

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.02.024

基于层次赋权的特大危岩体 爆破削方风险评价云模型*

郑臻,祝文化,黄建,夏元友

(武汉理工大学 土木工程与建筑学院,武汉 430070)

摘要: 针对特大型危岩体爆破削方治理过程中的风险因素具有随机性和不确定性,基于云模型理论,提出了组合赋权的危岩体云模型风险评价方法。从危岩体地质条件、环境因素、爆破削方施工及施工管理四个方面进行危险源辨识,建立特大型危岩体爆破削方治理风险控制安全评价指标体系,应用层次分析法对评价指标进行组合赋权处理。结合正向正态云模型和指标权重,计算评价对象的确定度及风险等级。应用该方法对甌子岩特大危岩体爆破削方治理过程进行了风险评价。该工程根据风险分析进行的危险源施工控制,能够满足施工安全。

关键词: 特大型危岩体;爆破削方;风险评价;赋权;云模型

中图分类号: O383 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)02-0141-08

Cloud Model of Risk Assessment for Blasting Cutting Oversize Dangerous Rock Mass by A Hierarchical Weighting Technology

ZHENG Zhen, ZHU Wen-hua, HUANG Jian, XIA Yuan-you

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: According to the randomness and uncertainty of the risk factors during the blasting cutting process for oversize dangerous rock mass, a risk assessment method by the cloud model theory and a combined weighting technology was proposed. The hazard identification considered four aspects: geological conditions, environmental factors, blasting cutting construction and construction management, and a safety evaluation index system was established accordingly. Furthermore, the combination and weighting of evaluation indexes were established by an analytic hierarchy process. Finally, the certainty degree and risk level of the evaluation object were calculated by combining with the positive normal cloud model and index weights. This method was applied to the risk assessment of the blasting cutting treatment process of Zengziyan oversize dangerous rock mass. According to the risk analysis, the risk source construction control of the project can meet the construction safety requirements.

Key words: oversize dangerous rock mass; blasting cutting; risk evaluation; weighting; cloud models

危岩体是一种典型的灾害地质体,其失稳坍塌具有突发性,尤其是在受到外界环境扰动时极易产生崩塌,严重威胁人类生命财产安全与工程活

动^[1]。

危岩体治理主要有主动加固、被动防护、削方及主被动组合等方法,其中爆破削方是危岩体防治工程的重要措施,例如乌江鸡冠岭危岩体的治理^[2]、黄石市板岩山危岩体的治理等^[3,4]。危岩体爆破削方治理过程中,由爆破施工产生的风险对危岩体的稳定性及相关环境安全具有极大的影响,制约着危岩体治理工程的安全实施。因此,对危岩体爆破削

收稿日期:2020-01-13

作者简介:郑臻(1992-),男,硕士研究生,从事岩土工程的研究,
(E-mail)846603458@qq.com。

通讯作者:祝文化(1966-),男,副研究员,主要从事岩土工程的教学和科研工作,(E-mail)jyzwh@whut.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51374163)

方治理过程进行风险评价及控制尤为重要。针对爆破施工风险评价,国内外学者进行了相关研究,董家兴等选取危险源自身、环境边坡、触发因素等建立了环境边坡危险源危险度评价体系^[5],王俊采用事故树方法,进行了露天煤矿爆破飞石危险源辨识与分析^[6],陆瑜等采用云模型进行了爆破振动影响度评估研究^[7],但是对特大型危岩体,由于其自身地质结构的复杂性以及施工过程时间长、重复爆破次数多等特殊特性,目前国内外对此类工程的爆破施工风险分析及控制研究较少。在风险评估过程中,风险源的确定、权重的赋值、判断矩阵的形成等都存在极大的不确定性。层次分析法是目前在安全评价方面运用较为广泛的一种方法,可以进行定性与定量的量化结合,求出最大特征值及对应的特征向量。但层次分析法在各项指标上的模糊性与随机性上具有一定的局限性。云模型属于不确定性人工智能范畴,可以度量指标的模糊性与随机性^[8]。因此将云模型与层次分析法相结合,既能良好的进行危险源影响因素的分析及权重赋值,也能更充分的表征不确定性概念的模糊性与随机性,结合甄子岩特大型危岩体爆破削方治理工程,建立基于云模型的特大危岩体爆破削方治理风险评价方法,从而对危岩体治理过程中的危险源影响因素进行风险控制,确保工程的安全实施。

1 云模型的基本理论

为了对具有模糊概念的问题进行更准确性的科学分析,李德毅院士提出了云模型理论,用于实现定性概念和定量值之间的不确定性转换^[9]。

1.1 云的定义

设 U 是一个精确数值表示的定量论域, C 为 U 上的定性概念,若一个定量值 $x \in U$, 且 x 是 C 的一次随机实现, x 对 C 的确定度 $\mu(x) \in [0, 1]$ 是有稳定倾向的随机数, 则 x 在论域 U 上的分布称为云, 每一个 x 称为一个云滴。

1.2 云模型的实现

采用正向正态云发生器来进行计算。具体算法如下:

计算云模型的三个数字特征期望 E_x 、熵 E_n 、超熵 H_e (其中超熵根据经验取值), 期望 E_x 可通过下式算出

$$E_x = (C_{\min} + C_{\max})/2 \quad (1)$$

式中: $C_{\min}$ 、 $C_{\max}$ 分别对应等级区间的上、下限边界值, 而对于单边界的情况, 依据实测值的上、下限确定缺省边界。

熵 E_n 的确定可由公式推出, 由于 $E'_n \sim N(E_n, H_e^2)$ 且 H_e 的值较小, 所以 E'_n 可由 E_n 代替, 由于当某一个影响因素的值为等级区间的上、下边界值时, 该影响因素同时隶属相邻等级, 即对相邻等级的确定度都为 0.5, 所以得下式

$$\exp\left\{-\frac{(C_{\max} - E_x)^2}{2E_n^2}\right\} = 0.5 \quad (2)$$

代入式(2)化简得

$$E_n = (C_{\min} - C_{\max})/2.355 \quad (3)$$

根据已经确定的 E_x 、 E_n 、 H_e , 运用 MATLAB 程序生成云图。

2 危岩体爆破削方风险评价指标及标准

特大型危岩体爆破削方治理不同于一般边坡的爆破开挖, 需考虑危岩体地质条件, 严格控制施工过程危岩体自身的稳定性及其对环境的影响。根据类似工程及专家建议, 从危岩体地质条件、环境因素、爆破削方施工及施工管理四个方面来建立特大型危岩体爆破削方治理风险控制安全评价指标体系。主要包括危岩体规模、岩体条件、地形地貌、降雨、地震烈度、爆破粉尘、爆破振动、施工滚石、爆破飞石安全距离、爆破方案、施工队伍素质、安全监测及火工材料运输等 13 个因子构成风险评价因素集。如图 1 所示^[10-13]。

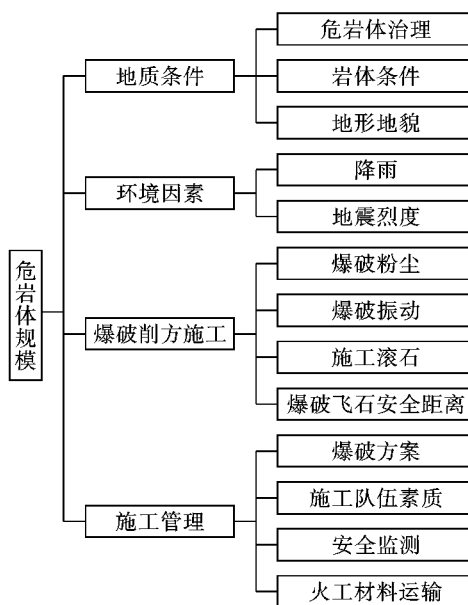


图 1 危岩体爆破削方风险评价指标体系

Fig. 1 Risk evaluation index system of dangerous rock blasting cutting

考虑危岩体岩体、环境条件以及对于风险控制的接受程度, 对各影响因素划分为安全、基本安全、较不安全、不安全和极不安全 5 个等级。其中危岩

体规模依据相关规范按危岩体体积进行划分;岩体条件依据危岩体中节理裂隙数量、地层岩性以及地质构造等来进行分级;地形地貌依据危岩体宽度进行分级;降雨采用观测日前期降雨量均值;地震烈度根据中国地震烈度区划图给出;爆破粉尘根据爆破后空气中粉尘的浓度来进行分级;爆破振动安全质点振速及爆破飞石安全距离根据《爆破安全规程》及相关设计规范给出;施工滚石根据爆破后滚石的大小及数量等来进行分级;施工管理根据检查的力

度、管理规章的制定、监控的实施以及严格的检查等方面进行分级。风险级别为极低风险(0,2),表明安全,不需要采取过多控制措施;低风险(2,4)表明基本安全,风险不明显,采取少量针对性控制措施;中等风险(4,6)表明较不安全,有风险存在,需采取适度控制措施;高风险(6,8)表明不安全,风险明显,需采取应急处理措施;极高风险(8,10)表明极不安全,应停止施工,人员和设备紧急撤离。

具体分级标准如表 1 所示^[14-18]。

表 1 分级标准及赋值
Table 1 Grading standard and assignment

因素	安全	基本安全	较不安全	不安全	极不安全
危岩体规模 $C_1/(10^4 \text{ m}^3)$	<1	1~10	10~50	50~100	>100
岩体条件 C_2	0~2	2~4	4~6	6~8	8~10
地形地貌(危岩体宽度) C_3/m	<50	50~100	100~150	150~200	>200
降雨 $C_4/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	<25	25~40	40~70	70~120	120~190
地震烈度 $C_5/\text{级}$	0~5	5~6	6~7	7~8	8~9
爆破粉尘 C_6	0~2	2~4	4~6	6~8	8~10
爆破振动 $C_7/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	0~8	8~10	10~15	15~25	25~30
施工滚石 C_8	0~2	2~4	4~6	6~8	8~10
爆破飞石安全距离 C_9/m	>200	150~200	120~150	80~120	<80
爆破方案 C_{10}	0~2	2~4	4~6	6~8	8~10
施工队伍素质 C_{11}	0~2	2~4	4~6	6~8	8~10
安全监测 C_{12}	0~2	2~4	4~6	6~8	8~10
火工材料运输 C_{13}	0~2	2~4	4~6	6~8	8~10

3 确定风险指标权重

层次分析法可以在赋权的同时,对危险源指标进行一致性检验,提高确定权重的效率及准确性。具体步骤如下。

3.1 建立层次结构模型

将风险问题分解为不同的因素组,根据因素间的相互关系划分为不同的层次,分别为需评价危岩体风险问题的目标层、危险源及影响因素。

3.2 构造判断矩阵

判断矩阵是表示本层所有因素与上一层的某一因素进行相对重要性的两两比较。从目标层到影响因素有多少个相互关系,就要建立多少个判断矩阵。

3.3 层次单排序及其一致性检验

定义一致性比率来衡量矩阵的一致性

$$CR = CI/RI \quad (4)$$

式中:CI 为一致性指标, $CI = (\lambda - n)/(n - 1)$, RI 为随机一致性指标。

当 $CR < 0.1$ 时,认为矩阵 A 的不一致性在允许范围内,通过一致性检验,可用最大特征值所对应的特征向量作为权向量,否则要对判断矩阵进行调整。

矩阵的特征值与特征向量可以用 MATLAB 软件进行求解,提高了计算效率且更加准确。

3.4 层次总排序及其一致性检验

层次总排序是指某一层次所有因素对于最高层相对重要性的排序。设 P 层有 n 个因素 $P_1, P_2, \dots, P_n$, 对总目标的权重为 $p_1, p_2, \dots, p_n$, 下一层 Q 层的 m 个因素对上层 P 中的某一因素 P_j 的层次单排序为 $q_{1j}, q_{2j}, \dots, q_{mj} (j = 1, 2, \dots, n)$, 则 Q 层第 i 个因素对总目标的权值为: $\sum_{j=1}^n p_j q_{ij}$ 。计算出的总排序需进行一致性检验,设 Q 层 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 对上层 P 层中因素 P_j 的层次单排序一致性指标为 CI_j , 随机一致性指标为 RI_j , 则层次总排序的一致性比率为

$$CR = \sum_{j=1}^n p_j CI_j / \sum_{j=1}^n p_j RI_j \quad (5)$$

当 $CR < 0.1$ 时,认为层次总排序通过一致性检验,否则需要重新调整那些不符合一致性的判断矩阵的元素取值。

4 特大危岩体爆破削方风险评价模型

首先根据层次分析法确定的各影响因素的权

重,得到各影响因素对目标层的总权重矩阵 $W = [W_1, W_2, \dots, W_n]$ 。再确定各影响因素的隶属度矩阵,论域 U 上的任意一个随机元素 x 的分布满足以 E_x 为期望, E'_x 为标准差的正态分布,即 $x \sim N[E_x, (E'_x)^2]$,而 E'_x 的分布满足以 E_n 为期望, H_e 为标准差的正态分布,即 $E'_x \sim N[E_n, H_e^2]$,则对于这个随机元素 x 存在一个稳定倾向的随机数 μ ,称作隶属度,如下式所示

$$\mu = e^{\frac{-(x-E_x)^2}{2E_n^2}} \quad (6)$$

根据表 1 的分级标准,通过式(1)、(3)以及经验取值得到的三个数字特征,画出各个影响因素对应的标准云图。

根据甑子岩特大型危岩体削方治理工程实际的各项影响因素取值通过式(6)得到各因素隶属度,计算各影响因素在各个安全等级下的隶属度矩阵 $B = (\mu_{ij})_{n \times n}$ 。

将得到的权重矩阵 W 与隶属度矩阵 B 通过模糊综合评价理论进行数学运算,从而建立特大型危岩体治理过程中的安全评价矩阵 Z ,如下式所示

$$Z = WB = [W_1, W_2, \dots, W_n][\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n] \quad (7)$$

通过最大隶属度识别原则确定特大型危岩体治理过程中的安全等级,得到评价结果。

5 实例分析

金佛山甑子岩危岩带位于重庆市南川区,该区为构造侵蚀地貌,危岩带位于斜坡上部陡崖带,分布数十处危岩体,由二叠系石灰岩及页岩组成,可能崩塌总规模为 $593.86 \times 10^4 \text{ m}^3$,为特大型危岩带。以 W29、W23 号危岩体为代表的两级危岩带,总体积约 $254.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。通过对 W29、W23 号危岩体稳定性综合评价分析,为达到消除其对威胁范围内保护对象的安全隐患、阻止后侧岩体的进一步变形和确保位于甑子岩危岩带下方的在建金佛山水库大坝工程的安全,经多方论证和治理方案比选,最终设计采用主体危岩体台阶式放坡清除、后缘台阶式放坡及封闭卸荷裂隙、绿化开挖坡面的治理方案。如图 2 所示^[19]。

由于特大型危岩体的爆破削方治理无类似工程借鉴,其爆破削方过程的风险评价及控制极为重要。为了保障施工安全,在爆破削方施工过程中,对爆破振动、施工滚石、爆破飞石、爆破粉尘等均采取了严格的控制措施;对局部危岩体单体采取控制爆破措施进行预处理;对危岩体施工过程的岩体变形及爆

破振动影响进行跟踪监测等^[19]。通过现场地质调查及施工过程控制跟踪,确定了特大危岩体爆破削方施工风险评价各影响因素的安全等级,采用层次分析法赋权的云模型对特大危岩体爆破削方治理风险进行评价。

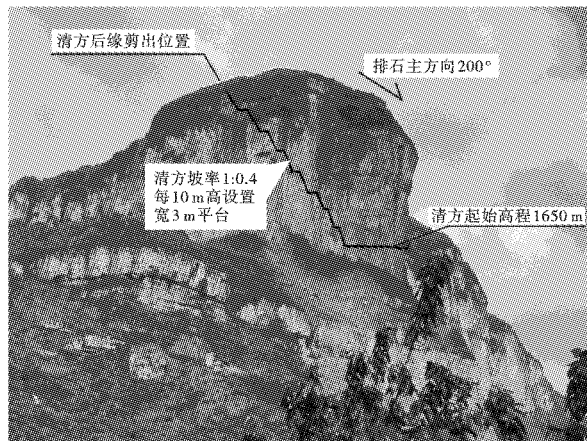


图 2 危岩体爆破削方治理方案

Fig. 2 Control scheme of cutting in dangerous rock blasting

5.1 确定权重矩阵

根据建立的特大型危岩体爆破削方治理过程风险评价模型,对各影响因素按实际工程控制标准及相关资料记载进行取值,通过层次分析法计算各影响因素的权重赋值,得到各个影响因素的权重系数,如表 2,由各权重系数可构建权重矩阵 W 。

表 2 影响因素权重及实例取值

Table 2 Influence factor weight and instance value

影响因素	权重	取值
危岩体规模 $C_1/(10^4 \text{ m}^3)$	0.0366	254.7
岩体条件 C_2	0.0140	9
地形地貌(危岩体宽度) C_3/m	0.0640	100
降雨 $C_4/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	0.1659	26.75
地震烈度 $C_5/\text{级}$	0.0829	6
爆破粉尘 C_6	0.0264	1
爆破振动 $C_7/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	0.2545	8
施工滚石 C_8	0.0826	3
爆破飞石安全距离 C_9/m	0.1920	300
爆破方案 C_{10}	0.0374	1
施工队伍素质 C_{11}	0.0065	3
安全监测 C_{12}	0.0169	1
火工材料运输 C_{13}	0.0203	3

5.2 确定隶属度矩阵

根据表 1 各影响因素分级标准及计算的权重赋值,通过式(1)、(3)计算确定云模型三个数字特征,云模型数字特征计算结果如表 3 所示;应用 MAT-

LAB 软件生成各影响因素在不同风险等级下的正 态云图,如图 3 所示。

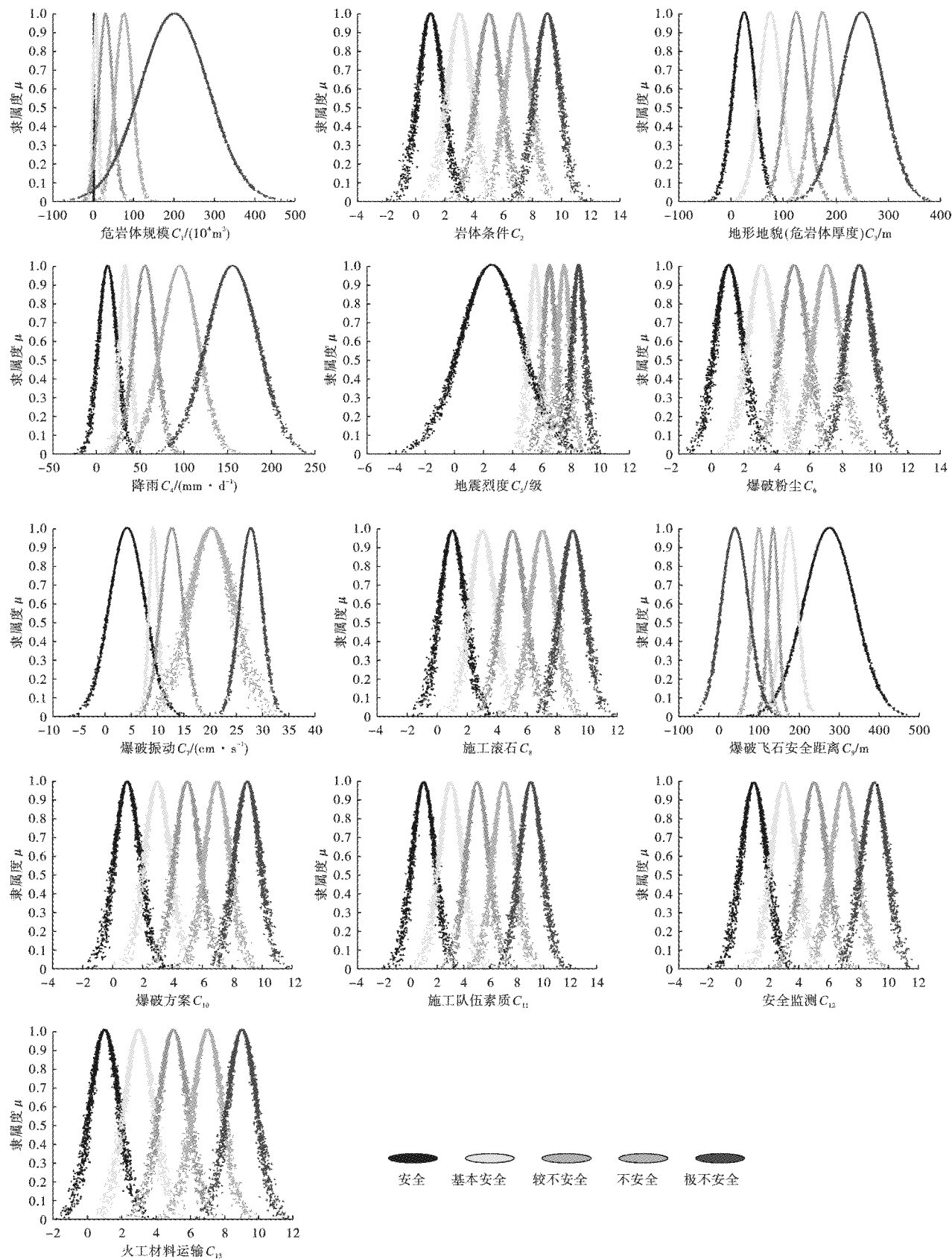


图 3 各影响因素所处安全等级

Fig. 3 Safety level of each influencing factor

表 3 云模型数字特征

Table 3 Cloud model digital features

因素	安全	基本安全	较不安全	不安全	极不安全
危岩体规模 $C_1/(10^4 \text{ m}^3)$	0.5, 0.425, 0.1	5.5, 6.369, 1	30, 16.985, 1	75, 21.231, 1	200, 84.926, 1
岩体条件 C_2	1, 0.849, 0.1	3, 0.849, 0.1	5, 0.849, 0.1	7, 0.849, 0.1	9, 0.849, 0.1
地形地貌(危岩体宽度) C_3/m	25, 21.231, 1	75, 21.231, 1	125, 21.231, 1	175, 21.231, 1	250, 42.463, 1
降雨 $C_4/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	12.5, 10.616, 1	32.5, 6.369, 1	55, 12.739, 1	95, 21.231, 1	155, 29.724, 1
地震烈度 $C_5/\text{级}$	2.5, 2.123, 0.1	5.5, 0.425, 0.1	6.5, 0.425, 0.1	7.5, 0.425, 0.1	8.5, 0.425, 0.1
爆破粉尘 C_6	1, 0.849, 0.1	3, 0.849, 0.1	5, 0.849, 0.1	7, 0.849, 0.1	9, 0.849, 0.1
爆破振动 $C_7/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	4, 3.397, 0.1	9, 0.849, 0.1	12.5, 2.123, 0.1	20, 4.246, 0.5	27.5, 2.123, 0.1
施工滚石 C_8	1, 0.849, 0.1	3, 0.849, 0.1	5, 0.849, 0.1	7, 0.849, 0.1	9, 0.849, 0.1
爆破飞石安全距离 C_9/m	275, 63.694, 1	175, 21.231, 1	135, 12.739, 1	100, 16.985, 1	40, 33.970, 1
爆破方案 C_{10}	1, 0.849, 0.1	3, 0.849, 0.1	5, 0.849, 0.1	7, 0.849, 0.1	9, 0.849, 0.1
施工队伍素质 C_{11}	1, 0.849, 0.1	3, 0.849, 0.1	5, 0.849, 0.1	7, 0.849, 0.1	9, 0.849, 0.1
安全监测 C_{12}	1, 0.849, 0.1	3, 0.849, 0.1	5, 0.849, 0.1	7, 0.849, 0.1	9, 0.849, 0.1
火工材料运输 C_{13}	1, 0.849, 0.1	3, 0.849, 0.1	5, 0.849, 0.1	7, 0.849, 0.1	9, 0.849, 0.1

通过式(6)计算各影响因素隶属度,得到各影响因素隶属度计算结果如表4所示。

表 4 各影响因素在相应等级下的隶属度

Table 4 Membership degree of each influencing factor under the corresponding level

因素	安全	基本安全	较不安全	不安全	极不安全
危岩体规模 $C_1/(10^4 \text{ m}^3)$	0	0	0	0	0.813
岩体条件 C_2	0	0	0	0.062	1
地形地貌(危岩体宽度) C_3/m	0.002	0.499	0.499	0.002	0
降雨 $C_4/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	0.406	0.665	0.086	0	0
地震烈度 $C_5/\text{级}$	0.257	0.500	0.500	0.002	0
爆破粉尘 C_6	1	0.062	0	0	0
爆破振动 $C_7/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	0.499	0.499	0.106	0.018	0
施工滚石 C_8	0.062	1	0.062	0	0
爆破飞石安全距离 C_9/m	0.926	0	0	0	0
爆破方案 C_{10}	1	0.062	0	0	0
施工队伍素质 C_{11}	0.062	1	0.062	0	0
安全监测 C_{12}	1	0.062	0	0	0
火工材料运输 C_{13}	0.062	1	0.062	0	0

由表4可获得各影响因素所处的安全等级。例如降雨,属于安全的隶属度为0.406,属于基本安全的隶属度为0.665,属于较不安全的隶属度为0.086,依据最大隶属度原则,判定降雨因素处于基本安全等级。由各影响因素隶属度可构建隶属度矩

阵 B 。

5.3 特大危岩体治理评价结果

根据计算得到的权重矩阵 W 与隶属度矩阵 B 进行数学运算,得到甌子岩特大危岩体爆破削方治理风险评价综合计算计算结果,如表5所示。

表 5 特大危岩体爆破削方风险评价结果

Table 5 Evaluation results of treatment of oversize dangerous rock mass

安全等级	安全	基本安全	较不安全	不安全	极不安全
隶属度	0.4811	0.425	0.1215	0.0058	0.0438

由计算结果可以看出,在采取一定控制措施条件下,甌子岩危岩体爆破削方治理施工阶段各危险源影响因素风险评价的安全等级综合计算结果为:属于安全的隶属度为0.4811,属于基本安全的

隶属度为0.425,属于较不安全的隶属度为0.1215,根据最大隶属度识别原则,可以看出甌子岩危岩体爆破削方治理施工阶段处于安全等级。

通过危岩体风险分析的方法,对施工过程中各

危险源进行针对性控制措施的实施,各危险源影响因素处于安全等级,保障了危岩体治理的安全实施。验证了该评价方法的可行性,降低了模糊性与随机性对风险评价结果的影响。已完成的危岩体治理如图4所示。

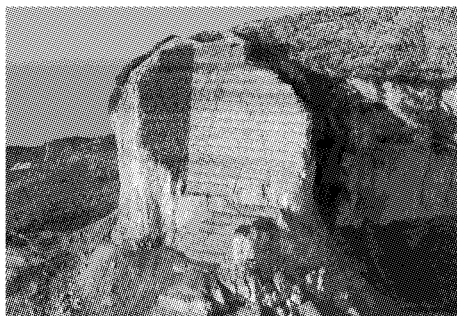


图4 治理完成的危岩体

Fig. 4 Treated dangerous rock mass

6 结论

(1) 针对特大型危岩体爆破削方治理其特殊性,从危岩体地质条件、环境因素、爆破削方施工及施工管理四个方面进行危险源辨识,建立了特大型危岩体爆破削方治理风险控制安全评价指标体系。

(2) 建立基于层次赋权的危岩体爆破削方风险评价云模型。在风险评价过程中,应用层次分析法对各危险源影响指标进行组合赋权处理,可对风险评价指标的随机性和模糊性进行综合处理,风险等级可通过云发生器生成风险云图,简单直观。

(3) 通过建立的风险评价云模型对甌岩特大型危岩体爆破削方治理过程进行安全评价,能够有效的进行爆破施工风险评价,保障了危岩体治理施工安全。验证了该方法的可行性,可以为类似工程提供借鉴。

参考文献 (References)

- [1] 乐琪浪,王洪德,高幼龙,等. 三峡库区望霞危岩体孕灾地质环境条件分析[J]. 地球学报,2015,36(2):204-212.
- [1] LE Qi-lang, WANG Hong-de, GAO You-long, et al. An analysis of disaster-pregnant geological environment conditions of the wangxia unstable rock mass in the three gorges reservoir[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2015, 36(2): 204-212. (in Chinese)
- [2] 殷跃平,康宏达,何思为,等. 乌江鸡冠岭危岩体整治爆破工程方案[J]. 中国地质灾害与防治学报,1994,5(S1):324-331.
- [2] YIN Yue-ping, KANG Hong-da, HE Si-wei, et al. Explosive engineering of jiguangling dangerous rockmass prevention of the wujiang river[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1994, 5(S1): 324-331. (in Chinese)
- [3] 程康. 黄石市板岩山危岩体成因机理分析与防治对策研究[J]. 工程地质学报,2000,8(2):202-205.
- [3] CHENG Kang. Analysis of genetic mechanism of dangerous rockmass on banyanshan mountain in huangshi city and study of controlling measures[J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(2): 202-205. (in Chinese)
- [4] 夏元友,朱瑞康. 黄石市板岩山危岩体防治方案决策分析[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(4):498-500.
- [4] XIA Yuan-you, ZHU Rui-geng. Analysis on control decision-making of unstable rockmass in banyan mountain huangshi city[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4): 498-500. (in Chinese)
- [5] 董家兴,徐光黎,李志鹏,等. 卜寺沟水电站环境边坡危险源分类及危险度评价[J]. 工程地质学报,2012,20(5):760-767.
- [5] DONG Jia-xing, XU Guang-li, LI Zhi-peng, et al. Classification and risk rating assessment of hazard sources in surrounding slope of busigou hydropower project[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(5): 760-767. (in Chinese)
- [6] 王俊. 基于事故树分析露天煤矿爆破飞石危险源辨识[J]. 煤矿安全,2012,43(6):180-183.
- [6] WANG JUN. Identify the hazard of blasting flying stones in open-pit mine based on fault tree analysis[J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(6): 180-183. (in Chinese)
- [7] 陆瑜,唐旭,邹飞. 基于云模型的爆破振动影响度评估研究[J]. 爆破,2018,35(3):166-171.
- [7] LU Yu, TANG Xu, ZOU Fei. Evaluation on impact of blasting vibration based on cloud model[J]. Blasting, 2018, 35(3): 166-171. (in Chinese)
- [8] 王景春,张法. 基于熵权二维云模型的深基坑施工风险评价[J]. 安全与环境学报,2018,18(3):849-853.
- [8] WANG Jing-chun, ZHANG Fa. Risk assessment of the deep foundation pit based on the entropy weight and 2-dimensional cloud[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(3): 849-853. (in Chinese)
- [9] 李德毅,刘常昱,杜鹞. 不确定性人工智能[J]. 软件学报,2004,15(11):1583-1594.
- [9] LI De-yi, LIU Chang-yu, DU Yi. Artificial intelligence with uncertainty[J]. Journal of Software, 2004, 15(11): 1583-1594. (in Chinese)
- [10] 黄龙华. 控制爆破技术在地质灾害治理中的应用[J]. 爆破,2010,27(2):41-56.
- [10] HUANG Long-hua. Application of controlled blasting technology in governacing geological hazards[J]. Blasting,

- 2010,27(2):41-56. (in Chinese)
- [11] 高文学, 万元林, 刘运通, 等. 高边坡危岩体爆破及其控制技术[J]. 爆破, 2005, 22(2): 1-16.
- [11] GAO Wen-xue, WAN Yuan-lin, LIU Yun-tong, et al. Blasting and controlling technique of high and steep rock slope[J]. Blasting, 2005, 22(2): 1-16. (in Chinese)
- [12] 李梅, 朱念, 夏元友, 等. 基于落石计算的危岩拦石土坝设计方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(2): 120-123.
- [12] LI Mei, ZHU Nian, XIA Yuan-you, et al. Design methods of rockfall barrier soil dams for unstable rocks using rockfall[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology. (Nature Science), 2011, 39(2): 120-123. (in Chinese)
- [13] 苗高建, 周传波, 张志华, 等. 三峡库区望霞危岩体削方爆破振动测试分析[J]. 爆破, 2012, 29(3): 131-134.
- [13] MIAO Gao-jiana, ZHOU Chuan-bo, ZHANG Zhi-hua, et al. Vibration measurement and analysis of wangxia dangerous rock mass blasting in three gorges reservoir[J]. Blasting, 2012, 29(3): 131-134. (in Chinese)
- [14] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(5): 148-153.
- [14] GUO Jin-yu, ZHANG Zhong-bin, SUN Qing-yun. Study and applications of analytic hierarchy process[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(5): 148-153. (in Chinese)
- [15] 谢全敏, 夏元友. 岩体边坡治理决策的模糊层次分析方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1117-1120.
- [15] XIE Quan-min, XIA Yuan-you. Fuzzy hierarchy analysis on decision making of rockmass slope treatment based on entropy weight[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1117-1120. (in Chinese)
- [16] 黎良辉, 杨斌, 魏博文, 等. 基于改进层次分析法的大坝性态安全诊断云模型[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(1): 209-214.
- [16] LI Liang-hui, YANG Bin, WEI Bo-wen, et al. Cloud model of dam behavior safety diagnosis based on improved analytic hierarchy process[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(1): 209-214. (in Chinese)
- [17] 张明广, 蒋军成. 基于层次分析法的重大危险源模糊综合评价[J]. 南京工业大学学报, 2006, 28(2): 31-34.
- [17] ZHANG Ming-guang, JIANG Jun-cheng. Application of analytical hierarchy process in hazard degree assessment of major hazard installations[J]. Journal of Nanjing University of Technology, 2006, 28(2): 31-34. (in Chinese)
- [18] 杨文东, 杨栋, 谢全敏. 基于云模型的边坡风险评估方法及其应用[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(4): 30-34.
- [18] YANG Wen-dong, YANG Dong, XIE Quan-min. Study on slope risk assessment method based on cloud model and its application[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(4): 30-34. (in Chinese)
- [19] 雷荣, 陆文清, 王爱民, 等. 甑子岩特大型危岩体治理开挖控制爆破[J]. 爆破, 2018, 35(1): 90-95.
- [19] LEI Rong, LU Wen-qing, WANG Ai-min, et al. Controlled explosive excavation of zengziyan oversize dangerous rock mass[J]. Blasting, 2018, 35(1): 90-95. (in Chinese)

英文编辑: 陈东方

科技论文关键词使用小知识

关键词是反映文章最主要内容的术语, 对文献检索有重要作用。凡期刊文章的文献标识码为 A、B、C 三类者均应标注中文关键词, 有英文摘要者应同时给出英文关键词。中、英文关键词应一一对应。一般每篇文章可选 3~8 个关键词, 如有可能, 尽量用《汉语主题词表》等词表提供的规范词; 未被词表收录的新学科、新技术中的重要术语以及文章题名中的人名、地名也可以作为关键词标出。多个关键词应按词条外延层次(学科目录分类)由高至低顺序排列, 以便于计算机自动切分, 关键词之间应以分号“;”分隔, 最后一个词后不打标点符号, 并以显著的字符排在同种语言摘要的下方。中文关键词前应冠以“关键词:”, 英文关键词前冠以“Key words:”作为标识。