

# 地下水影响下裂隙岩质 边坡变形的 Fuzzy 测度分析

李文秀, 梁旭黎, 赵胜涛

(河北大学 机械与建筑工程学院, 河北 保定 071002)

**摘要:** 根据裂隙岩质边坡工程实际, 采用 Fuzzy 数学理论中的 Fuzzy 测度理论, 将工程开挖引起裂隙岩质边坡移动变形这一客观现象视为一模糊事件, 依此建立了在地下水影响下岩体移动变形预测分析的 Fuzzy 测度模型。利用该模型可对边坡岩体移动变形参数进行反分析, 并可对边坡开挖过程中引起的岩体移动变形进行定量计算, 进而对地下水影响下岩质边坡总体稳定性和稳定程度进行预测。对已有的矿山边坡岩体移动变形及其稳定性进行了具体的分析预测, 结果符合工程实际。

**关键词:** 边坡工程; 岩质边坡; 岩体移动变形; 地下水; Fuzzy 测度

**中图分类号:** TU 457

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)02-0302-05

## FUZZY MEASURES ANALYSIS FOR DISPLACEMENTS AND DEFORMATIONS OF JOINTED ROCK SLOPE UNDER INFLUENCE OF GROUNDWATER

LI Wen-xiu, LIANG Xu-li, ZHAO Sheng-tao

(College for Machinery and Civil Engineering, Hebei University, Baoding 071002, China)

**Abstract:** The predictions of displacements and deformations of rock slopes are important in rock and soil mechanics and engineering. Various approximate methods have been used for such calculations. The displacement or deformation of a rock mass can be regarded as a fuzzy event that takes place at a fuzzy probability. Therefore, the theory of fuzzy measures can be applied to describe the displacements and deformations of rock slopes. Based on the results of the statistical analysis of a large amount of measured data in slope engineering, the fundamental fuzzy model of displacements and deformations of rock slope is established by using the theory of fuzzy measures. The formulas of two-dimensional problems are developed and applied to the predictions of displacements and deformations of rock slopes due to surface excavation. The fuzzy measures models presented are adopted for back analysis using displacement parameters. The agreement of the theoretical results with the field measurements shows that the model is satisfactory and the formulae obtained are valid, and thus can be effectively applied to predict the displacements, the failure of rock slopes due to mining, and the failure of slopes under the influence of groundwater.

**Key words:** slope engineering; rock slope; rock mass displacements and deformations; groundwater; fuzzy measures

**收稿日期:** 2003-06-04; **修回日期:** 2003-07-28

**基金项目:** 河北省教育厅科研项目基金资助项目(2004308); 河北大学人才引进项目基金资助项目(2001Y01)

**作者简介:** 李文秀(1954-), 男, 现任教授、研究生导师, 主要从事岩石力学、土木工程等方面的教学及研究工作。E-mail: Leewenxiu@yahoo.com.cn.



# 1 引言

在水利、交通、化工、冶金等许多领域的工程中都涉及到边坡稳定及其保护问题，此类问题不仅涉及到经济投资，更重要的是涉及到安全。文[1]就固坡问题进行了研究。文[2]针对高陡边坡稳定性分析问题进行了讨论。迄今为止，概率分析及可靠度分析<sup>[3-7]</sup>、模糊数学和神经网络及可拓学分析法<sup>[8-12]</sup>、岩体结构分析<sup>[13]</sup>、人工智能及有限元等数值分析法等均被广泛应用于岩体移动变形预测及边坡稳定性分析中<sup>[14-17]</sup>，已积累了丰富的经验。

人们注意到，对于没有控制边坡滑动的定向构造弱面，且边坡岩体中裂隙发育或严重风化的一类边坡，采用一些经典分析方法所获结果与工程实际相差甚远。这就说明了岩土边坡稳定性分析问题其自身的复杂性，及其影响因素的不确定性。

事实上，正是由于采用经典分析方法导致上述结果出现之后，启发了人们去探索新的途径，研究建立某种新的分析方法。本文以 Fuzzy 数学理论为基础，通过数值积分方法，建立适用于裂隙发育或风化岩质边坡岩体移动变形参数反分析模型，并从边坡岩体位移和变形的角度着眼，建立了边坡稳定性预测分析的综合理论分析系统。

## 2 数学模型

### 2.1 模糊测度

为讨论问题方便，在此给出与本文所讨论问题相关的 Fuzzy 测度理论定义<sup>[7]</sup>。

定义：假设  $A$  是一个由某些样本所构成的集合(模糊子集合)，集合  $A$  就称为模糊事件，且有  $A \subset D$ ，则模糊事件概率测度简称为“模糊测度”(fuzzy measures)，并可表示<sup>[7]</sup>为

$$M(A) = \int_{\Omega} \mu_A(x) dp(x) \tag{1}$$

式中： $\mu_A(x) \in \Omega [0, 1]$ 为隶属函数(membership function)， $dp(x)$ 为分布密度函数。

### 2.2 节理化边坡岩体移动变形

在开挖影响下的边坡岩体内部任意点所发生的移动变形可视为一类模糊事件，而由于这种移动变形在客观上对边坡岩体的稳定性产生直接影响。由此可采用模糊数学理论对其进行研究。

首先从边坡岩体内部移动变形入手。假定边坡岩体水平成层或节理裂隙发育，在水平面内具有统计意义下的各向同性时，可按二维问题考虑<sup>[3, 7]</sup>。建立二维直角坐标系(见图 1)对边坡移动变形进行研究。

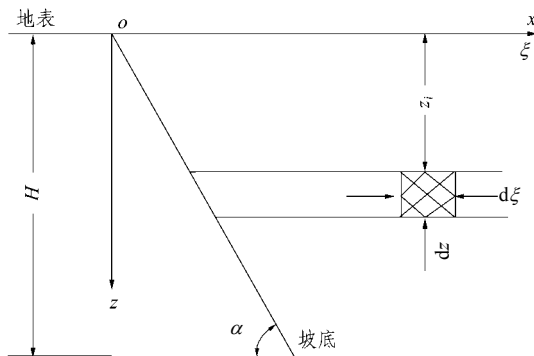


图1 露天工程开挖断面示意图  
Fig.1 A cross-section of surface excavation

#### 2.2.1 边坡岩体的垂直移动

由图 1 可知，在深为  $z_i$  时，挖出厚度为  $dz$  的岩体时，边坡岩体垂直移动服从的分布密度函数为

$$dp_s(x, z) = \int_D \frac{1}{r_z} \exp\left[-\frac{\pi(x-\xi)^2}{r_z^2}\right] d\xi \tag{2}$$

式中： $D(z \cot \alpha, \dots)$ ； $r_z$ 为开采深度为  $z_i$  处、开挖的岩体厚度为  $dz$  时的主要影响半径<sup>[3, 7]</sup>。

当开挖深度为  $H$ 、边坡角度为  $\alpha$  时，在深为  $z_i$  处，挖出厚度为  $dz$  的无限长条的水平岩层，在坡体内，开挖引起了岩体移动。此时，边坡岩体内部的主要影响范围可表示<sup>[3, 7]</sup>为

$$r_z = z / \tan \beta_w \tag{3}$$

式中： $\beta_w$ 为考虑地下水的开挖影响范围角。

为了考虑地下水对边坡岩体移动变形的影响，引入隶属函数为

$$\mu_A(z, w) = \exp\left(-\frac{wz}{H}\right) \tag{4}$$

式中： $A$ 为模糊子集合，即在地下水的影响下，边坡岩体稳定性变化与开挖引起岩体移动变形相关程度的模糊子集合，可称之为“相关模糊子集合”或“相关集”； $w(w > 0)$ 为与地下水影响有关的待定参数； $H$ 为边坡开挖最大高度。

式(4)的物理含义为：在地下水影响下边坡岩体移动变形这一模糊事件属于“相关集”的程度。

而当开挖深度为  $H$  时, 最终所形成的露天坑对地表所产生的影响在垂直方向上将引起地表下沉。根据 Fuzzy 测度定义, 得下沉 Fuzzy 测度为

$$M_S(A) = \int_{\Omega} \mu_A(z, w) dp_s(x, z) \quad (5)$$

式中:  $\Omega$  为积分区域, 视实际情况确定。

最终稳定的下沉量为

$$S(x, z) = S = K_w M_S(A) \quad (6)$$

$$S = K_w \int_0^H \int_{z \cot \alpha}^{\infty} \mu_A g \exp\left[-\frac{c(x-\xi)^2}{z^2}\right] dz d\xi \quad (7)$$

式中:  $g = t \tan \beta_w / z$ ,  $c = \pi \tan^2 \beta_w$ ,  $K_w$  为与地质条件有关的待定系数 ( $1.0 < K_w < 2.0$ ),  $M_S(A)$  为地表垂直移动的模糊测度。

由式(7)可见,  $M_S(A)$  的表达式为广义含参变量积分, 须采用数值积分来计算。

### 2.2.2 边坡岩体的水平移动

根据图 1 所示坐标系, 当在深为  $z_i$  处挖出的水平岩体厚度为  $dz$  时, 此时岩体产生的水平移动为

$$dp_u(x, z) = \exp(-cc_1 / z^2) dz \quad (8)$$

式中:  $c_1 = (x - z \cot \alpha)^2$ 。

因而, 当开挖深度为  $H$  时, 最终所形成的露天坑对地表所产生的影响在水平方向上将引起地表移动。根据 Fuzzy 测度定义, 可得关于地表水平移动 Fuzzy 测度  $M_U(A)$  表达式为

$$M_U(A) = \int_D \mu_A(z, w) dp_u(x, z) \quad (9)$$

式中:  $D$  为积分区域, 视实际情况确定。

最终稳定的水平移动量为

$$U(x, z) = \int_0^H b_w \mu_A \exp\left[\frac{-cc_1}{z^2}\right] dz \quad (10)$$

式中:  $b_w$  为待定的(考虑地下水影响)水平移动系数,  $b_w \in (0, 1)$ , 一般在  $0.2 \sim 0.5$  之间变化。

### 2.2.3 边坡岩体水平变形

水平变形 Fuzzy 测度<sup>[7]</sup>为

$$M_E(x, z) = \frac{\partial}{\partial x} M_U(x, z) \quad (11)$$

根据定义, 可导出地表水平变形表达式为

$$E(x, z) = \int_0^H \frac{2b_w(z \cot \alpha - x_i)c}{z^2} \mu_A \exp\left[\frac{-c(x_i - z \cot \alpha)^2}{z^2}\right] dz \quad (12)$$

## 2.3 边坡岩体移动变形参数反分析

### 2.3.1 主要影响范围角 $\beta_w$

根据式(7)可知, 在  $x=0$  处, 地表将出现最大下沉值。利用已知边坡角  $\alpha$  (即综合断面角度)、边坡开挖深度  $H$  (此时边坡为最终开挖状态——时间趋于无穷大状态下的开挖深度)、实测地表最大下沉值即可由式(7)反算出主要影响范围角  $\beta_w$  值。

### 2.3.2 边坡岩体水平移动系数 $b_w$

根据式(10)可知, 在  $x=0$  处, 地表出现最大水平移动值。此时最大水平移动值为

$$U_{\max} = \int_0^H b_w \exp\left[-\left(\frac{wz}{H} + c \cot^2 \alpha\right)\right] dz \quad (13)$$

通过式(7)反算出  $\beta_w$  值, 再利用已知的边坡角  $\alpha$ 、边坡开挖深度  $H$ 、实测地表最大水平移动值, 即可由式(13)反算出边坡水平移动系数  $b_w$ 。

## 3 工程实例分析

### 3.1 岩体移动参数反分析

例 1 某露天矿山边坡岩体移动参数反分析及其开挖后岩体移动预测。

该矿于 1961~1972 年进行了多次边坡岩体移动变形测量, 在 1972 年, 采深为 110 m, 边坡角为  $39^\circ$ , 实测地表最大下沉值为 1 250 mm, 地表最大水平移动值为 1 750 mm;  $K_w = 1.1$ ;  $w = 0.5$ 。采用式(7)反算主要影响范围角  $\beta_w$  值。计算得:  $\beta_w = 36^\circ$ 。

由式(13)反算水平移动系数  $b_w$ , 此时, 有

$$1.75 = \int_0^{110} b_w \mu_A \exp(-\pi \cot^2 39^\circ \tan^2 36^\circ) dz$$

计算得:  $b_w = 0.253 384 492 \sim 0.253 4$ 。

根据上述参数, 通过计算机进行了数值计算。理论曲线与实测资料对比情况如图 2 所示。由对比结果可见, 理论曲线与实测值吻合很好。

### 3.2 边坡岩体变形及稳定性分析

例 2 陇南山区厂坝露天矿边坡稳定性分析。

该矿地处陇南山区, 为一大型露天铅锌矿, 边坡岩体以石英片岩、黑云母石英片岩及大理岩为主。岩体中的节理裂隙发育, 局部风化较为严重。

为了对比, 在不考虑地下水影响的情况下, 根据矿区条件, 取不同参数及坡角进行数值计算。所取参数为:  $b = 0.2$ ;  $\beta = 55^\circ 00', 51^\circ 30'$ ; 计算结果见表 1。

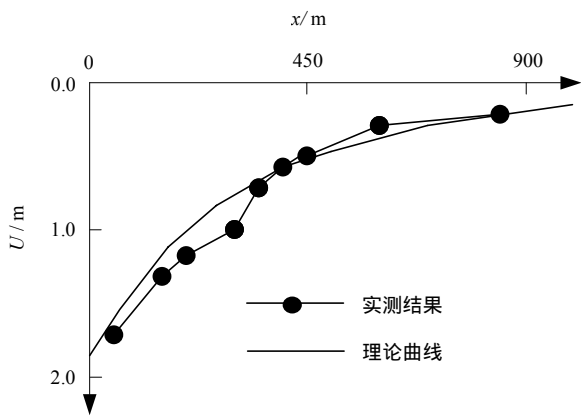


图2 理论曲线与实测移动值对比(水平移动)

Fig.2 Comparison between the measured data and the theoretical results for the horizontal displacement

表1 边坡角度与水平变形的对应关系

Table 1 Relations between slope angles and the strains

边坡角度 $\alpha / (^\circ)$	边坡岩体水平变形 $E(x=0)$	
	$\beta=55^\circ 00'$	$\beta=51^\circ 30'$
35	0.000 030 34	0.000 128 54
40	0.001 418 07	0.002 137 39
41	0.002 578 99	0.003 328 27
42	0.004 485 24	0.005 006 85
43	0.007 477 96	0.007 293 11
44	0.012 026 27	0.010 333 43
45	0.018 668 90	0.014 249 92
46	0.028 093 73	0.019 187 41
47	0.041 095 28	0.025 278 81
48	0.058 517 91	0.032 622 57
49	0.081 311 55	0.041 313 67
50	0.110 495 90	0.051 428 77

由表1数据可见,  $\beta$  相差  $3.5^\circ$ , 但变形值相差较大; 这反映出岩性不同, 其变形结果明显不同。另外, 当坡角达到  $45^\circ$  以后, 水平变形量急剧增加。实际调查统计分析表明, 当自然坡角小于  $45^\circ$  时, 边坡处于稳定或基本稳定状态; 而当自然坡角度大于  $45^\circ$  时, 边坡不稳定。对于开挖所形成的裂隙岩质高边坡, 若坡角大于  $45^\circ$ , 是不稳定的。

鉴于该矿地处多雨山区, 为确定合理坡角, 在此考虑最简单的情况: 即只选取不同的地下水影响系数  $w$  值进行分析。根据矿山实测资料和该矿区具体条件, 选取2组参数进行分析。第1组参数(考虑

地下水):  $\beta_w = 51^\circ 30'$ ,  $b_w = 0.2$ ,  $w = 0.5$ ,  $H = 504$  m; 第2组参数(不考虑地下水):  $\beta = 51^\circ 30'$ ,  $b = 0.2$ ,  $w = 0$ ,  $H = 504$  m。取不同的边坡角度进行计算, 并将2种情况计算结果对比于图3。

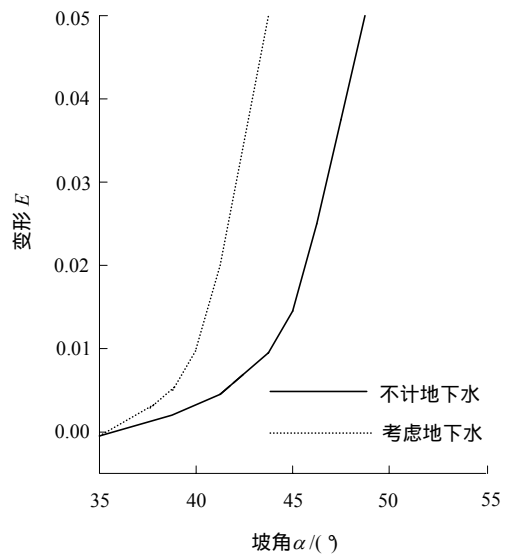


图3 水平变形理论曲线

Fig.3 The theoretical curves of the horizontal strains

由图3可见, 不考虑地下水( $w=0$ )时, 在坡角达到  $45^\circ$  以前, 水平变形变化平缓; 而当坡角达到  $45^\circ$  以后, 水平变形量急剧增加。考虑地下水( $w=0.5$ )时, 在坡角达到  $40^\circ$  以前, 水平变形变化平缓, 而当坡角达到  $40^\circ$  以后, 水平变形量急剧增加。2种情况差异较大, 边坡角相差  $5^\circ$ 。这一结果与许多文献研究结论一致, 即在地下水影响下, 安全系数下降; 对节理裂隙发育的高陡岩质边坡而言, 边坡角度明显降低。

从该矿情况分析, 由于边坡岩体节理裂隙发育, 又属于高陡边坡, 因而, 局部区段易出现不稳定现象。该矿北部边坡到1986年底之前就发生4次小滑坡, 1次大滑坡。在1985年7月, 该矿北部边坡1538~1610 m区段曾发生大滑坡, 主要是地下水的影响。因此, 边坡疏排水是极为重要的。

## 4 结 论

(1) 通过计算分析, 理论曲线与实测结果吻合得很好。表明采用本文所建立的 Fuzzy 测度模型对露天开挖岩体移动变形进行预测分析符合工程实际。

(2) 岩体节理发育或风化破碎情况下, 开挖影响范围较小, 即  $\beta_w$  值较大; 反之则开挖影响范围相对较大, 即  $\beta_w$  值较小。  $\beta_w$  值反映了边坡岩体性质。

(3) 考虑地下水影响与不考虑地下水两种情况差异很大。分析结果表明: 对节理裂隙发育的高陡岩质边坡而言, 在地下水影响下, 可使边坡坡角明显降低; 即边坡稳定程度与地下水密切相关。

### 参考文献(References):

- [1] 王可均, 李焯芬. 植物固坡的力学简析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 687—691.(Wang Kejun, Lee C F. Brief mechanics analysis on bioengineering techniques for slope protection[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 687—691.(in Chinese))
- [2] 朱维申, 程 峰. 能量耗散本构模型及其在三峡船闸高边坡稳定性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 261—264.(Zhu Weishen, Cheng Feng. Constitutive model of energy dissipation and its application to stability analyse of ship-lock slope in three gorges project[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 261—264.(in Chinese))
- [3] 颜荣贵, 李文秀. 露天煤矿随机裂隙边坡稳定性研究的概率积分法[J]. 煤炭学报, 1983, 12(3): 65—76.(Yan Ronggui, Li Wenxiu. Probability integral for analyzing stability of stochastic fissured slopes in open-pit coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 1983, 12(3): 65—76.(in Chinese))
- [4] Mazzoccola D F, Hudson J A. A comprehensive method of rock mass characterization for indicating natural slope instability[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1996, 29(1): 37—56.
- [5] Chowdhury R N. Simulation of risk of progressive slope failure[J]. Can. Geotech. J., 1992, 29(1): 94—102.
- [6] Pankaj Gupa, Anbalagan R. Slope stability of Teri reservoir area, India, using landslide hazard zonation mapping[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1997, 30(1): 27—36.
- [7] 李文秀. Fuzzy 理论在采矿及岩土工程中的应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.(Li Wenxiu. Applications of Fuzzy Mathematics in Mining and Geotechnical Engineering[M]. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 1998.(in Chinese))
- [8] 张晓晖, 王 辉, 戴福初等. 基于关系矩阵和模糊集合的斜坡稳定性综合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 346—351.(Zhang Xiaohui, Wang Hui, Dai Fuchu, et al. Comprehensive evaluation of slope stability using interaction matrix and fuzzy sets[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 346—351.(in Chinese))
- [9] 卢才金, 胡厚田, 徐建平. 改进的 BP 网络在岩质边坡稳定性评判中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 303—307.(Lu Caijin, Hu Houtian, Xu Jianping. Application of improved back-propagation network in the evaluation of rail way rock slope[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(3): 303—307.(in Chinese))
- [10] Ghassem Habibagahi. Post-construction settlement of rockfill dams analyzed via adaptive network-based fuzzy inference systems[J]. Computers and Geotechnics, 2002, 29(3): 211—233.
- [11] 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 Zhangming. Application of fuzzy analysis in slope stability evaluation[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(5): 490—495.(in Chinese))
- [12] 谢全敏, 夏元友. 岩体边坡稳定性的可拓聚类预测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 438—441.(Xie Quanmin, Xia Yuanyou. Extension classification prediction method for the stability of rock-mass slopes[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(3): 438—441.(in Chinese))
- [13] 何满潮, 武 雄, 鹿 粗等. “滑坡岩体”鉴别的实验方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 630—632.(He Manchao, Wu Xiong, Lu Cu, et al. Research on experimental method for identification of rock body within sliding masses of landslide[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 630—632.(in Chinese))
- [14] Li W. Fuzzy mathematics method for theoretical analysis of ground movements due to underground excavation[J]. Mining Science and Technology, 1991, 13: 45—56.
- [15] 冯夏庭, 张治强, 杨成祥等. 位移反分析的进化神经网络方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 529—533.(Feng Xiating, Zhang Zhiqiang, Yang Chengxiang, et al. Study on genetic-neural network method of displacement back analysis[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 529—533.(in Chinese))
- [16] 冯夏庭, 张治强, 盛 谦等. 三峡工程永久船闸首区开挖变形特征的智能分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 633—637.(Feng Xiating, Zhang Zhiqiang, Sheng Qian, et al. Intelligent analysis of deformation behaviors of permanent shiplock of the Three Gorges Project[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(5): 633—637.(in Chinese))
- [17] 戚国庆, 黄润秋, 速宝玉等. 岩质边坡降雨入渗过程的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 625—629.(Qi Guoqing, Huang Runqiu, Su Baoyu, et al. Numeric simulation on rainfall infiltration on rock slope[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 625—629.(in Chinese))