

# 边坡稳定性评价方法及发展趋势

杨学堂<sup>1,2</sup> 王 飞<sup>1</sup>

(1 三峡大学土木水电学院,湖北宜昌 443002; 2 重庆大学土木工程学院,重庆 400045)

**【摘要】** 介绍了目前边坡工程中常用的一些稳定性分析方法,对它们各自的主要原理、特点及其优缺点等进行了阐述,提出了岩土边坡系统稳定性评价的发展趋势,并做了初步的探讨。

**【关键词】** 边坡; 稳定性; 评价方法;

**【中图分类号】** TU 457

## Evaluation Method of Slope Stability and Its Developing Trend

Yang Xuetao<sup>1,2</sup> Wang Fei<sup>1</sup>

(1. College of civil & Hydropower Engineering, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002;

2 Institute of Civil Engineering Chongqing University, Chongqing 400045 China)

**【Abstract】** The ordinary evaluation methods of system stability of slope are introduced. Then the main principle, character, merit and shortcoming of each evaluation method are pointed out. Finally its developing trend is proposed and discussed.

**【Key Words】** slope; stability; evaluation method

### 0 引言

边坡稳定性问题一直是岩土边坡一个重要研究内容。它涉及水电工程,铁道工程,公路工程,矿山工程等诸多工程领域,能否正确评价其稳定性直接关系到建设的资金投入和人民的生命财产安全。边坡稳定性分析方法很多,不同的方法又各具特点,有一定的适用条件。如何根据具体的边坡工程地质条件,具体地分析目的与精度要求,合理有效地选用与之相适应的边坡稳定性分析方法,是一项很重要的工作。从边坡工程研究发展历程可见,边坡稳定性研究发展的过程,同时又是一个边坡稳定性分析方法不断发展的过程。本文简要分析了目前常用的边坡稳定性分析方法的主要特征及其优缺点,探讨了边坡稳定分析的发展趋势,为进一步研究边坡稳定性问题理清了思路。

### 1 定量分析方法

边坡稳定性分析还远没有走到完全定量这一步,它只能算是一种半定量的分析方法<sup>[1]</sup>。

#### 1.1 极限平衡分析法

极限平衡法是边坡稳定分析中最常用的方法。它是通过分析在临近破坏状况下,土体外力与内部强度所提供抗力之间的平衡,计算土体在自身和外荷作用下的土坡稳定性程度,通常以边坡稳定系数

表示为: 
$$F = \frac{S}{\tau}$$

式中:  $S$  为抗剪强度;  $\tau$  为实际剪应力。

边坡中最小的稳定系数称为边坡稳定安全系数,它表示了该边坡的稳定程度。目前已有了多种极限平衡分析方法,如:斯宾塞法,比肖普法(Bishop),简布法(Jaubu),摩根斯坦-普赖斯法(Morgenstern-Prince),剩余推力法,沙尔玛法(Sarma),楔体极限平衡分析法等等。其中Sarma法既可用于滑面呈圆弧形的滑体,又可用于滑面呈一般折线形滑面的滑体极限平衡分析;楔体极限平衡分析则主要用于岩质边坡中由不连续面切割的各种形状楔形体的极限平衡分析<sup>[2]</sup>。与其它方法相比,极限平衡法的缺点是在力学上作了一些简化假设,但是近年来已在计算模型、滑动面确定、边坡类型等方面都得到了进一步的完善。

#### 1.2 有限单元法<sup>[3]</sup>

有限元法是一种十分成熟的数值方法,也是边坡稳定分析中用得较多的一种方法。目前,已经开发了多个二维及三维有限元分析程序,可以用来求解弹性、弹塑性、粘弹塑性、粘塑性等问题。有限元法的优点是部分地考虑了边坡岩体的非均质和不连续性,可以给出岩体的应力、应变大小与分布,避免

了极限平衡分析法中将滑体视为刚体而过于简化的缺点,能使我们近似地从应力应变去分析边坡的变形破坏机制,分析最先、最容易发生屈服破坏的部位和需要首先进行加固的部位等<sup>[4]</sup>。但它还不能很好地求解大变形和位移不连续等问题,对于无限域、应力集中问题等的求解还不理想。

### 1.3 无单元法<sup>[5]</sup>

无单元法是有限元法的一种推广,近来已得到广泛的应用。此法采用滑动最小二乘法所产生的光滑函数近似场函数。它保留了有限元的一些特点,但摆脱了单元限制,克服了有限元的不足<sup>[5]</sup>。无单元法只需结点信息而不需单元信息,处理简单,计算精度高,收敛速度快,提供了场函数的连续可导近似解。基于这些优点,无单元法具有广阔的应用前景。

### 1.4 离散单元(DEM)法<sup>[6]</sup>

离散单元法(DEM)是一种适用于模拟离散介质的数值方法。自从康德(Cundall)于20世纪70年代提出以来,这一方法已在岩土工程和边坡问题中得到日益增长的应用。离散元法的一个突出功能是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。因此,任何一种岩体材料都可以引入到模型中,例如弹性,粘弹性或断裂等。故该法对块状结构,层次破裂或一般破裂结构岩体边坡比较合适。并且,它利用显式时间差分法求解动力平衡方程,对求解线性大位移与动力稳定问题较为容易。

### 1.5 快速拉格朗日(Lagrangian)分析(FLAC)法<sup>[7]</sup>

FLAC首先由康德在20世纪80年代提出并将其程序化,实用化。FLAC基本原理类同于离散单元法,但它却能象有限元那样适用于多种材料模式与边界条件的非规则区域的连续问题求解;在求解过程中,FLAC又采用了离散元的动态松弛法,不需求解大型联立方程组,便于在微机上实现<sup>[7]</sup>。该方法较有限元方法能更好地考虑岩土体的不连续性和大变形特征,求解速度较快。其缺点是同有限元方法一样,计算边界、单元网格的划分带有很大的随意性。

### 1.6 DDA法(不连续变形分析法)<sup>[8]</sup>

DDA法是石根华博士提出的分析不连续变形问题的一种新的离散型数据值计算方法。它兼具有有限元与离散元法二法之部分优点。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。此法可以反映岩体连续和不连

续的具体部位,考虑了变形的不连续性和时间因素,既可计算静力问题,又可计算动力问题,既可计算破坏前的小位移,也可计算破坏后的大位移,特别适合于边坡极限状态的设计计算。然而由于岩体种类繁多,性质复杂,计算时步的大小对结果的影响较大,计算方法的优化和改进还有待提高。文献[9]在DDA法基础上,提出了渗流,变形耦合作用的DDA法,并通过对该隧道的破坏进行数值模拟分析,表明扩展后的DDA法不仅可以很好模拟裂隙渗流,岩体变形的耦合作用,而且可以模拟块体结构的破坏过程。

### 1.7 流形元法<sup>[10]</sup>

流形元法是石氏继创立块体理论和DDA后,并在此基础上首创的一种新的现代数值方法。它以拓扑流形为基础,应用有限覆盖技术,吸收有限元法与DDA法各自的优点,通过在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<sup>[10]</sup>。利用该法不仅可以计算不连续体的大变形,块体接触和运动,也可以象有限元那样提供单元应力和应变的计算结果,并且可有效地计算连续体的小变形到不连续体大变形的过程。

### 1.8 遗传进化算法<sup>[11]</sup>

遗传进化算法是一种新发展起来的全局搜索的算法。此法首先随机生成一组模型,将模型的每个参数表示为二进制制数码,然后对种群内各模型根据具体问题所给的目标函数决定其生存概率,来进行优胜劣汰,再把剩下的较优的个体进行交换和变异,最终完成一次对种群的繁殖,反复循环,来模拟生物进化的规律。它的特点是在检索了少部分搜索空间后便能迅速地收敛于最优解。该方法模拟了生物遗传进化的过程,克服了传统方法容易陷入局部极小值的缺点,是一种全局优化算法。

### 1.9 人工神经网络评价法<sup>[12]</sup>

人工神经网络是指由大量简单神经元经广泛互连构成的一种计算结构,是一种广义的并行处理系统<sup>[1]</sup>。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拟仿真人的大脑功能,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。研究表明,神经网络法用于研究边坡工程具有独特的优势。利用神经网络,可以尽可能多地将各种影响因素作为输入变量,建立这些定性或定量影响因素同边坡安全系数与变形量之

间的高度非线性映射模型,然后用模型来评价边坡的安全性。

## 2 定性分析方法

定性分析方法主要是通过工程地质勘察,对影响边坡稳定性的主要因素、可能的变形破坏方式及失稳的力学机制等的分析,对已变形地质体的成因及其演化史进行分析,从而给出被评价边坡一个稳定性状况及其可能发展趋势定性的说明和解释<sup>[1]</sup>。其优点是能综合考虑影响边坡稳定性的多种因素,快速地对边坡的稳定状况及其发展趋势作出评价。常用的方法主要有下面几种。

### 2.1 范例推理评价法<sup>[13]</sup>

范例推理(case-based reasoning,简称CBR)是由斯坎克(Schank)在1982年提出的。1983年科勒登(Kolodner)开始在计算机上实现。在范例推理中,把当前所面临的新问题称为目标范例(target case),而把记忆的问题称为源范例(base case)。范例推理就是由目标范例的提示而获得记忆中的源范例,并由源范例来指导目标范例求解的一种策略。基于范例推理中知识表示是以范例为基础,范例的获取比规则获取要容易,从而大大简化了知识获取。为边坡稳定性评价这样知识获取很不容易的复杂问题提供了一条新途径。文献[13]提出了基于模糊相似优先的边坡稳定性评价范例推理方法。实例分析表明,评价结果与边坡的实际状态完全一致。但随着边坡范例库中的边坡源范例不断增多,必然会引起边坡范例之间的相互矛盾,甚至不相容,这些问题还有待进一步的研究。

### 2.2 专家系统<sup>[14]</sup>

专家系统是一种按某学科及相关学科专家的水平进行推理和解决问题、并能说明其缘由的计算机程序。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,再利用智能化的推理机(一个控制整个系统的计算机程序)来模拟并再现人(专家)脑的思维(推理与决策)过程,吸收其合理的知识结构,寻求优化的技术路径,同时,它又能建立计算机模型,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。利用良好的边坡工程专家系统,运用专家的知识水平,模拟其思维方式和决策过程,以提高设计人员的决策水平,并最大限度地

降低费用、节省时间,达到更加优化的目的和效果。

## 3 非确定性分析方法

### 3.1 模糊综合评价法<sup>[15]</sup>

试验与工程实践表明,边坡性质及稳定性的界限实际上不是很清楚,具有相当的模糊性。模糊综合评价是应用模糊变换原理和最大隶属度原则,综合考虑被评事物或其属性的相关因素,进而进行等级或类别评价<sup>[15]</sup>。实践证明,模糊分级评判方法为多变量、多因素影响的边坡稳定性分析提供了一种行之有效的。这一方法主要应用于大型边坡的整体稳定性评价。文献[15]构造了边坡稳定性分析的模糊综合评价模型及关联因素边界值矩阵,通过对某一大型露天矿边坡工程地质条件调查与物理力学性质测试研究,得到各关联因素的实测值,进而评价了该边坡的稳定性。

### 3.2 可靠度评价方法<sup>[16]</sup>

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,正确合理地解释许多用确定性理论无法解释的工程问题。但是,客观地说边坡工程可靠性分析目前还处于研究和探索阶段,往往只作为确定性方法的一种补充和参考<sup>[16]</sup>。尽管如此,边坡工程可靠性分析的方向是正确的,它能真实地考虑到客观和人为的一些不确定性因素,并且已逐步运用于工程实践。何满潮,杨强等将优化可靠性分析的边坡状态函数,实现MSARMA与蒙特卡洛模拟法的有机耦合。

### 3.3 灰色系统评价法<sup>[17]</sup>

信息不完全,部分信息已知,部分信息未知的系统称灰色系统<sup>[2]</sup>。把系统中的一切信息量看作灰色量,采用特有的方法建立描述灰色量的数学模型有3个基本环节:1)根据系统已发生的一组时间序列数据,根据变量多少建成不同的预测模型。2)估计模型参数,如按最小二乘法确定;3)把模型用于预测,并进行评价。利用灰色关联度分析方法,可在不完全的信息中,对所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,找到主要特征和主要影响因素,因此特别适合于象边坡稳定性这种数据有限,没有原型,复杂而且具有不确定性问题的分析与评

价<sup>[17]</sup>。文献[17]给出了一种基于经验的边坡稳定性灰色系统分析方法,该法所得结果与边坡实际状态相一致且直观,简单,可操作性强。

#### 4 边坡稳定性评价方法的发展趋势

1) 任何一种方法都不是万能的,把两种或多种方法融合起来,取长补短,是未来发展的一种趋势。例如在专家系统的设计中,目前遗传算法已成功应用于推理方法的选取,隶属函数的选取以及参数的选取和相关权重的确定等。

2) 随着数值分析方法的不断发展,不同数值方法的相互耦合成为一大发展趋势。如有限元,离散元与块体元等的相互耦合,数值解和解析解的结合,这些方法的耦合能充分发挥各自的优点,解决更复杂的边坡问题。

3) 滑坡显然是一种不连续的突变现象,利用突变理论的观点研究边坡系统有广阔的发展前景<sup>[18]</sup>然而应用单一的突变理论,解决复杂的滑坡问题有其一定的局限性,需要将模糊数学、概率论、灰色系统理论和现代计算机技术与突变理论相结合,应用数值模拟手段模拟复杂系统的动态演化全过程,这是有待深入研究的课题。

4) 把边坡及其所处的环境看成一个大系统,从系统的观点出发,综合考虑各子系统之间的相互作用与联系,采用系统控制论、协同学等理论方法对边坡的失稳机理的特性进行研究分析,也是一个大的发展趋势。

5) 边坡(滑坡)系统是一个开放的系统,它不断与周围环境进行着物质和能量的交换。边坡系统的失稳是一个不可逆的热力学过程,这种过程可以用熵来度量。滑坡失稳前,其总熵不变,一旦总熵发生变化,势能和应力分布随之发生变化,当两者出现差异时,滑坡就失稳而产生滑动。因此,从热力学角度研究边坡系统失稳应具有十分重要意义<sup>[19]</sup>。

6) 采用反分析法来研究边坡系统的失稳也是发展的一大趋势。一般研究边坡系统的失稳总是从边坡受力的角度研究。但如果转化思维,可以从边坡系统的变形分析出发,寻求边坡的变形失稳判据并进行稳定性评价。如位移反分析法就是先以实测的位移值为依据反演求出初始的应力与参数,再反过来应用于工程实践<sup>[20]</sup>。

7) 由于影响边坡系统各因素的复杂性,不确定性等,依托于计算机技术,形成集成式智能评价系统也将成为未来的发展趋势。

#### 参 考 文 献

- 1 黄昌乾,丁恩保. 边坡工程常用稳定性分析方法. 水电站设计, 1999, 15(1): 53~58
- 2 崔政权,李 宁. 边坡工程——理论与实践最新发展. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. 81~139
- 3 王勤成,邵 敏. 有限单元法基本原理和数值方法. 北京: 清华大学出版社, 2002. 38~258
- 4 张有天主编. 岩石高边坡的变形与稳定. 北京: 中国水利水电出版社, 1999, 117~293
- 5 周维垣,寇晓东. 无单元法及其在岩土工程中的应用. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 5~9
- 6 Ghaboussi j r, &Barboosa R. Three-dimensional and discrete element methods for granular marerials. Int J Nomer. Anal Methodes Geomech, 1990, 14: 451~472
- 7 黄润秋,许 强. 显式拉格朗日差分分析在岩石边坡工程中的应用. 岩石力学与工程学报, 1995. 14(4): 346~354
- 8 石根华. 块体系统不连续变形数值分析方法. 北京: 科学出版社, 1993. 131~143
- 9 张国新,武晓峰. 裂隙渗流对岩石边坡稳定的影响—渗流,变形耦合作用的 DDA 法. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1269~1275
- 10 裴觉民. 数值流形方法与非连续变形分析. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(3): 279~292
- 11 肖专文,张奇志. 遗传进化算法在边坡稳定分析中的应用. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 44~46
- 12 马洪生,胡卸文. 神经网络在边坡稳定性分析中的应用. 中国地质灾害与防治学报, 1999. 10(1): 49~53
- 13 刘沐宇,朱瑞赓. 基于模糊相似优先的边坡稳定性评价范例推理方法. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1188~1193
- 14 夏元友,朱瑞赓. 边坡稳定性分析专家系统研制. 灾害学, 1997, 12(4): 10~14
- 15 李彰明. 模糊分析在边坡稳定性评价中的应用. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(5): 490~495
- 16 王家臣. 边坡工程随机分析原理. 北京: 煤炭工业出版社, 1996. 11~34
- 17 陈新民,罗国煜. 基于经验的边坡稳定性灰色系统分析与评价. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 638~641
- 18 秦四清. 斜坡失稳的突变模型与混沌机制. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 486~492
- 19 刘小丽,周德培. 岩土边坡系统稳定性评价初探. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1378~1382
- 20 冯夏庭,张志强等. 位移反分析的进化神经网络方法研究. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 529~533