

文章编号: 1000-7598 (2010) 09-3000-05

模糊数学在边坡稳定分析中的应用

王艳霞

(南京工业大学 土木工程学院, 南京 210009)

摘 要: 边坡稳定性分析是一个非常复杂的不确定问题, 其不确定性主要有两种: 随机不确定和模糊不确定。实践证明, 模糊不确定是比随机不确定更为深刻的不确定性。综述了模糊数学在边坡稳定性分析中的应用, 重点阐述了模糊综合评判、模糊参数非概率稳定性分析和模糊随机可靠度的原理、特点及研究现状。针对模糊理论和边坡稳定自身的特点及其研究现状, 对模糊数学在边坡稳定性分析应用中存在的问题及未来的发展方向进行了分析, 以期对相关研究提供有益借鉴。

关 键 词: 边坡稳定; 模糊分析; 模糊综合评判; 模糊随机可靠度

中图分类号: TU 437

文献标识码: A

Application of fuzzy mathematics to slope stability analysis

WANG Yan-xia

(College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: Slope stability assessment is a geotechnical problem characterized by many sources of uncertainty, random uncertainty and fuzzy uncertainty. Practice has proved that fuzzy uncertainty is more profound than random uncertainty in slope stability evaluation. The article summarized the application of fuzzy analysis to slope stability evaluation. The basic principle, characteristics, advantages and shortcomings of various methods were elaborated. Based on the properties and research status of slope stability and fuzzy theory, the main issues and development trends of application of fuzzy analysis to slope stability evaluation were discussed.

Key words: slope stability; fuzzy analysis; fuzzy comprehensive assessment; fuzzy-random reliability

1 引 言

岩土工程系统是一个多因子、多层次作用的复杂系统, 其复杂性在于它具有很强的不确定性。这种不确定性主要表现为随机性和模糊性两方面。实践证明, 模糊不确定是比随机不确定更为深刻的不确定性。对边坡稳定性分析而言, 边坡岩土体是客观存在的, 本身并不具备模糊性, 所谓的模糊性是由于人们一定程度上掌握但又没有完全掌握其规律和性质, 无法把它们完全分清楚, 只能用一些定性或半定量地描述, 造成对边坡的认识只能是模糊的^[1]。模糊数学分析方法的特点就是考虑客观模糊因素的影响和事物发生本质变化的中介过渡过程, 能更好地体现出客观事物的固有特征和模糊属性。所以, 在处理边坡稳定这一不确定性问题时, 不仅要考虑随机不确定性, 更应该考虑模糊不确定性, 采用模糊数学方法, 把许多资料、判断及各种定性

描述转化为定量的模糊语言, 对边坡稳定性进行综合识别和判断, 得到更为符合客观实际的解答。

模糊数学评价边坡稳定性的方法主要有模糊综合评判、模糊聚类、模糊参数非概率稳定性分析以及与可靠度相结合的模糊随机理论等, 目前研究的热点主要集中在模糊综合评判、模糊参数非概率稳定性分析和模糊随机可靠度的应用上。

2 模糊综合评判

模糊综合评判最早由我国学者汪培庄提出, 它应用模糊变换原理和最大隶属度原则, 考虑与被评价事物相关的各个因素, 最终给出一个全面的、综合的评价。靳泽先^[2]根据对甘肃黄土地区的滑坡研究, 确定了影响黄土边坡稳定性的 6 种主要因素, 在国内首次用模糊数学方法对这些因素逐项进行分析, 找出促使边坡变形的“有害成分”, 在单项评价基础上再进行综合评价。此后, 周钜乾、唐川^[3],

李彰明^[4]分别结合工程实例,对模糊综合评判在边坡稳定性分析中的应用作了研究。张永波、刘端伶等^[5-8]采用两级模糊综合评判的方法,结合具体工程,对其边坡的稳定性进行了分析。

模糊综合评判方法为多变量、多因素影响的边坡稳定性分析提供了一种行之有效的手段,其优点是能得到边坡稳定性等级分类指标,据此判断出边坡的稳定性情况。缺点是在实际操作过程中评判中权数的分配带有一定的经验性和主观性。为克服这一缺点,一些学者在这方面做了有益的探讨,王旭华等^[9]提出了利用主客观综合的多级模糊模式识别的方法来确定影响因素的权重,以期寻找更为科学合理的权重判别方法,从而提高判别的准确度。黄建文^[10],陈文玲、赵法锁^[11]将层次分析法和模糊理论结合起来,运用层次分析法确定评价指标的权重,收到了很好的效果。

3 基于参数模糊性分析的边坡稳定性分析

岩土工程参数中的各种信息都存在模糊不确定性。在以往边坡稳定性评价中,无论是极限平衡法还是有限元法,计算前都通过统计的方法将各种参数处理为确定性参数后加以分析的。这种基于随机统计思想的方法只注意到试验样本值的随机不确定性,没有注意到样本本身具有的模糊不确定性,且试验样本又是小子样,因此不能全面反映样本的真实情况。基于参数模糊化的边坡稳定性分析方法就全面考虑了岩土样本参数的随机不确定性和模糊不确定性对边坡稳定性的影响,因而能够更为客观地反映边坡稳定的实际情况。

国外最早开始这方面研究的是 Kaciewicz^[12],将土性参数视为模糊数,经过模糊运算,得到安全系数的模糊区间。近年来国内一些学者较系统地研究了边坡岩土参数模糊性特点及其对边坡稳定性影响,并初步建立了基于参数模糊化的边坡稳定性分析方法。徐卫亚^[13]推导了岩土样本力学参数模糊统计特征值的计算公式。蒋中明^[14]将岩土力学参数的模糊统计特征值代入基于极限平衡的安全系数计算公式中,求得边坡稳定安全系数。徐卫亚^[15],蒋中明^[16]又基于模糊集理论,将边坡岩土体的重度、黏聚力及内摩擦角视为模糊数,因此以模糊数为基本变量的安全系数必然也是模糊数,经过模糊运算处理,将安全系数的模糊计算转化为常规运算,从而建立了基于模糊集理论的边坡稳定极限平衡分析方法。蒋中明^[17-18]将模糊集理论应用到有限元分析

中,建立了边坡稳定分析的模糊有限元模型和求解方法,求得模糊有限元的模糊位移、模糊应力及模糊点安全系数。

这类方法的关键在于参数的模糊化处理。既然参数是模糊的,以模糊数为基本变量的安全系数必然也是模糊的。从这点出发,基于模糊集理论的分析方法应该是更合理的符合实际的方法,但这其中又涉及到安全系数隶属函数的构造问题。

4 模糊随机可靠度

由于岩土力学特性同时包含着随机性和模糊性,随机性和模糊性相互渗透、相互影响,因而使边坡工程系统的状态、输入和输出都具有随机模糊性。传统的随机可靠性的观念和方法不能客观地反映这种系统的可靠性,将随机—模糊变量人为地用随机变量代替必然引起计算结果的人为歪曲,而模糊随机可靠度理论则避免了这一点。对边坡来说,不仅破坏(边坡失稳事件)是模糊的,而且,主要变量和参数也具有模糊性,也就是说不仅参数是模糊随机变量,事件也是模糊随机事件。现有的研究可以分为两大类:一类仅考虑失稳这一事件的模糊性,参数依然是随机变量,可称之为模糊破坏随机可靠度;一类同时考虑边坡稳定的模糊性和基本变量的模糊性,称为随机模糊可靠度,又称广义可靠度。

4.1 模糊破坏随机可靠度

对于模糊事件的概率问题,基本变量的概率分布性质不变,仅考虑边坡稳定这一事件的模糊性,可将边坡的可靠度称为模糊破坏随机可靠度。设边坡发生失稳破坏这一事件为模糊事件 A ,引入模糊数学中模糊概率的计算公式,从而得到边坡失稳的模糊概率:

$$P_f = \int_{-\infty}^{+\infty} \mu_A(z) f(z) dz \quad (1)$$

式中: P_f 为边坡失稳的模糊概率; $\mu_A(z)$ 为 Z 的隶属函数; $f(z)$ 为 Z 的概率密度。

这方面国内最早开始研究的是贺少辉、李中林^[19],通过建立边坡工程性能指标“安全时效性及适用性”的隶属函数,将模糊概率测度理论用于边坡工程模糊可靠度研究,建立了边坡工程模糊可靠度数学模型。谭晓慧^[20]在可靠性分析的基础上提出了用模糊概率的方法来计算边坡的稳定性,得出了边坡失稳的模糊概率,并探讨了隶属函数的形式及有关参数对模糊概率的影响。王亚军^[21],王广月^[22]等在常规的概率极限状态理论基础上,分析了边坡

安全状态的模糊性,提出了边坡失稳的模糊概率和边坡稳定性模糊可靠度的计算方法。

以往的这些研究都是在可靠度分析的基础上,把边坡失稳看作模糊事件,建立失稳的模糊概率计算公式,从而得到边坡失稳的模糊概率。各种方法的不同之处在于,一是可靠度分析方法的不同;二是不同的功能函数的概率密度;三是选取了不同的稳定性隶属函数形式。其关键就在于根据工程实际确定结构功能函数的概率密度函数 $f(Z)$ 及表征边坡稳定性的隶属函数 $\mu_A(Z)$ 。上述分析方法对此也作了具体的研究。关于功能函数的概率密度,目前多是参考可靠性分析的经验,假设其服从正态分布。王亚军^[21]将 c 、 φ 的极值I型分布与正态分布的结果予以对比,两者的结果还是有很大的差异。关于稳定性隶属函数的选取,谭晓慧^[20]、王亚军^[21]分别在FROM和MCS的基础上,探讨了常用的不同隶属函数分布形式对失稳概率的影响作了,一致认为隶属函数的选取对模糊概率的计算结果有很大的影响,但具体哪种分布形式更符合实际,并没有确定性的结论。因此,功能函数的分布类型和隶属函数的形式对失稳概率的影响是毋庸置疑的,但究竟什么样的分布类型和隶属函数形式是合理的、符合实际的,最为稳妥的方法就是根据模糊统计试验并结合专家经验来确定。

4.2 随机模糊可靠度

随机模糊可靠度同时考虑了基本变量的模糊性和边坡失稳这一事件的模糊性,以模糊随机变量为基本变量,建立相应的模糊随机功能函数,同时引入边坡的安全裕度的隶属函数,从而得到模糊可靠指标和模糊可靠度。

李胡生^[23]、Giasi和Masi^[24]将传统的输入、输出参数用参数的随机即模糊概率数字特征来代替,同时引入安全裕度的隶属度,建立边坡工程模糊可靠度数学模型。Dodagoudar和Venkatachalam^[25]、贾厚华^[26]以模糊随机变量为基本变量,求得其模糊随机统计指标,同样引入极限状态函数的模糊状态约束变量,通过模糊运算将其转化为约束水平下的非模糊约束条件,再用经典的可靠度理论进行分析,得到模糊可靠指标和模糊可靠度。杨建贵^[27]通过分别引入基本随机变量和极限状态函数的模糊状态约束变量对随机变量和极限状态进行了模糊化处理,并导出了计算边坡稳定的模糊随机可靠度算法。蒋建群、徐辉^[28]将部分输入参数视为正态模糊数,同时引入安全系数的隶属函数,建立了边坡破坏的随机模糊可靠度分析模型。

这类方法同时考虑边坡稳定分析中基本变量和失稳事件的模糊性,是更为客观的方法,但其客观是建立在合理科学的参数和事件的模糊化处理上,这也是该类方法所要解决的关键问题。笔者认为基于模糊集理论,通过引入基本随机变量和极限状态函数的模糊状态约束变量对随机变量和极限状态进行模糊化处理^[25-28]是今后研究的重点。

5 其他应用

随着人们对边坡稳定模糊性认识的深入,很多研究者致力于模糊数学与其他方法的结合。刘沐宇、WANG Xuhua等^[29-31]将模糊数学与范例推理相结合,运用模糊相似优先的概念,构造了一个基于模糊相似优先的边坡范例检索模型,提出了基于模糊相似优先的边坡稳定性评价方法。黄建文^[32]、陈文玲^[33]等将层次分析法和模糊识别理论结合起来,运用层次分析法确定评价指标的权重,采用模糊数学方法对边坡的稳定性进行综合评价。曹文贵、张永杰^[34]将区间组合法用于边坡安全系数的模糊求解,建立了基于区间组合法的边坡稳定非概率模糊可靠性分析方法。Ni和Lu等^[35-36]综合考虑影响边坡稳定性的各方面因素,将神经网络与模糊逻辑相结合用来进行边坡稳定性判别,建立了基于遗传算法的模糊神经网络模型。

6 结 论

(1) 隶属函数是模糊数学的本质,是恰如其分的定量地刻画模糊性事物的基础。无论是研究比较深入的模糊综合评判,还是刚刚起步的随机模糊可靠度,如何选取合理的反映问题客观实际的隶属函数都是亟需解决的问题,也是进一步研究需要重点解决的问题。

(2) 边坡稳定的影响因素众多,在模糊综合评判中,通常需要引进多级多层次模糊结构模型。显然,引进多层次结构模型的同时就增加了很多工作量,更关键的是需要更多的权重向量。而权重又是各个因素在决策中所占有的地位或所起的作用的反映,直接影响决策的结果。目前权数多数是凭经验得到的,往往带有主观性,有时会导致失真。多级模糊识别、层次分析法的引入,不失为解决问题的一个途径。

(3) 对现在正处于研究热点的随机模糊可靠度而言,同时考虑参数和破坏的模糊性能够更为真实地反映边坡稳定问题。这种方法不同于传统可靠度分析方法之处就在于它的“模糊化”处理,一是基本

随机变量的模糊化处理,二是极限状态的模糊化处理。

(4)为了更好地利用模糊理论,应发展多学科结合,借助其他学科的优势完善模糊理论,如模糊数学和灰色系统、模糊理论和遗传算法、模糊理论和神经网络等。

边坡岩土体特性的复杂性决定人们对其认识的模糊性。从确定到不确定,从随机到模糊,从各种方法的对立到统一,这是边坡稳定性发展的必由之路。

参考文献

- [1] 贾厚华. 边坡稳定性分析模糊方法研究[硕士学位论文 D]. 北京: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2003.
- [2] 靳泽先. 模糊数学方法在边坡稳定性评价中的应用[J]. 水文地质工程地质, 1987, (6): 31—33.
JIN Ze-xian. Application of fuzzy mathemtics in slope stability evaluation[J]. **Journal of Hydrological Geology Engineering Ecololy**, 1987, (6): 31—33.
- [3] 周钜乾, 唐川. 模糊评判模型在边坡稳定性评价中的应用[J]. 自然灾害学报, 1995, 4(3): 73—81.
ZHOU Ju-qian, TANG Chuan. The model of fuzzy comprehensive judgment applied in evaluations of slope stability[J]. **Journal of Nature Disasters**, 1995, 4(3): 73—81.
- [4] 李彰明. 模糊分析在边坡稳定性评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(5): 490—495.
LI Zhang-ming. Application of fuzzy analysis in slope stability evaluation network[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1997, 16(5): 490—495.
- [5] 张永波. 斜坡稳定性分析的模糊综合评判方法[J]. 太原工业大学学报, 1996, 27(1): 59—63.
ZHANG Yong-bo. Fuzzy mathematics method of the analysis of slope stability[J]. **Journal of Taiyuan University of Technology**, 1996, 27(1): 59—63.
- [6] 李辉, 杨振宏. 露天矿边坡稳定性的两级模糊综合评判[J]. 中国铝业, 1996, 20(5): 38—44.
- [7] 刘端伶, 谭国焕, 李启光, 等. 岩石边坡稳定性和 Fuzzy 综合评判法[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 170—175.
LIU Duan-ling, TAN Guo-huan, LI Qi-guang, et al. The stability of rock slope and fuzzy comprehensive evaluation method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(2): 170—175.
- [8] 洪海春, 徐卫亚, 叶明亮. 基于模糊综合评判的边坡稳定性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(5): 557—562.
HONG Hai-chun, XU Wei-ya, YE Ming. Slope stability analysis based on fuzzy comprehensive assessment[J]. **Journal of Hohai University(Natural Sciences)**, 2005, 33(5): 557—562.
- [9] 王旭华, 陈守煜, 陈雄. 边坡稳定性主客观权重模糊模式识别分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 1): 5243—5247.
WANG Xu-hua, CHEN Shou-yu, CHEN Xiong. Analysis recognition on slope stability with fuzzy pattern model of subjective and objective weight determination[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(Supp.1): 5243—5247.
- [10] 黄建文, 李建林, 周宜红. 基于 AHP 的模糊评判法在边坡稳定性评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 2627—2632.
HUANG Jian-wen, LI Jian-lin, ZHOU Yi-hong. Application of fuzzy analysis based on AHP to slope stability evaluation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.1): 2627—2632.
- [11] 陈文玲, 赵法锁. 基于模糊一致矩阵理论的边坡稳定性评价[J]. 地球科学与环境学报, 2007, 29(4): 404—407.
CHEN Wen-ling, ZHAO Fa-suo. Stability evaluation of slope in geological hazard survey based on fuzzy consistent matrix theory[J]. **Journal of Earth Sciences and Environment**, 2007, 29(4): 404—407.
- [12] MAREK KACEWICZ. Fuzzy slope stability method[J]. **Mathematical Geology**, 1987, 19(8): 757—767.
- [13] 徐卫亚, 蒋中明. 岩土样本力学参数的模糊统计特征研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 342—346.
XU Wei-ya, JIANG Zhong-ming. Research on fuzzy eigenvalues of samples of rock and soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(3): 342—346.
- [14] 蒋中明, 张新敏, 徐卫亚. 基于参数模糊性分析的边坡稳定性研究[J]. 三峡大学学报(自然学科版). 2003, 25(1): 52—55.
JIANG Zhong-ming, ZHANG Xin-min, XU Wei-ya. Stability analysis of slope based on analyzing fuzzy character of parameters[J]. **Journal of China Three Gorges University(Natural Science)**, 2003, 25(1): 52—55.
- [15] 徐卫亚, 蒋中明, 石安池. 基于模糊集理论的边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报. 2003, 25(4): 409—413.
XU Wei-ya, JIANG Zhong-ming, SHI An-chi. Slope stability analysis using fuzzy sets theory[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(4): 409—413.
- [16] 徐卫亚, 谈小龙, 蒋中明. 节理岩体边坡模糊稳定性分析方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1232—1236.
XU Wei-ya, TAN Xiao-long, JIAN Zhong-ming. Research on fuzzy analytic approach for stability analysis of jointed rock slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(6): 1232—1236.
- [17] 蒋中明, 张新敏, 徐卫亚. 岩土边坡稳定性分析的模糊有限元方法研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 922—927.

- JANG Zhong-ming, ZHANG Xin-min, XU Wei-ya. Study on fuzzy finite element method of rock and soil slope analysis[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(8): 922—927.
- [18] 蒋中明, 徐卫亚, 张新敏, 等. 弹性介质边坡模糊有限元方法研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1169—1173.
- JANG Zhong-ming, XU Wei-ya, ZHANG Xin-min, et al. Study on theory of fuzzy finite element method of elastic media slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(5): 1169—1173.
- [19] 贺少辉, 李中林. 边坡工程模糊可靠度研究[J]. 南方冶金学院学报, 1994, 15(1): 1—9.
- HE Shao-hui, LI Zhong-lin. Research on the fuzzy reliability of slope engineering[J]. **Journal of Southern Institute of Metallurgy**, 1994, 15(1): 1—9.
- [20] 谭晓慧. 边坡稳定分析的模糊概率法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2001, 24(3): 12—17.
- TAN Xiao-hui. The stability analysis of slope by fuzzy probability method[J]. **Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)**, 2001, 24(3): 12—17.
- [21] 王亚军. 基于模糊随机理论的广义可靠度在边坡稳定性分析中的应用[J]. 岩土工程技术, 2004, 18(5): 217—223.
- WANG Ya-jun. Application of generalized reliability method based on fuzzy—Stochastic theorem in bank slope stability analysis[J]. **Geotechnical Engineering Technique**, 2004, 18(5): 217—223.
- [22] 王广月, 刘健, 王有志. 岩质边坡平面滑动的模糊可靠度分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊 1): 283—286.
- WANG Guang-yue, LIU Jian, WANG You-zhi. Analysis of fuzzy reliability for plane sliding of slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(Supp.1): 283—286.
- [23] 李胡生. 岩土工程随机-模糊可靠度的概念和方法[J]. 岩土力学, 1993, 14(2): 25—34.
- LI Hu-sheng. The concept and calculating method of the random-fuzzy reliability theory for geotechnical engineering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1993, 14(2): 25—34.
- [24] GIASI C I, MASI P, CHERUBINI C. Probabilistic and fuzzy reliability analysis of a sample slope near Aliano[J]. **Engineering Geology**, 2003, 67: 391—402.
- [25] DODAGOU DARG R, VENKATACHALAM G. Reliability analysis of slopes using fuzzy sets theory[J]. **Computers and Geotechnics**, 2000, 27: 101—115.
- [26] 贾厚华, 贺怀建. 边坡稳定模糊随机可靠度分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 657—660.
- JIA Hou-hua, HE Huai-jian. Analysis of fuzzy-random reliability of slope stability[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(4): 657—660.
- [27] 杨建贵, 蔡新, 张永乐. 边坡稳定的模糊随机可靠性分析[J]. 河海大学学报, 2002, 30(1): 57—62.
- YANG Jian-gui, CAI Xin, ZHANG Yong-le. Fuzzy random reliability analysis for slope stability[J]. **Journal of Hohai University**, 2002, 30(1): 57—62.
- [28] 蒋建群, 徐辉. 边坡稳定模糊随机可靠度评价及其应用[J]. 水力发电学报, 2006, 25(4): 126—130.
- JIANG Jian-qun, XU Hui. Reliability analysis of slope stable capacity based on fuzzy probability[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2006, 25(4): 126—130.
- [29] 刘沐宇, 朱瑞庚. 基于模糊相似优先的边坡稳定性评价范例推理方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1188—1193.
- LIU Mu-yu, ZHU Rui-geng. Case-based reasoning approach to slope stability evaluation based on fuzzy analogy preferred ratio[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(8): 1188—1193.
- [30] 高德彬, 李邦旭, 何秦娥. 基于模糊相似优先比的黄土路堑高边坡稳定性评价[J]. 灾害学, 2007, 22(3): 41—44.
- GAO De-bin, LI Bang-xu, HE Qin-e. Research on stability of highway loess cutting-slope based on fuzzy analogy preferred ratio[J]. **Journal of Catastrophology**, 2007, 22(3): 41—44.
- [31] WANG Xu-hua, CHEN Shou-yu, TANG Lie-xian, et al. Application of fuzzy optimal selection of similar slopes to the evaluation of slope stability[J]. **Journal of Harbin Institute of Technology(New Series)**, 2007, 14(3): 415—418.
- [32] 黄建文, 李建林, 周宜红. 基于 AHP 的模糊评判法在边坡稳定性评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 2627—2632.
- HUANG Jian-wen, LI Jian-lin, ZHOU Yi-hong. Application of fuzzy analysis based on AHP to slope stability evaluation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.1): 2627—2632.
- [33] 陈文玲, 赵法锁. 基于模糊一致矩阵理论的边坡稳定性评价[J]. 地球科学与环境学报, 2007, 29(4): 404—407.
- CHEN Wen-ling, ZHAO Fa-suo. Stability evaluation of slope in geological hazard survey based on fuzzy consistent matrix theory[J]. **Journal of Earth Sciences and Environment**, 2007, 29(4): 404—407.
- [34] 曹文贵, 张永杰. 基于区间组合法的边坡稳定非概率模糊可靠性分析方法[J]. 土木工程学报, 2007, 40(11): 64—69.
- CAO Wen-gui, ZHANG Yong-jie. Non probabilistic fuzzy reliability analysis of slope stability based on interval interconnection method[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2007, 40(11): 64—69.
- [35] NI S H, LU P C, JUANG C H. A fuzzy neural network approach to evaluation of slope failure potential[J]. **Microcomputers in Civil Engineering**, 1996, 11(1): 59—66.
- [36] 薛新华, 姚晓东. 边坡稳定性预测的模糊神经网络模型[J]. 工程地质学报, 2007, 15(1): 77—82.
- XUE Xin-hua, YAO Xiao-dong. A fuzzy neural network model for predicting slope stability[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2007, 15(1): 77—82.