

地质灾害过程模拟 和过程控制研究

黄润秋 许 强 著
陶连金 林 峰



科学出版社

www.sciencep.com

地质灾害过程模拟 和过程控制研究

王德胜 主编
张 磊 副主编



地质出版社
GEOLOGICAL PUBLISHERS

地质灾害过程模拟 和过程控制研究

黄润秋 许 强 陶连金 林 峰 著

国家杰出青年科学基金资助项目(项目编号:49525204)

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书将工程地质学对现象的研究与现代数学力学、测试试验技术及计算机科学有机地结合起来,探讨了应用于地质灾害评价、预测和防治的数值模拟理论、方法和配套的软件系统。全书分为三篇,共 14 章,第一篇主要介绍了复杂地质结构的三维可视化模型的建模技术、节理岩体块体模型的建立及稳定性分析,以及边坡二维地质模型的交互式建立及稳定性分析方法;第二篇系统地阐述了地质灾害过程模拟的基本原理和方法,包括边坡地质灾害全过程模拟的数学-力学理论及相关的模拟技术、考虑水-岩相互作用的数值模拟理论和方法、考虑震动荷载作用的数值模拟理论和方法以及考虑水-热-力三者相互作用的数值模拟理论和方法等;第三篇则通过典型实例说明如何运用地质灾害过程模拟与过程控制技术解决工程实践和地质灾害防治中的实际问题。

本书可供土建、地质、水利水电、冶金、公路、铁路等部门从事工程地质或岩土力学研究的科技人员,以及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

地质灾害过程模拟和过程控制研究/黄润秋等著. —北京:科学出版社, 2002

ISBN 7-03-010327-0

I. 地… II. 黄… III. ①地质灾害-过程-模拟-研究②地质灾害-过程控制-研究 IV. P51

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 020354 号

责任编辑:匡敏 责任校对:柏连海
责任印制:钱玉芬 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>

源海印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002年11月第一版 开本:787×1092 1/16

2002年11月第一次印刷 印张:18 1/2

印数:1-2 000 字数:433 000

定价:36.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

序

我国地域辽阔,人口众多,特殊的地域地质环境条件和日益活跃的人类工程活动使崩塌、滑坡等地质灾害频繁发生,造成国家财产和人民生命的重大损失。据统计,我国每年由各种地质灾害(不包括地震)造成的直接经济损失约达200~300亿元。因此,如何在经济建设的同时,合理地利用和保护人类赖以生存的地质环境,防止地质灾害的发生,是摆在地学工作者面前的一项艰巨任务,同时也是地质学家参与解决环境问题的一个重要切入点。

地质体是一个典型的开放系统,其结构和行为特征常表现出高度的复杂性和非线性。因此,研究地质灾害仅依靠单一的学科是不行的,需要将多个学科、多种手段及方法有机结合并相互交叉与渗透,才能对其成因机理、发展演化等作出准确的预测评价,由此制定出科学合理的防护措施。应该说,这是人们在经历了对地质灾害的长期探索后总结出来的基本认识。黄润秋教授等人所著的《地质灾害过程模拟和过程控制研究》一书,正是这一思想的具体体现。该书是作者在获得国家杰出青年科学基金资助期间所取得的重要研究成果之一,作者将地质学对现象的认识与岩体力学、数学力学、计算机科学以及现代模拟技术有机地结合起来,采用过程模拟手段尽最大可能地实现了地质体发展演化全过程的模拟,从而对复杂地质体的变形破坏过程、所代表的稳定性状态和未来的发展趋势作出科学的评价和预测,在此基础上,“因地制宜”、有针对性地制定地质灾害的控制措施。该书在复杂地质结构的地质建模理论与方法、三维可视化模型的建立、复杂地质结构、复杂地质过程、复杂介质性态及复杂地质环境的模拟与“仿真”等关键理论与技术方面,取得了具有突出创新意义的成果,建立了一套理论严谨、实际操作可行、适用性较强的分析方法,具有重要的学术价值和显著的工程意义,是工程地质领域一部优秀的学术著作。

作为地质灾害方面国内首部综合、系统的学术著作,我相信,该书的出版,将对提高我国地质灾害的防治水平具有重大的理论价值和实际意义。

中国科学院院士: 陳颀

2002年5月8日

前 言

我国西部地区总体上处于青藏高原的周边地带,青藏高原在第四纪期间的快速隆升,不仅奠定了这一地区高山峡谷的基本地貌形态和河谷的发育历史,而且也决定了这一地区地壳的内动力条件、新构造运动、地震活动、地壳浅表层改造、第四纪沉积和剥蚀以及降雨分布等的规律,从而导致这一地区崩塌、滑坡、泥石流和地震灾害频繁发生。因此,地质灾害发生的机理以及其防护和控制措施已成为工程地质学界近年来研究的主要领域和内容。

地球系统是一个具有高度复杂性的开放系统,地质体的发展演化具有明显的阶段性和时效性。因此,地质灾害的研究必须首先以地质学的观点、自然历史的观点来分析地质体变形破坏的原因以及其随时间发展演化的历史和阶段性,然后在此基础上,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,从而实现对地质体演变全过程的模拟,以达到对地质体变形破坏演变过程及其稳定性状态、未来发展趋势进行半定量乃至定量评价和预测的目的,进而制定出合理、优化的防治方案和措施,这便是我们成都理工大学工程地质研究所和“地质灾害防治与地质环境保护”国家专业实验室一直倡导的学术思想——地质过程机制分析与定量评价。本书旨在对上述学术思想,尤其是对地质过程定量评价方面,作进一步的发展和完善。

除第一章绪论外,全书正文内容分三篇,共14章。第一篇主要讲述了复杂地质结构建模理论与技术,包括构建地质体三维实体模型的理论和方法、节理岩体块体模型的建立与稳定性评价方法、边坡二维交互式模型的建模技术和稳定性评价方法,以及治理措施、计算机辅助设计方法。第二篇重点阐述了地质灾害过程模拟的一些基本理论与方法,具体包括水-岩耦合作用模拟理论与方法、岩体动力学过程模拟理论与方法、边坡水-热耦合作用模拟理论与方法以及复杂介质性态模拟理论与方法。第三篇为实例篇,主要以典型实例为基础,讲述了上述各种理论和方法在工程实践中的具体应用。

本书内容是国家杰出青年科学基金资助项目“崩滑地质灾害模拟预测理论及其应用”(项目编号:49525204)的研究成果之一,同时也得到了“九五”国家科技攻关项目“地质灾害过程模拟和过程控制研究”专题(编号:96-913-06-01)的资助。本书的第1、2、5、6、7、8、9、11章由黄润秋编著,陶连金、柴贺军、黄地龙、徐则民、王贤能等参加了部分编著工作;第3、4、10、12、14章由许强编著,邓辉、巨能攀参加了部分编著工作;第13章由林峰编著。最后由黄润秋、许强、陶连金统稿。以上研究曾得到中国地质环境监测院殷跃平教授级高级工程师的大力支持,国家地震局陈颙院士在百忙中为本书作序,在此一并对他们表示衷心的感谢。

地质过程数值模拟已有数十年的历史,近年来随着计算机技术的迅猛发展,也取得了更大的进展,然而,欲采用计算机数值模拟技术来实现对地质过程完全符合实际的“仿真”还有很长一段路要走。因此,鉴于书中研究问题自身的复杂性,同时限于作者的知识面和学术水平,本书定会存在不够完善甚至错误之处,敬请读者批评指正。

目 录

序 前言

1 绪论	1
1.1 人类工程活动与边坡地质灾害	1
1.2 边坡地质灾害研究现状	3
1.3 边坡地质灾害的机制分析与稳定性评价	6
1.4 地质灾害过程模拟与过程控制	7
参考文献	11

第一篇 复杂地质结构建模理论与技术

2 三维实体地质模型构建的理论与方法研究	12
2.1 概述	12
2.2 系统的设计	13
2.3 数据库技术及其实现	15
2.4 三维可视化模型系统	20
参考文献	33
3 节理岩体块体模型的建立及稳定性评价	34
3.1 概述	34
3.2 节理岩体块体几何建模的基本原理	34
3.3 节理岩体块体稳定性分析与评价	38
3.4 边坡块体稳定性分析系统的开发	47
3.5 工程应用实例	49
参考文献	57
4 边坡的二维建模技术与稳定性分析	58
4.1 概述	58
4.2 SlopeCAD 的总体结构	58
4.3 交互式建模子系统	59
4.4 边坡稳定性分析子系统	64
4.5 滑坡治理方案计算机辅助设计系统(SlopeCAD)简介	69
4.6 应用实例	75
参考文献	77

第二篇 地质灾害过程模拟的理论与方法研究

5 地质灾害过程模拟的基本理论	78
5.1 概述.....	78
5.2 全过程数值模拟的数学-力学原理	80
5.3 斜坡变形过程模拟的快速拉格朗日分析(FLAC)	92
参考文献	95
6 地下水在复杂介质中的流动及边坡水-岩作用过程模拟	96
6.1 边坡岩体水-力耦合作用模拟的基本理论	96
6.2 节理岩体水-岩作用过程的离散单元法模拟	104
6.3 斜坡孔隙-裂隙双重介质水-岩耦合作用数值模拟	111
参考文献.....	129
7 岩体动力过程模拟	131
7.1 概述	131
7.2 动力离散元的思想和方法	132
7.3 块体的变形模拟	135
7.4 动力离散与边界元耦合	136
7.5 动力离散元动力问题的模拟过程	136
7.6 动力离散元法(DDEM)的检验与应用	138
7.7 动力有限元分析的复模量法	140
参考文献.....	145
8 边坡热及水-热耦合作用过程模拟	148
8.1 概述	148
8.2 岩石热学的基本概念	149
8.3 地温场的有限元数值模拟	151
8.4 边坡热应力分析及其对稳定性影响评价	154
8.5 水-热耦合作用过程分析.....	160
参考文献.....	170
9 复杂介质性态模拟	171
9.1 节理岩体各向异性特性模拟	172
9.2 断续节理岩体的模拟	177
9.3 岩体介质在开挖卸荷状态下的力学性态模拟	181
参考文献.....	183

第三篇 应用实例

10	大型人工开挖高陡边坡的变形稳定性分析——以攀枝花矿山营盘山边坡为例	185
10.1	计算模型的建立	185
10.2	营盘山高陡边坡的变形稳定性分析	187
10.3	营盘山高陡边坡在地震荷载作用下的稳定性分析	191
	参考文献	195
11	边坡动力稳定性的数值模拟研究——以康定白土坎滑坡为例	196
11.1	滑坡区工程地质环境条件	196
11.2	滑坡特征	198
11.3	静力条件下滑坡的变形分析	200
11.4	地震时滑坡的变形及动力稳定性过程分析	207
	参考文献	210
12	岩土体水-力相互作用数值模拟研究——以香港暴雨诱发型深基座滑坡为例	211
12.1	暴雨诱发深基座滑坡形成机制的概念模型	211
12.2	地下水降低斜坡稳定性的水力学模式	213
12.3	暴雨诱发香港深基座滑坡机制的数值模拟研究	217
12.4	坡体稳定性的极限平衡分析	231
12.5	结论	232
	参考文献	232
13	边坡开挖卸荷行为模拟研究——以三峡船闸高边坡为例	234
13.1	概述	234
13.2	开挖卸荷概念模型的建立	235
13.3	船闸高边坡卸荷过程模拟及变形分析	245
13.4	小结	258
	参考文献	260
14	边坡变形破坏全过程模拟研究——以贵州印江岩口滑坡堵江事件为例	261
14.1	滑坡发生的基本原因及基本情况	261
14.2	研究区工程地质岩组及物理力学性状	262
14.3	滑坡形态及结构特征	264
14.4	滑动面的形成及贯穿条件分析	266
14.5	滑坡形成的运动学及动力学分析	268
14.6	滑坡形成机制的概念模型	269
14.7	岩口滑坡形成机制及运动过程的全过程数值模拟研究	270
	参考文献	284

1 绪 论

1.1 人类工程活动与边坡地质灾害

边坡是人类生活和进行工程活动最为普通的地质环境。边坡岩土体的崩塌、滑坡、泥石流等失稳破坏形式将会给人民生命和财产造成巨大的损失。我国是一个地质环境极其复杂和特殊的国家,尤其是西南地区,青藏高原的隆升,使得该地区不但有极其复杂的地形地貌条件,而且存在着一系列活跃的动力地质作用,加之伴随经济快速发展而来的大规模工程建设和资源开发在一定程度上具有不规范性和盲目性,这些都导致地质灾害频繁发生。据初步统计,20世纪80年代以来,西南地区所发生的一次性死亡人数在数十人以上或直接经济损失在千万元以上的灾难性崩滑事件就有十余起,总计伤亡千余人(表1.1),直接经济损失数亿元;由于灾害而发生水、陆交通中断,造成的社会影响和间接损失更是难以估计;雨季突发性、群发性地质灾害造成的损失更显突出。20世纪90年代中期以来的统计表明:每年雨季我国因地质灾害死亡的人数达数百甚至近千人;1998年特大洪水期间伤亡人数更达1150余人,灾害损失达数十亿元。实际上,在所有地质灾害中,人类活动,尤其是大规模移民迁建、山区高等级公路及铁路的修建等为直接或间接诱发因素的占75%以上。图1.1是三峡工程水库蓄水前后1000余个滑坡稳定性的变化情况预测,可见,蓄水以后,库岸稳定或基本稳定的滑坡数量将大幅下降,而潜在不稳定和不稳定的滑坡数量则将较大幅度地增长。直接由工程修建而诱发的边坡地质灾害,近年来的数量和规模也呈惊人的增长趋势,随之而来的治理费用也高得惊人,如内昆线上的八渡滑坡,其单项治理费就高达8000万元之巨。

表 1.1 20 世纪 80 年代以来我国发生的典型灾难性崩滑地质灾害事件

滑坡名称	位置	发生时间	体积 / $\times 10^4 \text{m}^3$	斜坡类型	诱发(触发)因素	伤亡或灾 害情况
盐池河岩崩	湖北宜昌	1980.6.3	150	近水平层状边坡	地下采矿	284人
鸡扒子滑坡	重庆云阳	1982.7.17	1500	古滑坡(层状碎裂)	暴雨	即时搬迁
洒勒山滑坡	甘肃东乡	1983.3.7	3100	黄土斜坡	灌溉、冻融	230人
新滩滑坡	重庆姊归	1985.6.12	3000	古滑坡(散体)	降雨	即时搬迁
中阳村滑坡	重庆巫溪	1988.1.10	765	层状石灰岩	暴雨	33人
铁西滑坡	四川喜德	1988.9.2	4	堆积层散体	暴雨	颠覆列车
溪口滑坡	重庆华蓥	1989.7.10	100	反倾层状岩体边坡	暴雨	221人
昭通滑坡	云南昭通	1990.6	>1000	堆积体	暴雨	>100人

续表

滑坡名称	位置	发生时间	体积 / $\times 10^4\text{m}^3$	斜坡类型	诱发(触发)因素	伤亡或灾 害情况
鸡冠岭岩崩	重庆武隆	1994. 4. 30	424	中-陡反倾边坡	地下采矿	16 人
黄茨滑坡	甘肃兰州	1995. 3	200	黄土斜坡	灌溉水	即时搬迁
二道沟滑坡	重庆巴东	1995. 6. 10	60	强风化斜坡	洪水位	5 人
陨阳滑坡	云南	1996. 6. 1	500	散体斜坡	采矿	200 人
岩口滑坡	贵州印江	1996. 7. 18	1500	斜顺倾边坡	坡脚采石	3 人
沙冲路滑坡	贵州贵阳	1996. 12. 4	2	顺倾边坡	坡脚切坡	35 人
易贡滑坡	西藏波密	2000. 4. 9	28 000	基岩、散体	溶雪	淹没茶厂
双牛滑坡	古蔺石宝镇	2000. 6. 6	2	松散体	暴雨	10 人
盈江滑坡	云南盈江	2000. 8. 14	0. 2	混合花岗岩坡残积土	暴雨	13 人
兰坪滑坡	云南兰坪	2000. 9. 3	2000	顺倾边坡	暴雨	搬迁 5000 人

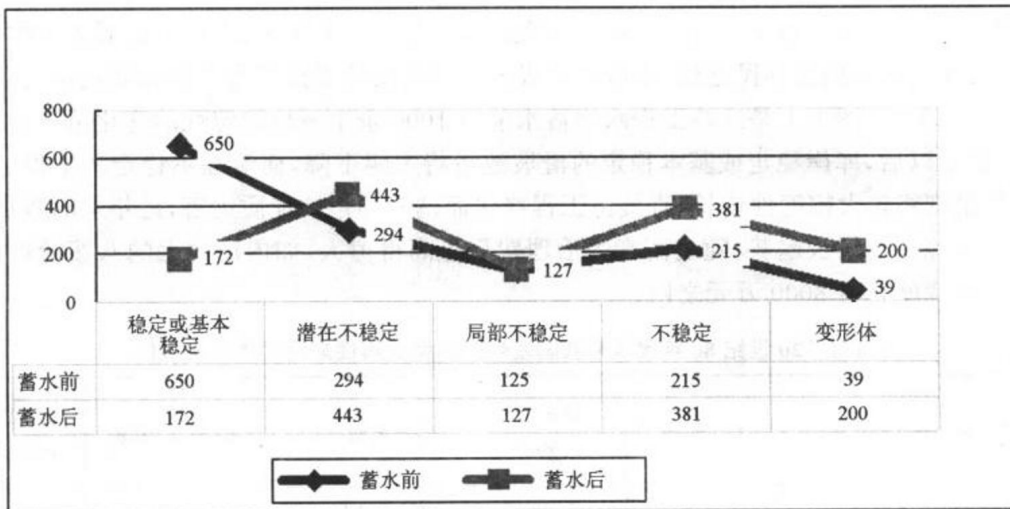


图 1.1 蓄水前后三峡工程移民区滑坡稳定性变化情况(单位,处)

另外,西南和西北地区人类大型工程活动的增加,尤其是黄河上游和长江上游及其主要支流上一批巨型和大型水电站的开工修建和规划拟建,以及一批大型露天矿的继续开采,使得与崩滑地质灾害具有紧密因果联系的岩质高边坡稳定性问题在我国工程建设中的重要性与日俱增,成为制约工程建设的主要地质环境问题,也是我国乃至国际工程地质和岩石力学界研究的难点和热点问题。表 1.2 列出了我国已建、在建和拟建的一批大型水电站工程所遇到的岩质高边坡情况。资料表明,我国水电工程所遇到的自然高边坡已达近千米,人工开挖边坡的高度也已超过 300m。

表 1.2 中国水电站建设中遇到的高边坡

工程名称	边坡位置	坡高/m	岩性	存在的主要问题
龙羊峡	泄水消能区	>200	砂岩及花岗岩	贯穿拉裂缝和缓倾角裂隙,虎丘山虎山坡雾化
天生桥二级	厂房	180	砂页岩夹泥岩	有反倾向坡构造面
天生桥一级	溢洪道	120	灰岩	顺向、逆向构造坡
向家坝	左岸马步坎	600	砂岩、泥岩互层	地表、深部拉裂
溪洛渡	左、右岸	300	玄武岩	层间、层内错动带
锦屏	左岸	350	大理岩、砂板岩	深部拉裂
漫湾	左岸坝肩	180	微风化流纹岩	滑面加固后继续下挖
大柳树	左、右岸	200	砂板岩	岩体松动,深部拉裂
隔河岩	厂房	190	页岩	上层页岩硬,下层页岩软
苗家坝	左、右岸	220	变质砂岩夹千枚岩	楔体变形,深部拉裂
五强溪	大坝左岸	170	砂岩、石英岩	层状结构,蠕变及顺层滑移
李家峡	左、右岸坝肩厂房及泄水建筑	220	片岩、变质岩混合	层间挤压断层、裂隙、NE 的裂隙发育
小浪底	引水系统进出口	120	砂岩、泥岩互层	岩体软弱,断裂发育
三峡	左岸船闸	170	闪云斜长花岗岩	边坡高陡,受断层和节理裂隙切割
小湾	泄水建筑物	239	片麻岩、少量片岩	顺层及楔形体滑坡
龙滩	左岸进水口	260	页岩、砂岩、板岩	蠕变体中的开挖边坡
拉西瓦	坝区左岸	700	花岗岩	深部拉裂和缓倾角裂隙
洪家渡	左坝肩	280	灰岩、页岩	存在变形体

1.2 边坡地质灾害研究现状

地质灾害防治与地质环境保护是一个涉及学科范围广、影响因素复杂且具有高度不确定性的课题,其主要研究目标是对地质灾害发生的可能性作出合理的评价和科学的预测,并提出科学、经济、合理的减灾防灾措施,从而减轻人类所面临的灾害风险。实际上,这是一个人类自有工程活动以来就苦苦追求与探索的问题,但直到如今也尚未得到很好的解决。以崩滑地质灾害这类最为典型的地质灾害为例,我国对这一问题的研究大致经历了表 1.3 所列的几个阶段。

表 1.3 边坡地质灾害研究历程

时间	工程实践	对边坡地质体的认识	基本观点	分析技术	典型高边坡工程及灾害事件
1950 ↓ 1965	这一阶段工程规模一般较小	刚性体介质, 结构面控制	地质历史分析方法	以解析分析方法为主	瓦依昂滑坡(1963) 龚嘴电站边坡 大渡河李子坪滑坡 雅砻江霸王山滑坡 雅砻江金龙山滑坡 乌江黄崖边坡变形 金川露天矿边坡
↓ 1980	西南、西北地区水电工程建设、三线铁路建设、露天矿的开发揭示了一系列具有典型时效过程的大型滑坡	可变形性(弹性), 结构控制的非连续性(岩石力学+弹塑性力学)	地质过程机制分析方法或工程地质力学分析方法		
↓ 1990	三峡工程库区库岸稳定性评价, 黄河上游一系列大型水电工程(龙羊峡、拉西瓦、李家峡等)坝区库区高边坡稳定性评价, 大型灾难性滑坡研究	非连续性, 弹塑性非线性, 时间效应, 损伤特性	地质过程机制分析——定量评价	数值分析+现代数理统计	盐池河岩崩(1980. 6. 3) 鸡爪子滑坡(1982. 7. 17) 撒勒山滑坡(1983. 3. 7) 新滩滑坡(1985. 6. 12) 中阳村滑坡(1988. 1. 10) 溪口滑坡(1989. 7. 10) 漫湾滑坡(1989. 1. 8) 龙羊峡近坝库岸高边坡 拉西瓦坝区高边坡 李家峡库坝区高边坡
↓ 1995	三峡工程、金沙江向家坝、溪洛渡、雅砻江锦屏、官地、澜沧江小湾、白龙江苗家坝等大型水电工程高边坡, 岩口、攀枝花等灾难性滑坡	高边坡系统工程强调系统性, 强调过程的模拟再现	系统工程地质学, 工程地质系统集成	过程模拟	向家坝水电站高边坡 锦屏水电站高边坡 小湾水电站高边坡 李家峡库坝区高边坡 攀枝花露天矿高边坡 链子崖高边坡治理 黄蜡石滑坡治理 黄土坡滑坡(1995. 6. 10) 鸡冠岭滑坡(1994. 4. 30) 黄茨滑坡(1995. 3)
↓ 至今	三峡工程库区移民迁建, 西南地区大型水电站及山区高等级公路、铁路修建等	强调相互作用, 强调系统的非线性过程演化及过程控制	相互作用与非线性	过程模拟与过程控制	三峡船闸高边坡 溪洛渡工程 岩口滑坡(1996. 7. 18) 白土坎滑坡 宝塔滑坡

1) 20 世纪 50 年代到 60 年代中期: 这一时期, 人类活动和工程建设的规模比较小, 并且有足够多的优良场地供工程选址, 场地条件比较简单, 因此, 工程建设对环境的影响较小, 灾害与环境问题并不突出。这一时期, 对崩滑灾害的分析更多地借助了前苏联体系的“地质历史分析”方法和土力学的基本理论, 地质体被视为相对均质的连续体, 采用土力学的刚体极限平衡理论对滑坡灾害进行评价。

2) 20世纪60年代中期到70年代:20世纪60年代初期的意大利瓦依昂滑坡事件,使人们意识到了地质灾害的发生不是一个单纯只用极限平衡理论就可以描述的过程。在我国,“三线”建设的兴起和大型水电工程的开发涉及到了复杂场地,同时也揭示了一系列大型滑坡,它们都难以用常规的静力学观点去认识,尤其是如何解释滑动面的形成过程。这个时期,岩石力学的发展为这个问题的解决提供了理论基础,它帮助工程地质学家认识到了岩体的“可变形性”、变形的“时效性”和岩体结构对这种变形乃至最终破坏可能起到的控制作用,从而开始了对地质灾害的形成演变进行“地质过程机制分析”的时代,一些具有代表性的边坡变形破坏地质-力学模式被相继提出。应该说,“机制分析论”的提出是人们对地质灾害认识上的一次质的飞跃,但受这一时期理论和研究手段的限制,人们还无从对这一复杂过程进行力学量化的描述,更多的还是建立在“概念模型”基础上的定性分析。

3) 20世纪80年代:是地质灾害分析手段与方法取得长足进步的时期。一方面,随着计算机技术的迅速发展和现代力学、现代数值分析理论的进步,模拟技术开始被广泛地应用于地质灾害分析,尤其是机制分析中;针对介质的特点,先后出现了线弹性模拟、弹塑性模拟和考虑时间效应的黏-弹-塑性模拟,后期还出现了准大变形和运动过程的离散单元模拟,乃至全过程模拟等。基于相似理论的物理模拟技术也得到了相应的发展。借助于方法的更新和手段的进步,人们对地质灾害的认识不再仅仅停留于“概念模型”阶段,而是通过模拟,把“概念模型”上升为“理论模型”,进一步从内部作用过程(机制)上揭示边坡地质灾害的发育及滑动面的形成过程,以及这一过程所反映的边坡稳定性状况和蕴涵的以后的变化信息,从而为复杂边坡的稳定性评价及预测提供了重要的理论方法和工具。这一阶段的发展促使“地质过程机制分析”的学术思想体系发展到了“地质过程机制分析-定量评价”的新阶段。另一方面,地质灾害的随机不确定分析方法及建立在其基础上的数理统计及灰色系统预报理论等被引入斜坡失稳评价及预测中,但所有这些方法,在描述上仍未脱离传统的线性领域范畴。

4) 20世纪90年代:是系统工程地质学形成和发展时期,也是人们对复杂地质过程和复杂灾害系统认识上的又一次质的飞跃时期。它有两个标志,一个标志是从20世纪80年代末期开始,系统科学的思想被引入复杂地质过程和地质灾害的研究中,人们从系统的结构上认识到地质灾害的发生是一个复杂的地学系统内部各子系统相互协调及其与外部系统相互作用的过程,从而从更深层次上分析地质灾害的形成与发育规律;人们从系统与系统之间、系统内部各子系统之间的信息传递上认识到了地质灾害的控制机制与可能的控制途径,从而开始了从认识地质体向适应乃至改造地质体、从认识地质灾害向控制灾害发生的过渡,并形成了“系统工程地质学”和“工程地质系统集成”等学术思想。另一标志是20世纪90年代初,现代系统科学的重要组成部分——非线性科学被引入到了地质灾害的研究中。人们不仅通过一般系统科学认识到了复杂灾害系统的物理构成,而且借助于非线性科学,认识到了系统形成与演变的非线性特性,从而完成了从线性系统到非线性系统的历史性转变。非线性科学认为地质灾害是由一系列非平衡不稳定事件产生的空间、时间、功能和结构上的自组织行为,从而导致开放系统远离平衡态的结果,由此相继建立了一些初步描述崩滑灾害非线性行为的动力学方程,提出了一些基于突变理论、分形理论及

非线性动力学理论的预测模型。

由此可见,对崩滑地质灾害的研究,在认识论上,人们走过了对系统认识从封闭到半开放、开放,对系统行为从确定性到随机性、混沌性,对系统内涵从线性到非线性的历程;在理论上,人们逐步将传统静力学、近代岩体力学、现代数理力学及非线性科学理论引入应用;在行为目的上,从认识灾害发生机制、评价预测其发生可能到进行灾害控制与治理,走过了从认识自然到改造自然的艰难历程。尽管如此,人们还是不得不承认这样一个事实:迄今为止,崩滑地质灾害的评价、预测问题并没有得到根本性解决,灾害仍在频繁发生,我们仍面临着极高的地质灾害风险。

1.3 边坡地质灾害的机制分析与稳定性评价

斜坡是在内外应力及人类活动因素的综合作用下,在早期侵蚀夷平面的基础上发展形成的。斜坡与自然界的任何事物一样,同样具有形成、演化、发展及“消亡”的历史过程。外营力作用导致沟谷不断侵蚀下切,这标志着斜坡的形成;在漫长的地质历史时期中,斜坡本身的变形及各种外应力(包括人类工程活动)作用导致其以稳定性程度不断降低的方式演化发展,最后以崩、滑、流等破坏形式结束其演化历史,代之而起的是新一轮斜坡的形成,新一轮斜坡变形破坏的演化。斜坡就是以这种方式参与地壳表层的地质作用及地貌改造作用的。斜坡在其整个发展演化过程中,始终以稳定性的变化为主线;斜坡目前的稳定性状态只是其整个演化过程中的一个片断而已,并非一个独立、前后不相关的片断,而是过去发展历史的结果、体现及将来变化发展的起点、先兆;同时,也是过去演变历史信息的记录。因此,从地质学的观点、历史的观点来研究斜坡的稳定性,就是要通过对其现象及赋存条件的研究,从全过程及内部作用机理上掌握其变形破坏的演变规律,也就是通常所说的“变形破坏机制”。只有这样,才能对斜坡稳定性现状和今后的发展趋势作出科学合理的评价和预测。从原理上讲,这是一个将今论古→以古推今→以今测未的“地质历史分析”问题,但在信息技术发达、各种测试手段不断完善的今天,对地质历史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,而是将地质学对现象的研究与现代岩体力学、数学、力学、计算机科学和测试试验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中的内部信息,尽最大可能地实现地质参数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,从而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进行半定量乃至定量评价的目的。因此,“地质历史过程分析”在今天已有了新的含义,即“地质过程的机制分析与定量评价”。根据这一基本思想,通过近 10 年来的探索,对高陡斜坡稳定性研究,我们已逐渐形成了一套以工程地质原型研究→岩体力学模型建立→变形破坏机制研究及演化过程的全过程模拟→稳定性评价、预测及防治处理为内容的系统工程地质分析方法^[1~3,6,13~15]。这一体系里面包含有以下几方面的关键性理论问题:

1) 首先是如何将斜坡变形破坏过程作为一个地质的,但具有力学涵义的“概念模型”来描述,也即如何根据斜坡赋存的地质力学环境及当前的变形破坏迹象,定性地掌握斜坡变形破坏的地质历史规律,这一规律就是“概念模型”。概念模型的建立主要依赖于对地质原型的正确理解与认识。

2) 如何将斜坡变形演化地质过程的“概念模型”用一系列地质-力学状态参数来描述。显然,准确地刻画地质过程的力学行为一直是我们多年来追求的目标。地质体很复杂,但认识过程是无止境的,通过反复的实践与探索,充分吸收和采用现代科学发展所带来的新技术、新方法,就一定能逐渐达到或逼近对客观世界较为真实的描述与认识。

3) 根据所确定的描述地质过程的参数,如何在地质分析的基础上,建立描述地质体物质运动过程的数学-力学方程,并在计算机上实现包括斜坡变形破坏乃至运动过程在内的物质运动全过程模拟。现代数学、力学及计算机科学的发展为我们提供了解决这方面问题的理论工具。

4) 变形理论及其过程控制。研究结果表明,在地质灾害控制方面,与传统的基于强度理论和极限平衡理论的力学控制方法相比,基于变形理论的变形控制方法似乎更为有效和更为科学合理。在本书中,提出了基于变形理论的边坡地质灾害治理工程设计理论概要。这一新的理论框架尽管还有诸多需完善之处,但近年来的实践表明,它对指导边坡地质灾害的评价与治理设计工作是有效的,并且可望逐渐成为取代传统理论的边坡地质灾害评价与设计理论。

1.4 地质灾害过程模拟与过程控制

地质灾害的防治是一个复杂的系统工程问题,涉及灾害的勘察、评价、预测、治理等诸多方面。目前,国内外专家学者在地质灾害的发生机理及灾害的预测、评价方面都作了大量工作。但是,传统的边坡及相关的崩滑地质灾害评价与治理设计均以强度稳定性理论及基于静力学的规范设计为依据^[1,9],这一体系的应用在工程界已有近百年的历史,其理论基础还是100年前的“朗肯”、“库仑”土压力理论或“推力传递”理论。其设计思想存在以下明显的不足:①其基本出发点是土力学的极限平衡理论,考虑均匀介质的简单破坏模式,这与大多数边坡受岩土体结构或结构面控制的实际情况相差甚远。②作为设计依据的岩土压力的产生是岩土体变形与支挡结构相互作用的结果,因此,岩土压力的计算应该基于岩土体的变形(弹塑性、蠕变等)及其与支挡结构的相互作用,而不应是传统的人为假定破坏面,然后用极限平衡方法来计算稳定性系数。上述理论的缺陷,会造成设计方案的保守和财力的浪费,错误的设计甚至会导致治理失败。因此,克服上述弊端,构建基于变形理论的地质灾害治理工程理论已成为地质工程领域一个急需解决的问题。

1.4.1 基于变形理论地质灾害评价的基本观点

边坡岩土体由于自然因素的作用(如河谷的不断下切)或人类工程活动的影响(如人工开挖),将随着时间的推移从局部的小变形发展到整体的大变形直至最后的成灾破坏,这是一个动态演化过程。在此过程中,地质体作为一个开放体系,无时无刻都在和其周围环境进行着物质和能量交换,这就导致地质体在各个不同的演化阶段有各自不同的特点。因此,针对一个具有上述“动态”特征的体系,作者认为地质灾害治理工程设计必须围绕地质体的变形和地质体与支护结构的相互作用来进行,这两方面可通过本书所倡导的地质灾害“过程模拟和过程控制”技术来实现。因此,基于变形理论的地质灾害治理设计的中心思想可通过如图1.2所示的框图来体现,这一基本思想的要点如下: