

高放废物地质处置地下实验室施工风险评价^{*}

张强勇¹, 郑阳¹, 吴冬², 李兴军¹, 张志浩¹

(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061; 2. 中核第四研究设计工程有限公司, 石家庄 050021)

摘要:高放废物地质处置地下实验室作为开发和验证高放废物地质处置技术、评价场址适宜性的地下研究设施,在高放废物地质处置中起着至关重要的作用。为保证地下实验室施工安全,对其施工风险进行分析评价具有十分重要的理论意义和工程应用价值。故障树分析和层次分析是工程风险评估中重要的分析方法,本文将故障树的结构重要度与层次分析法中的权重相结合,首先辨识出地下实验室施工风险因子,然后建立故障树模型,再将故障树的结构重要度计算结果引入层次分析法判断矩阵的构建中,最后提出基于故障树模型的层次分析法。将该方法应用于评价甘肃北山我国首座高放废物地质处置地下实验室的施工风险,获得了地下实验室施工期风险的权重分布玫瑰云图,提出了对保证地下实验室施工安全具有指导性的建议和结论。

关键词:高放废物地质处置地下实验室;施工风险辨识;故障树模型;层次分析法;风险权重分布玫瑰云图

中图分类号: TU714

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)06-1684-08

Risk Assessment during Construction of High-level Radioactive Waste Geological Disposal Underground Laboratory

Zhang Qiangyong¹, Zheng Yang¹, Wu Dong², Li Xingjun¹, Zhang Zhihao¹

(1. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, P.R. China;

2. The Fourth Research and Design Engineering Corporation of CNNC, Shijiazhuang 052021, P.R. China)

Abstract: High level radioactive waste (HLW) geological disposal underground laboratory plays a vital role in geological disposal as an underground research facility used for developing and validating the HLW geological disposal technology, evaluating suitability of the site. In order to ensure the construction safety of underground laboratory, it has very important theoretical significance and engineering application value to analyze and evaluate the construction risk. Fault tree analysis (FTA) and analytic hierarchy process (AHP) are important method in engineering risk assessment. This paper combined FTA structure importance with the weight of AHP, first identified the construction risk factors of underground laboratory, built up the fault tree model, then introduce the calculation result of FTA structure importance into the judgment matrix of AHP, and finally put forward AHP method based on FTA. This method is applied to evaluate the construction risk of China's first HLW disposal underground laboratory in Beishan, Gansu province, also obtained rose cloud for the distribution of risk weight of underground laboratory, and put forward the suggestions and conclusions to ensure the safety of underground laboratory construction.

Keywords: high-level radioactive waste geological disposal underground laboratory; construction risk identification; the fault tree model; analytic hierarchy process; rose cloud for the distribution of risk weight.

^{*} 收稿日期: 2018-04-21 (修改稿)

作者简介: 张强勇 (1967-), 男, 湖北赤壁人, 博士, 教授, 主要从事深部地下洞室围岩稳定分析与安全控制研究。

E-mail: qiangyongz@sdu.edu.cn

通讯作者: 郑阳 (1992-), 男, 山东泰安人, 硕士, 主要从事地下工程灾害风险评估与调控分析研究。

E-mail: 13854858625@163.com。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0401804); 泰山学者工程专项经费; 国家自然科学基金 (41772282); 高放废物地质处置地下实验工程前期科研项目 (YK-KY-J-2015-25)

0 引言

随着世界经济的发展进程不断加快,人类对能源的需求量也日益增加,传统化石能源不但储量有限,且燃烧还会带来环境污染等一系列难以解决的问题。核能作为一种高效、清洁、经济的能源,正逐渐应用到各个领域。在核能带来优质能源的同时,核废料的处理却成为一个亟需解决的问题。高放废物的储存有多种方法,目前公认的最安全的储存方法为地质储存^[1]。但由于地质处置库具有建设条件复杂、安全等级高、服务年限长等特点,因此在建设前首先需要建立高放废物地质处置地下实验室,如图1所示。它是建造于一定深度、用于开发和验证高放废物地质处置技术、在一定情况下用于评价场址适宜性的地下研究设施。地下实验室一旦建成,将成为处置库研究开发、验证实验、设备考验的中心。

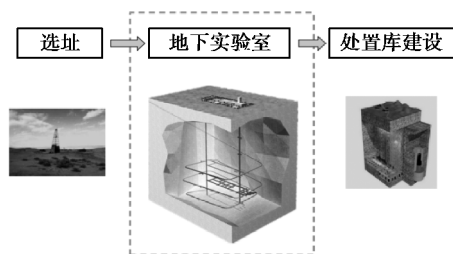


图1 地下实验室建设方案

Fig.1 Underground laboratory construction plan

世界上已经建成的地下实验室有20多座,主要集中于北美和欧洲的一些国家,例如芬兰的ONKALO(花岗岩),比利时的URF(塑性粘土),德国的Gorleben(岩盐),美国的ESF(凝灰岩)等^[2-3]。地下实验室作为高放废物地质处置的前期科研平台,对于开发和验证高放废物处置技术、了解深部地质环境和地应力状况、进行施工安全和环境影响评价,都具有极其重要的意义。目前,我国高放废物地质处置地下实验室尚处于规划阶段^[4-6]。

为保证地下实验室的施工安全,对地下实验室施工过程中的风险进行预测和评估变得尤为重要。通过对风险的识别、分析和控制,最终使风险发生的概率降至最低^[7]。目前风险分析的方法众多,主要有定性分析法、定量分析法以及定性定量相结合的方法,其中德尔菲法、蒙特卡罗分析法、故障树法、层次分析法、模糊综合评价等方法广泛应用于工程项目的风险分析中。例如:You等^[8]基于蒙特

卡罗模拟法获得了隧道安全因素的概率分布,从而对隧道风险分析进行了初步的研究;李媛等^[9]通过故障树分析法,获得了岩盐地下油气储库运营期风险因子结构重要度排序结果;翟友成等^[10]建立了基于群组决策的不确定层次分析法,对锚固边坡的稳定性进行评价;陈鹏宇等^[11]以Matlab编程反分析指标权重,建立基于权重反分析的标准化模糊综合评价模型,分析了多种因素对岩爆发生的影响等。国内外学者对地下工程的风险分析做了大量的相关研究工作,但研究内容主要集中在矿山、水电站和交通隧道等领域^[12-14]。目前世界上高放废物地质处置地下实验室尚处于发展阶段,相关研究主要集中在高放废物地质处置地下实验室的场址评估与结构设计方面,而对其施工风险的研究很少有人涉及。因此,本文以甘肃北山我国首座高放废物地质处置地下实验室为研究背景,通过对施工风险的辨识,建立故障树与层次分析模型,并将故障树的重要度引入层次分析权重的确定中去,通过权重大小绘制了地下实验室施工风险权重分布玫瑰图,并对地下实验室施工期风险评价提出了一些指导意见。

1 工程背景

我国从1985年开始对核电高放废物地质处置实验室开展了较为系统的选址和场址评价工作,主要包括工程地质、水文地质、地球物理调查、岩体质量评价和钻孔现场试验等研究。为避免对环境造成不良影响,并且考虑到围岩应具有良好性能,高放废物地质处置地下实验室的预选场址最终选择在甘肃北山,并以此预选区为工作重点,对旧井、新场、野马泉等预选地段进行地表调查以及深部环境特征研究工作^[15-17]。由于甘肃北山地处人烟稀少地带,经济发展较为落后,矿产资源匮乏,外加北山的地质条件优越,地处地壳运动稳定区,场址所在地有着完整的花岗岩体,不论从地理环境,社会经济环境还是地质资源环境来说,都是高放废物地质处置实验室建设的有利场址^[18]。我国借鉴目前国外在建地下实验室的建设经验,初步提出了北山高放废物地质处置地下实验室的概念模型(如图2所示),并初步预计在2020年左右完成地下实验室的建设工作。

虽然北山具有优越的条件来建造高放废物地质处置地下实验室,但这并不是一项简单的地

下工程,在建设过程中,高地应力、岩爆、节理裂隙、地下水的影响都会大大提高工程的建设难度。较高的地应力,这不但影响地下实验室整体的布局,还会对地下巷道以及硐室开挖方式、支护形式产生一定影响;且地质构造中的断层以及发育的节理裂隙对于实验室竖井的布置、斜坡道与水平巷道的走向以及断面形式断面尺寸选择都会有很大的影响,因此,在工程建设之前需要进行合理的风险评价与分析。

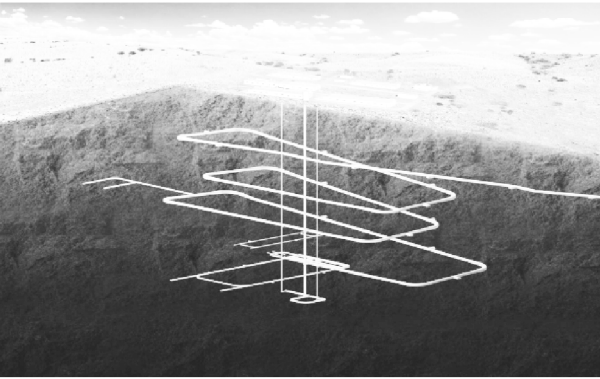


图 2 地下实验室主体概念模型

Fig.2 The conceptual model of underground laboratory

2 地下实验室风险辨识

通过收集、整理国外已建或在建的高放废物地质处置工程的事故资料,总结国外高放废物地质处置实验室建设过程中遇到的问题,对甘肃北山我国首座高放废物地质处置地下实验室施工过程中的风险类型、风险事故发生的原因进行了系统的分类和深入的分析。根据钻孔勘测资料,甘肃北山预选场址地区以花岗岩为主,埋深较大,在钻孔取样中发现个别存在显著岩芯饼化现象。该现象在深埋高应力岩体中较为常见,表明在预选区存在较高地应力场,且岩体和地层广泛发育节理裂隙^[19],这些都对岩体强度和工程稳定性造成极为不利的影响。较高的地应力还会对围岩的开挖支护,以及多场耦合条件下结构的长期稳定性产生影响。因此,本文结合甘肃北山地质构造及高放废物处置的特点,将高放废物地质处置地下实验室施工风险归为两大类:一是自然因素,即地质条件、地应力状态和地下水影响等;二是人为因素,即不适当的施工技术方案,或者不合理的施工管理措施等。通过系统分析与评判,最终辨识出地下实验室施工期主要风险因子,如表 1 所示。

表 1 地下实验室施工期主要风险因子
Table 1 Major risk factors during the construction of underground laboratory

| 编 号 | 风险因子 | 编 号 | 风险因子 |
|----------|---------|----------|---------|
| X_1 | 高地应力 | X_{11} | 超欠挖 |
| X_2 | 岩石弹脆性较高 | X_{12} | 开挖方式不当 |
| X_3 | 硐群交错复杂 | X_{13} | 支护不及时 |
| X_4 | 地下水发育 | X_{14} | 锚杆布置不合理 |
| X_5 | 节理裂隙发育 | X_{15} | 衬砌开裂 |
| X_6 | 地震影响 | X_{16} | 支护腐蚀老化 |
| X_7 | 水-力耦合作用 | X_{17} | 防水失效 |
| X_8 | 流变作用 | X_{18} | 监测不及时 |
| X_9 | 开挖扰动 | X_{19} | 施工质量差 |
| X_{10} | 开挖进尺过大 | X_{20} | 安全意识淡薄 |

3 基于故障树模型的层次分析

3.1 故障树分析

3.1.1 施工风险故障树模型的建立

以地下实验室施工风险辨识结果为基础,建立了地下实验室施工风险故障树,如图 3 所示。具体底事件所代表编号如表 1 所示。

3.1.2 最小割集计算

由故障树可知,底事件有 20 个,但并不是每一个底事件都会同时发生,只有在某些条件下,才导致顶事件发生,这样的底事件的集合,称为割集,而导致顶上事件发生的最低限度的底事件集合称为最小割集。通过布尔代数法对地下实验室施工阶段故障树模型进行最小割集的计算,得到本故障树的 23 个最小割集,其中一阶最小割集 $\{X_3\}, \{X_5\}, \{X_9\}, \{X_{10}\}, \{X_{11}\}, \{X_{12}\}, \{X_{15}\}, \{X_{17}\}$,二阶最小割集有 $\{X_1X_2\}, \{X_{15}X_{18}\}, \{X_{15}X_{20}\}, \{X_{16}X_{18}\}, \{X_{16}X_{20}\}, \{X_{17}X_{18}\}, \{X_{17}X_{20}\}, \{X_7X_9\}, \{X_7X_{10}\}, \{X_7X_{11}\}, \{X_8X_9\}, \{X_8X_{10}\}, \{X_8X_{11}\}$,三阶最小割集有 $\{X_1X_4X_6\}, \{X_{13}X_{14}X_{19}\}$ 。单事件组成最小割集表示该事件一旦发生顶事件就会发生,双重事件组成的最小割集表示两个事件一起发生顶事件就会发生,对 N 个事件组成的最小割集,表示这 N 个事件同时发生顶事件才会发生。割集中

底事件越少,说明对顶事件的影响程度越大,也越容易引起事故的发生^[20-21]。

3.1.3 结构重要度计算

故障树的各个底事件对顶事件都具有一定影响,但影响程度不同,可通过结构重要度来表示影响程度的大小。底事件的结构重要度可用式(1)表示^[22]。

$$I_{\varphi}(i)=\frac{1}{k}\sum_{j=1}^n\frac{1}{R_j}$$

(1)

式中: k 为事故树包含的最小割(径)集数目; n 为包含第 i 个底事件的最小割(径)集数目; R_j 为包含第 i 个底事件的第 j 个最小割(径)集中底事件的数目。

利用式(1)对故障树底事件的重要度进行计

算,结果如表2所示。计算结构的重要度时,暂时先不考虑底层风险事故发生的概率是多少,而是从故障树结构上计算分析各个底事件对顶事件的影响程度,底事件结构重要度越大,说明它对系统安全性的危害越大。

3.2 基于故障树模型的层次分析

3.2.1 层次分析模型的建立

根据故障树中已经确定的风险因子,将故障树中底事件进行分类总结,然后转化为层次分析法的指标层因素,并确定约束层因素:B1为岩爆风险、B2塌方风险、B3开挖风险、B4支护风险以及B5管理风险。最终建立的施工风险层次分析模型如图4所示。

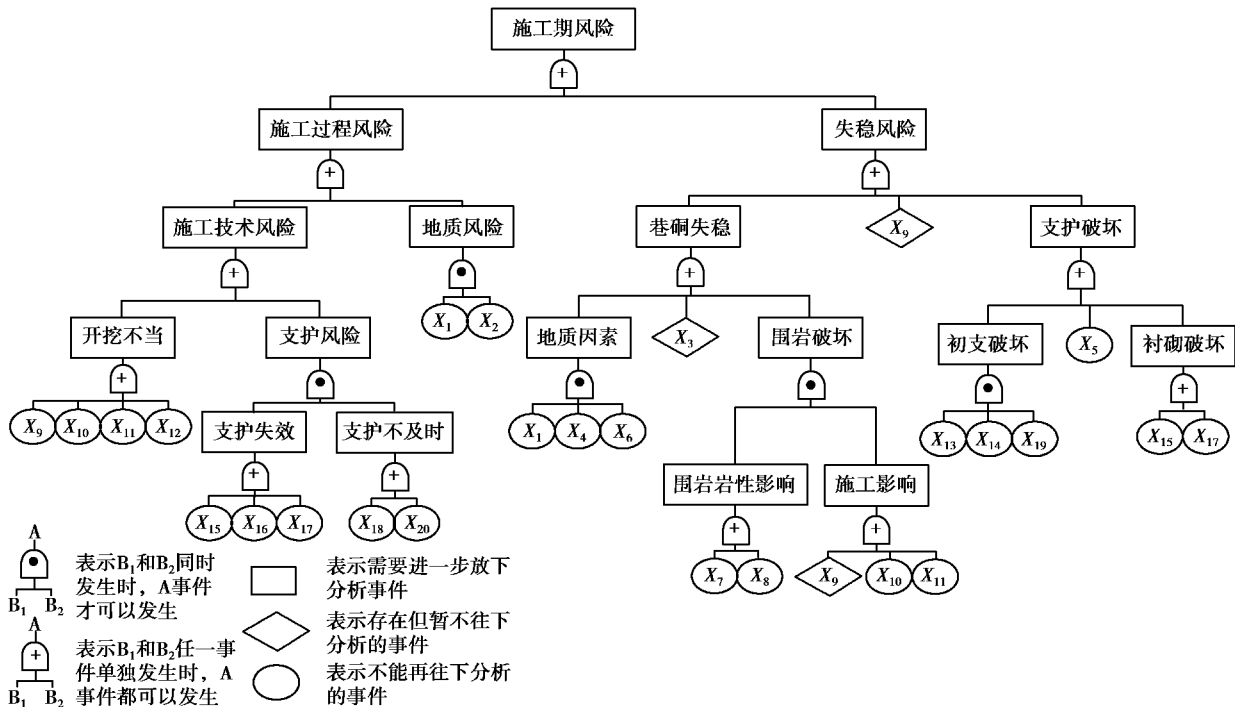


图3 施工风险故障树模型图
Fig.3 Construction risk of the FTA model

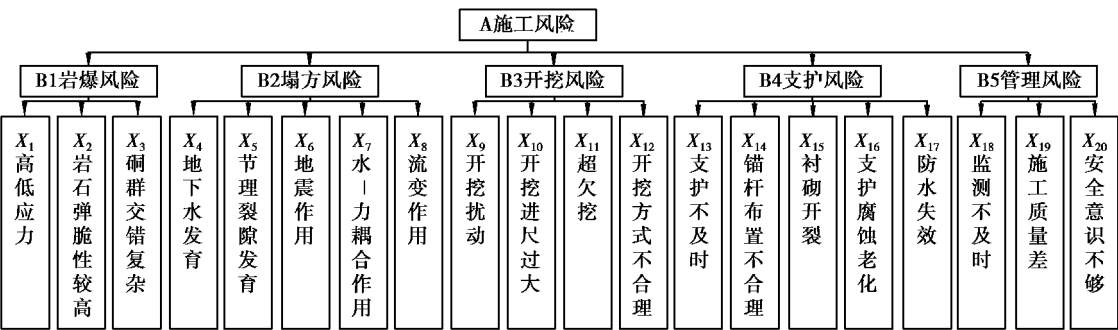


图4 施工风险层次分析模型图
Fig.4 Construction risk of AHP model

3.2.2 构造判断矩阵

传统的方法通过采用两两比较法将因素之间的相对重要性按一定标度量化,并将其标度值排成方阵,构成一个判断矩阵。

因故障树中重要度反映了底事件对顶事件的影响程度,而在层次分析法中,指标层的权重也反映了对目标层的影响大小,本文在此基础上,利用故障树的重要度确定层次分析的判断因子,并以此构造层次分析法的判断矩阵。首先通过(1)式

对故障树中各个底事件进行重要度计算,然后对各个重要度的分母求其最小公倍数 LCM,并与相应的底事件结构重要度相乘得到层次分析法中指标层事件的判断因子^[23],即:

$$X(i) = I_{\varphi}(i) \cdot LCM \quad (2)$$

根据结构重要度计算结果,可知分母最小公倍数 LCM 为 144,然后通过式(2)求得判断因子,具体数据如表 2 所示。

表 2 故障树底事件结构重要度及判断因子

Table 2 The FTA bottom event structure importance and judgment factor

| 底事件 | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_5 | X_6 | X_7 | X_8 | X_9 | X_{10} |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 结构重要度 | 5/144 | 1/48 | 1/24 | 1/72 | 1/24 | 1/72 | 1/16 | 1/16 | 1/8 | 1/12 |
| 判断因子 | 5 | 3 | 6 | 2 | 6 | 2 | 9 | 9 | 18 | 12 |
| 底事件 | X_{11} | X_{12} | X_{13} | X_{14} | X_{15} | X_{16} | X_{17} | X_{18} | X_{19} | X_{20} |
| 结构重要度 | 1/12 | 1/16 | 1/72 | 1/72 | 1/12 | 1/16 | 1/12 | 1/16 | 1/72 | 1/16 |
| 判断因子 | 12 | 9 | 2 | 2 | 12 | 9 | 12 | 9 | 2 | 9 |

由于各个因素的判断因子反映了底事件对顶上事件的影响程度,所以可以利用底事件判断因子两两比较来构造判断矩阵,其两两之间比较的判断矩阵为:

$$\begin{cases} a_{ij} = \frac{X(i)}{X(j)}, & \text{当 } X(i) \geq X(j) \\ a_{ji} = \frac{X(j)}{X(i)}, & \text{当 } X(i) < X(j) \end{cases} \quad (3)$$

因每个约束层因素都含有一定数量的指标层因素,故其判断因子可以用指标层各个因素判断因子的和来表示,即 $\sum_{i=1}^n X(i)$, 则约束层的判断矩阵为:

$$\begin{cases} a_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^n X(i)}{\sum_{j=1}^n X(j)}, & \text{当 } \sum_{i=1}^n X(i) \geq \sum_{j=1}^n X(j) \\ a_{ji} = \frac{\sum_{j=1}^n X(j)}{\sum_{i=1}^n X(i)}, & \text{当 } \sum_{i=1}^n X(i) < \sum_{j=1}^n X(j) \end{cases} \quad (4)$$

3.2.3 确定权重

权重的确定有多种方法,例如方根法、求和法、最小二乘法等^[24]。特征向量中的方根法操作方便,计算简洁,是确定权重时常用的方法。具体分

为以下几个步骤:

(1) 计算判断矩阵 A 的特征向量 W 。

计算判断矩阵每一行元素乘积:

$$M_i = \prod_{j=1}^n a_{ij} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

计算 M_i 的 n 次方根:

$$\bar{W}_i = \sqrt[n]{M_i} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

对 W_i 标准化:

$$W_i = \bar{W}_i / \sum_{i=1}^n \bar{W}_i (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

(2) 一致性判断

对系统要素进行相对重要度判断时,主要是通过主观的比较对因素层各个因子进行判断,因而不可能完全精密判断出 W_i/W_j 的值,只能对其估计,因此须进行相容性和误差分析。

计算判断矩阵最大特征值:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \quad (8)$$

计算一致性指标 CI :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (9)$$

计算检验系数 CR :

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (10)$$

对于 1~9 阶判断矩阵, RI 值如表 3 所示。

| 表 3 随机性指标 RI 数值 | | | | | | |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Table 3 Random index values | | | | | | |
| n | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| RI | 0 | 0 | 0.58 | 0.9 | 1.12 | 1.24 |
| n | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| RI | 1.32 | 1.41 | 1.45 | 1.49 | 1.51 | 1.54 |

当 $CR<0.1$ 时,认为判断矩阵有满意的一致性,权重向量 W 可以接受,否则需要重新两两比较调整判断矩阵的元素,直到判断矩阵具有满意的一致性为止。这时从判断矩阵中计算出的最大特征根所对应特征向量经标准化后,即可作为层次分析的权值。

通过式(3)对指标层权重的计算,对指标层的判断因子两两进行比较,如 $a_{12}=\frac{\chi(1)}{\chi(2)}=\frac{5}{3}$,同理可得指标层判断矩阵各个因子,然后根据特征根法求得指标层各因素权重大小,并进行一致性检验,结果如表 4 所示。

| 表 4 指标层各因素权重及排序 | | | | |
|---|---------|---------|---------|----|
| Table 4 The weight of index layer and the order | | | | |
| 编号 | 指标层因素 | 权重 | 组合权重 | 排序 |
| X_1 | 高地应力 | 0.357 1 | 0.033 3 | 14 |
| X_2 | 岩石弹脆性较高 | 0.214 3 | 0.020 0 | 15 |
| X_3 | 硐群交错复杂 | 0.428 6 | 0.040 0 | 12 |
| X_4 | 地下水发育 | 0.071 4 | 0.013 3 | 16 |
| X_5 | 节理裂隙发育 | 0.213 4 | 0.040 0 | 12 |
| X_6 | 地震影响 | 0.071 4 | 0.013 3 | 16 |
| X_7 | 水-力耦合作用 | 0.321 4 | 0.060 0 | 6 |
| X_8 | 流变作用 | 0.321 4 | 0.060 0 | 6 |
| X_9 | 开挖扰动 | 0.375 0 | 0.120 0 | 1 |
| X_{10} | 开挖进尺过大 | 0.250 0 | 0.080 0 | 2 |
| X_{11} | 超欠挖 | 0.250 0 | 0.080 0 | 2 |
| X_{12} | 开挖方式不当 | 0.125 0 | 0.060 0 | 6 |
| X_{13} | 支护不及时 | 0.058 8 | 0.013 3 | 16 |
| X_{14} | 锚杆布置不合理 | 0.058 8 | 0.013 3 | 2 |
| X_{15} | 衬砌开裂 | 0.352 9 | 0.080 0 | 16 |

| 续表4 | | | | |
|----------|--------|---------|---------|----|
| 编号 | 指标层因素 | 权重 | 组合权重 | 排序 |
| X_{16} | 支护腐蚀老化 | 0.176 5 | 0.060 0 | 6 |
| X_{17} | 防水失效 | 0.352 9 | 0.080 0 | 2 |
| X_{18} | 监测不及时 | 0.450 0 | 0.060 0 | 6 |
| X_{19} | 施工质量差 | 0.100 0 | 0.013 3 | 16 |
| X_{20} | 安全意识淡薄 | 0.450 0 | 0.060 0 | 6 |

通过表 2 可知,约束层岩爆风险的判断因子由 X_1, X_2, X_3 组成,则其判断因子 $\sum_{i=1}^n \chi(1)=14$,同理可求出其他风险的判断因子分别为 28,51,37,20。通过式(4)可得各约束层判断矩阵各元素,如 $a_{12}=\frac{\sum_{i=1}^n \chi(1)}{\sum_{j=1}^n \chi(2)}=\frac{1}{2}$,具体准则层施工事故的判断矩阵如表 5 所示,其权重为 $W=(0.093\ 3,0.187\ 6,0.340\ 0,0.246\ 7,0.133\ 3)$ 。

最后计算组合权重,即 X 层对 A 层的权重,实际为 X 层对 B 层的权重与 B 层对 A 层的权重累加值,通过组合权重的大小进行权重排序,如表 5 所示。

| 表 5 约束层判断矩阵及权重 | | | | | | |
|--|----|-----|-------|-------|-------|---------|
| Table 5 Judgment matrix and weight of constraint layer | | | | | | |
| | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | 权重 |
| B1 | 1 | 1/2 | 14/51 | 14/37 | 7/10 | 0.093 3 |
| B2 | | 1 | 28/51 | 28/37 | 7/5 | 0.187 6 |
| B3 | | | 1 | 51/37 | 51/20 | 0.340 0 |
| B4 | | | | 1 | 37/20 | 0.246 7 |
| B5 | | | | | 1 | 0.133 3 |

3.2.4 风险权重玫瑰云图

根据各风险组合权重大小,可绘制出地下实验室施工风险权重分布玫瑰云图,如图 5 所示。

由图 5 可知:在地下实验室施工过程中,开挖扰动对工程影响较大,其次是开挖进尺过大、超欠挖等风险;在支护过程中,衬砌开裂和防水失效等风险所占比重大;在工程地质中,岩石流变与水-力耦合作用对施工过程有明显影响;而在施工管理中,监测不及时和安全意识淡薄对工程安全影响较大。

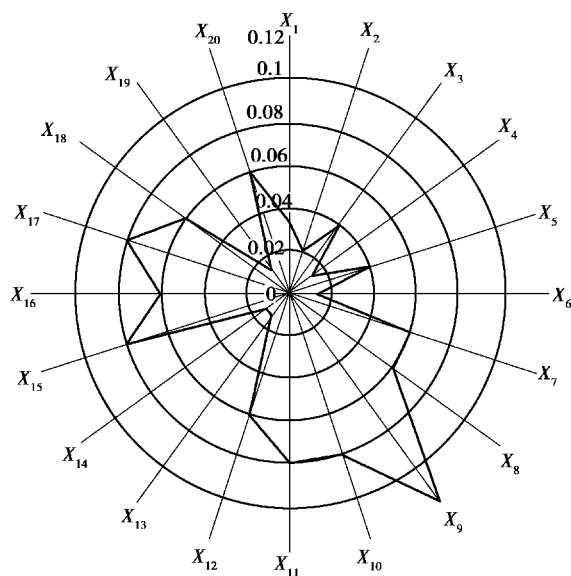


图5 风险权重分布玫瑰云图

Fig.5 Rose cloud for the distribution of risk weight

高放废物地质处置地下实验室工程项目风险众多,结合预选场址地应力、岩性以及工程地质特点,由计算结果可以看出,施工过程中开挖、支护风险所占权重较大,风险突出。在施工过程中,开挖支护工作作为关键工作,其施工方式方法的不合理更易造成事故的发生。因此,对于地下实验室这种特殊地下工程的施工,在施工时应提高施工管理水平,落实技术措施,建立合理的开挖与支护优化方案,更要加强对风险的预警,建立一系列风险应急预案和安全管理措施,对施工过程中的风险进行动态管控,做到早发现、早预防,减少和预防灾害事故的发生。

4 结论

(1)结合故障树与层次分析模型,将故障树的结构重要度引入层次分析法权重的计算中来,既能够全面直观描述风险事故的各种因素及逻辑关系以及逻辑运算,又能将系统的各个递阶层次清楚地表现出来,两种方法互补避免了传统层次分析人为主观判断的干扰,一定程度上提高了风险评估的可靠性。

(2)建立了甘肃北山我国首座高放废物地质处置地下实验室的施工风险故障树模型、以及基于故障树模型的层次分析方法。通过该方法确定了地下实验室施工期风险的权重,其中开挖扰动风险权重最大,其次,开挖进尺过大、超欠挖、衬砌开裂以及防水失效等风险所占权重也较大。

(3)建立了地下实验室施工风险权重分布玫瑰云图,更加直观地表现出各个风险所占比重的大

小,对于权重较大的风险可以优先针对,便于对重要的施工风险制订专项的应对和调控措施。

参考文献 (References)

- [1] Thompson B G J. The role of performance assessment in the regulation of underground disposal of radioactive wastes; An international perspective[J]. Risk analysis, 1999, 19(5): 809-846.
- [2] Wang J. High-level radioactive waste disposal in China: update 2010 [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010, 2(1): 1-11.
- [3] 李香绫, Bernier F, Bel J. 比利时高放废物处置库设计与与基岩和工程屏障体系的热-水-力性状的相关研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 681-692. (Li Xiangling, Bernier F, Bel J. The Belgian HLW repository design and associated R&D on the THM behavior of the host rock and EBS[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 681-692. (in Chinese))
- [4] 郭永海, 王驹. 高放废物地质处置中的地质, 水文地质, 地球化学关键科学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增2): 3926-3931. (Guo Yonghai, Wang Ju. Key scientific issues of geology, hydrogeology and geochemistry in high-level radioactive waste geological disposal [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp. 2): 3926-3931. (in Chinese))
- [5] 王驹, 苏锐, 陈亮, 等. 甘肃北山高放废物地质处置地下实验室若干战略问题的考虑[J]. 世界核地质科学, 2014, 31(增1): 125-130. (Wang Ju, Su Rui, Chen Liang, et al. Considerations on several strategic problems on underground research laboratory for high-level radioactive waste disposal in Beishan, Gansu province [J]. World Nuclear Geoscience, 2014, 31(Supp. 1): 125-130. (in Chinese))
- [6] 秦爱芳, 赵小龙, 王海堂. 核废料处置库近场热-水力耦合性状[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(5): 1201-1207. (Qin Aifang, Zhao Xiaolong, Wang Haitang. Coupled thermo-hydro-mechanical properties in field near nuclear waste repository[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(5): 1202-1207. (in Chinese))
- [7] Zhang H Y, Yang G B. Review of study on risk management for the construction project[A]//Advanced Materials Research [C]. Trans Tech Publications, 2011: 6404-6409.
- [8] You K, Park Y, Lee J S. Risk analysis for determination of a tunnel support pattern[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(5): 479-486.

- [9] 李媛, 张强勇, 贾超, 等. 盐岩地下油气储库运营期风险的故障树分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1125-1130. (Li Yuan, Zhang Qiangyong, Jia Chao, et al. Fault tree analysis of salt cavern storage during its operational period[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4), 1125-1130. (in Chinese))
- [10] 翟友成, 曹文贵, 王江营, 等. 基于不确定型层次分析法的边坡稳定模糊评判方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(增2): 539-543. (Zhai Youcheng, Cao Wengui, Wang Jiangying, et al. Fuzzy evaluation method of slope stability based on uncertain analytic hierarchy process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Sup. 2): 539-543. (in Chinese))
- [11] 陈鹏宇, 余宏明, 师华鹏. 基于权重反分析和标准化模糊综合评价的岩爆预测模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 2154-2160. (Chen Pengyu, Yu Hongming, Shi Huapeng. Prediction model for rockburst based on weighted back analysis and standardized fuzzy comprehensive evaluation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(10): 2154-2160. (in Chinese))
- [12] 黄宏伟. 隧道及地下工程建设中的风险管理研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(1): 13-20. (Huang Hongwei. State-of-the-art of the research on risk management in construction of tunnel and underground works[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1): 13-20. (in Chinese))
- [13] 李景龙, 李术才, 李树忱. 地下工程的风险分析研究[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(5): 835-839. (Li Jinglong, Li Shucan, Li Shuchen. Study on risk analysis methods for underground projects[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(5): 836-864. (in Chinese))
- [14] 吴楠. 基于深基坑施工工期风险评估的安全指数研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(3): 604-608. (Wu Nan. Study of safety index system based on risk assessment in the construction of deep excavation project[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(3): 605-608. (in Chinese))
- [15] 赵星光, 王驹, 马利科, 等. 高放废物地质处置库北山预选区新场岩体地应力场分布规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(2): 3751-3759. (Zhao Xingguang, Wang Ju, Ma Like, et al. Distribution characteristics of geostress field in xinchang rock block of candidate beishan area for high level radioactive waste repository in china [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(2): 3751-3759. (in Chinese))
- [16] Wang J. On area-specific underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(2): 99-104.
- [17] Wang J, Chen L, Su R, et al. The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: Planning, site selection, site characterization and in situ tests [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(3): 411-435.
- [18] 赵宏刚, 王驹, 杨春和, 等. 甘肃北山旧井地段高放废物处置库深度初步探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增2): 3966-3973. (Zhao Honggang, Wang Ju, Yang Chunhe, et al. Preliminary discussion on depth for high-level radioactive waste repository in Jiujing block, Beishan area, Gansu province [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Sup. 2): 3966-3973. (in Chinese))
- [19] 黄贤芳, 何建国, 徐国庆. 高放废物地质处置库花岗岩体预选研究[J]. 世界核地质科学, 2009, 26(4): 219-227. (Huang Xianfang, He Jianguo, Xu Guoqing. Pre-selection research on granite mass for high level radioactive waste repository [J]. World Nuclear Geoscience, 2009, 26(4): 219-227. (in Chinese))
- [20] Modarres M. Risk analysis in engineering: techniques, tools, and trends[M]. CRC press, 2016.
- [21] 史定华, 王松瑞. 故障树分析技术方法和理论[M]. 北京师范大学出版社, 1993. (Shi Dinghua, Wang Songrui. Analysis technique and theory of fault tree[M]. Beijing Normal University Publishing Group, 1993. (in Chinese))
- [22] 伍爱友, 王从陆, 肖国清. 事故树分析方法在建筑物火灾人员伤亡中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(5): 92-95. (Wu Aiyu, Wang Conglu, Xiao Guoqing. Application of fault tree analysis in casualty of building fire[J]. China Safety Science Journal, 2005, 15(5): 92-95. (in Chinese))
- [23] 石龙, 张瑞芳, 谢启源, 等. 改进层次分析法在公共建筑火灾风险分析中的应用[J]. 科学通报, 2009(3): 329-336. (Shi Long, Zhang Ruifang, Xie Qiyuan, et al. Using AHP in the fire hazard analysis of public building[J]. China Science Bulletin, 2009, 54(3): 329-336. (in Chinese))
- [24] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100. (Deng Xue, Li Jiaming, Zeng Haojian, et al. Research on computation methods of AHP weight vector and its applications[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(7): 93-100. (in Chinese))