

基于智能算法的边坡 稳定性评价研究

赵建强 李克民 编著



煤炭工业出版社

基于智能算法的边坡稳定性 评 价 研 究

赵建强 李克民 编著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

基于智能算法的边坡稳定性评价研究/赵建强, 李克民
编著. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2016
ISBN 978 - 7 - 5020 - 5486 - 1

I. ①基… II. ①赵… ②李… III. ①边坡稳定性—
研究 IV. ①TV698.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 207416 号

基于智能算法的边坡稳定性评价研究

编 著 赵建强 李克民
责任编辑 彭 竹
责任校对 孔青青
封面设计 安德馨

出版发行 煤炭工业出版社 (北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
电 话 010 - 84657898 (总编室)
010 - 64018321 (发行部) 010 - 84657880 (读者服务部)
电子信箱 cciph612@126.com
网 址 www.cciph.com.cn
印 刷 北京市郑庄宏伟印刷厂
经 销 全国新华书店

开 本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 6¹/₄ 字数 140 千字
版 次 2016 年 11 月第 1 版 2016 年 11 月第 1 次印刷
社内编号 8349 定价 25.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换, 电话: 010 - 84657880

内 容 提 要

本书主要是利用智能算法来研究边坡的稳定性问题。通过分析影响边坡稳定性的各定性因素和定量因素,建立边坡稳定性影响因素评价的指标体系;利用主成分-模糊综合评判方法(PCA-FCE)建立边坡稳定性影响因素综合评价的数学模型并进行实证分析;设计领导者海豚群算法(LDHA)、改进非洲野狗算法(IAWDA),对算法的寻优能力进行测试,并对不同边坡案例进行实证分析等。

本书可作为从事煤矿设计、科研和生产管理方面相关人员以及相关高等院校师生工作和学习的参考用书。

前 言

近年来,露天采矿、公路、铁路等工程项目的边坡工程质量越来越受到大家的重视。边坡的稳定性受到具有随机性、模糊性、混沌性、可变性等不确定性特点的地质因素和工程因素的综合影响,边坡稳定性与影响因素之间具有高度的非线性关系,边坡稳定性评价结果的正确与否直接关系到边坡工程的成败。因此,对边坡稳定性做出准确有效地预测预报是岩土工程领域亟待解决的关键课题之一。

本书第1章主要由李克民编写,第3、4、5、6、7、8章主要由赵建强编写,第2、9章由赵建强和李克民共同完成,赵建强对全书通稿,李克民对全书进行了审核和校对。

本书在编写过程中得到了中国矿业大学马力博士后的大力支持与协助;俄罗斯圣彼得堡国立电子科技大学的葛考、南京理工大学的陈必科、河海大学的戴青松、徐州工程学院的徐康耀和郭浩等对本书的算法测试、文字校对等也给予了很多帮助,在此一并表示感谢!

由于编者水平有限,书中可能存在不妥或错误之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2016年5月

目次

0 绪论	1
1 边坡稳定性分析方法简介	5
1.1 边坡稳定性分析的定性分析法	5
1.2 边坡稳定性分析的定量分析法	6
1.3 边坡稳定性分析的不确定性分析法	8
2 边坡稳定性分析的主成分-模糊综合评判方法 (PCA-FCE)	9
2.1 边坡稳定性影响因素分析	10
2.2 基于主成分-模糊综合评价法的边坡稳定性影响 因素评价	11
3 现代仿生智能算法介绍	20
4 领导者海豚群算法 (LDHA)	26
4.1 算法设计	26
4.2 算法测试	30
5 改进非洲野狗算法 (IAWDA)	37
5.1 算法设计	37
5.2 算法测试	39
6 基于领导者海豚群算法的边坡最危险滑动面搜寻算法	50
6.1 算法设计	50
6.2 案例分析	54
7 基于改进的非洲野狗算法优化 BP 神经网络的边坡稳定性 预测算法	56
7.1 算法设计	56
7.2 案例分析	59

8 边坡稳定性算法的可视化处理.....	73
9 边坡稳定性综合评价的方法.....	78
9.1 评价方法.....	78
9.2 评价案例.....	79
参考文献	81

0 绪 论

在现实生活中人们经常遇到边坡问题,如公路和铁路修建过程中的边坡工程、水库大坝的安全稳定、高山地区的雨季滑坡、地震灾害中的山体滑坡、露天矿开采过程中的边坡不稳定等都会涉及边坡问题。随着社会的发展,世界各地的工程基础设施建设正如火如荼地进行,由于露天采矿、公路铁路建设、大型水利设施建设等规模越来越大,产生了大量的人工边坡,遇到的边坡稳定性问题也越来越突出,由于边坡失稳引起的事故常有报道。统计资料显示,近年来,我国工程滑坡灾害至少造成一千人死亡,经济损失巨大,仅云南漫湾水电站滑坡造成的损失就超过 10 亿元,延误工期一年以上。

滑坡是指“在一定自然条件下,山坡上部岩土在重力作用下整体沿一定的软弱带产生以水平移动为主的向下向前移动的现象”。它是岩土体变形中规模大、数量多、性质复杂的一种不良物理地质现象,同山崩、泥石流一样是一种常见的自然灾害。另外,随着国民经济的发展,基坑开挖越来越深,公路、铁路常常穿行于崇山峻岭中,因而高陡人工边坡越来越多,倘若设计或施工不当,在适当的诱因下,也常常发生滑坡。滑坡经常摧毁工程、破坏房屋、中断交通、毁坏农田、堵塞江河、冲垮桥涵等,对交通、矿业、水利、农田及城市建设等造成极大的威胁和危害。滑坡虽不像地震那样集中和强烈,但滑坡灾害分布面积广、发生频繁、影响时间长,有时与地震相伴而生,常成为地震的次生灾害。滑坡造成重大生命财产损失的事例很多,图 0-1 列举了我国一些典型滑坡实例,表 0-1 列举了一些世界重大滑坡灾害实例。我国幅员辽阔,地质构造复杂。据不完全统计,每年发生的滑坡数以万计,年平均经济损失达 30 亿~50 亿元。在我国西部地区,由于高强度地震诱发的滑坡也很严重。随着西部大开发的深入推进,滑坡灾害已成为经济发展的障碍。

表 0-1 世界重大滑坡灾害实例

发 生 地 点	时 间	灾 害 情 况
爪哇	1919 年	5100 人死亡, 140 个村庄被毁
中国 甘肃	1920 年 12 月 16 日	约 20 万人死亡
美国 加利福尼亚	1934 年 12 月 31 日	40 人死亡, 400 间房子被毁
日本 久礼	1945 年	1154 人死亡
日本 东京	1958 年	1100 人死亡
秘鲁	1962 年 6 月 10 日	3500 多人死亡
意大利 瓦伊昂	1963 年	约 2600 人死亡
英国 艾伯凡	1966 年 10 月 21 日	144 人死亡
巴西	1966 年	1000 人死亡

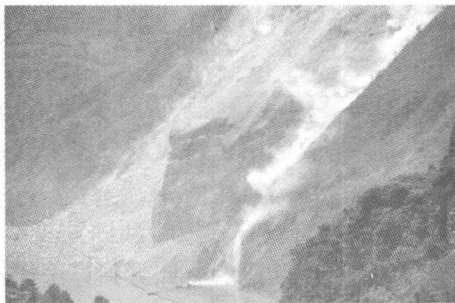
表 0-1 (续)

发生地点	时 间	灾 害 情 况
巴西	1967 年	1700 人死亡
美国 弗吉尼亚	1969 年	150 人死亡
日本	1969 年至 1972 年	519 人死亡, 1328 间房间被毁
秘鲁 永盖	1970 年 5 月 31 日	25000 人死亡
丘加	1971 年	259 人死亡
中国 香港	1972 年 6 月	138 人死亡
日本	1969 年至 1972 年	519 人死亡, 1328 间房间被毁
秘鲁 永盖	1970 年 5 月 31 日	25000 人死亡
秘鲁 丘加	1971 年	259 人死亡
中国 香港	1972 年 6 月	138 人死亡
日本	1972 年	112 人死亡
意大利南部	1972 年至 1973 年	约 100 个村庄被毁
秘鲁	1974 年 4 月 25 日	镇被毁, 451 人死亡
秘鲁	1974 年	450 人死亡
Semeru 山	1981 年	500 人死亡
秘鲁	1974 年	450 人死亡
尼泊尔西部	1983 年	186 人死亡
中国 东乡洒勒山	1983 年	4 个村庄被毁, 277 人死亡
哥伦比亚 阿尔米罗	1985 年 11 月	约 22000 人死亡
土耳其	1988 年 6 月	66 人死亡
中国 昆明	1990 年 2 月 21 日	25 人死亡
尼加拉瓜 卡西塔斯	1998 年 11 月 4 日	1500 人死亡
中国 云南盐津县	2002 年 8 月 12 日	9 人死亡
中国 云南昭通	2009 年 4 月 26 日	20 人死亡
中国 浙江丽水	2015 年 11 月 14 日	37 人死亡
中国 深圳	2015 年 12 月 20 日	76 人死亡
墨西哥	2016 年 8 月 7 日	38 人死亡

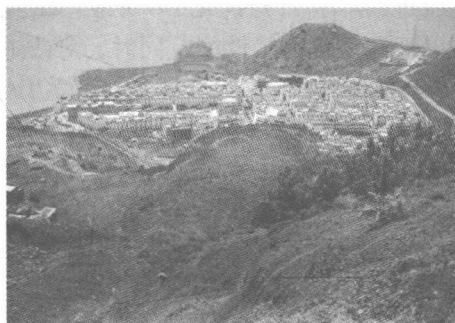
研究边坡稳定的影响因素、边坡的失稳机理对减少和解决失稳发生具有重大意义，是人类通过智慧来保护自身、减少灾难发生的正确选择，是人类追求人与自然和谐相处的必经之道。岩土边坡是一种自然地质体，一般被多组断层、节理、裂隙、软弱带所切割，从而使边坡存在薄弱面，在边坡角、地下水、地震动力等外因作用下，使边坡沿薄弱面产生相对滑移而产生失稳。边坡的变形、失稳，从根本上说是自身求得稳定状态的自然调整过程，而协助它趋于稳定的作用因素有自然因素和人类活动的因素。边坡研究的核心问题是边坡的稳定性问题，边坡稳定性问题涉及矿山工程、道路桥梁工程、水利水电工程、建筑



(a) 2008 年四川汶川地震山体滑坡阻塞交通



(b) 2014 年云南鲁甸地震山体滑坡形成堰塞湖



(c) 2010 年汉源万工乡滑坡 20 人失踪



(d) 2009 年四川攀枝花机场滑坡

图 0-1 我国典型的滑坡实例

工程等诸多领域，一直是岩石力学研究的一个重要课题。边坡稳定性分析与评价长期以来一直是边坡工程的重要核心内容之一，也是当今边坡工程的一个研究热点，贯穿于边坡工程的始终。边坡稳定性分析的一般步骤为：实际边坡—力学模型—数学模型—计算方法—结论，其核心内容是力学模型、数学模型、计算方法的研究，即边坡稳定性分析方法的研究。不同的边坡工程常常赋存于不同的工程地质环境中，不同的边坡稳定性分析方法又各具特点。因而，如何根据具体的边坡工程地质条件，合理有效地选用与之相适应的边坡稳定性分析方法，是值得深思的问题。从边坡工程研究的发展历程可见，边坡稳定性研究的发展过程同时又是边坡稳定性分析方法不断发展的过程。新的边坡稳定性分析方法不断出现，古老的方法又不断得到改进，且逐步由定性向定量、半定量的方向发展。边坡稳定性评价方法大致可以分为定性分析方法和定量分析方法两大类。此外，近年来，人们在前面两种分析方法的基础上，又引进了一些新的学科、理论等，逐渐发展起来一些新的边坡稳定性分析方法，如可靠性分析法、模糊综合评判法、系统工程地质法、灰色系统理论法等，这里暂且称之为不确定性分析方法。

综上所述，研究边坡稳定的影响因素、边坡的失稳机理，对减少和解决失稳发生都有很重大的意义。本书在梳理前人边坡稳定性评价成果的基础上，主要研究以下问题：

(1) 简单介绍边坡稳定性分析的定性分析、定量分析和不确定性分析方法。

(2) 分析影响边坡稳定性的因素, 建立边坡稳定性影响因素评价的指标体系, 利用主成分-模糊综合评价法建立边坡稳定性影响因素评价的数学模型, 并对某边坡案例进行实证分析。

(3) 模拟海豚捕食策略, 设计领导者海豚群算法, 并对算法的寻优能力进行测试, 利用领导者海豚群算法结合瑞典条分法来搜索最危险边坡滑动面, 并对边坡案例进行实证分析。

(4) 模拟非洲野狗狩猎策略和围捕策略, 设计改进非洲野狗算法, 并对算法的寻优能力进行测试, 利用改进的非洲野狗算法优化 BP 神经网络算法, 设计相应的边坡稳定性预测算法, 针对常用文献中的经典边坡案例、露天矿边坡案例、公路边坡案例、土质边坡案例、岩质边坡案例五类边坡案例, 利用上述改进的非洲野狗优化 BP 神经网络算法进行边坡稳定性预测测试, 研究算法的有效性、准确性和泛化性等性能。同时, 对改进的非洲野狗优化 BP 神经网络算法预测边坡稳定性程序进行封装, 设计简单易操作的边坡稳定性预测软件。

1 边坡稳定性分析方法简介

1.1 边坡稳定性分析的定性分析法

定性分析方法能综合考虑影响边坡稳定性的多种因素,并可快速地对边坡的稳定状况及其发展趋势做出评价。主要方法有工程地质分析法、边坡稳定性分析数据库和专家系统法、图解法等。

1.1.1 工程地质分析法

工程地质分析法是根据边坡的地貌形态、地质条件和边坡变形破坏的基本规律,追溯边坡演变的全过程,预测边坡稳定性发展的总趋势和边坡变形破坏方式,对边坡的稳定性做出定性评价;对已发生过滑坡的边坡,则判断其能否复活或转化。工程地质分析法包括两方面的任务:一方面要对与工程活动有关的天然斜坡或人工边坡的稳定性做出定性和定量的评价;另一方面要为设计合理的人工边坡和边坡变形破坏的防治措施提供依据。工程地质分析法包括地质分析法(历史成因分析法)、工程地质类比法等。

1. 地质分析法(历史成因分析法)

该方法主要根据边坡发育的地质环境、边坡发育历史中的各种变形破坏迹象及其基本规律和稳定性影响因素等的分析,追溯边坡演变的全过程,对边坡稳定性的总体状况、趋势和区域性特征做出评价和预测,对已发生滑坡的边坡,判断其能否复活或转化。地质分析法主要用于天然斜坡的稳定性评价。

2. 工程地质类比法

该方法实质上就是利用已有的自然边坡或人工边坡的稳定性状况及其影响因素、有关设计等方面的经验,并把这些经验应用到类似的所要研究边坡的稳定性分析和设计中去的一种方法。通过这些分析,来类比分析和判断研究对象的稳定性状况、发展趋势、加固处理设计等。在工程实践中,既可以进行自然边坡间的类比,也可以进行人工边坡间的类比,还可以在自然边坡和人工边坡间进行类比。

1.1.2 边坡稳定性分析数据库和专家系统法

(1) 边坡工程数据库是收集已有的多个自然斜坡、人工边坡实例的计算机软件。它按照一定的格式,把各个边坡实例的发育地点、地质特征(工程地质图、钻孔柱状图、岩土力学参数等)、变形破坏影响因素、形式、过程、加固设计,以及边坡的坡形、坡高、坡角等收录进来,并有机地组织在一起。

(2) 边坡稳定分析设计专家系统就是进行边坡工程稳定性分析与设计的智能化计算机程序。它把某一位或多位边坡工程专家的知识、工程经验、理论分析、数值分析、物理模拟、现场监测等行之有效的知识和方法有机地组织起来,建成一个边坡工程知识库,结合相关学科不同专家的知识进行推理和决策,对所研究的对象(边坡)进行稳定性评价。

1.1.3 图解法

图解法是通过分析结构面、岩性、地下水、坡度等因素的变化,根据相应的公式制成图表,这样可快速、直观地分辨出控制滑坡体的主要和次要结构面,确定出稳定类型,判定不稳定块体的形状、规模及滑动方向。图解法可进一步分为诺模图法和赤平极射投影图法。

1. 诺模图法

该法就是利用一定的诺模图或关系曲线来表征与边坡稳定有关参数间的关系,并由此求出边坡稳定安全系数,或根据要求的安全系数及一些参数来反分析其他参数(如结构面倾角、坡角、坡高等)的方法。

2. 赤平极射投影图法

该法就是利用赤平极射投影的原理,通过作图来直观地表示出边坡变形破坏的边界条件,分析不连续面的组合关系、可能失稳岩土体形态及其滑动方向等,进而评价边坡的稳定性,并为力学计算提供信息。

1.2 边坡稳定性分析的定量分析法

定量分析方法是通过力学原理对边坡进行稳定性分析,严格地讲,边坡稳定性分析还远没有达到完全定量这一步,目前它只能算是一种半定量的分析方法。边坡稳定性定量分析目前有解析法(最常用的是极限平衡法)、数值分析法和概率法等。

1.2.1 极限平衡法

极限平衡法是最常用的解析法,它是根据边坡上的滑体和滑体分块的力学平衡原理(即静力平衡原理)分析边坡各种破坏模式下的受力状态,以及边坡滑体上的抗滑力和滑动力之间的关系来评价边坡的稳定性。就极限平衡法本身而言,根据不同的假设条件,又可以细分为多种极限平衡分析方法,如 Fellenius 法、Bishop 法、Jaubu 法、Morgenstern-Prince 法、Spencer 法、传递系数法、楔形体法、Sarma 法、Hovlandf 法和 Leshchinsky 法等。在工程实践中,我们可以根据边坡破坏滑动面的形态来选择极限平衡法。

极限平衡法力学模型简单,可对边坡稳定性进行定量评价,但不能考虑坡体中的应力-应变状态,只是给出所有可能的危险滑动范围,对于均匀土质边坡计算结果较好。但该方法需对滑坡边界条件进行简化,人为假定条块之间的作用力方向和位置,对于由复杂介质和边界组成的岩质滑坡体,计算结果与实际相比有很大误差。

1.2.2 数值分析法

由于岩土工程问题的复杂性,数值模拟在解决边坡工程问题时比其他方法更具有灵活性和更好的适应性,成为边坡工程中比较有效的分析手段,而且越来越多地应用于边坡稳定及变形问题的分析中。岩土工程数值分析法主要有有限元法、离散元法、非连续变形分析法、快速拉格朗日分析法、数值流形法、界面应力元法、无单元法等各种数值分析方法等。

1. 有限元法(FEM)

有限元法是发展较早的数值方法,也是边坡工程中应用最成功的数值分析手段。它与其他数值方法相同,对工程问题的复杂边界及复杂构成有很好的适应能力,能考虑工程材

料的复杂本构关系如弹性、弹塑性、黏弹塑性、黏塑性等。它可以计算出分析对象的应力大小和分布,便于采用应力或应变的准则分析工程对象的破坏机制。

2. 离散元法 (DEM)

离散元法于1970年由Cundall首次提出,其基本原理是牛顿运动定理。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;另一个功能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,对于求解非线性大位移与动力稳定问题具有极大的优势。该法适用于不连续介质、大变形、低应力水平情况。

3. 非连续变形分析法 (DDA)

非连续变形分析法具有有限元与离散元二者优点,其求解过程与有限元法类似,而块体运动过程则像离散元法。非连续变形分析在工程中得到较高的重视和较快的发展,并已运用到三维问题,经过前人改进与发展,或针对特殊问题建立新的DDA计算模型,使模拟更加符合实际情况。

4. 快速拉格朗日分析法 (FLAC)

快速拉格朗日分析法是由P. A. Cudall提出的一种解析法,是针对材料非线性和几何非线性而提出的一种数值方法,它可以应用于连续介质大变形问题的分析。FLAC采用动态运动方程式,能有效克服系统模型内的不安定因素。另外,因为它使用显式差分的求解格式,无须建立刚度矩阵,需要的内存少。

5. 数值流形法 (NMM)

数值流形法是石根华通过研究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以最小位能原理和流形分析中的有限覆盖技术为基础,统一解决了连续与非连续变形的力学问题。该法适用于不连续介质、大变形,可以统一解决FEM、DDA和其他数值方法耦合的计算问题,是目前边坡工程中最具生命力的方法之一。

6. 界面应力元法

界面应力元法由卓家寿等提出,它源于Kawai提出的适用于均质弹性问题的刚体—弹簧元模型。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。界面应力元是一种位移不协调模型,能够模拟裂隙化岩体的不连续变形。

7. 无单元法

无单元法又称无网格方法,从产生至今仅有20多年,已经出现10多种形式。这些形式的共同点是:摆脱单元的束缚,采用结点信息及其局部支撑域上的权函数实行局部精确逼近,然后通过配点法或伽辽金法对偏微分方程求解。

1.2.3 概率法

理论与实践均证明,影响岩质边坡工程稳定性的诸多因素常常都具有一定的随机性,它们多是具有一定概率分布的随机变量。20世纪70年代中后期概率统计理论被应用到边坡岩体的稳定性分析中来,它通过现场调查,以获得影响边坡稳定性影响因素的多个样本,然后进行统计分析,求出它们各自的概率分布及其特征参数,再利用某种可靠性分析

方法,来求解边坡岩体的破坏概率即可靠度。可靠度评价法是近些年发展起来的边坡稳定性评价的新方法,它是通过大量的调查,运用数理统计方法,求出影响边坡稳定性诸多因素的具有一定概率分布的随机变量,进而求解边坡稳定性的可靠度。其优点是用随机可靠度比用安全系数在一定程度上更能客观、定量地反映边坡的安全性。但其不足之处在于求解边坡稳定性影响因素的概率分布还不太理想,其计算通常比常用的极限平衡方法困难和复杂。

1.3 边坡稳定性分析的不确定性分析法

由于边坡组成物质的复杂性、多样性,人们很难用确定性分析方法对它进行精确的综合评价,传统的极限平衡法和数值分析法采用以安全系数这一确定的评价标准来评价边坡的稳定性,在工程应用中出现了边坡安全系数大于1发生破坏而小于1却稳定的现象,为了能客观准确地评价边坡的稳定性,近些年人们尝试引用数学理论逐步形成了一些新的稳定性分析方法,并获得了较大进展,如近些年发展较快的模糊综合评价法、灰色系统理论评价法、人工神经网络分析法、模糊综合评价法等。

1. 灰色系统理论评价法

信息不完全,只有部分信息已知的系统称为灰色系统。灰色系统理论提出了一种新的系统分析方法,基于灰色关联度分析原理,通过数据处理建立描述灰色量的数学模型,确定边坡各影响因素的影响程度,发现主要矛盾,找到主要特性和主要影响因素,从而利用叠加分析进行边坡稳定性评价。该法的优点是直观、简单、可操作性强。

2. 人工神经网络分析法

人工神经网络分析法是一种基于非线性动力学系统,利用工程技术手段结合数学方法将其简化并抽象以模拟反映人脑思维基本功能的一种并行处理连接网络和一种新型信号处理系统。研究表明,在岩土边坡工程系统分析领域内采用神经网络法具有它的独特之处。利用神经网络理论,可以将影响边坡稳定性的因素和边坡安全系数相结合,建立起模型来预估和评价边坡的稳定性。现在用的最成熟的是BP神经网络,但其存在易陷入局部最小、收敛速度慢等缺点。为克服这些缺点,近些年不断发展起来的自适应网、复合网络等也逐渐被应用到边坡工程中来。

3. 模糊综合评价法

大量的工程实践表明,影响边坡稳定性因素及边坡稳定与否的界限实际上是很不确定的,具有相当的模糊性。模糊综合评价通常是先找出影响边坡稳定性的各主要因素并对他们进行分级和分类,进而根据专家评分法或层次分析法确定它们的权值,最后选择合适的隶属函数,依据最大隶属度原则来判定边坡的稳定级别。其优点是在大型边坡整体稳定性评价时与传统稳定性评价方法相比有明显的优势,但具体操作中合适的隶属函数的选取以及权重的分配往往带有很强的主观随意性。

2 边坡稳定性分析的主成分-模糊综合评判方法(PCA-FCE)

影响边坡稳定性的因素比较多,有定量的因素(如内摩擦角、黏聚力、边坡角、边坡高度等),也有定性的因素(如震动、不良地质、人为活动等),所以一般都会利用综合评价的方法来分析影响边坡的各个因素及做出初步评判。综合评价是利用数学方法(包括数理统计方法)对一个复杂系统的多个指标信息进行加工和提炼,以求得其优劣等级的一种评价方法。综合评价方法大体上可分为两类(其主要区别在确定权重的方法上):一类是主观赋权法,多数采取综合咨询评分确定权重,如综合指数法、模糊综合评判法、层次分析法、功效系数法等;另一类是客观赋权法,根据各指标间相关关系或各指标值变异程度来确定权数,如主成分分析法、因子分析法、理想解法(也称TOPSIS法)等。目前国内外综合评价方法有数十种之多,其中主要使用的评价方法有主成分分析法、因子分析法、TOPSIS法、秩和比法、灰色关联法、熵权法、层次分析法、模糊评价法、灰色理论法、物元分析法、聚类分析法、价值工程法等。

目前,上述方法已被广泛应用于边坡稳定性影响因素评价。例如,在分析影响边坡稳定性的内摩擦角、黏聚力、边坡角、边坡高度、地震加速度等因素的基础上,利用主成分分析法分析了主要影响因素对匀质土坡、土场边坡等边坡稳定性的影响作用等问题,提出有针对性的边坡加固措施;采用灰色系统理论中的灰色关联分析方法对边坡稳定进行敏感性分析,通过建立起包含土体密度、黏聚力、内摩擦角、地下水位、坡高、坡角等影响因素的灰关联数据矩阵,对数据矩阵进行无量纲化处理,计算出敏感因子变化与边坡安全系数之间的灰关联系数和灰关联度,确定出边坡稳定的内摩擦角、黏聚力等主要敏感因素,提出有针对性的边坡加固措施;利用熵权来反映影响边坡稳定性的各因素的信息量,用熵的大小来度量边坡稳定性各个评价指标的信息效用值,确定各指标的熵权,尽可能地减小主观确定权重所带来的人为干扰;利用层次分析法来研究影响边坡稳定性的各因素,给出各影响因素的权重值,确定各影响因素对边坡稳定性的影响大小;利用物元分析法对露天矿边坡、路堑边坡等的边坡稳定性做影响因素分析,确定边坡稳定性评级的经典域与节域,结合各指标因素的权重,据此计算出各边坡与各评价等级的关联度,根据关联度对边坡稳定性进行评判;利用聚类分析法对边坡稳定性的各影响因素进行分析,先将边坡稳定性影响因素敏感性分析问题转化为粗糙集理论中的属性重要性评价问题,然后采用聚类分析算法对各影响因素进行敏感性分析。

上述边坡稳定性综合评价方法将影响边坡稳定性的定性因素,利用相关的理论进行了半定量化处理,给边坡稳定性分析提供了一定的转化技术,给复杂地质条件的边坡稳定性分析开辟了新途径,所以很多学者一直都在致力于该方面的研究工作。

2.1 边坡稳定性影响因素分析

2.1.1 边坡分类

边坡泛指自然或人工形成的斜坡坡体,但是一般来说,大部分学者将一切自然的与人为的岩土斜坡统称为斜坡,把一切由于工程建设而开挖与填筑的斜坡统称为边坡。按不同的分类指标,边坡的分类方法有很多种。

1. 按构成边坡的物质种类分

(1) 土质边坡:整个边坡由土体构成,按土体种类又可分为黏性土边坡、黄土边坡、膨胀土边坡、堆积土边坡、填土边坡等。

(2) 岩质边坡:整个边坡均由岩体构成,按岩体强度可分为硬岩边坡、软岩边坡、风化边坡等;按岩体结构分为整体状边坡、块状边坡、层状边坡、破裂状边坡、散体状边坡等。

(3) 岩土混合边坡:边坡下部为岩层,上部为土层。

2. 按边坡的高度分

(1) 一般边坡:岩质边坡总高度在 30 m 以下,土质边坡总高度在 15 ~ 20 m 以下。

(2) 高边坡:岩质边坡总高度在 30 m 以上,土质边坡总高度大于 20 m。

3. 按边坡的工程类别分

(1) 路堑边坡,路堤边坡。

(2) 水坝边坡,渠道边坡,坝肩边坡,库岸边坡。

(3) 露天矿边坡,弃渣场边坡。

(4) 建筑边坡,基坑边坡。

4. 按坡体结构特征分

(1) 类均质边坡:边坡由均质土体构成。

(2) 近水平层状边坡:由近水平层状岩土体构成的边坡。

(3) 顺倾层状边坡:由倾向开挖面的顺倾岩土层构成的边坡。

(4) 反倾层状边坡:岩土层面倾向边坡山体内。

(5) 块状岩体边坡:由厚层块状岩体构成的边坡。

(6) 碎裂状岩体边坡:边坡由碎裂状岩体构成。

(7) 散体状边坡:边坡由破碎块石砂构成。

5. 按边坡使用年限分

(1) 临时边坡:只在施工期间存在的边坡。

(2) 短期边坡:只存在 10 ~ 20 a 的边坡。

(3) 永久边坡:长期使用的边坡。

6. 按边坡形成过程分

(1) 人工边坡:由施工开挖或填筑而形成的边坡。人工边坡又可分为挖方边坡(由山体开挖形成的边坡)、填筑边坡(填方经压实形成的边坡)。

(2) 自然边坡:在工程范围内,有可能影响工程安全的小规模自然斜坡。