

深井采场凿岩硐室稳定性模糊综合评价

刘湘平, 古德生, 罗一忠, 谢学斌

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 对影响深井采场凿岩硐室稳定性的因素进行了全面分析, 并将影响因素分为 4 类。运用模糊数学中的综合评判法建立了硐室稳定性的评价模型, 该模型包含二级模糊综合评判, 共考虑了 18 个影响因子。此外, 还建立了相关因子的隶属函数。以铜陵冬瓜山深井开采为实例, 对采矿方法试验采场凿岩硐室的稳定性进行了评价, 其结果与现场实际情况相吻合。

关键词: 深井开采; 凿岩硐室; 安全评价; 稳定性; 模糊数学

中图分类号: TD853 文献标识码: A 文章编号: 0253 - 6099(2008)03 - 0022 - 04

Fuzzy Comprehensive Evaluation of Drilling Chamber Stability in Deep Mining Stope

LIU Xiang-ping, GU De-sheng, LUO Yi-zhong, XIE Xue-bin

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: The influencing factors relating to chamber stability of deep mining stope were fully analyzed, and the factors were divided into 4 types. The evaluation model was set up by comprehensive judgement method which belongs to fuzzy mathematics. The model consists of two - class fuzzy judgement and 18 influencing factors. Besides, the membership functions of related factors were derived. As an example, the drilling chamber stability of deep mining stope was evaluated, where mining method are testing in Tongling Dongguashan deposit. The evaluating result is in agreement with the actual situation.

Key words: deep mining; drilling chamber; safety evaluation; stability; fuzzy mathematics

凿岩硐室的稳定性关系到采场作业的安全问题, 为了实现安全、高效采矿的目标, 需对凿岩硐室的稳定性进行安全评价, 以决定是否采取支护措施, 以及采取何种支护措施。

岩体工程稳定性评价方法大体上可分为 3 类: 第一类为因素组合公式法; 第二类属于模糊数学法; 第三类为模拟分析法, 如数值模拟法。到目前为止, 虽然模糊数学法在岩体工程稳定性评价中得到了一定程度的应用^[1-3], 但往往由于影响因素考虑不够全面、分级标准不尽合理等方面的原因, 在某种程度上影响了该法的应用效果, 笔者试图克服上述不足, 运用模糊综合评判法对深井采场凿岩硐室的稳定性进行评价。

1 影响深井采场硐室稳定性的因素

根据矿山岩体力学理论和工程实践经验, 并参考

有关文献^[4-7], 确定影响深井采场凿岩硐室稳定性的主要因素可分为如下 4 个方面, 每个方面又分为若干个因素。

1) 岩石强度。

通常表征岩石强度的力学参数有岩石单轴抗压强度、抗拉强度、弹性模量、泊松比、内聚力和内摩擦角等, 根据现有的研究成果, 考虑到它们之间的关系及重要程度, 选取单轴抗压强度、抗拉强度、弹性模量作为岩石强度的评价因素。此外, 对于深井开采而言, 岩爆倾向性是必须考虑的因素, 这里采用岩爆指数 (即有效弹性变形能量指数) 作为岩爆倾向性的评价指标^[4]。

2) 工程地质特征。

工程地质情况对岩体稳定性具有重要影响^[5], 选用岩芯质量指标 RQD 值、节理间距、节理走向和倾角、

收稿日期: 2007-12-08

基金项目: “十五” 国家科技攻关课题 (2004BA6152 - 04)

作者简介: 刘湘平 (1965 -), 男, 湖南邵阳人, 博士研究生, 主要从事采矿工程及其灾害控制研究。

节理条件、结构面胶结状况、地下水情况作为评价因素。其中,节理条件指节理面的粗糙程度、节理连续情况和节理宽度,地下水情况用每 10 m 巷道的涌水量作为评价指标。

3) 空区状况。

空区面积、体积和顶板暴露面形状系数^[6]是通常表征空区状况的 3 项指标。暴露面形状系数定义为面积与周长之比(也称水力半径)。对于留有矿柱的情形,空区比(定义为矿柱面积与空区面积之比)是一个反应空区特征及稳定性的重要参数。

4) 力学环境。

凿岩硐室的力学环境包括原岩应力和爆破振动两个方面^[7]。根据莫尔-库仑理论,原岩应力大小和应力差是决定岩体强度的重要因素。由于岩体具有显著的各向异性、不均质性和不连续性,应力作用方向不同,其强度也就完全不同。爆破振动对岩体稳定性有着不可忽视的影响,爆破作用往往在岩体临空面处产生拉伸波,极易导致岩体层离破坏。因而,选用原岩应力大小、应力差、应力作用方向和爆破振动 4 项因素作为评价指标。

2 模糊综合评价模型

2.1 多级模糊综合评判法的基本原理

按广义模糊综合评判方法,进行凿岩硐室稳定性评价的基本步骤如下。

1) 确定影响因素,并按某些属性逐级分为若干类,设倒数第二级中的某类(因素)含有 n 个因子,则因子的集合 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 。

2) 建立评语集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 。

3) 对倒数第二级中的某类(因素)构造出第一级模糊关系矩阵 R_1 。

$$R_1 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $r_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$ 表示因素 u_i 具有评语 v_j 的程度,也就是隶属度。

4) 按广义模糊综合评判方法进行第一级综合评判或决策,可记为如下形式:

$$B_1 = A_1 \circ R_1 = B_1 \quad (2)$$

式中 B_1 为第一级综合评判的结果;“ \circ ”表示模糊算子,模糊算子有多种类型,本文选用“实数的加乘”为模糊复合运算的算子; A_1 为第一级模糊关系的权矩阵, $A_1 = (a_1, a_2, \dots, a_n)$,其中 $a_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为常数

(即实际问题的权数); $B_1 = (b_1, b_2, \dots, b_m)$, 其中 $b_j (j=1, 2, \dots, m)$ 表示某类因素属于等级 v_j 的隶属度。

5) 对倒数第二级中的每类因素均进行上述的第一级模糊综合评判。

6) 利用上一级综合评判的结果,作为下一级的单因素决策。于是,第二级综合评判结果为:

$$B_2 = A_2 \circ R_2 \quad (3)$$

7) 按上述步骤逐级进行,即构成多级综合评判的广义模糊数学模型,最后按照最大隶属原则进行最终的稳定性综合评判。

通常根据问题的复杂程度,决定模糊综合评判的级数,本文采用二级模糊综合评判法对凿岩硐室的稳定性进行评价。

2.2 评价因子分级标准

目前,人们对岩体工程稳定性的分级尚无统一的认识,一般将其分为 3~6 级不等,笔者认为分为 5 级较为合理,因此,建立的关于凿岩硐室稳定性的评语集为:

$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} = \{\text{稳定, 较稳定, 中等稳定, 较不稳定, 不稳定}\}$ 。

针对深井采场所处的具体条件,考虑各影响因子的特征,参照有关文献,按 5 个级别进行划分,确定各因子的分级标准见表 1。

2.3 评价因子的隶属度

模糊数学中,是以隶属度来刻画事物的模糊界线的。确定评价因子隶属度的方法分为专家评定法和公式法两种,前者适用于离散型变量,后者则适用于连续性变量。根据建立隶属度的基本原则,对于表 1 中的离散型变量,因其指标的离散化,取值则采用专家评定法确定,见表 2;对于表 1 中的连续变量则建立代表隶属度和指标数值之间的函数关系,即隶属函数,其隶属度可通过代入实测值计算得出。隶属函数的确定往往带有浓厚的主观色彩,要确定符合实际的隶属函数并非易事。综合考虑各因子数据的分布特征,本文采用“降半梯形”分布的函数式,其公式如下:

$$Y_1(x) = \begin{cases} 1 & x \leq s_1 \\ \frac{s_2 - x}{s_2 - s_1} & s_1 < x < s_2 \\ 0 & x > s_2 \end{cases} \quad (4)$$

$$Y_5(x) = \begin{cases} 0 & x \leq s_4 \\ \frac{x - s_4}{s_5 - s_4} & s_4 < x < s_5 \\ 1 & x > s_5 \end{cases} \quad (5)$$

表 1 评价因子及分级标准

因素类别	因子	稳定 (第 1 级)	较稳定 (第 2 级)	中等稳定 (第 3 级)	较不稳定 (第 4 级)	不稳定 (第 5 级)
岩石强度	1) 单轴抗压 (MPa)	>196	98~196	49~98	25~49	0~25
	2) 抗拉强度 (MPa)	>12	12~7	7~4	4~2	0~2
	3) 弹性模量 (×10 ⁴ MPa)	>5.0	3.0~5.0	1.5~3.0	0.5~1.5	0~0.5
	4) 岩爆指数	0~1.8	1.8~2.8	2.8~5	5~10	>10
工程地质	1) RQD 值 (%)	90~100	75~90	50~75	25~50	0~25
	2) 节理间距 (m)	>3	1~3	0.3~1	0.05~0.3	0~0.05
	3) 节理走向和倾角	有利 (A)	较有利 (B)	一般 (C)	较不利 (D)	很不利 (E)
	4) 节理条件	节理条件好 (A)	节理条件较好 (B)	节理条件一般 (C)	节理条件不太好 (D)	节理条件不好 (E)
	5) 结构面胶结状况	胶结程度高 (A)	胶结较好 (B)	胶结程度一般 (C)	胶结不太好 (D)	未胶结 (E)
	6) 每 10 m 巷道的涌水量 (L/min)	0~4	4~10	10~25	25~125	>125
空区状况	1) 空区顶板面积 (m ²)	0~200	200~500	500~1000	1000~1500	>1500
	2) 硐室体积 (m ³)	0~2000	2000~4000	4000~8000	8000~15000	>15000
	3) 暴露面形状系数	0~5	5~7	7~9	9~12	>12
	4) 实空比 (%)	>50	40~50	30~40	15~30	0~15
力学环境	1) 原岩应力大小 (MPa)	1~15	15~25	25~35	35~50	>50
	2) 应力差 (MPa)	0~10	10~18	18~25	25~30	>30
	3) 应力作用方向	有利 (A)	较有利 (B)	一般 (C)	较不利 (D)	很不利 (E)
	4) 爆破振动	影响小 (A)	影响较小 (B)	影响一般 (C)	影响较大 (D)	影响大 (E)

$$Y_i(x) = \begin{cases} 0 & x > s_{i-1} \\ \frac{x - s_{i-1}}{s_i - s_{i-1}} & s_{i-1} < x < s_i \\ \frac{s_{i+1} - x}{s_{i+1} - s_i} & s_i < x < s_{i+1} \\ 0 & x > s_{i+1} \end{cases} \quad (i = 2, 3, 4)$$

式中 s_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5$) 为稳定性级别的分级阈值; x 为实测值。

表 2 离散型指标隶属度取值

指标级别	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5
A	0.75	0.25	0	0	0
B	0.20	0.60	0.20	0	0
C	0	0.20	0.60	0.20	0
D	0	0	0.20	0.60	0.20
E	0	0	0	0.25	0.75

2.4 因素指标权重的确定

确定因子权重的方法通常有 3 种:一是专家评分法;二是采用 Saaty 提出的 1-9 标度法;三是层次分析法^[8]。本文采用层次分析法确定影响因子的权重,结果见表 3。

3 硐室稳定性评价实例

以铜陵冬瓜山铜矿深井开采 52-2[#]试验采场凿岩硐室为例进行稳定性模糊综合评价。

表 3 各影响因子权重分配及因子值

因素类别	因子	因子值	一级评价权重	二级评价权重
岩石强度	1) 单轴抗压	100.0 MPa	0.21	0.19
	2) 抗拉强度	7.16 MPa	0.28	
	3) 弹性模量	1.76 GPa	0.18	
	4) 岩爆指数	4.65	0.33	
工程地质	1) RQD 值	70%	0.22	0.32
	2) 节理间距	1.0 m	0.16	
	3) 节理走向和倾角	B (较有利)	0.10	
	4) 节理条件	B (较好)	0.17	
	5) 结构面胶结状况	C (一般)	0.21	
	6) 10 m 巷道涌水量	3.0 L/min	0.14	
空区状况	1) 空区顶板面积	840 m ²	0.32	0.33
	2) 硐室体积	3300 m ³	0.16	
	3) 暴露面形状系数	6.62	0.19	
	4) 实空比	35%	0.33	
力学环境	1) 原岩应力大小	34.33	0.21	0.16
	2) 应力差	24.06	0.28	
	3) 应力作用方向	C (一般)	0.17	
	4) 爆破振动	D (较大)	0.34	

冬瓜山铜矿床埋藏深度达 740~1150 m,设计的矿井年生产能力为 300 万 t,矿岩具有岩爆倾向性,目前正在进行阶段空场嗣后充填采矿法试验。回采凿岩分为大孔和中深孔两种方式,大孔直径为 165 mm,中深孔直径为 76 mm。52-2[#]采场为大直径深孔试验采场,该采场有矿石量 24 万 t,凿岩硐室布置在矿体的顶部。

凿岩硐室长 50 m,宽 18 m,高 4 m 左右。原岩应力的量值范围为 8.7~38.1 MPa,最大主应力方向与矿体走向大体一致,为 NE~SW 方向,近似水平。采

场顶板为大理岩,矿体主要为含铜磁铁矿、含铜蛇纹石和含铜砂卡岩。单轴抗压强度 50 ~ 150 MPa,抗拉强度 3.5 ~ 17.2 MPa,弹性模量 12.8 ~ 51.5 GPa,有效弹性变形能量指数 1.0 ~ 10.3。矿岩属块状裂隙岩体,大块状岩体。岩体 RQD 值为 50% ~ 90%;断层、节理、裂隙均不发育,节理密度约 1 条 /m。绝大部分节理倾角较陡,常无充填物。水文地质条件相对简单。

根据式 (4) ~ (6)和表 2、表 3,求得一级模糊矩阵 R_{1-1} 、 R_{1-2} 、 R_{1-3} 、 R_{1-4} ,再经过式 (2)运算,求出二级模糊矩阵 R_2 。

$$R_{1-1} = \begin{bmatrix} 0.02 & 0.98 & 0 & 0 & 0 \\ 0.03 & 0.97 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.17 & 0.83 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.16 & 0.84 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{1-2} = \begin{bmatrix} 0 & 0.80 & 0.20 & 0 & 0 \\ 0 & 1.00 & 0 & 0 & 0 \\ 0.20 & 0.60 & 0.20 & 0 & 0 \\ 0.20 & 0.60 & 0.20 & 0 & 0 \\ 0 & 0.20 & 0.60 & 0.20 & 0 \\ 0.25 & 0.75 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{1-3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.32 & 0.68 & 0 \\ 0 & 0.35 & 0.65 & 0 & 0 \\ 0 & 0.38 & 0.62 & 0 & 0 \\ 0 & 0.40 & 0.60 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{1-4} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.07 & 0.93 & 0 \\ 0 & 0 & 0.13 & 0.87 & 0 \\ 0 & 0.20 & 0.60 & 0.20 & 0 \\ 0 & 0 & 0.20 & 0.60 & 0.20 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.01 & 0.51 & 0.20 & 0.28 & 0 \\ 0.09 & 0.65 & 0.22 & 0.04 & 0 \\ 0 & 0.26 & 0.52 & 0.22 & 0 \\ 0 & 0.03 & 0.22 & 0.68 & 0.07 \end{bmatrix}$$

由式 (3)求得凿岩硐室稳定性第二级模糊综合评判的结果为:

$$_2 = (0.03, 0.40, 0.31, 0.25, 0.01)$$

根据最大隶属原则,凿岩硐室稳定性属于较稳定类型(第 2 级),并偏向于中等稳定类型。事实上,该

凿岩硐室目前基本上是稳定的,仅在局部结构面较多或结构面产状不良的地点出现了顶板岩层掉块现象。

鉴此,凿岩硐室顶板采取轻度支护或低密度支护即可,建议采用“稀疏的长锚索 + 局部锚杆”支护方式。

4 结 论

1) 对影响采场凿岩硐室稳定性的因素进行了全面分析,并以此为基础,运用模糊数学方法建立了硐室稳定性二级模糊综合评判模型,并推导了有关评价因子的隶属函数。

2) 以铜陵冬瓜山深井开采为实例,对采矿方法试验采场凿岩硐室的稳定性进行了二级模糊综合评判。评判结果表明,该凿岩硐室的稳定性属于较稳定类型。建议对该硐室顶板进行轻度支护或低密度支护。

3) 模糊数学方法在矿山岩体工程稳定性评价中的应用目前尚处于发展阶段,在隶属度的确定、稳定性影响因素分析及因素权重的分配等方面均需要进一步研究和完善。

参考文献:

- [1] 俞 敏,胡杰刚,全洪波. 桂柳高速公路边坡稳定性二级模糊综合评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(3): 130 - 135.
- [2] 罗一忠,吴爱祥,胡国斌. 采场人-机-环境系统可靠性模糊综合评价[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006, 37(4): 804 - 809.
- [3] 郭 然,潘长良,于润沧. 有岩爆倾向硬岩矿床采矿理论与技术[M]. 北京:冶金工业出版社, 2003.
- [4] 彭振斌,何志明,彭文祥,等. 模糊评判在岩质边坡稳定性分析中的应用[J]. 矿冶工程, 2005, 25(3): 1 - 4.
- [5] Hudson J A, Harrison J P. Engineering rock mechanics - An introduction to the principles[M]. Oxford: Elsevier Science, 1997.
- [6] Hoek E, Kaiser P K, Bawden W F. Support of underground excavation in hard rock[M]. Rotterdam: Balkema, 2005.
- [7] 杨承祥,罗周全. 有岩爆倾向深井矿山采矿巷道的失稳模式分析及其控制技术[J]. 矿冶工程, 2007, 27(2): 1 - 4.
- [8] Ayyub B M, Lai K L. Structural reliability assessment with ambiguity and vagueness in failure[J]. Naval Engineers Journal, 2007, 119(1): 21 - 36.