

动力影响下山区露天矿合理边坡角的确定*

李文秀^{1,2} 梁旭黎¹ 梅松华¹ 乔金丽¹ 翟淑花¹

(¹河北大学岩土工程研究所 保定 071002) (²中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室 武汉 430071)

摘要 针对山区露天开挖和岩石边坡工程实际,根据极限平衡理论和模糊数学理论,建立了相应的理论分析模型。考虑矿山生产爆破振动动力因素作用和影响,利用所建立的数学模型对某大型金属露天矿山边坡稳定性进行了具体计算分析,并依此对矿山边坡总体边坡角进行了评价。将理论计算分析结果与露天矿山工程实际情况进行了对比,表明所采用的理论模型和计算分析方法符合矿山工程实际。

关键词 岩石力学, 边坡稳定性, 爆破振动, 模糊数学, 边坡角

分类号 TU 457, TD 824.7 **文献标识码** A **文章编号** 1000-6915(2004)17-2949-05

DETERMINATION OF RATIONAL SLOPE ANGLE CONSIDERING INFLUENCE OF BLASTING VIBRATION ON OPEN-PIT MINE IN MOUNTAINOUS AREAS

Li Wenxiu^{1,2}, Liang Xuli¹, Mei Songhua¹, Qiao Jinli¹, Zai Shuhua¹

(¹Hebei University, Baoding 071002 China)

(²Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, IRSM, CAS, Wuhan 430071 China)

Abstract The landslide of rock slope with the influence of blasting vibration often results in serious disasters, frequently with heavy losses of life and damage to property. It is generally difficult to precisely analyze rock slope stability due to the vast number of unknown variables, such as slope type, height and angle of slope, physical properties of rock mass, and so on. The prediction of failure of rock slope is an important problem of rock mechanics in the engineering excavation activities, especially the open-pit mine in mountainous areas. It is difficult to determine the rational slope angle of rock slope because of the complexity of the problem. Recently, fuzzy theory has been applied to predict the landslide and failure of rock slope. The landslide of rock slope can be regarded as a fuzzy event. The landslide will take place at a fuzzy probability, and so the theory of fuzzy measures can be applied to predict the landslide and failure of rock slope. By using statistical analysis, the initial damage of the rock slope in mountainous areas is found to be of normal distribution. Based on the results of statistical analysis of a large amount of measured data in slope engineering, the fundamental fuzzy model of failure of rock slope is established by using the theory of fuzzy mathematics. The formulas of two-dimensional problems are derived and applied to the prediction of slope failure due to surface mining. The fuzzy measure models are adopted for determination of rational slope angle considering the influence of the blasting vibration on open-pit mine in mountainous areas. The fuzzy failure probability and dynamic responses of the rock slope are calculated. Numerical results are compared with those obtained from independent field tests. The agreement of the theoretical results with the field measurement shows that the presented model is satisfactory and the formulas obtained are valid, and thus can be effectively used for prediction of slope failure and determination of the rational slope angle of rock slope.

Key words rock mechanics, slope stability, blasting vibration, fuzzy mathematics, slope angle

2004年4月23日收到初稿,2004年6月1日收到修改稿。

* 中国科学院武汉岩土力学所岩土力学重点实验室基金(Z110406)资助课题。

作者 李文秀 简介:男,1954年生,现任教授、研究生导师、河北大学机械与建筑工程学院副院长、河北大学岩土工程研究所所长,主要从事岩土力学、土木工程等方面的教学及科研工作。E-mail: Leewenxiu@yahoo.com.cn.

1 引言

在露天开采过程中，边坡岩体的稳定性问题是整个矿山开采过程中的核心问题，而合理边坡角度的确定是问题的关键，它不仅涉及到工程预算和经济投资，而且更重要的是还涉及到工程安全问题。迄今为止，极限平衡分析法、岩体结构分析法、有限单元法、离散单元法、可靠度分析方法、专家系统分析法、模糊数学分析法、人工神经网络等分析方法均已广泛应用于岩石边坡稳定性分析中，已积累了丰富的经验，并不断取得新的进展^[1~13]。

本文针对岩石边坡在爆破振动力影响下的失稳破坏问题，考虑生产过程中的爆破振动影响，采用模糊数学理论并结合极限平衡方法进行研究探讨，为确定合理的岩石边坡角提供科学依据。

2 数学模型

2.1 模糊概率测度模型

为建立数学模型，先给出模糊数学定义。

定义1 设 Ω 为一空间，并假定 (Ω, B, P) 为一概率空间， B 是集合 Ω 中 Borel 集合的 σ 域， P 是 Ω 上的概率测度。 Ω 中的点由 x 所定义，故可将 x 视为工程问题中的样本或变量。

定义2 设 A 为一模糊子集合， $A \in B$ ，则 A 的概率可用下式表示：

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

$$\int_{\Omega} dp(x) = 1.0 \tag{2}$$

式中： $\mu_A(x) (\mu_A : \Omega \rightarrow [0, 1])$ 为 A 的隶属函数。

在开挖影响下的边坡滑坡或破坏可视为一类模糊事件，由此可采用模糊数学理论对其进行研究，并从边坡岩体移动变形入手开展工作。

假定边坡岩体水平成层或节理裂隙发育，在各个水平面内具有统计意义下的各向同性，此时可将边坡稳定性三维问题简化为二维问题进行研究。

如图1所示，考虑从 $x = -L$ 到 $x_i (x_i = -n, -n-1, \dots, -1, 0)$ 的开挖过程中，伴随生产爆破等动力作用对边坡稳定性的影响，并依此确定合理的边坡角度。

根据大量的工程实测资料分析，可建立与爆破等动力作用相关的隶属函数为

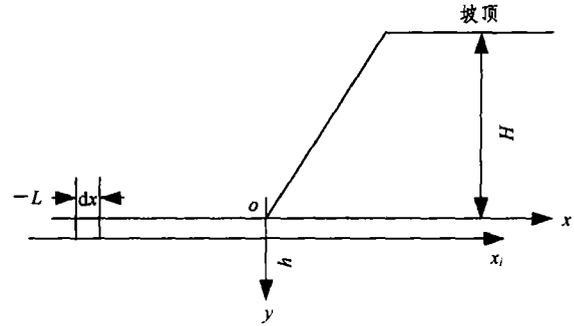


图1 露天工程开挖示意图
Fig.1 Sketch of open-pit excavation

$$\left. \begin{aligned} \mu_A(x_i) &= \exp(\xi \eta x_i) & x_i \leq 0 \\ \mu_A(x_i) &= 0 & x_i > 0 \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

式中： ξ, η 为待定参数。在实际工程问题中， x_i 的分布密度函数 $dp(x_i)$ 为下面的函数表达式：

$$dp(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi H \xi}} \exp \left[- \left(\frac{x_i - x}{\sqrt{2H \xi}} \right)^2 \right] dx \tag{4}$$

根据定义2可导出在爆破动力影响下边坡失稳的模糊概率 $MP(A)$ 如下：

$$MP(A) = \int_{-L}^{x_i} \frac{\exp(\xi \eta x_i)}{\sqrt{2\pi H \xi}} \exp \left[- \left(\frac{x_i - x}{\sqrt{2H \xi}} \right)^2 \right] dx \tag{5}$$

本文先采用上述模型计算出边坡破坏概率，再用极限平衡公式计算出边坡安全系数；由此再判断所设计边坡角度的合理性。此处采用工程界熟悉并认可的 Bishop 公式计算边坡安全系数 K 值。

此处，由于假定边坡岩体节理裂隙发育，在各个水平面内具有统计意义下的各向同性，而且在分析过程中不考虑时间因素的影响，实际上已将爆破动荷载的影响转化为拟静力问题。

此时，边坡安全系数 K 可按下式计算：

$$K = \frac{\sum [c_i l_i + (W_i \sec \alpha_i - U_i) f_i] \frac{1}{1 + \frac{f_i}{K} \tan \alpha_i}}{\sum Q_i \cos \alpha_i + \sum W_i \sin \alpha_i} \tag{6}$$

式中：只考虑爆破振动力影响，即取 $Q_i > 0, U_i = 0$ ； c_i 为岩体粘聚力； l_i 为每一条块宽度； W_i 为条块自重； f_i 为每一小条块摩擦系数； α_i 为每一小条块底面与水平面的夹角； Q_i 为每一小条块所受的水平爆破振动力。由于在矿山生产爆破振动实测资料中，发现地震波在岩体中的水平传播速度与垂直传播速

度近似相等, 为了充分利用前人已有的研究成果, 并考虑计算上的方便, 因而此处只考虑采用水平爆破振动力。

2.2 边坡失稳破坏临界值的确定

为定量地对边坡在爆破振动力影响下失稳破坏问题进行分析, 在此给出边坡失稳破坏的临界值。

迄今为止, 关于岩土边坡允许破坏概率的极限值, 在国际上尚没有统一的标准。根据国内外许多学者的研究结果, 土质边坡失稳的比例为 1/1 000, 所以在工程中取土质边坡失稳破坏概率 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 为一般条件下比较的临界值^[12-13]。

由于露天矿山岩质边坡与土质边坡存在比较大的差异, 二者介质的物理力学性质指标等均很不相同, 因此不能按土质边坡失稳的临界值对比。根据文[12, 13]的研究结果, 可取 15%(即 $MP(A)=0.15$) 作为露天矿山岩质边坡失稳的比较界限值, 亦即当露天矿山岩质边坡失稳的可能程度达到 15% 以上时, 可以认为边坡失稳的可能性较大。

3 工程实例分析

陇南某露天金属矿地处陇南山区, 边坡设计最大高度为 501 m, 台阶高度为 12 m。矿区第 33[#]~41[#] 地质勘探线之间为边坡主要开挖区段, 其中的东北部边坡岩体为重点部位。该部位从海拔标高 1 586~1 658 m, 平均边坡角度为 47°。在该区段岩体中有大量的石英片岩及黑云母石英片岩, 上部岩体风化破碎, 中部和下部岩体节理裂隙较发育, 在开挖过程中, 在生产爆破振动影响下, 曾发生过多次滑坡。根据矿山生产实际, 生产爆破采用微差爆破技术, 靠近边坡部位则采用预裂和微差控制爆破技术进行松动爆破。

为考虑分析生产爆破振动对永久边坡稳定性的影响, 先后进行了多次爆破振动观测。现将穿爆参数及爆破实测数据列入表 1, 2 中。

经分析得到诸相关参数值见表 3, 数值计算结果列入表 4。

采用极限平衡分析方法对该矿边坡稳定性进行了计算分析, 此处采用 Bishop 公式计算边坡安全系数 K 。所计算出的边坡安全系数 $K = 1.161 3 > 1.0$, 表明边坡是稳定的; 但实际上却发生了较大的滑坡事故。而采用模糊概率模型所计算出的结果,

即从表 4 数值可见, 当 $x = -5$ (即距边坡 5 m 处) 时, 在生产爆破振动影响下, 边坡破坏失稳的模糊概率(可能性)为 $MP(A) = 0.302 351 12 \approx 0.30 > 0.15$; 而此时在边坡的 1 586~1 658 m 区段发生了滑坡破坏事故, 总滑动量为 4 000 m³, 表明理论结果与实际情况吻合。

表 1 矿山爆破参数表

Table 1 Parameters of blast in open-pit mine

爆破 孔号	炸药比量 /kg · m ⁻³	孔深 /m	台阶高 /m	超深 /m	抵抗线 /m
1	0.42	13.50	11.50	2.0	7.60
2	0.42	13.50	11.50	2.0	6.00
3	0.42	13.50	11.50	2.0	6.50
4	0.42	14.00	12.00	2.0	6.17
5	0.42	16.00	13.90	2.1	6.60
6	0.52	13.50	11.50	2.0	3.60
7	0.52	13.50	11.50	2.0	4.50
8	0.52	13.50	11.50	2.0	5.10
9	0.52	13.60	11.50	2.1	4.40
10	0.52	14.00	12.00	2.0	4.50

表 2 矿山现场实测结果表

Table 2 In-situ measured results in the open-pit mine

测点 编号	仪器 编号	高差 /m	炸药量 /kg	振动速度 /cm · s ⁻¹	水平距离 /m	R /m
1-1	25	10.00	469.60	13.30	21.00	23.30
1-2	26	10.00	347.60	23.80	15.80	18.70
2-1	22	10.00	413.30	74.30	14.50	17.60
3-1	36	10.00	359.00	35.00	20.00	22.40
4-1	03	11.60	468.00	2.40	66.50	67.50
5-1	131	24.90	468.00	11.40	37.80	45.30
5-2	311	24.90	468.00	11.40	37.80	45.30
6-1	08	24.80	468.00	2.40	50.00	55.80
7-1	56	25.30	468.00	5.00	81.50	85.30
8-1	314	51.00	468.00	8.40	83.50	97.80
8-2	361	51.00	468.00	8.40	83.50	97.80
9-1	54	58.10	468.00	3.00	72.00	91.70

表 3 计算工程参数值表

Table 3 Engineering parameters for calculation

坡高 H /m	坡角 α /(°)	距离 L /m	内摩擦角 φ(°)	ξ	η
72	47	67	39.83	0.89	0.02

表4 陇南露天矿岩石边坡稳定性分析数值计算结果

Table 4 The numerical results for the stability analysis of rock slope in Longnan open-pit mine

x_i/m	$\mu_i(x_i)$	$MP(A)$	x_i/m	$\mu_i(x_i)$	$MP(A)$
-60	0.339 596	0.014 533 01	-23	0.661 001	0.166 159 13
-58	0.352 044	0.019 402 91	-22	0.673 007	0.172 478 23
-56	0.364 948	0.024 590 20	-21	0.685 231	0.178 934 37
-54	0.378 326	0.030 107 18	-20	0.697 676	0.185 529 49
-52	0.392 194	0.035 966 15	-18	0.723 250	0.199 150 50
-50	0.406 579	0.042 177 57	-17	0.736 387	0.206 181 00
-48	0.421 473	0.048 528 40	-16	0.749 762	0.213 359 77
-46	0.436 922	0.055 399 53	-15	0.763 380	0.220 376 36
-44	0.452 938	0.062 820 34	-14	0.777 245	0.227 876 58
-42	0.469 541	0.070 562 62	-13	0.791 362	0.235 485 59
-40	0.486 752	0.078 722 40	-12	0.805 735	0.243 275 57
-38	0.504 595	0.087 312 60	-11	0.820 370	0.251 221 91
-36	0.523 091	0.096 078 74	-10	0.835 270	0.259 330 45
-34	0.542 265	0.105 560 02	-9	0.850 441	0.267 599 77
-32	0.562 143	0.115 509 14	-8	0.865 888	0.276 032 11
-30	0.582 748	0.125 940 58	-7	0.881 615	0.284 638 22
-29	0.593 333	0.131 343 16	-6	0.897 628	0.293 407 66
-28	0.604 109	0.135 869 96	-5	0.913 931	0.302 351 12
-27	0.615 082	0.142 523 73	-4	0.930 531	0.311 467 34
-26	0.626 254	0.148 018 26	-3	0.947 432	0.320 430 98
-25	0.637 628	0.153 932 96	-2	0.964 640	0.329 897 23
-24	0.649 209	0.159 978 08	-1	0.982 161	0.339 547 79

由上述分析结果可见, 仅用极限平衡分析方法所获结果与实际工程情况差异较大。而将其与模糊数学理论结合起来进行分析其结果较为符合实际。

由上述结果可知, 原设计的边坡角 47° 显然不合理, 应进一步考虑降低边坡角。

采用本文所给模型和分析方法, 对另一边坡剖面 $B-B$ 剖面进行了计算分析。该部位为一山包, 边坡后面为一自然坡, 边坡上部(1 522 m 水平以上)岩体主要为大理岩, 且地表植被较好。该剖面从 1 522~1 600 m 区段的边坡剖面角为 48° , 而下部为 44° , 总体边坡剖面角为 46° ; 边坡剖面总体形状呈上部较陡、下部较缓的形状。

根据现场情况, 按本文方法计算分析, 此时边坡破坏失稳的模糊概率 $MP(A) = 0.12 < 0.15$, 即边坡破坏失稳的可能性为 12%; 而采用 Bishop 公式计算出的边坡安全系数 $K = 1.31$; 两种结果一致, 均表明边坡是稳定的。经过两年多的工程实践, 在

该部位采用预裂爆破方法, 降低最大爆段的起爆药量, 同时在中部和下部分别打了疏干排水巷道, 该部位的边坡一直是稳定的。这也进一步说明, 采用本文的分析方法所获结果符合矿山工程实际。

4 结 论

(1) 在陇南某露天金属矿的具体条件下, 1 586~1 658 m 区段岩体风化破碎, 设计边坡角 47° 不甚合理, 应适当降低, 同时对该部位边坡采取疏干排水措施, 以确保其稳定。

(2) 当在靠近高陡边坡近区进行生产爆破时, 采用预裂爆破方法, 设计合理的穿爆参数, 降低最大爆段的起爆药量, 可有效地保护在既定边坡角度条件下的最终边坡(即永久边坡)的安全和稳定。

(3) 在一定的山地地形、岩石性质和工程地质条件下, 可将永久边坡的总体边坡角(总体边坡剖面

角)设计成上部较陡、下部较缓的形状,从而可大大减少剥离量,提高企业经济效益。

(4) 将极限平衡分析方法与模糊概率分析方法结合起来进行分析,所获结果较为符合工程实际。

本文所提出的分析方法是在岩石边坡稳定性分析中的初步实践,尚需在工程应用实践中进一步完善,愿与本领域同行共同探讨。

参 考 文 献

- 1 Dodagoudar G R, Venkatachalam G. Reliability analysis of slopes using fuzzy sets theory[J]. Computers and Geotechnics, 2000, 27(2): 101~115
- 2 Juang C H, Jhi Y Y, Lee D H. Stability analysis of existing slopes considering uncertainty[J]. Engineering Geology, 1998, 49(2): 111~122
- 3 Sagaseta C, Sanchez J M, Canizal J. A general analytical solution for the required anchor force in rock slopes with toppling failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(3): 421~435
- 4 Davis T J, Keller C P. Modelling and visualizing multiple spatial uncertainties[J]. Computers and Geotechnics, 1997, 23(4): 397~408
- 5 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
- 6 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
- 7 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
- 8 胡云进, 速宝玉, 周维垣. 有地表入渗的岩坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1112~1116
- 9 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): 58~62
- 10 Duzgun H S B, Yucemen M S, Karpuz C. A methodology for reliability-based design of rock slopes[J]. Rock Mech. Rock Engng., 2003, 36(2): 95~120
- 11 Li W X, Mei S H. Fuzzy system method for the design of a jointed rock slope[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(3): 467~478
- 12 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
- 13 何广纳. 土工的若干新理论研究与应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994

中国大陆首条海底隧道 9 月动工

中国大陆第一条海底隧道——厦门东通道将于今年 9 月正式动工。

厦门东通道总投资 35 亿元,由国内专家自行设计施工。隧道在海平面下最深约 70 m,全长 5.6 km,涉及一系列繁杂的水文地质与工程地质、岩土工程问题。

与地面或江底隧道不同,建设海底隧道往往都是在巨大水压条件下进行作业,如果隧道选址的地质监测数据稍有误差,就极有可能引发隧道涌水事故,造成生命财产的巨大损失。又由于高盐分的海水本身对钢筋混凝土具有较强的腐蚀性,因此,隧道突(涌)水超前地质预测预警和注浆加固,是确保海底隧道安全建设的两大关键性技术难题。

去年,中国地质大学(武汉)唐辉明教授作为厦门东通道地质工程专家组成员,负责攻关隧道突(涌)水超前地质预测预警课题,今年 3 月该课题正式立项研究。

借助 MAPGIS(地理信息系统)高新技术手段,课题组根据地质状况的差异,将隧道所经区域划分为安全区、过渡区和危险区,创新性地研究出了一套海底隧道分段预报预警系统,为下一步注浆加固提供了较为准确的预警信息。

在此基础上,课题组又开发出了工程预案专家决策信息化施工方案,实现了对隧道的逐段分析预测预警、逐段开挖、步步推进的信息化施工,这不仅有利于隧道的整体稳定,还可大大降低施工成本(海底隧道的建设成本一般在 5 亿元/公里左右)。

(摘自 2004 年 7 月 6 日《长江日报》11 版)