

基于等效数值法的岩爆烈度预测研究

姜大威, 杨涛

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 岩爆是深部岩石地下工程中常见的自然灾害,因此,必须对岩爆烈度进行预测。选择围岩最大切向应力与其单轴抗压强度的比值 σ_θ/σ_c 、岩石单轴抗压强度与单轴抗拉强度的比值 σ_c/σ_t 以及岩石弹性能量指数 Wet 作为岩爆烈度评价指标,基于王元汉岩爆烈度分级标准建立了岩爆烈度等效数值法预测模型。国内外 12 个岩石地下工程的岩爆预测表明,本文模型预测结果与实际岩爆烈度非常吻合,与其他预测模型相比,所建议的模型简单可行,便于实际工程采用。

关键词: 岩爆烈度; 岩爆烈度预测; 等效数值法; 地下工程

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)01-0210-04

Prediction of rock burst intensity based on equivalent numerical method

JIANG Dawei, YANG Tao

(College of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The rock burst is a kind of common geological disaster in deep underground engineering and severely threatens the safety of workers and the equipments. Hence, it is necessary to predict the intensity of rock burst. The paper chose the ratio of the maximum rock tangential stress to the compressive rock strength σ_θ/σ_c , the ratio of the compressive rock strength to the tensile rock strength σ_c/σ_t and the elastic energy index as the criteria indexes of rock burst intensity, and established a forecast model of rock burst occurrence and its intensity of equivalent numerical method according to classification standard of rock burst intensity proposed by Wang Yuanhan. The model is tested by 12 cases of rock project at home and abroad. The results show that the prediction result of rock burst intensity line up perfectly with the practical records. Comparison with other predict models, the proposed model is very simple and convenient for practical use.

Key words: rock burst intensity; prediction of rock burst intensity; equivalent numerical method; underground engineering

岩爆是硬质岩体地下工程开挖过程中,围岩因开挖产生应力集中造成其内部破裂和弹性能突然释放而引起的爆裂松动、剥离、弹射乃至抛掷等破坏的灾害现象,它严重威胁工程人员和设备的安全。随着我国水利、交通和采矿事业的快速发展,高地应力环境中的深部岩体开挖越来越多,岩爆的预测与防治问题日益突出。

近几十年来,国内外学者在岩爆发生机制和烈度预测方面做了大量工作。Feng Xiangting 等^[1]首先利用专家系统对南非深部金矿岩爆进行了系统的

研究。王元汉等^[2]建立了岩爆烈度多指标分级标准和模糊数学综合评判法。杨莹春等^[3]采用可拓方法建立了岩爆烈度预测物元模型。姜彤和谢学斌等^[4-5]基于灰色理论建立了岩爆烈度预测模型。赵洪波和祝云华等^[6-7]建立了岩爆烈度预测的支持向量机模型。付玉华等^[8]建立了岩爆烈度预测的 Bayes 模型。宫凤强和罗磊等^[9-10]基于统计学原理,建立了岩爆烈度预测的距离判别模型。文畅平^[11]建立了岩爆烈度分级的属性识别模型。高玮^[12]给出了岩爆烈度预测的蚁群聚类法。王迎超

收稿日期: 2013-09-02; 修回日期: 2013-09-12

作者简介: 姜大威(1989-),男,河南驻马店人,硕士研究生,研究方向为工程结构分析。

通讯作者: 杨涛(1962-),男,江苏南京人,博士,教授,主要从事岩土力学与工程等方面的教学和研究工作。

等^[13]给出了岩爆烈度预测的功效系数法。周宣赤等^[14]建立了基于粒子群算法和投影寻踪算法的岩爆烈度预测模型。杨涛、陈海军和丁向东等^[15-17]建立了基于岩爆发生及其烈度先验知识的人工神经网络模型。葛启发等^[18]在神经网络岩爆烈度预测模型中采用 AdaBoost 组合学习方法,极大地提高了模型预测精度。贾义鹏等^[19]提出了基于粒子群算法和广义回归神经网络的岩爆预测模型。胡建华等^[20]对岩爆烈度预测的物元可拓模型进行了改进。

由于新的数学方法和人工智能理论不断用于岩爆烈度的预测,导致计算模型越来越复杂。实际上,岩爆烈度与其影响因素之间的非线性关系复杂极其,从上述文献给出了岩爆预测实例来看,过于复杂的预测模型并未显著改善预测精度,反而给工程实际应用带来更大不变。基于此,本文提出岩爆烈度预测的等效数值法模型,不仅具有较高的预测精度,并且简单易行,便于实际工程采用。

1 等效数值法的基本原理^[21]

等效数值法是将不同性质量纲的指标无因次化,转化为某种标准形式,转化后的指标值均在(0, 1)之间,这些实数称为“等效数值”。设已知岩爆烈度多指标分级标准,该标准采用 m 项评价指标将岩爆烈度分为 h 级。若在进行岩爆烈度等级预测时实测获得的指标样本数为 n 个,这样,则共有 $m \times n \times h$ 个指标值 f_{ijt}^* ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; t = 1, 2, \dots, h$), 这些值均为大于零的实数,根据下式计算等效数值 f_{ijt}^* :

$$f_{ijt}^* = \frac{f_{it}}{|f_{ij} - f_{it}| + f_{it}} \tag{1}$$

式中: f_{ijt}^* 为第 j 个实测样本对第 t 级岩爆烈度在第 i 个评价指标下的等效数值; f_{it} 为第 t 级岩爆烈度中的第 i 个评价指标的标准值(分级界限值); f_{ij} 为第 j 个实测样本中相应于第 i 个评价指标的实测值。

由式(1)求得 f_{ijt}^* 后,由下式计算第 j 个实测样本关于第 t 级岩爆烈度的综合等效数值:

$$f_{jt} = \sum_{i=1}^m \omega_{ij} f_{ijt}^* \quad (j = 1, 2, \dots, n; t = 1, 2, \dots, h) \tag{2}$$

式中: ω_{ij} 为第 j 个实测指标样本对第 i 个评价指标的权值,采用指标超标法按下式计算:

$$\omega_{ij} = \frac{f_{ij} / \left[\frac{1}{h} \sum_{t=1}^h f_{it} \right]}{\sum_{i=1}^m f_{ij} / \left[\frac{1}{h} \sum_{t=1}^h f_{it} \right]} \tag{3}$$

采用等效数值法进行岩爆烈度预测时,对于第 j 个实测样本,如果 $f_{jt}(t = 1, 2, \dots, h)$ 最大,则第 j 个岩石样本代表的岩爆烈度等级就判定为 t 级。

2 等效数值法预测模型

2.1 岩爆烈度分级评价指标与标准

岩爆发生及其烈度的主要影响因素有围岩最大切向应力 σ_θ 、岩石单轴抗压强度 σ_c 、岩石单轴抗拉强度 σ_t 以及弹性能量指数 W_{et} , 它们基本综合了岩爆发生的内外因条件,而且在实验室或现场容易测试获取。最大切向应力 σ_θ 反映围岩应力水平, σ_θ/σ_c 越大越容易发生岩爆; σ_c 、 σ_t 和 W_{et} 反映出岩爆的发生与围岩本身性质有关, σ_c/σ_t 越小发生岩爆的烈度越大; W_{et} 反映岩石存储能量的能力,其值越大发生岩爆的倾向及烈度越大。

本文选取 σ_θ/σ_c 、 σ_c/σ_t 和 W_{et} 作为评判岩爆烈度等级的指标,将岩爆烈度分为 4 个等级:无岩爆(I 级)、弱岩爆(II 级)、中等岩爆(III 级)和强烈岩爆(IV 级)。王元汉^[2]给出了岩爆烈度与上述 3 个指标的关系,即岩爆烈度分级标准,见表 1。

表 1 岩爆评价指标和烈度分级标准

岩爆烈度等级	σ_θ/σ_c	σ_c/σ_t	W_{et}
无岩爆(I)	< 0.3	> 40	< 2.0
弱岩爆(II)	0.3 ~ 0.5	26.7 ~ 40	2.0 ~ 3.5
中等岩爆(III)	0.5 ~ 0.7	14.5 ~ 26.7	3.5 ~ 5.0
强烈岩爆(IV)	> 0.7	< 14.5	> 5.0

2.2 岩爆分级标准归一化

为了建立等效数值法岩爆烈度预测模型,必须对表 1 给出的岩爆烈度分级标准中各指标界限值进行量纲归一化处理。本文采用线性量纲法^[22],计算公式如下:

效益型:

$$y = \begin{cases} 1, & x \geq x_{\max} \\ \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, & x_{\min} < x < x_{\max} \\ 0, & x \leq x_{\min} \end{cases} \tag{4}$$

成本型:

$$y = \begin{cases} 1, & x \leq x_{\min} \\ \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}}, & x_{\min} < x < x_{\max} \\ 0, & x \geq x_{\max} \end{cases} \tag{5}$$

式中: x 为岩爆烈度分级标准中各评价指标的界限值, $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 分别为 x 的最大值和最小值, y 为归一

化后岩爆烈度标准中各评价指标的界限值。

从表 1 中可见, W_{et} 和 σ_{θ}/σ_c 属于效益型指标, 数值越大岩爆烈度越高; σ_c/σ_t 属于成本型指标, 数值越小岩爆烈度越高。由于表 1 并没有给出各评价指标的最大和最小值, 因此, 为了实现岩爆烈度标准归一化, 首先要确定岩爆烈度标准中 3 个评价指标各自最大和最小值。最大与最小值的选会择影响到各指标界限值的权重, 本文 3 个评价指标的下限值 $x_{\min}$ 统一取为 0。经过对一些实际岩爆工程等效数值法岩爆烈度的预测分析, 发现 σ_{θ}/σ_c 、 σ_c/σ_t 和 W_{et} 上限最大值 $x_{\max}$ 可分别取 0.8、42 和 20。归一化后的岩爆烈度分级标准见表 2。

表 2 归一化后的岩爆烈度分级标准

岩爆等级	σ_{θ}/σ_c	σ_c/σ_t	W_{et}
无岩爆(Ⅰ)	0~0.375	0~0.047	0~0.1
弱岩爆(Ⅱ)	0.375~0.625	0.047~0.364	0.100~0.175
中等岩爆(Ⅲ)	0.625~0.875	0.364~0.654	0.175~0.25
强烈岩爆(Ⅳ)	0.875~1.000	0.654~1.000	0.25~1.00

3 模型验证

为验证本文岩爆烈度预测模型的有效性, 选择了国内外 12 个大型地下工程^[2], 利用表 2 的岩爆烈度分级标准, 采用等效数值法进行岩爆烈度预测。各工程岩爆烈度评判指标实测值、本文模型预测结果和实际岩爆烈度等级见表 3。实际工程分析时, 需首先对各实测样本进行归一化处理。若实测的评判指标超过(低于)表 1 岩爆烈度分级标准的上(下)限值, 则取略高(低)于上(下)限值的数值代入式(4)或(5)进行归一化。表 3 表明, 在 12 个工程中, 本文预测的鲁布革水电站地下隧洞为弱岩爆, 但实际上为无岩爆, 除此之外, 其他工程预测结果与实际岩爆烈度完全一致。

为比较本文模型和其他模型岩爆烈度的预测精度, 表 4 给出了采用与本文同样 3 个评判指标的模糊综合评判法^[2]、物元评判法^[3]、灰色聚类法^[5]、属性评价法^[11]和粒子群与神经网络法^[20]共 5 个岩爆预测模型获得的上述 12 个工程岩爆烈度评判结果。

表 3 国内外工程岩爆烈度预测结果

编 号	工程名称	σ_{θ}/σ_c	σ_c/σ_t	W_{et}	本文评判	实际烈度
1	天生桥二级水电站引水隧洞	0.300	24.0	6.6	Ⅲ	Ⅲ
2	二滩水电站 2 号支洞	0.410	29.7	7.3	Ⅱ	Ⅱ
3	鲁布革水电站地下隧洞	0.227	27.8	7.8	Ⅱ	Ⅰ
4	锦屏二级水电站引水隧洞	0.820	18.5	3.8	Ⅲ	Ⅲ
5	渔子溪水电站引水隧洞	0.530	14.8	9.0	Ⅳ	Ⅲ~Ⅳ
6	挪威 Heggura 公路隧道	0.370	24.1	5.0	Ⅲ	Ⅲ
7	挪威 Sewage 隧道	0.420	21.7	5.0	Ⅲ	Ⅲ
8	瑞典 Forsmark 核电站冷却水隧洞	0.380	21.7	5.0	Ⅲ	Ⅲ
9	瑞典 Vietas 电站引水隧洞	0.440	26.7	5.5	Ⅱ	Ⅱ
10	前苏联 Rasvumchorr 矿井巷	0.317	21.7	5.0	Ⅲ	Ⅲ
11	日本关越隧道	0.377	22.1	5.0	Ⅲ	Ⅲ~Ⅳ
12	意大利 Raibl 铅硫化锌矿井巷	0.774	17.5	5.5	Ⅲ	Ⅲ

表 4 不同模型预测结果的比较

编号	本文 评判	模糊综合 评判法 ^[2]	物元可 拓法 ^[3]	灰色聚 类法 ^[5]	属性综合 评价法 ^[11]	粒子群与神 经网络法 ^[19]	岩爆实 际烈度
1	Ⅲ	Ⅲ~Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ~Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
2	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
3	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ~Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ
4	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ~Ⅳ	Ⅲ~Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
5	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ~Ⅳ	Ⅲ~Ⅳ	Ⅲ~Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ~Ⅳ
6	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
7	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
8	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
9	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ~Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ
10	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
11	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅳ	Ⅲ~Ⅳ
12	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ~Ⅳ	Ⅲ~Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ

从表4中可以看出,本文模型的预测精度要高于属性综合评价法,与另外4种模型的预测精度相当,这充分说明本文岩爆预测模型虽然简单,但预测精度并不比复杂岩爆预测模型的精度低,将本文模型用于实际工程岩爆烈度等级预测是可行的。

4 结 语

(1)选取围岩应力系数 σ_θ/σ_c 、岩石脆性系数 σ_c/σ_t 和弹性能量指数 W_e 作为岩爆烈度分级指标,基于王元汉岩爆烈度分级标准建立了岩爆烈度等效数值法预测模型。

(2)国内外12个工程岩爆烈度预测结果表明,等效数值法岩爆烈度预测结果与工程实际吻合较好,说明该模型具有较高的预测精度。

(3)与5个现有岩爆烈度预测模型比较表明,等效数值法模型与基于复杂数学知识和人工智能理论建立的岩爆烈度预测模型相比,评判精度并未降低,但计算非常简单,更便于实际工程应用。

参考文献:

- [1] Feng Xiangting, Wang Yongjia. An expert system on assessing rockburst risks for South African deep gold mines[J]. Journal of Coal Science and Engineering, 1996, 2(2): 23–32.
- [2] 王元汉,李卧东,李启光,等. 岩爆预测的模糊数学综合评判方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(5): 493–501.
- [3] 杨莹春,诸 静. 物元模型及其在岩爆分级预报中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(8): 125–129.
- [4] 姜 彤,黄志全,赵彦彦. 动态权重灰色归类模型在南水北调西线工程岩爆风险评估中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1 104–1 108.
- [5] 谢学斌,潘长良. 岩爆灾害的灰类白化权函数聚类预测方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2007, 34(8): 16–20.
- [6] 赵洪波. 岩爆分类的支持向量机方法[J]. 岩石力学, 2005, 26(4): 642–644.
- [7] 祝云华,刘新荣,周军平. 基于 ν -SVR算法的岩爆预测分析[J]. 煤炭学报, 2008, 33(3): 277–281.
- [8] 付玉华,董陇军. 岩爆预测的 Bayes 判别模型及应用[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(4): 528–533.
- [9] 宫凤强,李夕兵. 岩爆发生和烈度分级预测的距离判别方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 1012–1018.
- [10] 罗 磊,曹 平. 深部巷道岩爆加权距离判别法模型的分析应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(10): 3971–3975.
- [11] 文畅平. 属性综合评价系统在岩爆发生和烈度分级中的应用[J]. 工程力学, 2008, 25(6): 153–158.
- [12] 高 玮. 基于蚁群聚类算法的岩爆预测研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(6): 874–880.
- [13] 王迎超,尚岳全,孙红月,等. 基于功效系数法的岩爆烈度分级预测研究[J]. 岩石力学, 2010, 31(2): 529–534.
- [14] 周宣赤,白春华,王仲琦,等. 粒子群投影寻踪算法在岩爆预测中的应用[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(12): 1956–1961+1966.
- [15] 杨 涛,李国维. 基于先验知识的岩爆预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 429–431.
- [16] 陈海军,邴能惠,聂德新,等. 岩爆预测的人工神经网络模型[J]. 岩土工程学报(自然科学版), 2002, 24(2): 229–232.
- [17] 丁向东,吴继敏,李 健,等. 岩爆分类的人工神经网络预测方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(4): 424–428.
- [18] 葛启发,冯夏庭. 基于 AdaBoost 组合学习方法的岩爆分类预测研究[J]. 岩石力学, 2008, 29(4): 943–948.
- [19] 贾义鹏,吕 庆,尚岳全. 基于粒子群算法和广义回归神经网络的岩爆预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 343–348.
- [20] 胡建华,尚俊龙,周科平. 岩爆烈度预测的改进物元可拓模型与实例分析[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(2): 495–502.
- [21] 纪桂霞. 大气环境质量的等效数值评价法[J]. 环境工程, 1999, 17(6): 58–59.
- [22] 谢勇谋,李天斌. 爆破对岩爆产生作用的初步探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(1): 61–64.