郎溪镇和 1 个电站,造成 5 人死亡,直接经济损失 1.5 亿元
贵州纳雍岩脚寨崩塌	2004. 12. 03	0. 4	死亡 44 人
重庆武隆鸡尾山滑坡	2009. 06. 05	700	74 人死亡,掩埋了 12 户民房及铁矿矿井
贵州关岭大寨滑坡	2010. 06. 28	175	造成岗乌镇大寨村两个村民组 99 人死亡
重庆巫山望霞危岩	2010. 08	10	造成长江航道多次封航
贵州凯里渔洞村崩塌	2013. 02. 18	17	造成 5 人死亡
云南镇雄赵家沟滑坡	2013. 01. 11	40	造成 46 人死亡

调查分析发现,这些大型崩滑灾害多发于上硬下软、上陡下缓的“二元结构”山体,上部为厚度大于 100m 的二叠—三叠系灰岩、白云岩,夹 4~6 层薄层状碳质或泥质页岩,下部为志留系页岩、粉砂质页岩,临空条件好,河谷深切。此外,二叠—三叠系厚层灰岩中存在着多套含煤、铁或铝土矿地层,数百年来一直沿江和沟谷两岸开采,并且随着经济建设的全面发展,矿层开采规模和范围不断扩大,形成大面积采空区,加速了地表的沉陷与岩体开裂。此类山体失稳后,较大的势能向动能转化,极易形成高速远程碎屑流,造成

严重的损失。因此，亟待开展岩溶山区典型崩滑灾害的变形特征、失稳机理和监测预警研究，为岩溶山区地质灾害早期识别与预警预报提供依据。

0.2 国内外研究现状

大型岩质滑坡是世界很多山区的主要地质灾害类型，其体积大、运动速度快、堆积范围广、破坏性大，经常造成严重的人员和经济损失，是国际滑坡界研究的热点与难点问题，其研究与失稳过程密切相关，一般分为三个方面——初始变形破坏、高速远程滑动、散布堆积。

1. 大型岩质滑坡的基本分类

岩质斜坡破坏分类较多，多根据失稳特征与模式进行分类。如 Hoke 和 Bray (1974) 将岩质斜坡分为平面破坏、楔形体破坏、圆弧形破坏、倾倒破坏四种类型；Varnes (1978) 将岩质滑坡分为六大类：崩塌、倾倒（块体和柔性）、滑动（旋转和平面）、侧向扩张、流动（蠕滑和深部蠕滑）、复合型（高速远程滑坡和泥石流），该分类标准后被国际工程地质协会作为国际标准采纳。但大型岩质滑坡变形及破坏过程是一个多相、多阶段力学变化过程，不仅包括初始变形破坏，还包括复杂的后破坏过程，并形成超乎想象的高速远程碎屑流，破坏力巨大。因此，2002 年在意大利切拉诺召开的北约“特大型岩质滑坡：灾害评估新方法”高级研讨会上，首次提出大型岩质滑坡（Massive Rock Slope Failure）这一概念，并系统地特大型岩质滑坡的研究内容、发展方向进行了阐述，为大型岩质滑坡研究奠定了基础（Evans et al., 2006）。之后，众多国际知名专家按照特大型岩质滑坡初始失稳模式为主、滑坡形态及运动特性为辅的原则对其类型进行了重新划分。目前，Hungr 和 Evans 的特大型岩质滑坡八种分类基本取得共识（Hungr and Evans, 2004a; Hungr et al., 2013），包括旋转滑动、崩塌、滑动（平面和楔形体）、结构控制复合型滑动、坡趾突破型滑动、复合型滑动、弯曲倾倒、块体倾倒（表 0.2）。按照这个分类标准，不难看出我国西南岩溶山区山体的变形属于硬岩变形，其破坏往往是灾难性的。

表 0.2 大型岩质滑坡基本类型（Hungr and Evans, 2004a）

结构面控制	主要的变形机制	结构面控制					
		不受结构面控制	滑动			倾倒	
			平移滑动	复合式		弯曲	块体
				无约束	前缘阻滑 后缘裂缝控制		
运动机制	前缘受阻						
失稳类型	A 旋转滑动， B 崩塌	C 平面滑动、 楔形体滑动	D 结构控制 复合型滑动	E 坡趾突破 型滑动	F 复合型 滑动	G 弯曲 倾倒	H 块体 倾倒
软岩中的 变形特征	A 变形缓慢， 旋转滑动	灾难性的	—	变形缓慢	变形缓慢	变形 缓慢	—
硬岩中的 变形特征	B 坡型陡，下 挫，灾难性的	灾难性的，初始 破坏变形小	灾难性的，初始 破坏变形大	灾难性的	—	—	灾难 性的

2. 大型岩质滑坡失稳机理研究

大型岩质滑坡虽然概念提出较晚,但其失稳破坏机理研究较早,其触发因素很多,包括暴雨、冰雪融化、地震、库水波动等。1963年举世闻名的意大利瓦伊昂滑坡是特大型岩质滑坡的经典范例,也推动了全球滑坡灾害的研究。以Müller为代表的诸多专家对瓦伊昂滑坡进行了系统的研究,通过地质调查、水文与工程地质勘查,确定了滑坡的滑面位置、形状、地质结构及物理力学参数,对滑带土进行了系统的物质成分、物理特性及环剪强度试验等工作,提出滑面及其以下的承压水层及后缘陡直拉裂缝的静水压力降低了瓦伊昂滑坡的稳定,结合物理模型试验,对滑坡破坏过程的力学特性进行了研究,利用解析解分析岩体的层状结构抗滑作用、节理的摩阻力、滑带的抗剪强度以及岩层渗透性对滑坡力学机制的影响,提出了拟静态的滑坡滑动过程经验计算方法(Müller, 1964, 1968, 1987a, 1987b; Rossi and Semenza, 1965; Broili, 1967; Hendron and Patton, 1985; Tika and Hutchinson, 1999; Semenza and Ghirotti, 2000; Petley and Petley, 2006); 1987年Müller对瓦伊昂滑坡的研究进展进行了总结,涉及滑坡的初始破坏、蠕滑、渐进破坏的过程及特点,以及众多研究者的成果、观点、各种分析研究方法的利弊,成为大型岩质滑坡研究的经典案例。此外, Glastonbury 和 Fell (2000) 综合研究了51个自然高速岩质滑坡,分析滑坡的特点、成因与失稳破坏机理,提出了高速岩质滑坡的识别特征。Schuster等(2002)对20世纪北美地区的23个特大型岩质滑坡成因、破坏机理及高速碎屑流效应进行了研究。诸多学者提出了不同山区岩质滑坡的失稳机理,如Voight等(1981)分析认为地震动是大型岩质高速远程滑坡岩体脱离基岩发生滑动的关键成因; Eisbacher 和 Clague (1984) 认为人类活动与气候变暖不断加剧阿尔卑斯山区大型山体变形; Vardoulakis (2000) 认为摩擦生热导致剪切带内孔隙水压增大,有效应力降低,从而摩擦角极低,导致滑坡发生, Goren (2007)、Goren等(2009)通过数值模拟验证了这一过程。

我国西南山区是特大型岩质滑坡高发区,国内研究处在较高的水平。谷德振(1979)从地质体的形成与演化过程出发,采用地质力学分析岩体形成与演变,利用岩体力学分析岩体斜坡的变形破坏机制;以此为基础,孙广忠(1988)通过岩体结构力学系统分析了斜坡岩体的力学破坏机制。张倬元等(1994)讨论了各类岩质斜坡的形成与演化过程,提出蠕滑-拉裂、滑移-压致拉裂、滑移-拉裂、滑移-弯曲、弯曲-拉裂、壅流-拉裂等多种斜坡失稳破坏模式;黄润秋(2012)系统提出了岩质高边坡的滑移-拉裂-剪断、“挡墙”溃屈、阶梯状蠕滑-拉裂、弯曲-倾倒、压缩-倾倒、强卸荷-深拉裂等变形破坏机理。此外,还有很多学者通过地质调查、室内外试验、数值分析、模型试验、力学分析等方法对大型岩质崩滑灾害进行过研究,如张缙(1980)提出的临床峰残强度差别与势动能转化高速启程机理;胡广韬等(1995)提出的临床弹性冲动、坡体波动震荡、临床峰残强降和滑体势动能转化理论;胡厚田(1989)提出五种崩塌模式;殷跃平(2004)、伍法权(2010)等提出的三峡库区高边坡失稳模式等。这些研究成果极大推动了我国地质灾害的防灾减灾工作。

2009年6月5日,重庆武隆铁矿乡鸡尾山发生特大型岩质滑坡,形成高速远程滑坡-碎屑流灾害,造成74人死亡,8人受伤的特大灾难。鸡尾山滑坡是典型单斜灰岩山体的失稳模式,即斜倾厚层岩质山体“后部块体驱动-前缘关键块体瞬时失稳”的视向滑动,这

类灾害在我国西南山区分布广泛,如长江三峡链子崖危岩、陕西山阳“8.12”山体滑坡。早在20世纪70年代,石根华(1981, 2006)采用集合理论和岩体结构相结合的方法,提出了岩体稳定的关键块体数学判据理论;Goodman和Shi(1981)认为加固首先产生位移的块体容易控制滑坡稳定性,这一块体称为关键块体;Hoek和Bray(1974)在研究厚层板状岩体倾倒变形破坏时,提出了“塞缝石”的概念,强调关键块体对整个岩体稳定的控制作用;刘传正等(1995a)、柳源(1999)等以链子崖危岩为例,提出了山体崩滑的视滑力概念;殷跃平等(1995, 2000)、殷跃平(1997)在长江三峡链子崖危岩体预应力锚固工程设计中,提出了以关键块体为加固重点的思路与方法。

3. 大型岩质滑坡失稳后动力学研究

岩质滑坡失稳后的运动堆积过程及范围是灾害危险区划与风险评估的基础,然而这一过程极为复杂,涉及滑坡运动学与动力学机制的转换、体积与材料的变化等,大型岩质滑坡高速远程滑动机制成为国内外的研究热点问题。研究成果包括:通过滑坡案例调查与数理统计分析,提出了滑坡滑距的预测公式(Scheidegger, 1973; Evans et al., 2006);通过数学分析,提出了各类高速远程的运动模型,如国外学者的空气润滑模型(Kent, 1966; Shreve, 1966)、颗粒流模型(Bagnold, 1968; Davies, 1982)、能量传递模型(Eisbacher, 1979; Davies et al., 1999; Davies and Mcsaveney, 1999)、底部超孔隙水压力模型(Sassa, 1988; Evans et al., 2001)、基底铲刮效应(Hungr and Evans, 2004a, b; Gauer and Issler, 2004; Barbolini et al., 2005; McDougall and Hungr, 2005)等;国内学者殷跃平(2009)认为高速远程滑坡在运动过程中的具备气垫效应、铲刮效应、流化效应和液化效应;卢万年(1991)、程谦恭等(1999)、邢爱国(2002)等认为气垫擎托持速效应是高速远程滑动的原因;程谦恭等(1997)、刘涌江(2002)、何思明等(2008)、李祥龙等(2012)提出了高速远程运动过程中的碰撞效应。上述研究极大提高了高速远程滑坡运动距离的理论判断依据。

4. 溶蚀岩体强度及水力学作用研究

由于溶洞、溶隙、溶孔、管道等岩溶现象的存在,造成岩溶岩体强度降低而诱发山体崩滑灾害在岩溶山区普遍存在。岩体强度不仅取决于岩石强度,还受岩体结构控制(谷德振, 1979; 孙广忠, 1988)。对于可溶性岩体,岩溶作用不仅使岩体矿物成分发生变化,而且岩体结构面也不断发生变化,宏细观结构面加宽和变长,岩体结构由层状块裂发展为碎裂甚至散体,强度随之降低。溶蚀岩体试验表明,溶蚀风化带的抗剪断峰值强度约为完整岩体抗剪断峰值强度的30%~40%(付兵, 2005)。目前,试验是描述岩体结构力学性质与获取岩体强度参数最直接的方法,但试验受各种条件及技术等的限制,并不能完全真实反映岩体的力学参数。国内外应用最为广泛的岩体强度参数选取方法,是Hoek等(Hoek et al. 2002; Hoek and Marinos, 2007)提出的基于GSI的Hoek-Brown估算经验判据,但仍然存在主观性较大和缺乏量化等缺点,有数据表明极少数的原位试验与Hoek-Brown强度准则估算结果一致(Pells, 2008)。近年来,计算机的快速发展,工程地质调查、室内力学实验和数值模拟方法相结合的多手段综合分析成为岩体强度参数研究的趋势,并逐渐替代各种大型岩体强度参数试验。

目前,岩溶岩体的研究多集中于岩溶成因、岩溶通道形态与地下水运移规律方面,对

溶蚀岩体强度特性与强降雨时水力学作用研究甚少。利用高性能计算机,溶蚀岩体物理力学参数取值研究经历了经验法—半经验法—精度较差的数值计算—精度较好复杂工况的数值分析的发展过程(张社荣等,2012);溶孔的模拟由以往的确定性方法向随机和模糊结构模型转变,更为客观真实地描述和模拟溶蚀特征(陈祥军等,2004;张菊明等,2005);水力学作用是改变溶蚀岩体力学性质的一个重要因素,溶蚀岩体具有岩溶管道—裂隙—孔隙三重空隙介质特征,暴雨时体现出水位及水压力急剧变化的特性。对溶蚀岩体水力学的研究内容主要聚焦在渗透介质模拟(陈崇希,1995;Király,2003;Sauter et al.,2006;仵彦卿,2009)、岩溶水运动方式(Charlier et al.,2012)、渗漏评价(Fleury et al.,2007)等方面。一些学者指出岩溶山体大型崩塌灾害边界具有显著的管道溶蚀现象,岩溶地下水动力作用对山体稳定性有较大的影响(Colley,2002;Santo et al.,2007;Frayssines and Hantz,2009;Parise,2010)。但是,目前由于岩溶的复杂性,溶蚀岩体地质力学模型、溶蚀体的力学分析与数值模拟、岩溶地下水动力作用与斜坡失稳的耦合机制的研究非常少,如何科学、合理的开展工作仍然是难点问题。

5. 软弱夹层对山体稳定性的影响

岩质斜坡的软弱夹层往往是大型滑坡的滑带层,其演化过程、强度特性、孔隙水压、水岩相互作用、矿物成分等内容一直是滑坡研究的热点。谷德振(1979)、孙广忠(1988)指出褶皱运动是岩体形成层间错动带的重要地质作用,这一过程使得软岩从原岩逐渐变化为层间剪切带、泥化夹层,地下水的作用也使其矿物成分出现变化。此外,诸多专家都对西南地区大型滑坡的侏罗系红层、泥岩等软层、泥化夹层进行过系统研究,很好地解释了大型滑坡的演化过程(任光明等,1996;任光明、聂德新,1997;李守定等,2006)。

6. 大型岩质滑坡研究的发展动态分析

大型岩质滑坡不仅体积大,初始破坏失稳模式复杂,且滑动过程中,受地形地貌、岩石物性等的因素控制,往往转变为高速远程碎屑流、泥石流等。结合国内外的研究现状发现,目前大型岩质滑坡的研究趋向于以下四个方面:

- (1) 进一步改进细化特大型岩质滑坡的分类;
- (2) 开展特大型岩质斜坡的失稳前兆及识别特征研究,包括地震、降雨诱发因素分析,初始破坏过程中滑带的力学演化机制,滑带与结构面水岩耦合作用对滑坡变形及滑动特性的影响;
- (3) 结合多手段分析获取地质模型,研发精确的物理模型、数值模型分析斜坡失稳;
- (4) 滑坡失稳后滑体解体的碰撞力学特征、滑坡向碎屑流或泥石流转化的动力学机制,如何利用颗粒流、粉碎模型模拟运动过程,更系统化、科学化、方法多样化地预测滑坡的滑距,提出具有普遍和推广意义的预测方法。

0.3 工作思路

本研究紧密围绕西南岩溶山区大型崩滑灾害成灾模式研究中的关键科学问题,以乌江

流域武隆县、南川区为研究区,在地质灾害详细调查、勘查与测绘的基础上,查明岩溶山区大型崩滑灾害的主要类型、形成地质环境、发育特征和破坏模式,结合控制大型崩滑灾害发生的软弱岩体物质成分与物理力学特性分析,利用大型物理模型试验、三维数值模拟、力学与数学解析、运动学分析等多技术方法,提出了近水平层状、斜倾厚层状、陡倾层状三类大型灰岩山体崩滑失稳模式和崩滑灾害启动后高速远程动力学分析模型,探索了植被茂密山区城镇地质灾害 InSAR 技术、GPS 技术、LiDAR 技术、地面三维激光扫描技术的适用性问题,并建立大型地质灾害动态监测与识别示范,获取危岩体和滑坡体的动态形变信息,为山区城镇与重大工程规划的地质灾害早期识别与安全评价提供科技支撑保障。

0.4 主要成果

1. 集成总结岩溶山区的典型地质灾害破坏模式与发育特征

受构造运动影响,厚层碳酸盐岩中山地貌区,山高坡陡、河谷深切,多发灰岩及白云岩等层状碳酸盐岩岩体崩滑灾害,山体失稳模式包括滑移顺层滑坡、斜倾视向顺层滑坡、逆向层状倾倒崩滑、压裂-溃屈崩塌和滑移-拉裂崩塌五类。

采用地质调查分析、运动学解析、物理模型试验、数值模拟等手段,初步建立了近水平高陡灰岩山体“坡脚压裂-整体溃屈”的失稳模式、斜倾厚层灰岩山体“后缘块体驱动-前缘关键块体剪断”的视倾向滑动失稳模式和陡倾层状横向斜坡“弯曲变形-滑移剪出”的失稳模式。

2. 系统分析了近水平层状高陡危岩压裂溃屈崩塌破坏机理

近水平层状高陡灰岩山体破坏以塔柱状危岩崩塌为主,其失稳破坏主要受陡倾构造节理裂隙与层面控制,岩溶作用使裂隙加宽变深,长期的地下水静动力加载、地下采空加速危岩变形,塔柱状底部岩体强度弱化,在上覆岩体产生压裂溃屈破坏。塔柱状危岩压裂溃屈崩塌初始失稳划分为低速启动—加速破坏—减速碰撞三个运动阶段,失稳从底部岩体溃屈破坏开始,呈现出由下至上、裂缝扩展、破坏传递、空中崩解的特点。

引入连续介质损伤力学理论,分析了塔柱状危岩底部岩体损伤演化过程,从损伤力学角度解释塔柱状底部岩体的强度劣化机制,并分析了塔柱状岩体失稳崩塌的力学模型,提出随损伤演化的塔柱状岩体稳定性计算分析方法。

试验模拟和数值分析显示长期重力作用、地下采空对危岩变形破坏特征与稳定性造成一定影响,底部岩体强度的降低是导致塔柱状岩体发生压裂溃屈崩塌的直接原因,地下采空造成山体不均匀沉降和变形,对危岩体的影响加大,甚至改变危岩体潜在失稳模式。

3. 验证了斜倾厚层灰岩山体视倾向滑动地质力学模型

针对斜倾厚层岩质滑坡视倾向滑动失稳模式,以重庆武隆鸡尾山滑坡为例,验证了斜倾厚层灰岩山体“后缘块体驱动-前缘关键块体剪断”的视倾向滑动地质力学模型。采用 InSAR 技术获取了鸡尾山滑坡前地表形变时间序列,揭示鸡尾山滑坡发生剧滑破坏之前,经历了长期的渐进变形过程,滑坡前两年最大水平位移量超过 50cm,表现出临滑前的前缘压裂。通过土工离心模型试验和离散元数值模拟,重现了鸡尾山滑坡全过程,验证了斜