

# 基于数理统计的地铁车站深基坑施工风险评估<sup>\*</sup>

蒙国往<sup>1,2</sup> 黄劲松<sup>1</sup> 吴波<sup>1,2</sup> 农忠建<sup>1</sup> 许杰<sup>1</sup> 韦汉<sup>1</sup>

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 530004, 南宁;

2. 广西大学工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 530004, 南宁//第一作者, 讲师)

**摘要** 为更准确地评估施工风险, 保障施工安全, 根据风险定义从风险发生概率和风险发生损失两方面对地铁车站深基坑施工风险进行分析, 以层次分析法为原理基础, 将数理统计数据应用于模糊综合评价法。对南宁轨道交通5号线狮山公园站深基坑施工风险总值及各风险因素风险值进行评估。经评估, 该工程施工风险处于最低合理可行区域, 并给出应注意的主要风险因素以及相应的控制措施。后续监测结果显示, 该工程在采取相应控制措施后, 主要风险得到有效控制, 工程安全得到保障。

**关键词** 地铁车站; 深基坑; 施工风险评估; 数理统计; 模糊综合评价法

**中图分类号** U231.4; TU714

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.12.011

## Risk Assessment of Metro Station Deep Foundation Pit Construction Based on Mathematical Statistics

MENG Guowang, HUANG Jinsong, WU Bo, NONG Zhongjian, XU Jie, WEI Han

**Abstract** In order to evaluate construction risk more accurately and to ensure construction safety, metro station deep foundation pit construction risk is analyzed from the two aspects of risk occurrence probability and risk loss, according to the definition of risk. Mathematical statistical data are applied to fuzzy comprehensive evaluation method based on the principle of analytic hierarchy process. Assessment of the total risk value of deep foundation pit construction of Shishan Park Station of Nanning Rail Transit Line 5 and of the risk value of various risk factors is carried out. Results show that the construction risk of the project is in the lowest reasonable and feasible range according to evaluation, and the main risk factors that should be paid attention to are listed, as well as corresponding control measures. Following monitoring results show that with adoption of the corresponding control measures, main risks of the project are effectively controlled, and the project safety is

guaranteed.

**Key words** metro station; deep foundation pit; construction risk assessment; mathematical statistics; fuzzy comprehensive evaluation method

**First-author's address** College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, 530004, Nanning, China

据不完全统计, 地铁车站基坑工程安全事故大部分发生在施工阶段<sup>[1]</sup>。为了有效降低施工风险, 减少各类安全事故发生, 需在施工前对施工风险进行准确而全面的风险评估。现阶段, 定性定量相结合的方法成为主要风险评估方法。文献[2]将模糊综合评判应用到地下工程风险评估中, 利用专家调查法对地下工程中出现的风险因素进行识别, 对各风险因素的比较判断矩阵进行分析和运算, 得到深基坑施工总风险值大小; 文献[3]引用模糊隶属函数曲线, 得到一定置信水平下风险值所处的区间范围; 文献[4]采用基于二元语义和灰色关联分析的改进失效模式和影响分析(FMEA)法进行风险分析, 对计算值进行风险排序, 得到风险优先等级。这些评估方法虽有助于管理者把握深基坑施工风险程度, 但其大部分数据基于专家主观判断, 客观性不强。

对此, 本文基于AHP(层次分析法)<sup>[5]</sup>, 分别从风险发生概率和风险发生损失等角度对风险值进行分析, 结合专家主观评估的模糊综合评价法<sup>[6]</sup>及客观的数理统计数据, 充分考虑了主观和客观的因素, 所得评估的风险值可信度更高。

## 1 基于数理统计的模糊综合评价

根据风险值的定义<sup>[7-8]</sup>, 风险值可用风险发生概率和后果或损失程度的函数来表示, 则各风险因素风险值可表示为:

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(51678164, 51478118)

$$R_i = P_i C_i (i = 1, \dots, n) \quad (1)$$

式中:

$R_i$ ——第  $i$  个风险因素的风险值;

$P_i$ ——第  $i$  个风险因素的发生概率;

$C_i$ ——第  $i$  个风险因素的发生后果或损失。

AHP 采用求解判断矩阵最大特征值对应的特征向量作为各风险因素的相对权重值可从矩阵特征向量定义去分析理解<sup>[9]</sup>。矩阵与其特征向量关系式为:

$$AX = \lambda X \quad (2)$$

式中:

$A$ ——判断矩阵;

$X$ ——判断矩阵的特征向量;

$\lambda$ ——判断矩阵的特征值。

结合式(1),应用 AHP 分别构造风险发生概率和风险发生的判断矩阵(风险因素的个数即为判断矩阵的阶数),分别求出最大特征值  $\lambda_{\max}$  对应的特征向量。特征向量中的分量即代表各风险因素在概率和损失所占的权重值,两者相乘则为该风险因素的风险值。

风险发生概率可通过对已完工或在建的深基坑工程进行风险因素发生次数统计分析;得到的统计做归一化处理,最终得出客观的各风险因素发生概率权重。此权重与用 AHP 求出的主观的风险发生概率权重值作对比,根据最不利结果取两者最大值作为最终风险发生概率权重值,并应用于风险值的计算中,使求出的风险值更准确客观。而风险总值的求解则在此基础上结合模糊综合评价进行求解。

在模糊综合评价中,最终的评判结果向量由采用 AHP 确定的权重向量和模糊关系矩阵确定,其结果会随模糊算子的选择而发生不同。模糊综合评判的基本模型公式表示为:

$$B = QOZ \quad (3)$$

式中:

$B$ ——评判结果向量;

$Q$ ——权重向量;

$O$ ——模糊算子;

$Z$ ——模糊关系矩阵。

本文将全部的风险因素的发生概率作为权重向量。该权重向量是基于数理统计得到的,即通过风险因素发生次数的真实统计数据获取。而模糊关系矩阵由风险因素发生损失的判断矩阵,通过重要性标度值反推得到,再选取合适的模糊算子进行

运算得到评判结果向量,即是风险等级隶属度。风险总值即为风险等级指标与相应风险等级隶属度乘积之和。

接受准则借鉴隧道风险管理,采用国际隧道与地下空间协会推荐的项目风险判据原则——ALARP(最低合理可行)原则。在 ALARP 原则中,任何工程活动都具有风险,不可能通过预防措施来彻底消除风险,必须在风险水平与利益之间做平衡。

ALARP 风险管理原则图如图 1 所示。图 1 中,风险被分为 3 个区域:若风险评估所得的风险总值处于不可接受区域,必须拒绝或采取强制性的措施来降低风险;若风险值处在风险可接受区,由于风险水平很低,无需采取任何对应措施;若风险总值处于合理可行的最大限度降低区域(ALARP 区域),则需要考察各种降低风险水平措施的效果,并进行对比分析,以此确定风险是否可接受。

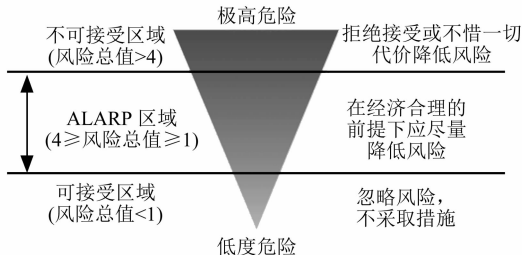


图 1 ALARP 风险管理原则图

Fig. 1 ALARP risk management criteria

## 2 基于数理统计的模糊综合评价

### 2.1 风险因素清单

在深基坑施工过程中,施工安全风险因素众多。各工程的水文地质条件和周边环境各不相同,其风险因素也存在差异性。

本文以南宁轨道交通 5 号线多个车站的深基坑施工情况为例,通过常用的 WBS-RBS 法(工作分解结构-风险分解结构法)<sup>[10]</sup>,得到深基坑施工的目标层、准则层及普遍存在的 9 个风险因素的因素层,从而构建层次结构(见图 2),建立风险因素清单。

在图 2 中,目标层为深基坑施工风险总值,是需要评价的目标;准则层指影响目标实现的准则;因素层为各个对深基坑风险产生影响的因素。

### 2.2 构造判断矩阵

根据层次结构图构造两两相比的判断矩阵。准则层相对于目标层可构建一个判断矩阵,即准则层中的三个因素对于施工风险而言哪个更重要;同

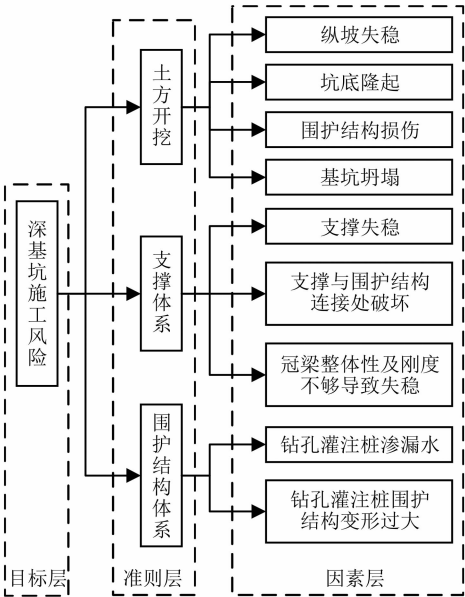


图 2 风险层次结构图  
Fig. 2 Risk hierarchy chart

理,准则层相对于因素层则可构建三个判断矩阵。目前,深基坑施工风险分析常用专家打分法来确定判断矩阵的重要性标度的赋值,具体规则为:若有  $n$  个元素,且元素  $i$  比元素  $j$  重要,令元素  $i$  对元素  $j$  的重要性标度为  $I_{ij}$ ,则  $I_{ij}$  取值范围为 1~9(当元素  $i$  与元素  $j$  同等重要时,  $I_{ij} = 1$ ;当元素  $i$  比元素  $j$  极端重要时,  $I_{ij} = 9$ );  $a_{ij} = I_{ij}/I_{ji}$ ,  $a_{ij}$  为元素  $i$  与  $j$  的重要程度之比,  $a_{ij}$  值越大,则元素  $i$  比  $j$  越重要;  $a_{ij}$  与  $a_{ji}$  为倒数形式。由此构成 1 个  $n$  行  $n$  列的判断矩阵。

2.3 计算权向量与检验判断矩阵一致性

判断矩阵最大特征值的特征向量即为风险因素的权重向量。本文采用常用的方根法来近似求解权重值,步骤如下:

第一步:计算  $\overline{w_i}$

$$\overline{w_i} = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad (i = 1, \cdots, n) \tag{4}$$

式中:

$\overline{w_i}$ ——判断矩阵最大特征值的特征向量第  $i$  个分量的近似值。

第二步:归一化  $\overline{w_i}$

$$w_i = \frac{\overline{w_i}}{\sum_{i=1}^n \overline{w_i}} \quad (i = 1, \cdots, n) \tag{5}$$

式中:

$w_i$ ——第  $i$  个风险因素的权重值。

第三步:求解判断矩阵最大特征值  $\lambda_{\max}$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{w_i} \tag{6}$$

式中:

$A$ ——判断矩阵;  
 $W$ ——相应判断矩阵的特征向量。

第四步:检验一致性

计算一致性指标  $I_C$  为:

$$I_C = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{7}$$

查表 1 确定相应的平均随机一致性指标  $R_I$  (random index),以  $I_R$  表示。

表 1 平均随机一致性指标表  
Tab. 1 Average random consistency index

$n$	$I_R$	$n$	$I_R$
1	0	6	1.26
2	0	7	1.36
3	0.52	8	1.41
4	0.89	9	1.46
5	1.12	10	1.49

计算一致性比例  $CR$  (consistency ratio) 并进行判断,以  $R_C$  表示,则有:

$$R_C = \frac{I_C}{I_R} \tag{8}$$

当  $R_C \leq 0.1$  时,认为判断矩阵的一致性是可以接受的;当  $R_C > 0.1$  时,认为判断矩阵不符合一致性要求,需要对该判断矩阵进行重新修正。

2.4 确定最终权重值与划分风险等级

统计分析现有资料和数据,得到各风险因素发生的概率权重值,并与专家评估结果进行对比,根据最不利情况选取两者中最大者,再归一化处理作为最终权重值。

根据风险因素发生损失严重程度,风险因素的损失等级及描述如表 2 所示。先由专家组评选出损失等级最高的风险因素,再由该风险因素与其他风险因素两两相比的损失等级判断矩阵,得出其他风险因素对应的损失等级,从而得出各风险因素的损失等级统计表。

表 2 风险因素的损失等级及描述

Tab. 2 Loss grades and description of risk factor

损失等级	损失严重性描述
1 级	轻微
2 级	较大
3 级	严重
4 级	很严重
5 级	灾难性

2.5 计算风险总值与确立风险接受准则

首先,根据指标统计表,通过模糊综合评判法,选取相应权重值及合适的模糊算子;然后,结合式(3)计算出风险总值,并由式(1)计算出各风险因素风险值大小;最后,根据 ALARP 准则确定风险总值所处的风险等级,并判断是否需要采取措施以减小施工风险,根据各风险因素风险值来确定需重点防范的风险因素。

3 工程实例

3.1 工程概况

南宁轨道交通 5 号线狮山公园站采用单柱双跨 2 层矩形结构,为地下 2 层岛式站台车站。车站长 272.1 m,宽 19.7 m。基坑开挖深度为 15.4~21.1 m,车站顶板覆土厚度为 2.6~4.7 m。基坑施工范围内地势起伏较大,总体上呈东高西低。本站主体基坑支护结构采用钻孔灌注桩(Φ 1 000 mm,桩心距为 1 300 mm)+内支撑+钢筋网+喷射混凝土的支护形式,基坑采用明挖法施工。坑外水位与填土层的厚度有关,无统一水位。

该站基坑施工为典型的深基坑施工工程,包含了如图 2 所示的 9 个风险因素。

3.2 风险参数计算

首先,由专家组成员根据工程实际情况通过 WBS-RBS 法建立风险因素清单。专家组成员来自设计、施工、监理、监测、风险管理及业主等单位,共计 10 人。根据风险因素清单,由 AHP 建立分层结构图,如图 3 所示。

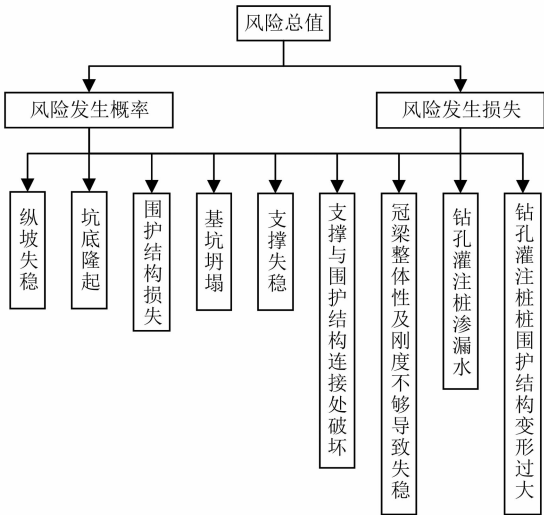


图 3 风险因素分层结构图

Fig. 3 Structure diagram of risk factor layers

采用专家打分法,构造 9 个风险因素的风险发生概率和风险发生损失的判断矩阵  $A_1$  与  $A_2$ ,对专家评分取加权平均值,计算可得  $P_i$  与  $C_i$  对应的权重值,如表 3 所示。由表 3 计算可得, $A_1$  的  $R_c = 0.071\ 9 \leq 0.1$ , $A_2$  的  $R_c = 0.041\ 6$  均满足一致性要求。其中, $P_i$  表示第  $i$  个风险因素发生概率的权重比值, $C_i$  为发生损失的权重比值。

表 3 风险因素发生概率及损失的权重

Tab. 3 Probability weight values of risk factors

<i>i</i>	风险因素	$P_i$	$P_i$ 权重	$C_i$	$C_i$ 权重
1	纵坡失稳	$P_1$	0.056 9	$C_1$	0.078 3
2	坑底隆起	$P_2$	0.152 6	$C_2$	0.056 3
3	围护结构损失	$P_3$	0.127 7	$C_3$	0.033 1
4	基坑坍塌	$P_4$	0.012 9	$C_4$	0.479 5
5	支撑失稳	$P_5$	0.051 6	$C_5$	0.102 4
6	支撑与围护结构连接处破坏	$P_6$	0.120 6	$C_6$	0.028 6
7	冠梁整体性及刚度不够导致失稳	$P_7$	0.051 8	$C_7$	0.129 0
8	钻孔灌注桩渗漏水	$P_8$	0.169 2	$C_8$	0.032 0
9	钻孔灌注桩围护结构变形过大	$P_9$	0.256 8	$C_9$	0.060 8

为确保数理统计结果更贴近实际情况,本文选择与狮山公园站深基坑工程施工方法、周边环境、水文和地质情况类似的南宁轨道交通 5 号线 03 标段已完工车站深基坑工程作为数理统计对象,对施工过程中各风险因素发生次数进行统计,进而统计风险权重向量  $W_3$ (第  $i$  个分量为  $w_{i,3}$ )。将  $W_3$  与  $A_1$  的权重向量  $W_1$ (第  $i$  个分量为  $w_{i,1}$ )做对比后,按最不利情况取其大者并进行归一化处理,得到最终风险因素发生概率权重向量  $W_4$ (第  $i$  个分量为  $w_{i,4}$ ), $W_4 = \max(W_1, W_3)$ 。结果如表 4 所示。

表 4 风险因素发生概率最终权重值表

Tab. 4 Final weight value of occurrence probability of risk factors

<i>i</i>	发生次数/次	$w_{i,3}$	$w_{i,1}$	$w_{i,4}$
1	0	0.000 0	0.056 9	0.045 8
2	2	0.080 0	0.152 6	0.122 8
3	3	0.120 0	0.127 7	0.102 8
4	0	0.000 0	0.012 9	0.010 4
5	3	0.120 0	0.051 6	0.096 6
6	1	0.040 0	0.120 6	0.097 1
7	1	0.040 0	0.051 8	0.041 7
8	6	0.240 0	0.169 2	0.193 2
9	9	0.360 0	0.256 8	0.289 7

根据风险因素发生损失等级标准<sup>[17]</sup>,经专家组评选,风险因素“基坑坍塌”的损失严重程度最高,即风险等级最高。由  $A_2$  反推得出其他风险因素损失等级,进而得到各风险因素引发的不同损失等级

事故次数统计如表 5 所示。

表 5 各风险因素引发的不同损失等级事故次数统计  
Tab.5 Statistics incidents at different loss grades induced by each risk factors

<i>i</i>	事故次数/次				
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
1	0	1	8	1	0
2	1	3	5	1	0
3	0	2	7	1	0
4	0	0	0	0	10
5	0	4	5	1	0
6	1	6	3	0	0
7	0	1	7	2	0
8	2	6	2	0	0
9	0	3	6	1	0

对表 5 数据按损失等级进行归一化处理后,作为模糊关系矩阵  $Z$ 。由模糊综合评判法, $Z$  权重向量取  $W_4$ ,由式(3)得隶属度如表 6 所示,模糊算子为:

$$b_j = \min\left\{1, \sum_{i=1}^m a_i r_{ij}\right\} (j = 1, 2, \cdots, n)$$

表 6 风险等级隶属度表  
Tab.6 Risk grade membership

等级描述	轻微	较大	严重	很严重	灾难性
隶属度	0.060 6	0.307 9	0.489 0	0.132 0	0.010 4

由式(1)得到各风险因素风险值  $R_i$ ,其值为  $W_2$  与  $W_4$  权重值两两相乘所得,如图 4 所示。

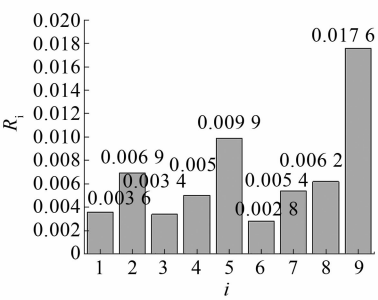


图 4 各风险因素风险值

Fig. 4 Risk value of each risk factor

由表 6 及风险等级赋值<sup>[17]</sup>(由轻微到灾难性分别为 1~5 分)计算可得,风险总值  $R=2.723 7$ 。

3.3 结果分析

由图 1 可知,当  $R=2.723 7$  时,狮山公园站深基坑施工风险处于 ALARP 区域,应采取相应措施以控制风险。

根据图 4,应注意的主要风险因素为钻孔灌注桩围护结构变形过大、支撑失稳及坑底隆起。

针对主要风险因素,应采取如下措施:

1) 基坑开挖时应遵循“竖向分层、纵向分段、先支后挖”的施工原则,做到“分层、分步、对称、平衡、限时”。

2) 在基坑土方开挖过程中,应按设计要求放坡,防止基坑纵向失稳,及时架设钢支撑,及时喷锚支护,减少基坑无支撑暴露时间。

3) 加强巡查与监测,基坑开挖见底时应及时浇筑垫层,避免基坑隆起。

后续监测结果显示:在采取相关措施后,狮山公园站深基坑围护结构变形速率得到了有效控制,其累计变化量维持在低于规范预警值(30 mm)范围之内;在底板浇筑完成后,该项目基坑隆起的检测指标(立柱隆起量)变化速率基本为 0,累计变化量最大未超过 25 mm。狮山公园站深基坑施工全过程处于可控风险范围内,杜绝了支撑失稳的发生。

4 结语

本文主要基于层次分析法和模糊综合评判的原理和风险值公式,结合数理统计数据,计算风险总值和各风险因素风险值,并根据对深基坑施工风险总值及各风险因素风险值的评估,针对风险较大的主要风险因素采取相应措施。本方法有以下优点:

1) 分层结构图形式合理,能通过目标层直接与最底层的各风险因素相联系,不考虑中间复杂的准则层,极大地减少了 AHP 中因多层划分造成的主观误差,提高了风险总值的准确性。

2) 采用数理统计概率数据与专家评测结果相结合的方法来确定权重系数,构建了主客观因素相融合的权重分析体系,使得风险总值的计算更具客观。

参考文献

[1] 钱七虎,戎晓力. 中国地下工程安全风险管理的现状、问题及相关建议[J]. 岩石力学与工程学报,2008(4):649.  
QIAN Qihu, RONG Xiaoli. State, issues and relevant recommendations for security management of China's underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(4):649.  
[2] 包小华,付艳斌,黄宏伟. 深基坑开挖过程中的风险评估及案例分析[J]. 岩土工程学报,2014(增刊1):192.  
BAO Xiaohua, FU Yanbin, HUANG Hongwei. Case study of risk assessment for safe grade of deep excavations[J]. Chinese

- Journal of Geotechnical Engineering, 2014( S1 ):192.
- [ 3 ] 兰守奇,张庆贺. 基于模糊理论的深基坑施工期风险评估[J]. 岩土工程学报, 2009(4):648.
- LAN Shouqi, ZHANG Qinghe. Risk assessment of deep excavation during construction based on fuzzy theory [ J ]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009( 4 ): 648.
- [ 4 ] 程敏,王倩露,林慧龙,等. 基于改进 FMEA 法的深基坑施工风险评价[J]. 土木工程与管理学报, 2018(1):54.
- CHENG Min, WANG Qianlu, LING Huilong, et al. Risk assessment of the deep foundation pit based on the improved FMEA method [ J ]. Journal of Civil Engineering and Management, 2018(1):54.
- [ 5 ] 计春华,张立龙,刘伟. 基于层次分析法的拱座基坑施工安全风险评估指标体系研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018(6):153.
- JI Chunhua, ZHANG Lilong, LIU Wei. Research on safety risk assessment index system of arch foundation pit construction based on analytic hierarchy process [ J ]. Highway Traffic Technology ( application technology version ), 2018( 6 ): 153.
- [ 6 ] 张胜昔,陈为公,王会会,等. 基于 G-FAHP 的深基坑施工风险评价[J]. 土木工程与管理学报, 2016(5):10.
- ZHANG Shengxi, CHEN Weigong, WANG Huihui, et al. Construction risk evaluation of deep foundation pit based on G-FAHP [ J ]. Journal of Civil Engineering and Management, 2016( 5 ): 10.
- [ 7 ] 姚浩,周红波,蔡来炳,等. 软土地区土压盾构隧道掘进施工风险模糊评估[J]. 岩土力学, 2007(8):1753.
- YAO Hao, ZHOU Hongbo, CAI Laibing, et al. Fuzzy synthetic evaluation on construction risk of EPBS during tunnelling in soft soil area [ J ]. Rock and Soil Mechanics, 2007( 8 ): 1753.
- [ 8 ] 黄宏伟,边亦海,深基坑工程施工中的风险管理[J]. 地下空间与工程学报, 2005(4):611.
- HUANG Hongwei, BIAN Yihai. Risk management in the construction of deep excavation engineering [ J ]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005( 4 ): 611.
- [ 9 ] 兰继斌,关于层次分析法优先权重及模糊多属性决策问题研究[D]. 成都:西南交通大学, 2006.
- LAN Jibin. Research on priorities of analytic hierarchy process and problems of fuzzy multiple attribute decision making [ D ]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [ 10 ] 梁士举. 基于 WBS-RBS 方法的地铁车站风险识别研究[J]. 山西建筑, 2016(20):239.
- LIANG Shiju. Research on risk identification of subway station based on WBS-RBS method [ J ]. Shanxi Architecture, 2016( 20 ): 239.
- [ 11 ] 刘保国,沈铭龙,马强. 模糊网络分析法在公路山岭隧道施工风险分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014( 增刊 1 ):2861.
- LIU Baoguo, SHEN Minglong, MA Qiang. Application of fuzzy analysis network process in risk analysis for construction of highway mountain tunnel [ J ]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014( S1 ): 2861.
- [ 12 ] 周宗青,李术才,李利平,等. 浅埋隧道塌方地质灾害成因及风险控制[J]. 岩土力学, 2013(5):1375.
- ZHOU Zongqing, LI Shucai, LI Liping, et al. Causes of geological hazards and risk control of collapse in shallow tunnels [ J ]. Rock and Soil Mechanics, 2013( 5 ): 1375.
- [ 13 ] 徐福卫,田斌,陈海玉. 人工神经网络和可靠度理论用于拱坝坝踵开裂风险的研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016(5):787.
- XU Fuwei, TIAN Bin, CHEN Haiyu. Study of risk of arch dam heel cracking based on artificial neural network and reliability theory [ J ]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016( 5 ): 787.
- [ 14 ] 王成汤,王浩,覃卫民,等. 基于多态模糊贝叶斯网络的地铁车站深基坑坍塌可能性评价[J]. 岩土力学, 2020(5):1.
- WANG Chengtang, WANG Hao, QIN Weimin, et al. Evaluation of collapse possibility of deep foundation pits in metro stations based on multi-state fuzzy bayesian networks [ J ]. Rock and Soil Mechanics, 2020( 5 ): 1.
- [ 15 ] 张永刚,王永红,王梦恕. 渤海湾海底隧道工程施工风险评估与控制分析[J]. 土木工程学报, 2015( 增刊 1 ):414.
- ZHANG Yonggang, WANG Yonghong, WANG Mengshu. Risk assessment of construction for Bohai Bay subsea tunnel [ J ]. China Civil Engineering Journal, 2015( S1 ): 414.
- [ 16 ] 张驰,黄广龙,李娟. 深基坑施工环境影响的模糊风险分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013( 增刊 1 ):2669.
- ZHANG Chi, HUANG Guanglong, LI Juan. Fuzzy risk analysis for influence of deep foundation pit excavation on surrounding environment [ J ]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013( S1 ): 2669.
- [ 17 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通地下工程建设风险管理规范 GB 50652—2011 [ S ]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for risk management of underground engineering construction of urban rail transit GB 50652—2011 [ S ]. Beijing: China Construction Industry Press, 2011.

( 收稿日期:2019-12-23 )