



姚爱军 薛廷河 著

复杂边坡稳定性 评价方法与工程实践



科学出版社
www.sciencep.com

TU457/4

2008

复杂边坡稳定性 评价方法与工程实践

姚爱军 薛廷河 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书全面阐述了复杂边坡稳定性评价分析的基本方法和相应的工程分析软件,主要内容包括:边坡工程地质模型与复杂条件的研究、针对不同边坡岩土体透水特性的边坡稳态 Sarma 方法的改进、边坡下滑推力的计算和比较、边坡可靠性分析原理及模型以及蒙特卡罗法与 MSARMA 法的耦合与应用等,在此基础上详细介绍了针对复杂边坡工程研制的边坡稳定性评价设计系统的基本框架、功能和使用方法,并结合三个不同类型的边坡工程,介绍了复杂边坡评价的基本方法、工程分析软件的应用和评价结果。

本书可供水利水电、公路、铁路、矿山、港口、城市建设等领域的广大科技人员及高校师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

复杂边坡稳定性评价方法与工程实践/姚爱军,薛廷河著. —北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-020151-5

I. 复… II. ①姚…②薛… III. 边坡稳定性-研究 IV. TU457

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 006508 号

责任编辑:沈 建 张 敏 / 责任校对:邹慧卿

责任印制:刘士平 / 封面设计:陈 敏

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>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2008 年 1 月第一次印刷 印张:13

印数:1—2 500

字数:247 000

定价:35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

序

我国地形地貌复杂多样,山区、丘陵面积广大,约占全国国土面积的 2/3,各地区的工程地质条件千差万别,工程建设中不可避免地会产生一些工程地质问题,其中边坡稳定性问题是山区、丘陵最常见的工程地质问题,如不加以重视,将造成严重的崩滑灾害。近年来,我国投入巨资在水利水电工程、公路工程、铁路工程、矿山工程、城市建设与改造等诸多领域开展了大规模的工程建设,而边坡往往是这些工程建设的主要研究和整治对象之一,其稳定性问题则是重要的研究课题。

边坡是一种自然地质体,其稳定性受多种因素的影响,如地形地貌、地层岩性、地质构造、地下水作用、地震作用、地应力、气象水文、人类工程活动等。因此,边坡岩土体表现为非连续性、非均匀性、各向异性和赋存环境的复杂性等特点,相应地,边坡的稳定性则表现为动态的、非确定性的基本特征。可喜的是,近几十年来国内外学者和工程人员提出了许多理论和方法,结合先进的计算机技术,深入了解了各类边坡变形破坏的形成机理,并通过工程实践探索科学有效的治理措施,解决了众多的边坡安全隐患问题。但是,由于边坡稳定性的动态的、不确定性的特征,特别是复杂边坡的稳定性评价,若要准确地评价边坡稳定状态,并提出科学合理的整治方案,仍然是一个十分严峻的课题。而工程实践中,复杂工程地质条件下产生的边坡稳定性问题与崩滑灾害是常见和多发的。该书中,姚爱军博士针对复杂边坡基本特征,基于极限平衡理论和计算机技术,在复杂边坡稳定性分析评价方法和软件开发方面进行了初步探索,取得了长足进展。

无论是土质边坡还是岩质边坡,当有地下水、河(库)水、地震、大气降雨、坡面荷载等因素中的一种或多种因素联合作用时,边坡稳定状态在客观上应该是动态的和不确定性的,我们必须摒弃那种主观地把边坡稳定状态看作静态的和确定的事件的做法,而应将边坡看作一个复杂的体系,采用定性与定量相结合的方法,提高评价分析的准确性和精度。该书作者十分注重边坡的工程地质条件分析,详细研究了边坡的地下水力学作用、地下水运动与降雨的动态关系、地震与工程震动的作用,以及边坡潜在滑动面的确定等问题,并成功地应用于改进的 Sarma 方法(MSARMA 法)中,实现了边坡稳定性的各类影响因素的敏感性分析,反映了边坡稳态的动态特征。同时,作者基于概率分析的可靠性分析方法,实现了蒙特卡罗法与 MSARMA 法的耦合,初步尝试了边坡稳态的不确定性评价方法。这些方法和手段对于我们今后评价复杂边坡的稳定性有较好的启示和借鉴意义。

在此书出版之际,我欣然接受了姚爱军博士邀请我为这本书作序,一方面是该

书的研究内容正是国内、外边坡工程领域的关键性问题,也是他 1997 年攻读博士学位时的重要课题之一,作者和其课题组成员历经十余年,先后承担和参与了公路边坡、铁路边坡、港口边坡、城建边坡等十几个工程治理项目,以及黄河上游、长江三峡库区崩滑灾害的科研项目,取得了优良成绩,他们在这一领域的开拓精神值得鼓励。另一方面,该书充分展示了作者和他的课题组的最新研究成果,密切结合工程实践,开辟了复杂边坡稳定性评价的新思路,是一部较好的科技参考书,我深信它将对从事边坡工程领域的科技人员解决复杂边坡稳定性问题是十分有益的。

何满潮

2007 年 10 月

前 言

边坡稳定性问题是土建、交通、水利、矿业、冶金等工程领域最广泛和最普遍的岩土工程问题。由于边坡岩土体具有不连续性、不均匀性、各向异性和地质环境的复杂性等特点,使得边坡的稳定性评价工作更具有针对性和评价结果的多样性。特别是在大气降雨作用、地下水作用、河(库)水作用、坡面荷载作用和地震作用等复杂条件下的边坡稳定性评价时,如何掌握边坡的工程地质条件,建立边坡的工程地质模型,采用更切合边坡实际工程状态的评价模型,获得更为准确的评价结果,是许多学者不懈努力的方向。

复杂边坡指的是边坡的工程地质条件和边界条件复杂,如边坡区曾遭受强烈的地壳运动,地质构造发育,边坡岩土体结构多样不均一,边坡受大气降雨、地下水、河(库)水、地震或工程爆破、坡面工程荷载等影响因素的一种或多种联合作用等。近年来,我国一系列大型土木工程项目不断开工建设,出现了众多的复杂边坡稳定问题,且边坡稳定性评价和工程整治是建设项目的重要内容。例如,高山和黄土高原地区的高速公路工程由于切挖山体,往往出现较多的高陡边坡,岩体结构复杂,加固难度较大。在丘陵地区,有些公路边坡虽然较平缓,但在大气降雨和地下水的联合作用下,也出现了大规模的滑塌现象,如申苏浙皖高速公路长兴段。又如,我国的长江三峡工程,世人瞩目,据统计在库区存在 2000 多个大型或巨型滑坡体,工程地质条件复杂,受降雨、库水位等多种诱发因素的影响,构成了三峡库区主要的地质灾害类型,近年来国家投入巨资进行综合治理,取得了明显效果。

从 1989 年,作者就开始针对复杂边坡的稳定性评价问题进行了系统学习和专题研究,先后参加了国家“八五”科技攻关项目“黄河上游典型崩滑灾害形成机制研究”、长江水利委员会项目“三峡库区巫山岸坡变形失稳机理及库岸稳态预测”、国际合作项目“三峡库区滑坡泥石流预测预报 3S 系统核心技术研究”、西部交通建设科技项目“三峡库区港口地质灾害防治关键技术研究”、交通部公路水路交通科技“十五”发展计划项目“公路边坡稳定性对地下水与降雨的动态响应研究”,以及目前正在进行的“十一五”国家科技支撑计划项目“村镇地质灾害防治技术”等。同时,参加了众多的边坡工程整治或综合治理项目,在现场得到了许多工程师对于复杂条件下边坡稳定性评价方法的批评和建议,并在研制实用的工程分析软件方面获得了有益的启发。在此基础上,该书针对复杂边坡稳定性评价中的关键问题进行了进一步分析和总结,基于极限平衡理论、可靠性理论和面向对象的计算机编程技术,研制了解决复杂边坡稳定性问题的功能优良、实用的工程分析软件。

全书总共包括十章。其中,第1章阐述了边坡稳定性分析的基本理论和方法,以及近年来较突出的复杂边坡稳定性评价问题;第2章主要针对边坡工程地质模型的构成,综合分析了边坡岩土体特征、潜在滑动面的确定,以及地下水作用、地震作用等边界条件;第3章和第4章分别针对不透水介质边坡和透水介质边坡,总结分析了边坡稳态 MSARMA 分析方法及其进一步的改进形式;第5章分析比较了传递系数法边坡下滑推力计算方法和基于 MSARMA 法的下滑推力计算方法;第6章阐述了边坡可靠性分析原理和模型,研究了蒙特卡罗法与 MSARMA 法的耦合及其实现过程;第7章详细阐述了边坡稳定性评价设计系统的研制基础、系统框架、功能和使用方法;第8章、第9章和第10章分别结合三个不同类型的复杂边坡工程实例,阐述了复杂边坡稳定性评价的方法和评价效果。

本书第1、2、3、4、5、6、8、10章由姚爱军撰稿,第7章由姚爱军、薛廷河撰稿,第9章由薛廷河撰稿。

本书在写作过程中,始终得到恩师何满潮教授的鼓励和指导,本书的完成离不开恩师的亲切关怀和无私帮助。在基本理论和方法研究上,何满潮教授提供了大量第一手资料,在软件研制上提供了基础模块,指出了研制方向,并让我参与和承担了众多的科研项目,得以锻炼和提高。这些都为后续的方法改进、拓展和软件的优化、升级奠定了坚实基础。同时,在课题研究和软件研制过程中,也得到了王旭春博士、武雄博士、孙晓明博士、衡朝阳博士、段庆伟博士、张晗硕士等师兄的帮助,姚磊华博士、易武博士对本书的边坡排水模型提出了许多建议,感谢他们的帮助和指导。还要特别感谢蒋业放博士、李铁峰博士、田文奇硕士,他们为工程软件的编制给予了特别指导和良好的启发。在工程现场,单光炎高级工程师、易庆林高级工程师、王晓林工程师、李廷义工程师等为作者搜集第一手工程地质资料提供了帮助,并对软件开发提出了良好建议。在此向他们表示衷心的感谢。

边坡稳定性分析和评价是岩土工程中最常见的问题,本书仅是对过去的一些研究成果进行了综合分析和总结,并在工程分析软件研制方面做了初步尝试,因此,书中有不妥之处,敬请同行们批评指正。

姚爱军

2007年10月于北京

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 边坡工程研究现状	1
1.2 边坡工程理论与方法综述	3
1.2.1 边坡工程中的岩体结构控制理论	3
1.2.2 边坡工程中的分形理论	4
1.2.3 边坡工程中的 3S 理论	4
1.2.4 边坡工程中的人工神经网络方法	5
1.2.5 边坡工程中的数值计算和仿真	5
1.2.6 边坡工程中的可靠性分析理论	6
1.2.7 边坡工程中基于极限平衡理论的稳定系数计算	7
1.2.8 边坡稳定性 Sarma 分析方法研究进展	9
1.3 我国近年来较突出的复杂边坡评价问题	14
1.4 本书的研究内容与方法	16
第 2 章 边坡工程地质模型研究	19
2.1 边坡岩土体的基本特征	19
2.1.1 边坡岩土体的特性与岩土体结构分类	19
2.1.2 边坡岩土体的连续性概化	20
2.2 边坡潜在滑动面(带)的确定	22
2.2.1 固有结构面与危险滑动面	22
2.2.2 潜在滑动面的确定	24
2.3 边坡地下水力学作用研究	27
2.3.1 边坡岩土体介质水力学分类	28
2.3.2 地下水在岩土体介质中的力学状态	29
2.3.3 岩土体中地下水力学作用分析	30
2.3.4 水力学作用分析中的常见错误	32
2.4 边坡地下水运动及其与降雨动态关系	32
2.4.1 边坡地下水动态及其预测方法简介	32
2.4.2 边坡在不考虑降雨入渗条件下的潜水面计算	34

2.4.3 边坡在考虑降雨入渗条件下的潜水面计算	36
2.4.4 降雨及地下水对边坡稳定性产生影响的机理分析	38
2.5 地震动与工程爆破作用研究	39
2.6 边坡工程地质模型构架	41
第3章 边坡稳态 Sarma 分析方法及改进	43
3.1 边坡稳态评价准则	43
3.2 MSARMA 法的分析原理	45
3.2.1 极限平衡方程与假设	45
3.2.2 数学模型建立	47
3.3 MSARMA 法的实现过程	50
3.3.1 边坡稳定性求解	50
3.3.2 边坡稳态对影响因子的敏感性分析	52
3.3.3 边坡工程加固力作用研究	56
3.4 边坡工程 MSARMA 法设计方法	57
3.4.1 边坡加固力最佳方位设计	57
3.4.2 边坡加固力大小与分布设计	58
3.5 本章小结	58
第4章 透水介质边坡稳定性分析方法	60
4.1 透水介质边坡的主要特征	60
4.2 建立极限平衡方程	61
4.3 基本递推公式的推导	62
4.4 稳定系数迭代公式的推导	67
4.5 几点说明	67
4.6 降雨、地下水动态模型与改进 Sarma 法的耦合	68
第5章 边坡下滑推力计算方法及比较	70
5.1 传递系数法的基本思想	70
5.2 基于传递系数法的三种下滑推力计算模式	70
5.2.1 方法一(规范方法)	70
5.2.2 方法二	72
5.2.3 方法三	72
5.2.4 三种计算方法的比较	73
5.3 考虑地震与地下水作用的传递系数法下滑推力计算	74
5.4 基于改进 Sarma 法的下滑推力计算方法	75
5.5 本章小结	77

第 6 章 边坡可靠性分析原理及模型	78
6.1 概述	78
6.1.1 边坡可靠性概念	78
6.1.2 边坡稳态的不确定性	80
6.1.3 边坡可靠性分析方法	82
6.2 边坡可靠性分析概率模型确定	82
6.2.1 连续概率分布	83
6.2.2 经验概率分布	86
6.2.3 概率分布的检验与确定	86
6.3 边坡可靠性蒙特卡罗模拟法	92
6.3.1 边坡可靠性蒙特卡罗法基本思想	92
6.3.2 蒙特卡罗法的误差估计与收敛性	93
6.3.3 边坡工程状态随机变量的抽样	94
6.3.4 蒙特卡罗法与改进的 Sarma 法的耦合	96
6.4 边坡系统可靠性分析	97
6.5 本章小结	99
第 7 章 边坡稳定性评价设计系统的研制	100
7.1 MSARMA V3.0 系统的研制基础与构架	100
7.1.1 MSARMA V3.0 系统的开发的主要内容与方法	100
7.1.2 MSARMA V3.0 系统的研制基础	101
7.1.3 MSARMA V3.0 系统的构架	101
7.1.4 MSARMA V3.0 系统的稳定系数计算程序介绍	103
7.1.5 MSARMA V3.0 系统的可靠性分析计算程序介绍	115
7.2 MSARMA V3.0 系统的安装与功能	126
7.2.1 硬件环境	126
7.2.2 软件环境	126
7.2.3 系统安装和启动	126
7.2.4 系统主要功能	130
7.2.5 系统主要特点	131
7.3 MSARMA V3.0 系统的用户界面	132
7.3.1 启动 MSARMA V3.0 系统	132
7.3.2 MSARMA V3.0 系统的菜单栏	132
7.3.3 MSARMA V3.0 系统的工具栏	142
7.3.4 MSARMA V3.0 系统的状态栏	142
7.4 MSARMA 方法边坡稳定性分析模块	143

7.4.1	构造计算数据文件	143
7.4.2	稳定系数计算	146
7.4.3	边坡稳定性敏感性分析	147
7.5	边坡稳态可靠性分析模块	154
7.5.1	构造计算数据文件	154
7.5.2	随机变量数字特征	155
7.5.3	边坡破坏概率和可靠度计算	155
7.6	边坡加固设计分析	157
第 8 章	深圳黄贝岭开发区东南侧边坡加固工程	161
8.1	工程概况	161
8.2	黄贝岭边坡工程地质模型研究	162
8.2.1	地层岩性及其物理力学性质	162
8.2.2	地质构造与岩体结构	164
8.2.3	边坡潜在滑动面的确定	164
8.2.4	水文地质条件	165
8.2.5	地震与地应力	165
8.3	边坡稳态现状研究	166
8.4	边坡稳态对影响因子的敏感性	166
8.5	边坡工程加固设计与优化	168
8.6	边坡工程的可靠性研究	169
8.7	本章小结	170
第 9 章	申苏浙皖高速公路 K44 边坡稳定性研究	171
9.1	工程概况	171
9.2	K44 边坡岩土体工程地质特征	171
9.3	K44 边坡计算模型与计算参数	174
9.4	K44 滑坡体稳定性计算分析	175
9.4.1	K44 边坡稳定性现状分析	175
9.4.2	边坡稳态对岩土体物理力学参数的敏感性分析	176
9.5	边坡稳态对地震的敏感性分析	178
9.6	边坡稳态对地下水的动态响应	179
9.7	边坡稳态对降雨的动态响应	179
第 10 章	三峡库区兴山杨家岭公路边坡稳定性研究	181
10.1	杨家岭公路边坡工程地质条件	181
10.1.1	地形地貌	181
10.1.2	地层与岩性	181

10.1.3	地质构造	182
10.1.4	水文地质条件	183
10.1.5	地震	183
10.2	杨家岭公路边坡稳定性影响因素分析	183
10.2.1	岩土体物理力学参数的离散性	183
10.2.2	降雨、水库蓄水和地下水的影响	184
10.2.3	地震作用	184
10.2.4	河流冲蚀与人类工程活动	185
10.3	杨家岭 1# 滑坡地质模型与计算模型	185
10.3.1	杨家岭 1# 滑坡的地质模型	185
10.3.2	杨家岭 1# 滑坡的计算模型与参数	186
10.4	杨家岭公路边坡稳定性综合评价	187
10.4.1	杨家岭公路边坡稳态现状分析	187
10.4.2	边坡稳态对岩土体物理力学参数的敏感性分析	187
10.4.3	边坡稳态对地震的敏感性分析	189
10.4.4	边坡稳态对地下水的动态响应	190
10.4.5	边坡稳态对降雨的动态响应	190
参考文献		192

第 1 章 绪 论

1.1 边坡工程研究现状

随着经济的飞速发展,人类对自然环境的改造、利用越来越强烈。城市建设,修建铁路、公路及水利枢纽,露天开采矿产资源、煤炭资源等,均涉及边坡工程的研究和整治问题。边坡工程的研究是岩土工程研究的一个主要分支,涉及工程数学、力学、工程地质学等多个学科领域,其研究历史已达 100 多年。边坡工程的概念一般是指人类工程活动所形成的人工边坡的研究和整治,但多年来,边坡工程的研究包含了自然滑坡及崩塌体。

早在 1958 年,美国公路局滑坡委员会就组织编写了《滑坡与工程实践》(*Landslides and Engineering Practice*),随后在 1978 年又出版了《滑坡分析与防治》一书。1977 年加拿大矿物与能源中心(CANMET)编写了《边坡工程手册》(*Pit Slope Manual*)共 27 册,从理论和实践两方面系统地对边坡工程进行了论述。近年来,一些特大工程的相继开发,出现了复杂高陡边坡的整治和预防预测问题,如长江三峡库区众多高边坡工程、云南元墨高速公路近百个高陡边坡的整治等,而边坡工程的研究远远不能满足工程实践的要求。

1968 年,在举行国际地质大会期间,成立了国际工程地质协会(IAEG),同时成立了“滑坡及其它块体运动委员会”,它是世界上第一个专门研究滑坡及其防治的国际组织。该委员会除每年向 IAEG 提出工作报告以外,还向联合国科教文组织(UNESCO)提交全球灾害性滑坡年度报告。国际岩石力学与工程学会、国际工程地质协会均将边坡工程作为一个重要的课题进行学术交流和探讨。

国际工程地质协会在联合国科教文组织资助下,成立了全球滑坡登录工作组,对滑坡登记的内容、名词、标准等作了专门规定,计划建立一个完整的全球数据管理系统。1991 年 9 月 23 日~27 日在北京召开了“应用空间技术对抗自然灾害研讨会”,它是由中国国家科学技术委员会、中国国际减灾十年委员会与联合国外层空间事务司、亚太经济与社会委员会、联合国救灾署(UNDRO)联合组织召开的。1992 年 2 月 10 日~14 日在新西兰 Christchurch 召开了第 6 届“国际滑坡会议”。1992 年 12 月 7 日~11 日在印度新德里召开了“国际滑坡会议”。1996 年 6 月 17 日~21 日在挪威 Trondheim 召开第七届“国际滑坡会议”。

此外,国际岩石力学学会(ISRM)、国际工程地质协会(IAEG)、国际岩土力学

与基础工程学会(ISSMFE)、国际大坝委员会(ICOLD)、国际地质科学联合会(IUGS)、国际地理学联合会(IGU)等组织都经常召开学术会议,滑坡或边坡研究大都是会议的重要讨论专题。

国内的滑坡研究起始于新中国成立之后,随着大规模经济建设的发展,研究工作日益广泛深入。20世纪70年代铁道部成立了“滑坡分类与分布”专题研究组,对全国铁路沿线进行普查。“六五”期间,地质矿产部将“中国西南、西北崩滑灾害与山区斜坡稳定性研究”列为专题进行重点攻关。“七五”期间,三峡工程地质地震专题组对三峡库区沿岸重点滑坡进行了登记和调查。“八五”期间,水利水电部的“岩质高边坡稳定及处理技术”被列为国家重点攻关项目,在统一规划下,进行了卓有成效的工作,如开展国际、国内学术交流,进行边坡工程登录,建立水利水电边坡工程信息网等。80年代以来,水利水电部门对龙羊峡、天生桥、鲁布革、拉西瓦、李家峡、安康、漫湾、五强溪、龙滩等工程的边坡工程进行了系统的研究,取得了丰硕的成果。进入90年代,随着三峡工程建设的不断深入,在库区出现了大量的复杂边坡工程问题,根据初步统计,在长江三峡库区,灾害点总数达6000多个,其中滑坡3465处,崩塌620处,国家先后分三期投巨资进行研究和整治。从1994年开始,“三峡工程永久船闸高边坡稳定和工程处理措施”被列为国家自然科学基金重大研究项目。

我国露天矿边坡稳定性研究起步于20世纪50年代,1965年孙玉科教授在“岩质边坡稳定性的工程地质研究”论文中首先提出“岩体结构”理论的学术观点,并先后提出岩质边坡岩体结构分类、边坡稳定性岩体结构分析、实体比例投影及其在露天矿边坡稳定性分析中的应用等理论,并于1999年4月出版了专著《中国露天矿边坡稳定性研究》。1988年,孙广忠教授出版了《岩体结构力学》专著,明确地提出“岩体结构控制论”的学术观点,是在露天矿边坡稳定性研究方面一项重要的理论突破。自80年代以后,我国矿山边坡研究工作得到极大发展,一些科研院所和设计单位,先后对大孤山、尖山、磐石、攀钢石灰石矿、平朔露天煤矿、抚顺露天煤矿、金川矿等几十个矿山的边坡进行了系统研究,取得了一系列的科研成果。其中,中国科学院地质所王思敬、牟会宠、徐嘉谟等,马鞍山冶金设计研究院祝玉学教授,以及中国矿业大学何满潮教授等在露天矿边坡研究中做出了重要贡献。

边坡工程研究作为中国岩石力学与工程学会开展学术活动的重点,其所属的地面岩石工程专业委员会,于1986年召开成立大会及学术会议,会后出版了《中国典型滑坡》(1988),1991年召开第三次学术会议,会后出版了《自然边坡稳定性分析暨华蓥边坡变形研讨会论文集》(1992)。

20世纪80年代初期,滑坡动力学作为独立的学科被提出来,1986年6月在湖北宜昌召开的“我国典型滑坡实例学术研讨会”建议在我国开展滑坡动力学或滑坡运动学的研究工作。1995年2月,胡广韬教授总结多年的研究成果,出版了我国

第一部《滑坡动力学》专著,系统地阐述了有关滑坡动力学的二十余项关键性理论和问题。

廖小平、徐峻龄等人提出利用“变形力”理论(deformation-power)对滑坡的失稳时间进行预测,取得了较好的效果,这在1995年1月30日发生于甘肃省的黄茨滑坡的成功预测中得到了很好的应用。聂高众、高建国、马宗晋等人提出以天-气-地-海的相互作用为出发点,将滑坡的发生作为地球总体运动的一个事件链,从能量的聚集、传递、释放等角度探讨滑坡发生的动力学机制,对滑坡进行预测。

边坡工程研究的理论基础需要多种学科的相互结合、相互渗透,不仅包括工程数学、工程力学、工程地质学、岩土力学,还应结合计算机仿真技术、岩土工程测试技术等手段。经过100多年的研究和发展,从边坡的规律性分析,到边坡的变形破坏机制的研究,以及边坡稳定性评价和预测预报,均取得了令人瞩目的成果,已初步形成边坡工程独立的学科体系。这一体系应包括四大部分:①边坡(或滑坡)的区域分布规律性研究;②边坡的变形破坏机制研究;③边坡的稳定性评价、监测与预测预报;④边坡工程治理。事实上,随着边坡的工程规模越来越大、所处理的工程地质条件越来越复杂,边坡工程研究理论也不断深入和多样化,但各有其优点和局限性,系统和完善边坡工程理论,满足日益增强的边坡工程实践要求,仍是一项艰巨的任务。

1.2 边坡工程理论与方法综述

1.2.1 边坡工程中的岩体结构控制理论

岩体是工程影响范围内的地质体,它包含有岩石块(即结构体)和结构面(如层面、层理、节理或裂隙、断层、软弱夹层、不整合面等)。而对于岩体工程性质,主要决定于岩体内部裂隙系统的性质及其分布情况,当然岩体边坡也不例外。岩体的特性包括:①非连续性;②非均匀性;③各向异性;④地质环境的复杂性(地下水、地应力、地温)等。

岩土力学的发展为边坡工程的研究奠定了基础,特别是岩质边坡结构十分复杂,其稳定性取决于边坡的各类结构面的特征。中国科学院地质所孙广忠先生提出了“岩体结构控制论”,并出版了专著《岩体结构力学》,孙玉科先生等将赤平投影法和实体比例投影法应用于边坡工程。美国学者石根华提出了“关键块体理论”,主要解决被多个地质结构面、开挖面所切割的边坡或洞室之稳定性问题。南京大学罗国煜教授等提出了岩坡优势面控制论,认为岩坡的变形破坏受岩坡内的优势面所控制。上述理论的共同的特点是注重岩体结构研究,各类地质结构面对边坡的变形破坏起着控制作用。

1.2.2 边坡工程中的分形理论

分形理论是美国数学家 Mandelbort(1973)首次提出来的,它主要是研究自然界中一些具有自相似但没有特征长度的图形或现象,其研究方法是通过确定图形或现象的分维数,以揭示该现象或图形的内在本质和规律。

分形理论被广泛地应用于物理学、生物学、材料科学、岩石力学等学科中,近年来,边坡工程中开始应用分形理论进行有意义的探索。研究表明,边坡岩体结构常呈不规则分形状态,可以用分维来表征,利用分维可以定量地描述断层、层理、节理、泥化夹层等宏观结构面的形态特征、分布、产状及粗糙度等。同样,岩体的微观结构面或破坏面也呈不规则的分形状态,这种不规则反映了岩体破坏时的能量耗散及微观结构效应,也可用分维来表示。分维数是岩体变形破坏的某一统计特征量,分维数可以充当岩体变形破坏变量的角色进行岩体的强度和稳定性演化过程的分析。

由于岩质边坡变形破坏的空间分布主要受区域的地质构造、地层岩性、岩组、地形地貌、地下水、地震以及区域水系等因素控制,而这些因素均具有分形特征。其中地质构造的分维数可以根据不同比例尺的地质图用盒维法确定,结构面产状的分维数通过其极点图确定,地震的分维数由地震分布图确定,水系的分维数依据 Horton 的水道数定律确定。这些影响因素的分维数可以定量地反映岩质边坡的发育情况,并且边坡在形成至破坏过程中,其空间分维数具有降维趋势,依据这一特征可以进行边坡变形破坏的预测预报。

分形理论在边坡工程的应用有广阔的前景,目前,三峡库区、西北黄土地区及一些典型的滑坡体均有所应用,在分布规律研究、机制分析和预测预报方面取得较好成果。

1.2.3 边坡工程中的 3S 理论

在信息社会中,全球是一个开放系统,3S 系统已在地学领域进行了初步尝试,在 1996 年国际岩石力学学会年会上,充分利用 3S 技术在岩石工程建设中的作用已引起极大注意。所谓 3S 系统是指地理信息系统(geography information system, GIS)、遥感系统(remote sensing system, RS)和全球卫星定位系统(global positioning system, GPS)。三者融为一体为边坡工程的防治与预测预报提供了新一代观测手段、描述语言和思维工具。其中,GIS 是一种对空间信息以数字形式进行采集、编辑、处理、存储、组织、模拟和分析并表示的机助系统,由硬件、软件、数据和应用 4 大部分组成,其任务则包括数据输入、数据管理、数据分析和数据表示 4 个方面。GPS 和 RS 是 GIS 的重要数据源和数据更新手段。其中 GPS 与 GIS 的结合可以用来实时监测空间数据,即实时准确监测危险岩坡的形变过程,它可在瞬

间产生目标定位坐标,如滑坡原位监测,其垂直变位精度可达 5mm,水平变位精度可达 2mm,但不能给出定位点的地理、地质属性。RS 可快速获取区域面状信息,但又受光谱波段限制,有众多的地物特性不可遥感。综上可以看出,集 GIS、GPS 和 RS 为一体的 3S 系统,如同善于分析的大脑又增添了两只眼睛,是一个完整的有机整体。例如针对三峡库区边坡,崔政权率先提出“3S 工程”的概念和设想,从 1997 年着手建立“三峡库区边坡稳态 3S 实时工程分析系统”,并给出了系统的框图,何满潮教授将该系统按功能分为三大部分,即 3S 接收处理系统、GIS 地理信息系统和工程分析专家系统等。

1.2.4 边坡工程中的人工神经网络方法

人工神经网络(neural network, NN)是指由大量简单神经元经广泛互联构成的一种计算结构,它是一种广义的并行处理系统。人脑的认知模式被认为是一种并行的分布式模式,神经网络采用类似于人脑的神经网络的体系结构来构造模型仿真人大脑的功能,即把对信息的储存和计算推理同时储存在一个单元里。因此,在某种程度上神经网络被认为可以模拟生物神经系统的工作过程。特别是通过抽象、简化和模拟手段,神经网络部分反映了人脑的某些功能特征,且具有高度非线性、自组织、自学习、动态处理、联想记忆、容错性等特征。近年来,人工神经网络开始应用于边坡工程的稳定性分析和评价,对于解决复杂的边坡系统工程的稳定性问题提供了一条新的途径。

白占平博士针对露天矿发生的顺层滑坡,利用 BP(back propagation)神经网络原理,建立了边坡系统状态识别人工神经网络模型,选择海州露天矿 66 次滑坡实例和 34 个典型非失稳边坡模型作为样本进行训练和预测,取得了显著成果。夏元友等应用人工神经网络(ANN)BP 模型建立了岩质边坡稳定系数的估算方法。BP 模型的最大特点是非线性动力学、自学习和实时处理等,能通过对已知样本的学习,掌握输入与输出间复杂的非线性映射关系,并对这种关系进行存储记忆,直接为其他样本预测提供服务。估算边坡的稳定系数就是利用 BP 模型的高度非线性映射功能,根据大量的极限平衡法分析实例,用实例计算条件作为网络的输入,以实例分析结果(稳定系数)作为网络的输出,进行网络训练,用学习好的网络对边坡稳定系数进行估算。

1.2.5 边坡工程中的数值计算和仿真

从 20 世纪 70 年代开始,数值计算被广泛地应用于边坡工程,比较成熟的三大数值方法是有限单元法、边界单元法和离散单元法。其中有限单元法是通过离散化,建立近似函数把有界区域内的无限问题简化为有限问题,并通过求解联立方程对工程问题进行应力位移分析的数值模拟方法,它假定工程岩体是连续的力学介