

基于梯形模糊层次法的地铁施工风险评价研究^{*}

郑学召¹ 姜 鹏¹ 刘会林² 吴文彤³

(1. 西安科技大学安全科学与工程学院, 710054, 西安; 2. 中铁十六局集团有限公司, 100018, 北京;
3. 中煤科工集团常州研究院有限公司, 213015, 常州// 第一作者, 教授)

摘 要 针对西安某地铁隧道施工风险, 对多指标人-机-环系统综合评价进行了探讨。在分析人员安全风险、机械设备安全风险、环境风险的基础上, 结合模糊层次分析法, 提出了一种新型的综合评价体系。该体系采用了梯形模糊层次分析法, 来处理地铁隧道施工风险因素影响的不精确性和不确定性; 并从人员安全风险因素、机械安全风险因素、环境风险因素三个方面建立了指标体系, 通过建立成对比较矩阵以及计算指标权重, 得出了模糊评价向量, 从而将地铁隧道施工风险等级划分为不安全、较不安全、一般安全、较安全、很安全等 5 类, 进而确定地铁隧道施工风险等级。梯形模糊层次分析具有较强的工程适用性, 是评估地铁隧道施工风险的一种有效方法。基于该方法得到的地铁隧道施工风险等级, 可为提高地铁隧道施工安全提供可靠的理论依据。

关键词 地铁; 隧道; 施工; 梯形模糊层次分析法; 评价研究

中图分类号 TU714

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.09.013

Metro Construction Risk Evaluation Based on Trapezoidal Fuzzy Hierarchy Method

ZHENG Xuezhao, JIANG Peng, LIU Huilin, WU Wentong

Abstract In view of a metro tunnel construction risk in Xi'an City, the comprehensive evaluation of multi-index man-machine-environment system is discussed. Based on an analysis of personnel safety risk, mechanical equipment safety risk and environmental risk, and combined with fuzzy analytic hierarchy method, a new comprehensive evaluation system is proposed. The system uses trapezoidal fuzzy analytic hierarchy method to deal with the inaccuracy and uncertainty of the influences caused by risk factors during metro tunnel construction. Then, the index system is established from personnel safety risk factors, mechanical safety risk factors and environmental risk factors three aspects. By setting up a pairwise comparison matrix and the calculation index weight, a fuzzy evaluation vector is

obtained, which categorizes the metro tunnel construction risks into five levels: unsafe, relatively unsafe, generally safe, relatively safe, and highly safe, and furthermore determines the risk level of metro tunnel construction. Due to the strong engineering applicability, the trapezoidal fuzzy analytic hierarchy method is an effective method to evaluate the construction risk of metro tunnels. The metro tunnel construction risk level obtained from this method can provide a reliable theoretical basis for improving the safety of metro tunnel construction.

Key words metro; tunnel; construction; fuzzy analytic hierarchy method; evaluation

First-author's address School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, 710054, Xi'an, China

地铁施工空间狭小, 其隐蔽性、复杂性和不确定性等诸多因素, 形成了地铁施工技术难、施工条件差、施工条件不确定性大, 以及人员与机械协同作业等特点^[2], 造成了地铁施工事故多发的局面。近几年, 地铁施工安全问题越来越受到社会的关注。许多学者和专业人员进行了各种安全评价研究, 以深入了解这一问题。地铁工程安全评价分析起始于 20 世纪 50 年代, 文献[3]提出了隧道施工的安全评价特点及基本准则。80 年代, 文献[4]提出了用图表法将风险发生的概率以及风险造成的影响表现出来, 这种方法简单、直观, 便于观察比较结果。文献[5]构建了工程项目风险管理模型, 该模型将地铁施工中的风险因素进行了量化, 并对其进行了安全评价, 而且对评价结果进行了分析并给出了相应管理方法。但该模型只能对地铁工程前期进行量化, 因此, 最终的评价结果准确度较低。我国地铁施工安全评价起步较晚, 文献[7]采用专

^{*} 国家重点研发计划重点专项项目(2018YFC0808201); 陕西省自然科学基金资助项目(2018JM5009)

家调查法、层次分析法对地铁施工过程中的风险进行了识别和评估,并给出了地铁施工事故风险评价等级标准。文献[8]提出了采用风险矩阵的方法对地铁施工中出现的风险进行了分析,并从工期和成本的角度对每一段的地铁施工的风险进行了量化,将地铁施工的风险分为四类进行评价。但该理论并没有将评价结果进行量化,不能实现对地铁隧道施工进行客观评价。

基于以上问题,本文采用梯形模糊层次分析法对地铁施工的风险进行分析,建立地铁施工风险评价指标体系,利用梯形模糊数法确定各评价指标的权重,建立模糊评价向量,从而得到地铁施工风险评价集,实现对地铁隧道施工风险的客观评价。

1 模糊层次分析法

层次分析法^[9](AHP)在1977年首次提出。目前,层次分析法已经成功应用于风险评估、风险预测等多个领域。AHP的优点是可以确定一系列因素的相对重要性,并将有形定量标准与无形定性标准的判断相结合。尽管AHP有其优点和普遍性,它也因其无法充分处理评估对象的固有不确定性和不精确性而受到制约。这种不确定和不精确的问题可以通过使用模糊集合理论来解决,该理论在数学上表示不确定性和模糊性,通过将定性问题转换为定量问题来解决。

在地铁施工过程中,许多因素会对地铁施工安全产生影响,如人员安全风险因素、机械安全风险因素以及环境风险因素等。因此,地铁施工风险应该从整体的角度进行评估,而不是考虑单一因素或多个因素的评估。层次分析法以层次分解的方式构建目标,包括了目标发生的因素和子因素,该方法是综合确定不同因素对地铁施工安全影响的最

佳方法之一。对于影响地铁施工安全的各种因素可以通过模糊集合理论来处理,将定性影响转变成定量模糊数从而改善固有的不确定性和不精确性,并得到更加真实的结果。因此,本文采用模糊层次分析法对地铁施工风险进行评估。许多研究人员开发了各种模糊层次分析法,每种方法都有其优点和缺点,考虑到简单性和实用性,本文利用梯形模糊层次分析法。

2 地铁施工风险评估系统

2.1 建立指标体系

地铁隧道施工是一个动态的、复杂的过程。要科学合理地地铁施工风险进行评价,必须要确定能够准确反映地铁施工实际情况的指标参数,建立一个科学合理的地铁施工风险指标体系。指标体系中指标过多,可能会增加评价指标体系的复杂度以及评价难度,而忽略了其中的重要因素。指标过少,评价过程虽然简单易行,但难以反映地铁施工风险的客观状况^[10]。因此,评价指标体系应能全面反映地铁施工风险的综合情况,以确保评价过程中的全面性、准确性以及客观性。

为了研究地铁隧道施工事故的危害,寻找地铁隧道施工过程中的薄弱环节以及提高施工安全性的技术途径,在对地铁隧道施工安全的“人-机-环”系统进行分析的基础上,提出地铁隧道施工事故风险评价指标体系的总体结构。在评价体系总体结构下,对人员安全风险因素(B_1)、机械安全风险(B_2)、环境安全风险因素(B_3)进一步细化,建立二级指标体系。利用模糊理论将指标中定性描述转换为定量分析,以满足评价过程的客观性以及合理性。根据层次分析法将评价指标体系分为目标层、中间层以及因素层,如图1所示。

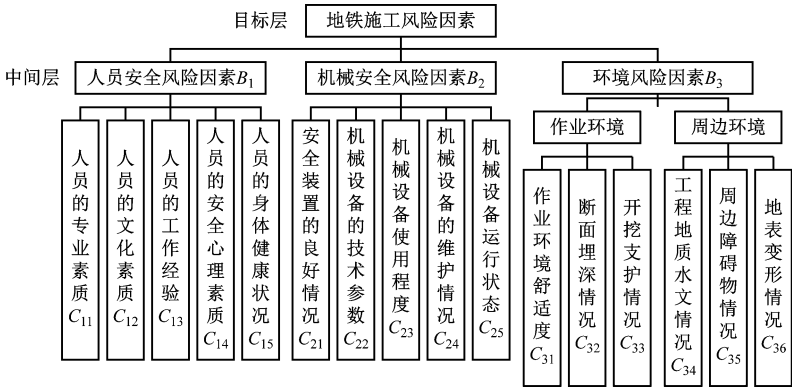


图1 地铁施工风险评价指标体系

2.2 指标权重的计算

语言变量是描述因素和子因素重要性的方法之一^[11],为了方便数学运算,应将语言描述转换为模糊尺度。去模糊化是一种逆变换,它将模糊域的输出映射回清晰域。表 1 中列出了用于成对比较的相对重要性的梯形模糊尺度。

表 1 语言变量转换表	
语言变量	梯形模糊数
同等重要	(1,1,1,1)
稍微重要	(1,5/4,7/4,2)
明显重要	(3/2,7/4,9/4,5/2)
强烈重要	(2,9/4,11/4,3)
绝对重要	(5/2,11/4,13/4,7/2)

2.2.1 建立成对比较矩阵

通过比较内部组元素而建立的成对比较矩阵是指标权重计算的基础。成对比较矩阵可以表示为:

$$X = x_{ij}(i, j = 1, 2, \cdots, n)$$
 (1)

式中:
X——成对比较矩阵;
 x_{ij} ——矩阵的元素;
n——子因素的因子数量。

2.2.2 检查一致性

通常情况下,专家评价所得出的比值具有主观性,与施工现场的实际情况存在偏差,要求对构造的比较矩阵进行一致性检验。具体步骤如下:首先,计算出模糊矩阵的最大特征值(λ_{\max});其次,使用一致性比率 R_C 来判断矩阵的一致性,一致性比率可以写为:

$$R_C = I_C/I_R$$
 (2)

$$I_C = (\lambda_{\max} - 1)/(n - 1)$$
 (3)

式中:
 I_C ——一致性指数;
 I_R ——随机指数(见表 2)。

只有当 $R_C < 0.10$ 时,矩阵的一致性才是可接受的。否则,应修改配对比较矩阵,直到它们一致。

表 2 随机一致性指数(I_R)										
序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
I_R	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	

2.2.3 计算权重

不同因素对地铁施工安全有不同的影响,因

此,利用梯形模糊方法计算不同因素权重,其步骤如下:

梯形模糊方法利用组内所有元素值之和的平均值表示对该组元素的权重的一种方法。成对矩阵 $T_{ra,m,i}$ 之和为:

$$\overline{T_{ra}} = \sum_{i=1}^n T_{ra,m,i} = \sum_{i=1}^n \left[\prod_{j=1}^n x_{i,j} \right]^{1/n}$$
 (4)

式中:
 $T_{ra,m,i}$ ——成对比较矩阵中第 i 行的梯形模糊数的几何平均数。

那么第 i 个因子或子因子的梯形模糊权重可以写成:

$$W_{Tra,i} = T_{ra,m,i}(\emptyset) \overline{T_{ra}}$$
 (5)

式中:
 $W_{Tra,i}$ ——第 i 个因子或子因子的梯形模糊权重。

因子(W_{Tra})和因子 $B_i(W_{Tra}; B_i)$ 下的子因子的梯形模糊权重向量可以写为:

$$W_{Tra} = (W_{Tra,B_1}, W_{Tra,B_2}, W_{Tra,B_3})$$
 (6)

$$W_{Tra,B_i} = (W_{Tra,C_{i1}}, W_{Tra,C_{i2}}, \cdots, W_{Tra,C_{ik}})$$
 (7)

首先,利用式(2)和式(3)判断子因子成对比较矩阵的一致性指数是否可接受,接着将得到的子因子成对比较矩阵,利用式(4)分别得出成对比较矩阵的梯形模糊数的几何平均数以及成对比较矩阵之和,然后利用式(5)得出每个子因子的梯形模糊权重。通过以上公式计算得出的子因素权重,如表 3 所示。

2.3 模糊评价向量的建立

如表 4 所示,建立了从语言变量到模糊评估数的转换,以评估层次系统中的因素或子因素。因素和子因素的风险等级分为 5 个等级:非常危险(VD)、危险(D)、较危险(M)、安全(S)和非常安全(VS)。为了避免决策群体在评价子因素时的主观偏好和知识局限性,标准风险等级由地铁施工安全影响的子因素决定。将收集的参数(子因子)数据与按各种风险等级分类的参数范围进行比较,可以得到子因子的模糊评估数。因子 B_i 下的 k 个子因子的模糊评价向量表示为:

$$F_{Tra,B_i} = (f_{Tra,c_{i1}}, \cdots, f_{Tra,c_{ij}}, \cdots, f_{Tra,c_{ik}})$$
 (8)

式中:
 F_{Tra,B_i} —— B_i 下的梯形模糊评价向量;
 $f_{Tra,c_{ij}}$ —— c_{ij} 下梯形模糊评估数。

表 3 一致性检查结以及因素和子因素的计算权重

因素	模糊权重向量	模糊权重	最大的特征值	一致性比率
C_{11}	(0.177, 0.224, 0.352, 0.446)	0.294		
C_{12}	(0.228, 0.286, 0.424, 0.512)	0.358		
C_{13}	(0.125, 0.153, 0.233, 0.293)	0.197	4.087	0.032
C_{14}	(0.099, 0.118, 0.176, 0.222)	0.151		
C_{15}	(0.114, 0.147, 0.237, 0.285)	0.186		
C_{21}	(0.152, 0.183, 0.273, 0.346)	0.225		
C_{22}	(0.207, 0.258, 0.396, 0.499)	0.321		
C_{23}	(0.298, 0.374, 0.559, 0.678)	0.454	3.051	0.044
C_{24}	(0.168, 0.235, 0.344, 0.481)	0.297		
C_{25}	(0.216, 0.273, 0.383, 0.512)	0.332		
C_{31}	(0.107, 0.131, 0.208, 0.274)	0.179		
C_{32}	(0.229, 0.285, 0.419, 0.501)	0.362		
C_{33}	(0.158, 0.198, 0.304, 0.377)	0.26		
C_{34}	(0.125, 0.153, 0.23, 0.287)	0.199	4.094	0.035
C_{35}	(0.147, 0.176, 0.269, 0.343)	0.237		
C_{36}	(0.186, 0.251, 0.353, 0.445)	0.323		
B_1	(0.152, 0.183, 0.273, 0.346)	0.225		
B_2	(0.298, 0.374, 0.559, 0.678)	0.454	3.051	0.044
B_3	(0.207, 0.258, 0.396, 0.499)	0.321		

表 4 5 个标准风险等级的因素及其模糊数

语言变量	梯形模糊数
非常危险 (VD)	(7, 8, 9, 10)
危险 (D)	(5, 6, 7, 8)
较危险 (M)	(3, 4, 5, 6)
安全 (S)	(1, 2, 3, 4)
非常安全 (VS)	(0, 1, 2, 3)

因子 (B_1 、 B_2 和 B_3) 的模糊评估数可以通过模糊评估向量乘以子因子的权重来计算。为了获得所需的结果,进行归一化,即因子除以权重之和所得到的模糊评估数:

$$f_{Tra, B_i} = \sum_{j=1}^k (W_{Tra, c_{ij}} (\otimes) f_{Tra, c_{ij}}) / (\sum_{j=1}^k W_{Tra, c_{ij}}) \quad (9)$$

式中:

f_{Tra, B_i} ——因子 B_i 的梯形模糊评估数;

$W_{Tra, c_{ij}}$ ——子因子 C_{ij} 的梯形模糊权重。

模糊层次分析法计算出的各因素的模糊评价向量分别为:

$$F_{Tra} = (f_{Tra, B_1}, f_{Tra, B_2}, f_{Tra, B_3}) \quad (10)$$

3 地铁施工风险评级

将地铁施工风险分为 5 类:5 级、4 级、3 级、2 级和 1 级,其目的是根据算出的模糊数确定地铁施工风险。表 5 简单列出了每个分类风险等级以及 5 个风险等级的模糊数区间。基于权重向量和因素的模糊评价向量,可以计算出模糊数。地铁施工的安全风险 (A) 可以通过权重乘以风险因素的模糊评估向量来计算。为了获得所需的结果,进行标准化,即评估的安全风险除以权重之和:

$$Z_{Tra} = \sum_{i=1}^n (W_{Tra, B_i} (\otimes) f_{Tra, B_i}) / \sum_{i=1}^n W_{Tra, B_i} \quad (11)$$

式中:

Z_{Tra} ——梯形模糊方法评估地铁施工风险的结果。

将评估后的模糊数与 5 个地铁施工风险等级的模糊数区间进行比较 (见表 5),可以得到地铁施工最终风险等级。

表 5 地铁施工安全风险等级

风险级	情况描述	风险等级的梯形模糊数区间
5	不安全	$(7, 8, 9, 10) \leq Z_{Tra}$
4	较不安全	$(5, 6, 7, 8) \leq Z_{Tra} < (7, 8, 9, 10)$
3	一般安全	$(3, 4, 5, 6) \leq Z_{Tra} < (5, 6, 7, 8)$
2	较安全	$(1, 2, 3, 4) \leq Z_{Tra} < (3, 4, 5, 6)$
1	很安全	$(0, 1, 2, 3) \leq Z_{Tra} < (1, 2, 3, 4)$

4 实例研究

4.1 工程概况

西安某地铁二期工程车站,站台宽度 11 m。车站主体为单柱双跨结构,采用 4 导洞 PBA 法(洞柱法)施工,附属采用明、暗挖结合施工。该站为地下二层 11 m 岛式站台车站,采用单柱双跨拱顶直墙混凝土框架结构,全长 208 m。

4.2 评价结果分析

为了检验评估系统的有效性和方法的正确性,对西安某地铁隧道施工现场进行了安全评价分析,如表 6 所示。由表可知:

评价结论如下:

1) 地铁施工综合评估结果为一般安全,所以要对整个系统进行监测。

2) 地铁施工子因素风险中第一风险为人员安全风险,第二风险为环境风险,第三风险为机械设

表 6 西安某地铁施工现场各子因素的模糊评估数

子因素	梯形模糊数	子因素	梯形模糊数
C_{11}	(7,8,9,10)	C_{24}	(7,8,9,10)
C_{12}	(0,1,2,3)	C_{25}	(1,2,3,4)
C_{13}	(3,4,5,6)	C_{31}	(7,8,9,10)
C_{14}	(5,6,7,8)	C_{32}	(3,4,5,6)
C_{15}	(1,2,3,4)	C_{33}	(1,2,3,4)
C_{21}	(0,1,2,3)	C_{34}	(1,2,3,4)
C_{22}	(0,1,2,3)	C_{35}	(0,1,2,3)
C_{23}	(5,6,7,8)	C_{36}	(5,6,7,8)

备安全风险,说明在地铁隧道施工风险中作业人员的影响很大。

3) 各子因素的风险评估结果如下:在对人员的安全风险评价中,风险度最大的为人员的专业素质,其次是其安全心理素质,人员的工作经验与其文化程度的高低对风险的影响最低。从而得出:提高人员的专业素质是最直观、最有效的方法,尤其是针对应急突发事件;工作经验和文化程度对风险的预防也有重要的作用。在机械设备的安全风险因素考虑中,首要的就是保证机械设备的完善程度并及时维护。作业的舒适度是在环境风险中提高安全生产的重要因素,包括特殊作业情况下工作环境的温度、湿度以及个体防护等;其次应该考虑的为结构的可靠性,特别是在跨度较大的作业中系统的稳定性。

5 结论

1) 融合了梯形模糊分析法、层次分析法提出了一种地铁施工风险综合评价模型,并构建了开放式

的评价指标体系。

2) 梯形模糊层次分析法能够有效地将定性影响转变定量模糊数,减少地铁施工安全评价的不精确性和不准确性,使评价结果更具真实性和客观性。

参考文献

[1] 黄宏伟,叶永峰,胡群芳. 地铁运营安全风险现状分析[J]. 中国安全科学学报,2008(7):55.

[2] 朱立. 浅谈地铁工程施工的风险管理[J]. 山东工业技术, 2016(17):101.

[3] EINSTEIN H H. Risk and risk analysis in rock engineering [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1996, 2 (11):141.

[4] 温树东. 城市轨道交通建设安全评价与分析[D]. 大连:大连交通大学,2014.

[5] 付菲菲. 地铁工程施工安全评价体系研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011.

[6] 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(1):13.

[7] 黄宏伟,朱琳,谢雄耀. 上海地铁 11 号线关键节点工可阶段工程风险评估[J]. 岩土工程学报,2007(7):1103.

[8] 王晶,谭跃虎,王鹏飞,等. 地铁隧道施工过程中风险分析与控制[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2009,10 (4):379.

[9] SATTY T L. A scaling method for priorities in hierarchical structures [J]. Journal of Mathematical Psychology, 1977, 15 (3):234.

[10] 付红安. 中隔壁-台阶复合工法地铁隧道施工过程动态风险预警研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2015.

[11] 郝长胜,盛军坤,樊雪敏,等. 基于模糊层次分析法的矿山安全综合评价模型[J]. 煤炭技术,2016,35(2):234.

(收稿日期:2018-11-01)



上海市域线金山铁路进出站闸机正式投入使用

8月28日起,全新的金山铁路进出站闸机正式亮相。除了支持上海交通卡、纸质车票外,还可以通过“上海公共交通乘车码”扫一扫,实现快捷过闸。

记者了解到,上海公共交通乘车码(以下简称“乘车码”)在金山铁路的上线应用为国内市域铁路场景的首创。该项目由金山铁路公司和久事集团旗下上海公共交通卡公司共同合作开发。本次闸机改造工作不单单针对新增的刷码功能,对原本可用的交通卡刷卡功能也进行了优化升级,同时支持各省区发行的交通联合版交通卡刷卡应用。

(摘自2020年8月30日上海广播清晨新闻)