

谭文辉 蔡美峰 著

边坡工程广义可靠性 理论与实践

6.1
2



科学出版社
www.sciencep.com

边坡工程广义可靠性 理论与实践

谭文辉 蔡美峰 著

046
7/32
科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是在理论与实践相结合的指导思想下编写的,是作者多年的研究成果。本书全面系统地阐述了边坡工程中不确定性分析的基本原理和方法,对岩体力学参数的空间变异性、边坡的时变性与破坏的渐进性、边坡稳定性评价等时空不确定性进行了较为全面的分析,主要内容包括:边坡工程可靠性分析基本原理、边坡工程的空间不确定性——岩体性质的空间变异性及其工程应用、边坡工程的时间不确定性——边坡工程的时变性与破坏的渐进性研究、边坡稳定性的广义可靠性分析以及对边坡的时空变化进行监测的最新技术等。

本书可供矿山、交通、水电、土建、水利等领域的科研、设计和施工人员参考,也可作为高等学校岩土工程、采矿工程、道路与铁道工程、工程地质、水工结构工程、工程力学、防灾减灾与防护等专业学生的相关教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

边坡工程广义可靠性理论与实践/谭文辉,蔡美峰著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-025822-9

I. 边… II. ①谭…②蔡… III. 边坡-道路工程-可靠性理论
IV. U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 188890 号

责任编辑:刘宝莉/ 责任校对:陈玉凤

责任印制:赵 博/ 封面设计:鑫联必升

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

*

2010 年 1 月第 1 版 开本: B5 (720×1000)

2010 年 1 月第一次印刷 印张: 10 1/2

印数: 1—2 500 字数: 198 000

定价: 45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

前 言

不确定性是工程中广泛存在的客观现象,对工程中不确定性因素的认识和解决是工程技术水平发展的一个关键环节。

作者多年来一直致力于边坡工程中的不确定性研究,先后参与了煤炭科学基金项目:“边坡三维动态系统随机分析”、国家“十五”科技攻关项目课题:“大型深凹露天矿高效运输系统及强化开采技术研究”以及横向合作项目:“铁路、建筑物附近露天开采边界问题研究”、“爆破震动对岩质公路边坡稳定性影响的综合研究”等科研项目的研究。结合研究项目,作者查阅了国内外大量有关工程可靠度基本理论、计算方法和应用研究的文献,并发表了多篇研究论文,在边坡工程力学参数的不确定性、边坡破坏的不确定性、边坡稳定性的评价等方面进行了大量的工作。

不确定性包括随机不确定性和模糊不确定性,传统的工程设计和研究中,大多只考虑随机不确定性或模糊不确定性。目前国内外已出版了多本有关工程结构可靠性的著作,但在边坡工程领域,专门介绍边坡广义可靠性及其应用的著作还没有,已有的介绍边坡可靠性的著作都只考虑了随机不确定性,而没有考虑模糊不确定性。基于这一考虑,作者完成了本书。本书书名中的“广义”有两方面的含义,一方面是同时考虑模糊不确定性和随机不确定性;另一方面是研究的系统化,包括边坡的空间不确定性、时间不确定性、稳定性评价的不确定性方法,以及时空不确定性监测的新方法等。因此,本书分6章,主要内容包括:岩土体性质的空间变异性、边坡工程的时变性与破坏的渐进性、边坡的广义可靠性分析、边坡时空变化监测的新技术等。

在本书的完成过程中,作者得到课题组的同事、现场的工程师,以及身边的亲人和朋友的帮助,对此深表感谢;著述本书是作者总结10多年研究、学习的心得,同时也是对这些无私的关心者的回报。感谢在本书完成过程中给予作者热心帮助的人们。

限于作者水平,本书难免存在不足之处,作者热切希望读者和同行专家批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 边坡工程稳定性研究现状	1
1.1.1 边坡稳定性计算方法的进展	1
1.1.2 边坡工程分析理论的进展	5
1.2 边坡工程中的不确定性问题	10
1.2.1 边坡工程中的随机性与模糊性	10
1.2.2 边坡工程的空间变异性——随机性和相关性	11
1.2.3 边坡工程的时变性与破坏的渐进性	12
1.2.4 边坡工程的广义可靠性分析	13
1.2.5 边坡时空变化监测的新技术	14
1.3 本书的主要内容和特点	15
参考文献	16
第 2 章 边坡工程可靠性分析	22
2.1 概述	22
2.2 边坡工程可靠性分析的概念	23
2.2.1 可靠性与可靠度	23
2.2.2 结构极限状态函数	23
2.2.3 边坡工程可靠性分析原理	24
2.3 边坡可靠性分析的基本方法	24
2.3.1 随机变量的概念	24
2.3.2 随机变量的数字特征	25
2.3.3 随机变量的概率分布形式	26
2.3.4 随机变量概率模型的建立	27
2.3.5 可靠指标	29
2.3.6 边坡稳定性状态函数	30
2.4 边坡稳定性分析常用的可靠性计算方法	32
2.4.1 蒙特卡罗模拟方法	32
2.4.2 罗森布鲁斯法	35

2.4.3 一次二阶矩法	37
参考文献	41
第3章 岩土体性质的空间变异性及其工程应用	42
3.1 岩土体性质的随机性与区域性	42
3.2 空间信息统计学分析方法	43
3.2.1 空间信息统计学的产生与现状	43
3.2.2 区域化变量	44
3.2.3 变差函数	44
3.2.4 二阶平稳假设	45
3.2.5 实验变差函数	46
3.2.6 变差函数的理论模型	47
3.2.7 变差函数的拟合	49
3.2.8 理论变差函数的最优性检验	51
3.3 岩体强度参数空间变异性的实例分析	53
3.3.1 实例简介	53
3.3.2 边坡岩体强度的点荷载测试及概率统计分析	54
3.3.3 岩体强度参数的地质统计学模型	57
3.4 岩土体强度空间变异性分析	60
3.5 岩土体强度空间变异性对边坡可靠性的影响分析	61
参考文献	63
第4章 边坡工程的时变性与破坏的渐进性	65
4.1 概述	65
4.2 边坡渐进破坏的力学模型	67
4.2.1 边坡临界滑面确定的 FLAC-Monte Carlo 法	67
4.2.2 边坡渐进破坏概率模型	72
4.3 边坡渐进破坏的物理模拟和数值模拟	75
4.3.1 岩体边坡渐进破坏过程的物理模拟	75
4.3.2 边坡渐进破坏过程的数值模拟研究	75
4.4 边坡渐进破坏的随机可靠性分析	77
4.4.1 边坡渐进破坏的随机可靠性分析	77
4.4.2 边坡渐进破坏的敏感性分析	78
4.5 峰值强度与残余强度对边坡加固的影响研究	79
4.5.1 工程概况	79
4.5.2 计算模型	80
4.5.3 峰值强度与残余强度对边坡加固的影响分析	81

4.6 流变理论在边坡时变性和破坏渐进性研究中的探索	83
参考文献	87
第5章 边坡稳定性的广义可靠性分析	91
5.1 可靠性方法在边坡工程系统中的应用及局限性	91
5.2 确定力学参数的模糊随机方法	92
5.2.1 力学参数确定中的随机性和模糊性	92
5.2.2 岩石试验指标取值的模糊随机方法	93
5.2.3 实例分析——岩石点荷载强度指标的模糊随机分析	94
5.3 边坡广义可靠性分析的模糊点估计法	97
5.3.1 统计矩点估计法	97
5.3.2 模糊截集理论	97
5.3.3 模糊点估计法	98
5.4 实例分析	99
5.4.1 实例简介	99
5.4.2 伪连续边坡的模糊随机可靠性分析	102
5.4.3 非连续边坡的模糊随机可靠性分析	108
5.4.4 参数敏感性分析	112
5.5 水对边坡稳定性影响的模糊随机可靠性分析	114
5.5.1 水对边坡稳定性的固-液耦合分析	114
5.5.2 水作用下边坡稳定性的模糊随机可靠度计算	118
5.5.3 有水与无水条件下计算结果的比较	118
5.6 边坡稳定性的可接受模糊随机可靠度准则	119
参考文献	120
第6章 边坡时空变化监测的新技术	122
6.1 GPS 动态监测技术及其在深凹露天矿边坡工程中的应用	125
6.1.1 GPS 基本原理	126
6.1.2 GPS 监测点与监测网布设	134
6.1.3 GPS 监测方式与监测周期	136
6.1.4 GPS 动态监测的数据处理	136
6.1.5 水厂铁矿边坡 GPS 动态监测分析	137
6.2 高密度电阻率成像系统在边坡工程中的应用	141
6.3 光纤技术在边坡工程中的应用	145
6.3.1 边坡光纤监测技术现状	145
6.3.2 光纤传感技术及其应用	147
参考文献	154
后记	157

第 1 章 绪 论

1.1 边坡工程稳定性研究现状

边坡工程的稳定性问题是岩土工程的主要研究内容之一。人们对边坡稳定性的认识最早是从滑坡现象开始的,早期对边坡稳定性的研究多以长期观测的资料为基础,采用“地质历史分析”方法、工程类比法、图解法等进行定性描述分析。定性分析法能综合考虑影响边坡稳定性的各种因素,快速地对边坡工程的稳定状态及其发展趋势作出评价。缺点是在评价边坡工程的稳定状态时往往以人的经验为主,解决边坡工程问题的范围较窄,并带有很大的主观随意性。20 世纪 60 年代初期,意大利瓦依昂水库岸坡失事以及国内外一系列水电工程失稳事故,使人们认识到边坡稳定性的研究必须将地质分析与力学机制分析紧密结合起来,这期间,边坡研究主要采用刚体极限平衡法,并开始重视对岩体中结构面强度及变形特性的研究,根据岩体结构特点对边坡的破坏模式进行分类。进入 20 世纪 80 年代以来,人们越来越认识到传统的定性分析法和极限平衡法存在着极大的局限性,边坡工程中广泛存在着非连续性、非线性、不确定性等,随着计算理论和计算机技术的发展,一系列数值方法和一些新理论被引入边坡研究中,它们从不同的角度,对边坡体的结构、稳定性影响因素等进行了研究,从而极大地推动了边坡稳定性的研究^[1]。

1.1.1 边坡稳定性计算方法的进展

边坡稳定性分析和评价是边坡工程研究的核心。不同的边坡破坏方式存在不同的滑动面形式,因此采用不同的分析方法及计算公式来分析其稳定状态。例如,平面直线滑动的滑坡,可用平面直线法来计算;圆弧滑坡可选择 Fellenius 法和 Bishop 法来计算;复合破坏面滑坡可采用 Janbu 法、Morgensten-Price 法、Spencer 法等来计算;对于折线型的滑坡可以采用传递系数法、Janbu 法等来分析计算;对于楔形四面体岩石滑坡可以采用楔形体法来计算;对于受岩体结构面控制而产生的滑坡可选择 Sarma 法来计算;此外还可以采用 Hovland 法和 Leshchinsky 法等对边坡进行三维极限平衡分析^[2]。

上述方法本质上都属于极限平衡法,极限平衡法是根据斜坡上的滑体或滑体分块的力学平衡原理(即静力平衡原理)分析斜坡各种破坏模式下的受力状态,以

及斜坡体上的抗滑力和下滑力之间的关系来评价斜坡的稳定性。极限平衡法具有模型简单、计算简捷、可解决各种复杂剖面形状、能考虑各种加载形式的优点,但是该法引入了过多的人为简化假设,不考虑岩土体自身的应力、变形等力学状态,对滑坡的边界条件大大地进行了简化,计算中选用的各种参数也往往是确定的或线性变化的,对复杂现象进行这样的简单处理方法,在具体的工程实例中虽然也起到了一定的作用,但并不是对客观实际的真实反映。实际上,不仅滑坡体的各种计算参数是不确定的,而且边坡系统本身就是一个不平衡、不稳定、充满复杂性的复杂系统,与外界环境有着不断的物质、能量和信息的交换。

为了更真实地反映实际工程体的力学行为,人们进行了各种尝试,在数值计算方法上,以计算机技术为基础,发展了一系列的新方法。

1) 自适应有限元方法

有限单元法是以连续介质力学为基础的数值分析方法。它将分析域离散成有限个只在结点处相联结的子域,即有限元,然后在单元中采用低阶多项式插值,建立单元刚度矩阵,再利用能量变分原理集合形成总刚度矩阵,最后结合初始条件及边界条件进行求解。20世纪70年代开始,自适应理论被引入有限元计算中,其主导思想是减少前处理工作量和实现网格离散的客观控制。经 Zienkiewicz 等学者^[3~7]的努力,已经基本建立了一般弹性力学、流体动力学、金属成形、渗流分析等领域的平面自适应分析系统。

三峡课题组对水工结构和岩土工程结构进行了弹黏塑性自适应有限元分析理论的研究和软件开发,并形成了实用的二维弹黏塑性自适应有限元分析软件系统,对三峡船闸边坡进行了较好的研究^[8];邓建辉等^[9]运用该法对边坡网格加密型的自适应性进行了分析,也取得较好效果;陈尚法等^[10]应用该法对大岩淌滑坡进行了变形与稳定分析。吴余生等^[11]采用自适应有限元法进行边坡稳定分析,将改进的遗传算法和自适应有限元法相结合,建立基于应力场的边坡任意形状临界滑动面的全局搜索方法。

2) 离散单元方法

离散单元方法(distinct element method, DEM)于1971年由 Cundall^[12]首次提出,其基本原理是牛顿运动定理。离散单元法是将所研究的区域划分成一个个分立的多边形块体单元,单元之间可以看成是角-角接触、角-边接触或边-边接触,而且随着单元的平移和转动,允许调整各个单元之间的接触关系,最终,块体单元可能到过平衡状态,也可能一直运动下去。离散单元法的原理虽然比较简单,但在解决非连续介质大变形问题时却是非常实用的,离散单元法的单元,从性质上分,可以是刚性的,也可以是非刚性的;从几何形状上分,可以是任意多边形,也可以是圆形。

离散单元法一个突出的功能是它在反映岩块之间接触面的滑移、分离与倾翻

等大位移的同时,又能计算岩块内部的变形与应力分布;另一个优点是它利用显式时间差分解法(动态松弛法)求解动力平衡方程,这一方法用于求解非线性大位移与动力稳定问题具有独特的优势。该法适用于不连续介质、大变形、低应力水平。

为了模拟颗粒体的力学行为,Ghaboussi 与 Barbosa^[13]提出了刚体离散元。在离散元与其他数值技术耦合方面,Lorig 等^[14]提出了一种离散元与边界元耦合模型用于模拟裂隙岩体与完整岩体的组合系统。Lemos^[15]发展了离散元动力分析程序,可用于计算岩石工程的地震响应问题以及混凝土坝与地基动力相互作用问题。Iwashita 与 Hakuno^[16]研究了岩石陡坡的动力稳定过程。

王泳嘉^[17]首次在我国应用这一方法于节理岩体的数值分析中。张楚汉等^[18~19]利用该法提出了岩质边坡失稳判别标准,定义了安全系数,并将二维可变形离散元用于三峡边坡的地震研究中。

3) 快速拉格朗日分析法

快速拉格朗日分析法(fast Lagrangian analysis of continue,FLAC)是由 Cundall^[20]于 1976 年根据显式有限差分原理提出的一种显式时间差分解法,有限差分法主要思想是将待求解问题的基本方程组和边界条件(一般均为微分方程)近似地改用差分方程(代数方程)来表示,即由一定规则的空间离散点处的场变量(应力、位移)的代数表达式代替,这些变量在单元内是非确定的,从而把求解微分方程的问题转化为求解代数方程的问题。

基于牛顿运动定理,FLAC 方法可以考虑材料的非线性和几何学上的非线性,采用动态运动方程式,有效地克服了系统模型内的不安定因素;采用混合离散化法使塑性破坏和塑性流动得到体现;采用显式时间差分解法,大大提高了运算速度。该法由美国 Itasca 咨询公司首先使用并推广,适用于求解非线性大变形,但节点的位移连续,本质上仍属于求解连续介质范畴的方法。

黄润秋等^[21]介绍了 FLAC 在岩石边坡中的应用情况。王志伟等^[22]用 FLAC 程序对裂隙性黏土边坡的渐进性破坏过程进行了描述。赵宝云等^[23]结合实际工程,利用了拉格朗日有限差分法 FLAC 程序对爆破震动作用下某边坡进行了数值模拟,获得该边坡爆破震动特征及位移场、振动速度场的变化规律,研究成果对保证边坡安全具有较好的指导作用。

4) 边界元法

边界元法(boundary element method,BEM)是 20 世纪 70 年代兴起的一种数值计算方法,以 Betti 互等定理和 Kelvin 基本解为理论基础。边界元法前处理工作量少,能有效模拟远场效应,普遍应用于无界域或半无界域问题的求解。1983 年,Crouch 和 Starfield^[24]首次系统地介绍了边界元法的几种方法及其在岩石力学问题中的应用的例子。Crotty 和 Wardle^[25]于 1985 年提出了能分析含有连续弱面的非均匀介质的边界元程序。由于边界元法是以弹性理论为基础,因而从理论

上讲只能适用于线弹性介质,而且最好是单一介质和连续介质问题^[26]。

许瑾等^[27]采用地震波作动载荷,用边界元法对边坡动态稳定性进行分析,从理论上探讨了边坡的动态稳定性判据。杨天鸿等^[28]应用边界元数值方法模拟研究了巷道疏干边坡地下水的动态过程,结果表明,边界元数值方法模拟断面尺寸较小的排水设施十分有效。

5) 界面元方法

界面应力元模型源于 Kawai^[29]提出的适用于均质弹性问题的刚体-弹簧元模型。基于累积单元变形于界面的界面应力元模型是不连续介质变形体的新模型,该法建立了适用于分析不连续、非均质、各向异性和各向非线性问题、场问题以及能够完全模拟各类锚杆复杂空间布局和开挖扰动的界面元理论和方法,为复杂岩体的仿真计算提供了一种新的有效方法。

章青和卓家寿^[30]针对三峡船闸高边坡的特点,提出了不连续介质变形体的界面应力元模型和工程稳定问题的干扰能量法,并对三峡船闸高边坡进行了分级开挖仿真计算,评价了其稳定状况。王建良^[31]采用基于弹-黏塑性模型的界面元法求解软岩边坡的应力场和位移场,对云南玉溪钢铁股份公司的原料堆场边坡进行了稳定性分析。薛翊国^[32]借助随机不连续面三维网络计算机模拟技术,用界面元法对锦屏一级水电站左岸裂隙渗流模型进行了分析与探讨,建立了左岸坝肩三维数值模型,并进行了水电站高边坡开挖的稳定性分析和支护加固措施的研究。

6) 不连续变形分析法

不连续变形分析法(discontinuous deformation analysis, DDA)由 Shi(石根华)与 Goodman^[33]于 1989 年提出,是基于岩体介质非连续性,利用最小位能原理发展起来的一种崭新的数值分析方法,它兼具有限元与离散元法二法的部分优点。此法将每个块体作为一个单元,块体与块体间通过接触机构进行连接,通过分析单个块体或块体系统的动态平衡,求解块体的受力和运动,可模拟出岩石块体的移动、转动、张开、闭合等全过程,据此可判断出岩体的破坏程度、破坏范围,从而对岩体的整体和局部的稳定性作出正确的评价。非连续变形分析可考虑渐进型破坏,这为其在工程界的应用开辟了广阔的前景。

王书法等^[34]对原非连续变形分析方法(DDA 方法)中边界约束方法进行了推广,将其应用于节理岩质边坡变形规律的数值模拟。张国新等^[35]根据最小能量原理构造出单元 DDA 的瞬时平衡方程,编制了基于 DDA 的岩石裂隙中稳定渗流和不稳定渗流压力水头的有限单元计算程序。邬爱清等^[36]利用 DDA 方法分别计算仅考虑滑动面摩擦角和同时考虑摩擦角和黏聚力条件下块体的运动稳定性和安全系数,将 DDA 方法应用于乌江银盘水电工程右坝肩边坡开挖后因软弱断层控制引起的稳定性及处理措施优化取得较好效果。

7) 数值流形法

数值流形法(numerical manifold method, NMM)是 Shi(石根华)^[37]通过研究 DDA 与有限元的数学基础于 1995 年提出的,是 DDA 与有限元的统一形式。NMM 以拓扑流形和最小位能原理为基础,应用有限覆盖技术,吸收有限元法与 DDA 法各自的优点,通过分析域内各物理覆盖上建立一般覆盖函数和加权求和形成总体位移函数,从而把连续和非连续变形的力学问题统一到流形方法之中。该法在积分方法上采用与传统数值方法不同的方法——单纯形上的解析积分形式,对于解决复杂地质问题,动、静交叉问题,以及连续和不连续介质耦合问题等是一种高效精确的数值分析方法,可以统一解决 FEM、DDA 和其他数值计算方法耦合的计算问题。

周维垣、裴觉民、王芝银等^[38~40]相继将 NMM 引入我国工程界。李树忱^[41]以大型水电地下洞室群(岩石高边坡)中断续节理岩体为研究背景,以数值流形方法和无网格方法为基础,研究了断续节理岩体中岩体不连续及其尖端场的数值模拟方法,并进行了实验研究,研究表明应用该法可较好地求解裂隙岩体连续和非连续及其所带来的局部化问题。钱莹等^[42]用流形元法对爆破地震波作用下的边坡进行了数值模拟。

数值分析方法能从较大的范围考虑边坡介质的复杂性,比较全面地分析边坡工程的应力与变形状态,能够对边坡工程从局部开始渐进扩展至整体破坏的过程进行量化表征,有助于人们对边坡工程破坏模式和变形破坏规律的认识。随着数值分析方法的不断发展,数值计算方法目前已由线性发展到高度非线性和大变形,由二维发展到三维,同时可考虑黏性流变、渗流、温度、热导与应力场耦合、损伤、断裂以及波动和动力效应。同时,不同数值方法的相互耦合已成为数值方法的发展趋势,如有限元与边界元的混合、有限元与离散元的混合、有限元与 DDA 的混合等。

由于实际边坡工程的复杂性,如何合理概化边坡工程岩体的特性,建立符合边坡工程实际的计算模型、正确选用计算参数等仍有待进行深入的探讨和研究。

1.1.2 边坡工程分析理论的进展

在边坡稳定性分析中,数值计算方法仅仅是工具,如果缺乏对研究对象、行为、过程的正确认识,是不可能得到客观的分析结果的。事实上,非线性是边坡变形破坏行为的本质特征^[43],这主要表现在:①当岩体变形进入塑性、断裂、破坏后,就会在系统中出现分叉、突变等非线性复杂力学行为;②边坡工程系统规模大、系统复杂,原始条件和环境信息不确定。通常,岩体的变形、损伤、破坏及演化过程包含了互相耦合的多种非线性过程,因而决定论的和平衡态的传统力学方法难以描述系统的力学行为;③岩石材料的高度无序分布,岩体内地应力随时空而变,岩石成分

与构造的复杂性和多相性,岩体开挖和施工工艺的影响,构成了边坡岩体工程高度的非线性;④岩石(体)的变形、损伤、破坏过程是一个动态的非线性不可逆演化过程,各种参数处于变化之中。由此可见,边坡工程系统是一个非线性和动态演化系统。

因此,为了适应边坡岩体的非确定性特征,边坡研究者将以耗散结构、协同学、突变理论、分形理论、神经网络理论等为核心的非线性科学理论和可靠性理论、模糊数学、随机过程等不确定性理论引入到边坡工程分析中。

1) 边坡稳定分析的模糊综合评判法

模糊数学对于处理经验事件和模糊性的概念具有一定的优势。边坡稳定分析的模糊综合评判法是把模糊评判和层次分析法相结合进行滑坡综合评判。其基本思路是,分析影响滑坡的各种因素,采用层次分析法将各种因素划分层次,建立递阶关系,求出各类影响指标对稳定性的影响程度,最后用模糊评判方法按最大隶属度原则进行选择,判断边坡属于哪种状态。实践证明,模糊评判法为受多变量、多因素影响的边坡稳定性的综合评价提供了一种有效的手段。

李彰明^[44]、李文秀^[45]分别用模糊理论对边坡的稳定性进行了判别研究。温世亿等^[46]建立了边坡稳定性分析的多级模糊综合评判模型,并对某水电站卸荷高边坡进行了综合评判。孙树海等^[47]针对露天边坡稳定性问题,分析了影响露天矿边坡稳定性的主要因素,建立了模糊综合评判方案模型并用于实际工程的判别。

2) 可靠性分析方法

边坡工程可靠性分析是近 20 年发展起来的评价边坡工程状态的新方法,它把边坡岩体性质、荷载、地下水、破坏模式、计算模型等影响边坡稳定性的多个因素作为不确定量,借鉴结构工程可靠性理论方法,结合边坡工程的具体情况,用可靠指标或破坏概率来评价边坡安全度。与传统的确定性理论相比较,可靠性分析能更好地反映边坡工程的实际状态和安全程度,正确合理地解释许多用确定性理论无法解释的工程问题。

祝玉学^[48]、王家臣^[49]对边坡的可靠性分析进行了较为系统的论述。孟达等^[50]以鞍钢眼前山露天铁矿南邦节理岩体边坡为工程背景,综合应用 FLAC-3D、损伤力学、断裂力学和可靠性分析等多项理论和方法,系统研究了露天矿边坡的节理岩体伴随采矿开挖的概率损伤分析程序,定量揭示了边坡岩体概率损伤分布及演化规律。吴应祥等^[51]基于 ANSYS 概率设计系统,提出了利用 ANSYS 概率分析功能对边坡稳定性进行可靠性分析的方法。陈昌富等^[52]基于响应面法,建立了一种高效的边坡可靠度指标和失效概率近似计算方法。

3) 岩质边坡稳态判别的灰色系统理论

灰色系统理论是研究信息不完全系统的有效方法,由我国的邓聚龙教授首创。在系统分析中,常用的定量方法大多是数理统计法,如回归分析、方差分析、主成分

分析,其中回归分析法最为常用。然而,回归分析有要求大样本量、要求样本有较好的分布规律、计算工作量大以及可能出现量化结果与定性分析结果不符的现象等弱点。灰色系统理论可在不完全的信息中,对所要分析研究的各因素,通过一定的数据处理,在随机的因素序列间,找出它们的关联性,发现主要矛盾,找到主要特性和主要影响因素。因此,特别适合像边坡稳定性这种数据有限、没有原型、复杂且具有不确定性问题的分析和评价。

边坡中主要是用灰色关联理论进行稳定性判别,将影响边坡稳定的诸因素作为岩质边坡稳定性的判别变量,用多组判别法就可以得到边坡各种状态的概率,以此判别边坡的稳定与否。殷坤龙等^[53]用 Verhulst 预测模型进行滑坡预测。李造鼎等^[54]以能量突变为材料破坏的特征,提出灰色能量突变模型来研究边坡的破坏。刘造保等^[55]针对强随机性的边坡监测时间序列,提出了考虑斜率修正的灰色 GM(1,1) 预测模型,将该模型应用于锦屏一级水电站左岸高边坡中某部位岩体的应力发展趋势的短期预测。杨静等^[56]采用均匀设计安排试验,运用灰色理论中的灰色关联分析考察了边坡稳定性影响因素的主次。

4) 边坡系统破坏非线性动力学

任一边坡系统破坏演化都遵循一般非线性系统演化具有的普遍规律。非线性动力学是耗散结构理论及协同学在解决问题时共有的有效数学工具。滑坡系统的动力特征可以用多组状态变量来描述,但位移就能够反映出边坡的各个变量的痕迹和整个系统的特征^[57]。因此可以结合大量的位移观测资料,利用非线性动力学方法反演滑坡系统的非线性动力学方程,从而预测滑坡系统的动态行为。秦四清、黄明国等^[58~61]在这方面进行了一些有益的尝试。

5) 边坡系统变形破坏的自组织

从耗散结构理论及协同学的观点出发,考虑滑坡系统发展演化的全过程,无一不完美地体现了自组织的特征,在一定的时期内,滑坡系统中各个地质要素之间以及外部诱导因素之间的分布和作用相对平衡的,处于一种混沌状态。这时斜坡系统是相对稳定的,随着时间的推移以及各种触发因素如暴雨、地震等的作用,边坡系统就从混沌状态出发向功能组织演化,形成完全不同的新的稳定有序结构,这种不断实现的无序→有序平衡态→近平衡态→远离平衡态的演化和发展过程就是边坡的自组织,从这个过程可以看出,滑坡系统的自组织过程不具有稳定性,因而有可能透过程序分析抓住滑坡的本质。

周萃英^[62]对滑坡系统的自组织特性进行了较为深刻的研究。姚裕春等^[63]应用信息熵定量地描述了边坡演化自组织过程(减熵过程)。何越磊等^[64]通过多组实验研究了松散体边坡演化行为规律,研究表明幂律特征及自组织临界性是许多松散体边坡灾害的共性。

6) 滑坡预测中的分形分维理论

分形是指具有自相似的几何客体。表述这种自相似性的定量参数为分维,分形常用的表示方法有相似维、信息维、关联维等。研究自然客体的分维值可以了解其复杂程度和演化规律。在边坡稳定性分析中,根据边坡位移的监测资料,依据关联维数 D_2 的原理,应用分形理论确定边坡状态空间维数的充分和必要值,然后依据 Renyi 熵 k_2 的原理,用 k_2 和 $|k_2|$ 来分析边坡稳定性和稳定程度。

易顺民等^[65,66]采用容量维和信息维计算了滑坡活动的时间和空间分维,明确指出降维是滑坡的前兆。郑明新等^[67]利用分形理论研究了新滩滑坡的观测资料,阐明了滑坡的位移分维、速度分维与滑坡动态的相关性。秦鹏等^[68]以小湾水电站高边坡典型位置的位移数据为依据,引入分形理论对监测数据进行分析。张飞等^[69]应用分形理论研究了某露天矿边坡滑体的监测位移速率的时间序列。张子新等^[70,71]也将分形理论用于边坡的稳定性分析中。

7) 边坡失稳的分岔与突变模型

突变理论是法国数学家 Thom^[72]于 20 世纪 70 年代初创立的,是用来研究不连续现象的一个新兴的数学分支,对于研究一个复杂的、难以确定其微分方程的系统表现出极大的优越性。边坡失稳的分岔与突变理论可以用来描述边坡系统的控制变量连续变化而导致边坡状态突变的过程。

许强等^[73~75]研究不同产状岩体失稳的突变规律,建立了岩质坡体的势能函数,从理论和方法上建立了几类岩体的突变模型,并应用突变理论对斜坡的失稳时间进行预测,在实践中得到较好的检验。黄志全等^[76]基于单状态变量摩擦定律,把协同学和分岔理论联系起来,建立了边坡失稳时间预报的协同-分岔非线性理论模型,并对新滩滑坡进行了预报研究。姜永东等^[77]根据含软弱夹层状岩质边坡失稳的特点,考虑内外环境因素对边坡稳定性的影响,建立了完善的边坡失稳尖点突变模型,分析得到了边坡系统发生突变的必要条件。周利杰等^[78]针对降雨触发的滑坡,运用突变理论分析了反倾岩质边坡弯曲倾倒破坏的力学机制。

8) 人工神经网络分析方法

人工神经网络是基于模仿大脑神经网络结构和功能而建立的一种信息处理系统。它是由大量简单元件相互连接而成的复杂网络,具有高度非线性,是能够进行复杂逻辑操作和非线性关系实现的系统。神经网络在边坡工程研究中主要是用于边坡稳定性的评价和滑坡时空预测预报。它根据待识边坡的固有特性、统计特性、结构特性、模糊特性、知识性,对待识边坡进行描述、量化,然后作为神经网络的输入,设置其期望值,与一些标准的(即已知其类别归属的)边坡样本进行比较,据此去调整权值,经过反复学习,直到获得理想的输出为止,然后用此理想的学习结果去识别未知的边坡。利用人工神经网络方法和理论,可以尽可能地将多种影响因素作为输入变量,建立这些定性定量影响因素同边坡安全系数与变形中的变形量

之间的高度非线性映射模型,然后用模型来预测和评价边坡工程的安全性。神经网络方法可考虑其他方法难以考虑的定性描述和人为因素,解决处理一些难以用明确的数学、力学方法表示的不确定性因素及其相互关系,对结论进行定量和定性分析,尤其适合处理象边坡工程这样内部规律不甚了解、不能用一组规则方程进行描述的不断变化、开放的复杂巨系统^[79,80]。

张德政等^[81]根据边坡稳定性评价特征和影响边坡稳定性因素的数据类型及特点,构造了神经网络复合模型来评价边坡的稳定性。薛新华等^[82]针对边坡工程稳定性分析中参数的不确定性,建立了评价边坡稳定状态的 SOFM 神经网络模型,得出 SOFM 神经网络比 BP 神经网络判别结果预测精度高的结论。姚颖康等^[83]结合大冶铁矿露天高陡边坡,分别运用多元线性回归和 BP 神经网络方法研究边坡稳定性预测模型,得出应用 BP 神经网络方法预测露天矿山高陡岩质边坡稳定性更有效的结论。

9) 3S(即 GIS、GPS、RS)技术

全球定位系统(GPS)、遥感(RS)、地理信息系统(GIS)称为 3S 技术,3S 技术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。滑坡演化发展所反映的信息具有地域性、多层次性、时效性的特征,GIS 能对所有空间相关的科学提供一个公用的平台和通用的数据结构,近年来在采矿和岩土工程中得到广泛应用。GIS 是一个进行数据捕获、输入、操作、转换、可视化、合并、检索、分析、模型化及输出的系统,提供了一种多功能的工具进行空间数据分析和表现,大大缩短了数据准备和处理的时间,并且 GIS 能处理来自不同数据源的信息。对于边坡三维问题,其稳定性取决于复杂空间分布的地形、地层、岩土力学参数及地下水等因素,但这些空间分布的信息很难在一般的边坡稳定分析程序中进行有效的分析管理,数据的更新也十分繁琐。而 GIS 恰好提供了一个公用的平台来处理这些复杂的空间信息,与边坡稳定性研究的基本方法耦合应用,为边坡稳定性分析提供了新的手段。

崔政权、何满潮从 1997 年开始建立了“三峡库区边坡稳态 3S 实时工程分析系统”。周翠英等^[84]将 MAP-GIS 系统应用于三峡库区奉节段进行了边坡失稳的确定性系数(CF)计算和滑坡因子敏感性分析。王明华等^[85]借助 GIS 的数据管理和空间分析功能,从三维地质模型中提取滑体几何参数和物理力学参数,提出了基于最小势能原理的斜坡稳定性三维计算方法。谢谟文和蔡美峰^[86]将 GIS 等信息技术与边坡稳定性分析的力学方法相结合,开展了信息边坡工程学的研究。

以上这些理论和技术引入到边坡分析中,极大地推动了边坡研究的进展,但是,它们尚处于初期阶段,因此存在各种不足,如由于滑坡系统参数的选择往往受到实际监测资料的限制,资料本身的误差也给模型带来较大的误差,因此滑坡过程的非线性方程的建立并非易事;对于滑坡的自组织特征,由于内部与外部之间的相

互作用和耦合机制不清楚,难以建立模型来分析和研究,只能由系统的一些宏观参数(如熵、分维数、Lyapunov 指数等)的数值分析来了解系统的复杂性;对于分形理论,尺度的选择对无标度域规律性会有一定的影响,滑坡系统并不是简单的分维。神经网络法虽然优点不少,但基础研究难度大,未形成完整的理论和体系。另外,储存知识的范围和程度将在很大程度上影响分析结果。因此,这些新理论的应用还有待于进一步的探索。

边坡工程研究中出现的新理论和新方法反映出当前的岩土工程研究者正由传统正向思维,即牛顿时代的思维模式向不确定方向,即系统思维、反馈思维、全方位思维(包括逆向思维、非逻辑思维、发散思维甚至直觉思维)发展^[87]。但是,数值方法的局限性和新理论仍有待完善,实际边坡工程又极其复杂,因此任何单一的理论和方法都不可能较好地解决具体问题。但是基于对边坡工程岩体、边坡工程复杂性和不确定性的认识,对边坡工程的不确定性和非线性研究已成为边坡稳定性研究的趋势,不确定性分析方法在边坡工程中的应用将具有广阔的前景。

1.2 边坡工程中的不确定性问题

1.2.1 边坡工程中的随机性与模糊性

边坡工程中,不可避免地涉及大量的不确定性因素,如岩体性质、载荷、破坏机理等。这些不确定性因素按其成因大致可分为物理不确定性、统计不确定性、模型不确定性和人为过失造成的不确定性。具体来说,岩层(土层)剖面与边界条件的不确定性、岩土性质的固有变异性、试验样品数量不足产生的不确定性、外加荷载大小和分布的不确定性、计算模型的不确定性、勘测取样方法与试验方法的误差产生的不确定性等。这些不确定性因素中,既有随机不确定性因素,也有模糊不确定性因素。

随机不确定性因素主要有荷载环境、地质环境、不同施工环境与条件等。模糊不确定性包括由于对岩体特性、变形破坏机理认识不清等导致的对岩石力学分析和模拟的模糊性,如概化模型、计算参数的选取、计算的假定、计算简化、计算图式、信息描述、测量精度以及设计施工数据与信息不足等。因此,在边坡工程系统分析中,必须根据不确定性的性质选用相应的分析方法。

岩体边坡工程中的这些不确定性,使人们对采用传统的确定性方法研究岩体边坡问题,即用安全系数表示安全程度产生了疑问。边坡安全系数是岩体许多参数的函数,既然这些参数具有不确定性,那么把安全系数作为确定值来判断边坡工程的安全程度显然是不够合理的。为了最大限度地消除岩体工程中的不确定性,人们试图从提高岩体测试技术和计算技术的精度入手,这种努力可以取得一定效果。然而,局