

文章编号:1673-2049(2017)06-0021-07

采用改进区间层次分析法评估地铁工程地下水风险

周念清¹, 高逸群¹, 黄钟晖², 张世荣²

(1. 同济大学 水利工程系, 上海 200092; 2. 南宁轨道交通集团有限责任公司, 广西 南宁 530021)

摘要:将模糊数学理论引入到地铁工程地下水风险评估中,用改进层次分析法中区间数来代替模糊评估中确定数值评估地下水风险。以南宁市轨道交通一号线火车站站作为研究对象,根据区域地质及水文地质条件,分别对勘察、设计、施工和运营阶段地下水风险进行评估。通过类高斯方法计算区间隶属度,构建区间数判断矩阵,利用区间可能度互补矩阵进行修正。计算结果表明:施工过程中防管涌、流砂等施工质量和现场抽水管理对地下水风险影响最大;按照风险区间数符合度评估标准,南宁地铁火车站站地下水风险综合评估等级为“良”;所得结论对类似地铁工程地下水风险评估和防控具有借鉴和指导作用。

关键词:改进区间层次分析法;模糊综合评估;地铁工程;地下水;风险评估

中图分类号:TU46 **文献标志码:**A

Groundwater Risk Assessment by Interval-based Improvement of Analytic Hierarchy Process in Subway Project

ZHOU Nian-qing¹, GAO Yi-qun¹, HUANG Zhong-hui², ZHANG Shi-rong²

(1. Department of Hydraulic Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Nanning Rail Transit Co., Ltd., Nanning 530021, Guangxi, China)

Abstract: The fuzzy mathematics theory was introduced into groundwater risk assessment in subway project, the interval number was instead of the fuzzy evaluation to determine the groundwater risk in the improved analytic hierarchy process. The railway station of Nanning Metro Line 1 was taking as the research object. Based on the area geology data and hydrogeologic condition, the groundwater risk was evaluated respectively from investigation, design, construction and operation phases. The membership degree was calculated by the Gaussian method, and the interval number judgment matrix was constructed, the complementarity matrix of interval possibility was used to correct the membership degree. The calculation results show that the construction quality and pumping management are the greatest influences on the groundwater risk in the construction process, such as the prevention of piping and running sand. According to the evaluation criteria of the interval number, the groundwater risk rating of Nanning railway station is good, and the results have reference and guidance for similar railway project about groundwater risk assessment.

Key words: interval-based improvement of analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation; metro project; groundwater; risk assessment

收稿日期:2017-07-11

基金项目:国家自然科学基金项目(41572285)

作者简介:周念清(1964-),男,湖南石门人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:nq.zhou@tongji.edu.cn。

0 引言

随着城市人口的不断增长和经济的快速发展,交通拥挤已成为许多城市发展的重要制约因素。为了缓解城市交通压力,越来越多的城市选择修建地铁和高架桥来加以解决,使交通向立体空间延伸。地铁建设和地下空间开发均存在不同程度的风险,其中地下水是一个重要的风险因子。地铁工程在施工或运营期间发生的事故大多与地下水相关^[1-2],因此对地下水进行风险评估是地铁工程风险管理的必要手段。通过研究和解决地下水问题,确保地铁工程的施工和运行安全,防患于未然,且对其他地铁工程建设也具有借鉴和指导意义^[3-4]。

国内外对地下工程中地下水风险做了较多研究。Benardos 等^[5]提出了基于岩体工程系统脆弱指数的 TBM 掘进风险评估方法,建立了概率模型并进行参数的不确定性分析;Isaksson 等^[6]提出了一类基于风险评估的时间-成本模型,结合场地水文地质条件得到最优的隧道施工方式;王志杰等^[7]通过模糊综合层次分析法计算得出隧道施工对地下水环境的影响程度;周念清等^[8]提出了一种基于模糊数学理论探讨评估地铁工程中地下水风险的模糊综合评估方法。上述这些研究方法都是将模糊的风险值用确定数值来表示,但由于不同领域的研究人员对风险因子的判断权重不同,用确定数值代表风险值具有一定的主观性,且对计算结果影响较大。鉴于客观事物本身的复杂性以及人们思维的模糊性和局限性,往往只能给出区间范围进行框定。为此,曾文艺等^[9]提出了基于区间数的大系统综合决策方法,解决了评估思维的定量化问题。在此之后,区间数模糊评估已引入到多个研究领域,并得到了广泛的应用^[10]。

本文将改进的区间层次分析法引入到南宁地铁工程地下水风险评估模型中,从勘察、设计、施工及运营 4 个方面深入分析了引起地铁工程地下水风险的影响因素,建立风险层次结构模型,用区间数来代替结构模型中的确定数值,使指标评估标准及得分区间化,并通过判断模型对南宁地铁轨道交通一号线火车站站地下水风险进行评估,以解决地下水风险判断存在的模糊性与局限性问题。

1 改进区间层次分析法

1.1 基本原理

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process,

AHP) 是 20 世纪 70 年代中期由美国运筹学家托马斯·塞蒂提出,它是一种定性和定量相结合、系统化、层次化的分析方法,包括目标层、准则层和因素层。层次分析法通过建立层次结构模型、构造成对比较阵、计算权向量并做一致性检验,然后计算组合权向量并做组合一致性检验等步骤完成模型计算。

改进区间层次分析法 (Interval-based Improvement of Analytic Hierarchy Process, IIAHP) 是在层次分析法的基础上,利用区间数来代替原有分析方法中的具体数值,将专家们的评估结果用一个区间数进行限定,通过权向量的计算和一致性检验,得到的结果也是一组区间数,更符合人们对风险的客观认识。

目标层包含多个准则层,同一准则层中有多个不同影响因素,利用 Satty 提出的 1~9 标度的互反法^[11],进行因素成对比较,形成判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$,其中 $a_{ij} = [\underline{a}_{ij}, \bar{a}_{ij}]$, \underline{a}_{ij} 和 \bar{a}_{ij} 分别为影响因素 a_{ij} 的下限和上限。

各准则层包含的影响因素对上层准则层的权重值是通过区间数特征向量法来求解,区间数特征向量法是特征向量法在区间数领域的扩展和应用^[12]。按影响因素的上、下限分解为 2 个判断矩阵,然后求其最大特征根对应的归一化特征向量,区间数判断矩阵的单因素权重向量 w 为

$$w = (\alpha \underline{w}, \beta \bar{w}) \quad (1)$$

$$\text{式中: } \alpha = \left(\frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\underline{a}_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\underline{a}_{ij}}} \right)^{1/2}; \beta = \left(\frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\bar{a}_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\bar{a}_{ij}}} \right)^{1/2}; \underline{w},$$

\bar{w} 均为特征向量, $\underline{w} = (\underline{w}_1, \underline{w}_2, \dots, \underline{w}_n)$, $\bar{w} = (\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_n)$ 。

计算因素层对准则层的权重值,通过准则层对目标层权重值之间的传递,得到因素层对目标层的影响权重值^[12]。计算过程中全部采用区间数形式进行模糊综合评估,得出的综合评估结果有可能发散。计算因素层对目标层的综合影响权重值 w_i 的可能度为 $p(w_i \geq w_j)$,其表达式为

$$p(a \geq b) = \max\{1 - \max\{\frac{\bar{b} - \underline{a}}{L(a) + L(b)}, 0\}, 0\} \quad (2)$$

式中: $L(a)$, $L(b)$ 分别为区间数 a , b 的长度, $L(a) = \bar{a} - \underline{a}$, $L(b) = \bar{b} - \underline{b}$, \bar{a} , \underline{a} 分别为 a 的上限和下限, \bar{b} , \underline{b} 分别为 b 的上限和下限。

由式(2)构成区间数可能度互补矩阵 $Q = (p_{ij})_{n \times n}$,通过修正改进区间数层次分析法各因素的综合权重,保证计算结果的合理性^[13-14]。综合权重

的修正值 $w' = (w'_i)_{n \times n}$, 其中

$$w'_i = \frac{1}{n} - \frac{n}{4\alpha(n-1)} + \frac{1}{2\alpha(n-1)} \sum_{k=1}^n p_{ik} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中: $\alpha \geq \frac{n-1}{2}$ 。

1.2 模糊综合评估模型

1.2.1 改进的类高斯区间隶属度

假设有某一影响因素 X , 专家判断其区间数得分为 $[x, \bar{x}]$, 而区间数等级本身就具有模糊性。改进的类高斯隶属度函数目标就是将区间数的上、下限本身的模糊性量化, 然后根据判断准则将量化的隶属度再转化为区间隶属度。

指标因素质量等级的隶属度函数 $\mu^n(x)$ 为

$$\mu^n(x) = \begin{cases} 0 & x \leq \bar{x}_{k-1} \\ e^{-\frac{|x-c|^\gamma}{\sigma}} & \bar{x}_{k-1} \leq x \leq \bar{x}_k \\ 1 & \bar{x}_k \leq x \leq \bar{x}_{k+1} \\ e^{-\frac{|x-c|^\gamma}{\sigma}} & \bar{x}_k \leq x \leq \bar{x}_{k+1} \\ 0 & x \geq \bar{x}_{k+1} \end{cases} \quad (4)$$

式中: k 为 1~5 之间的整数, 分别对应的质量等级为“优、良、中、一般、差”; c 为区间中值; γ, σ 为常参数, 取值分别为 3.0 与 0.1 时, 类高斯函数能更好拟合区间数隶属关系, 可保证区间控制的灵敏度^[15-16]。

计算评估指标因素的隶属度 μ_{ij} 和 $\bar{\mu}_{ij}$, 再根据区间数判断准则将隶属度转化为区间数的形式^[11], 可以细致地刻画单项评估指标对于不同质量等级的区间隶属度 $\mu^k = [\underline{\mu}^k, \bar{\mu}^k]$, $\underline{\mu}^k, \bar{\mu}^k$ 分别为 μ^k 的下限和上限。

1.2.2 基于改进区间层次分析法的模糊综合评估

将专家对影响因素打分结果结合类高斯区间隶属度函数, 计算各影响因素模糊区间得分 F_{ij}

$$F_{ij} = [\underline{F}_{ij}, \bar{F}_{ij}] = \mu^k F^k \quad (5)$$

式中: F^k 为对应质量等级标准得分区间限值。

评估对象综合区间得分 H 为

$$H = [\underline{H}, \bar{H}] = w' F \quad (6)$$

式中: F 为评估对象综合区间得分限值。

1.2.3 模糊综合评估等级判断

计算得出评估对象的综合区间得分, 并不一定属于某一标准的等级区间, 利用区间数符合度, 准确判断综合得分区间的符合等级^[17]。计算综合区间得分与 5 个评估等级的符合度 $\{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5\}$, 则最终的综合区间得分符合度 f_i 为

$$f_i = 1 - (|p(H \geq F_i) - 0.5| +$$

$$|p(H \leq F_i) - 0.5|) \quad (7)$$

$$Z = \max\{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5\} \quad (8)$$

式中: F_i 为每个等级标准区间数。

综合区间得分的符合等级为 Z 所对应的标准等级。

2 工程概况

南宁地铁一号线火车站站位于邕江北岸 II 级阶地, 属侵蚀堆积河谷低阶地, 见图 1。地铁车站主体结构为地下三层, 长 265.0 m, 标准段宽 44.7 m, 底部标高约 54.6 m, 基坑深度为 21.5 m。

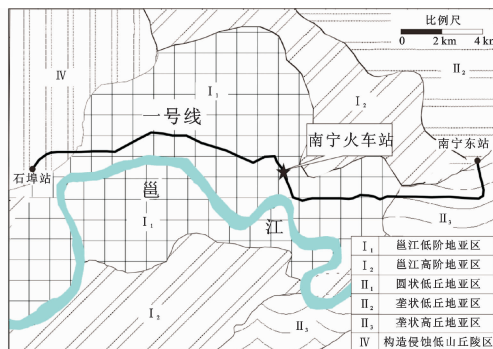


图1 南宁轨道交通一号线地貌分区图

Fig. 1 Geomorphologic Regional Map of Nanning Metro Line 1

根据地铁车站详细勘察资料, 区域内分布的地层岩性自上而下分别为素填土、粉质黏土、粉土、粉细砂、圆砾层, 见图 2。在钻探揭露深度范围内有 2 个地下水含水层: 第 1 层为孔隙潜水含水层, 第 2 层为第四系松散岩类孔隙承压含水层。第 1 层地下水主要赋存于素填土中, 主要由大气降水补给, 也有少量生活废水渗漏补给, 该层地下水水量较小, 对车站施工及运营安全影响不大。第 2 层地下水主要赋存于砾砂、圆砾、卵石层中, 主要由大气降水垂向入渗及邕江地表水侧向补给, 且与邕江水力联系密切。丰水期邕江水向地下水补给, 而在枯水期地下水向邕江排泄。丰水期稳定水位较高, 埋深 5.0~6.20 m, 标高为 69.35~70.35 m; 枯水期埋深为 9.20~11.2 m, 标高为 64.45~66.62 m。丰枯季节地下水位波动幅度在 5 m 左右, 且地下水存在一定水力坡度, 对地铁施工安全影响十分明显。地铁站深基坑施工时, 必须采取围护结构和降水相结合的办法, 使地下水位降低至基坑设计底板以下 1~2 m 才能保证开挖施工的安全。

另外, 由于南宁市正在进行“水城”建设, 抬高邕江地表水位补给城市内河^[18], 也会引起地下水位的整体抬升, 尤其是丰水期可能会加大地下水对地铁

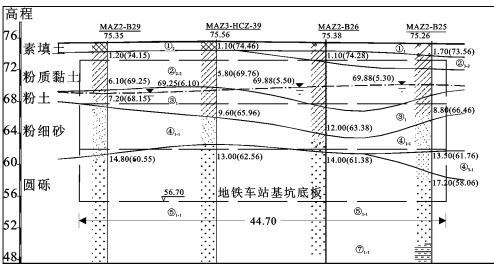


图2 南宁地铁火车站工程地质剖面图(单位:m)

Fig. 2 Engineering Geological Profile of Nanning Railway Station (Unit:m)

施工及运营的安全风险。

3 地下水风险评估模型

将风险管理理论应用到地铁工程地下水风险评估中,采用合理的方法识别地铁工程地下水风险因子,分析风险因子的作用方式及其影响程度,建立地下水风险因子评估模型,在此基础上对地铁工程事故发生的可能性及其后果做出合理判断和综合评估,并提出地铁工程地下水风险防控措施。

3.1 地下水 IIAHP 模型建立

针对地铁工程存在的地下水风险,从勘察、设计、施工和运营 4 个阶段全面系统地识别潜在风险因子,并将地下水风险分成 14 项指标。地下水风险评估指标体系如表 1 所示。

表 1 地铁工程地下水风险评估指标体系
Tab. 1 Indicator System for Groundwater Risk Assessment in Metro Project

目标层	准则层		因素层	
	阶段	因素指标	因素	因素指标
地铁工程地下水风险 U	勘察	U ₁	地层结构及含水层划分	U ₁₁
			潜水及承压水静止水位	U ₁₂
			水文地质参数计算与选取	U ₁₃
			地下水的腐蚀性	U ₁₄
	设计	U ₂	止水帷幕设计	U ₂₁
			基坑抗突涌验算	U ₂₂
			基坑防水加固设计	U ₂₃
	施工	U ₃	防管涌、流砂等施工质量	U ₃₁
			止水材料选用	U ₃₂
			施工工序安排	U ₃₃
			现场抽水管理	U ₃₄
	运营	U ₄	地下水动态监测体系	U ₄₁
			车站地下水渗漏控制	U ₄₂
			应急水事故处理机制	U ₄₃

为了评估南宁地铁一号线火车站站地下水风险,咨询了相关领域设计人员、专家及施工管理人员

18 人,并对各个风险因子进行专业判断和打分。在此基础上,利用 Satty 提出的 1~9 标度法,通过两两比较确定各因子的相对权重构造判断矩阵,准则层对目标层重要程度的判断矩阵 $A_{U_i \rightarrow U}$ 为

$$A_{U_i \rightarrow U} = \begin{bmatrix} [1,1] & [2,3] & [\frac{1}{6},\frac{1}{5}] & [6,7] \\ [\frac{1}{3},\frac{1}{2}] & [1,1] & [\frac{1}{3},1] & [5,6] \\ [5,6] & [1,3] & [1,1] & [5,6] \\ [\frac{1}{7},\frac{1}{6}] & [\frac{1}{6},\frac{1}{5}] & [\frac{1}{6},\frac{1}{5}] & [1,1] \end{bmatrix}$$

勘察、设计、施工和运营各因素层对准则层重要程度的判断矩阵 $A_{U_{1j} \rightarrow U_1}, A_{U_{2j} \rightarrow U_2}, A_{U_{3j} \rightarrow U_3}, A_{U_{4j} \rightarrow U_4}$ 分别为

$$A_{U_{1j} \rightarrow U_1} = \begin{bmatrix} [1,1] & [3,5] & [3,4] & [5,6] \\ [\frac{1}{5},\frac{1}{3}] & [1,1] & [\frac{1}{4},\frac{1}{3}] & [3,4] \\ [\frac{1}{4},\frac{1}{3}] & [3,4] & [1,1] & [5,6] \\ [\frac{1}{6},\frac{1}{5}] & [\frac{1}{4},\frac{1}{3}] & [\frac{1}{6},\frac{1}{5}] & [1,1] \end{bmatrix}$$

$$A_{U_{2j} \rightarrow U_2} = \begin{bmatrix} [1,1] & [\frac{1}{4},\frac{1}{3}] & [3,4] \\ [3,4] & [1,1] & [3,4] \\ [\frac{1}{4},\frac{1}{3}] & [\frac{1}{4},\frac{1}{3}] & [1,1] \end{bmatrix}$$

$$A_{U_{3j} \rightarrow U_3} = \begin{bmatrix} [1,1] & [3,4] & [2,3] & [3,4] \\ [\frac{1}{4},\frac{1}{3}] & [1,1] & [1,2] & [\frac{1}{4},\frac{1}{3}] \\ [\frac{1}{3},\frac{1}{2}] & [\frac{1}{2},1] & [1,1] & [\frac{1}{6},\frac{1}{5}] \\ [\frac{1}{4},\frac{1}{3}] & [3,4] & [5,6] & [1,1] \end{bmatrix}$$

$$A_{U_{4j} \rightarrow U_4} = \begin{bmatrix} [1,1] & [4,5] & [4,5] \\ [\frac{1}{5},\frac{1}{4}] & [1,1] & [\frac{1}{6},\frac{1}{5}] \\ [\frac{1}{5},\frac{1}{4}] & [5,6] & [1,1] \end{bmatrix}$$

按照上述步骤,利用特征向量法求解最大特征根对应的归一化特征向量,并利用系数 α, β 进行修正,其判断矩阵中各影响因子的权重 w 为

$$w = [\alpha \underline{w}, \beta \overline{w}] = [[0.207\ 3, 0.239\ 0], [0.145\ 3, 0.209\ 9], [0.462\ 1, 0.535\ 0], [0.043\ 3, 0.053\ 3]]$$

式中: $\alpha = 0.857\ 9; \beta = 1.026\ 3$ 。

同理可以计算得到因素层对各自准则层的权重值。根据区间数可能度互补矩阵计算指标元素综合

权重修正值。由此可得出准则层对目标层、因素层的综合权重值,计算结果见表 2。

对相应准则层的单因素权重值以及因素层对目标层的综合权重值,由计算结果可以得出,地铁工程施工过程中地

表 2 区间层次分析指标权重值

Tab. 2 Index Weights Based on Interval AHP

目标层		准则层			因素层			
指标	系数	指标	权重	系数	因素指标	单因素权重	综合指标权重	权重修正值
U	$\alpha=0.857\ 9$	U_1	$[0.207\ 3,0.239\ 0]$	$\alpha_1=0.933\ 8$	U_{11}	$[0.498\ 6,0.559\ 1]$	$[0.103\ 3,0.133\ 6]$	$0.101\ 6$
					U_{12}	$[0.116\ 5,0.133\ 0]$	$[0.024\ 1,0.031\ 8]$	$0.029\ 1$
				$\beta_1=1.026\ 8$	U_{13}	$[0.263\ 8,0.278\ 7]$	$[0.054\ 7,0.066\ 6]$	$0.069\ 8$
					U_{14}	$[0.055\ 0,0.056\ 0]$	$[0.011\ 4,0.013\ 4]$	$0.035\ 3$
		U_2	$[0.145\ 3,0.209\ 9]$	$\alpha_2=0.948\ 0$	U_{21}	$[0.254\ 4,0.274\ 3]$	$[0.037\ 0,0.057\ 6]$	$0.079\ 7$
					U_{22}	$[0.582\ 4,0.628\ 0]$	$[0.084\ 6,0.131\ 8]$	$0.097\ 3$
				$\beta_2=1.022\ 2$	U_{23}	$[0.111\ 1,0.119\ 8]$	$[0.016\ 1,0.025\ 2]$	$0.059\ 6$
					$\beta=1.026\ 3$	U_3	$[0.462\ 1,0.535\ 0]$	$\alpha_3=0.908\ 6$
	U_{32}	$[0.092\ 8,0.115\ 0]$	$[0.042\ 9,0.061\ 4]$	$0.082\ 4$				
	$\beta_3=1.008\ 1$	U_{33}	$[0.084\ 4,0.102\ 8]$	$[0.039\ 0,0.054\ 9]$				$0.079\ 0$
		U_{34}	$[0.282\ 2,0.303\ 8]$	$[0.130\ 4,0.162\ 2]$				$0.114\ 6$
	U_4	$[0.043\ 3,0.053\ 3]$	$\alpha_4=0.954\ 6$	U_{41}		$[0.626\ 1,0.661\ 6]$	$[0.027\ 1,0.028\ 7]$	$0.029\ 4$
				U_{42}		$[0.079\ 5,0.083\ 9]$	$[0.003\ 4,0.003\ 6]$	$0.006\ 3$
			$\beta_4=1.003\ 9$	U_{43}		$[0.249\ 0,0.258\ 5]$	$[0.010\ 8,0.011\ 2]$	$0.011\ 4$

下水的风险影响最大,占到整体技术的 46.2%~53.5%,其次为勘察阶段资料的准确性和可靠性,占到整体风险值的 20.7%~23.9%,二者对地铁站工程风险影响总和达 70%以上。因此,在施工过程中如发现异常情况,需立即进行补充勘察并开展风险分析工作。

按照每个准则进行单因素判断评分,勘察阶段地层结构及含水层划分对地下水风险影响最大,占到勘察部分技术的 46.9%~56%;在设计阶段,基坑抗突涌验算占比重大,达到 58.2%~62.8%;在施工阶段,防管涌、流砂等施工质量和现场抽水管理是决定其地下水风险大小的重要因素,分别为 44.9%~48.6%和 28.2%~30.4%,所以在地铁施工过程中应该特别注意这 2 个方面的质量把控;在运营阶段,地下水动态监测体系和应急水事故处理机制二者能占整体风险值的 91%。按照综合指标权重评估,防管涌、流砂等施工质量和现场抽水管理是影响整体风险的主要因素。

表 4 南宁地铁火车站站区段地下水风险评估指标

Tab. 4 Evaluation Index of Groundwater Risk in Nanning Railway Station Section

指标	U ₁₁	U ₁₂	U ₁₃	U ₁₄	U ₂₁	U ₂₂	U ₂₃
得分	[81.4,87.9]	[86.8,92.8]	[77.7,82.2]	[90.1,95.3]	[86.8,93.1]	[88.1,94.0]	[91.4,96.8]
指标	U ₃₁	U ₃₂	U ₃₃	U ₃₄	U ₄₁	U ₄₂	U ₄₃
得分	[87.3,92.1]	[84.9,90.1]	[81.4,86.5]	[85.8,90.8]	[85.8,90.8]	[88.8,94.6]	[89.1,95.7]

所示,其中 U_c 为综合得分。

从改进的模糊综合评估法得出:单因素指标得

3.2 地下水风险评估

针对南宁地铁一号线火车站站区段地下水风险处理情况,咨询专家及施工人员,参照表 3 中评估等级标准区间得分,对各项指标进行打分,并按照得分上、下限分别做均值处理,得出火车站站地铁区段地下水风险评估指标值,如表 4 所示。因勘察阶段地层结构及含水层划分,施工阶段防管涌、流砂等施工质量和现场抽水管理对整体风险影响权重最高,所以上述 3 个指标对整体风险敏感性影响较大,应注意专家对指标风险打分的一致性检验,提高计算结果的准确度。

表 3 评估等级标准区间得分

Tab. 3 Score of Evaluation Level Standard Range

评估等级	差	一般	中	良	优
标准得分	[0,59.9]	[60,69.9]	[70,79.9]	[80,89.9]	[90,99.9]

利用类高斯隶属度函数,计算影响地下水单项评估的区间隶属度,按照专家打分和质量标准等级,计算其单因素得分及评估对象的综合得分,如图 3

分最高的为施工部分的防管涌、流砂等施工质量,说明本工程有较高的施工质量,在施工过程中足够重

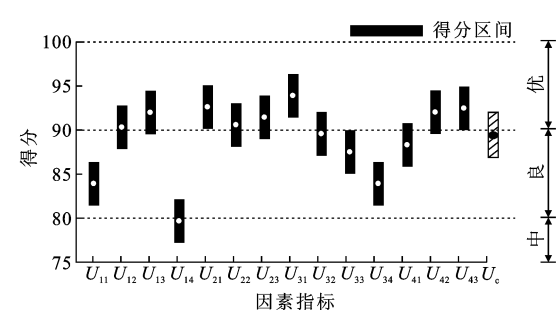


图3 单因素得分及评估对象综合得分

Fig.3 Single Factor Score and Overall Score of Assessed Objective

视地下水所能引起的管涌、流砂等问题;地下水的腐蚀性得分最低,表明此次工程未全面考虑地下水的腐蚀因素,对地下水风险具有较大影响。综合得分为[86.9,91.8],在评估等级为“良”和“优”之间,具体隶属等级需要进行进一步计算。

3.3 综合等级评估与结果分析

按照判断综合区间得分符合等级: $Z=\max\{0,0,0,0.399\,0,0.249\,7\}=0.399\,0$,地铁工程火车站站地下水风险处于“良”等级。亦可判断单因素指标的区间得分符合等级,判断结果如表5所示。

由表5可以看出,14项评估指标因子大部分处

表5 单因素指标区间符合等级

Tab.5 Interval Level of Single Factor Index

指标	U ₁₁	U ₁₂	U ₁₃	U ₁₄	U ₂₁	U ₂₂	U ₂₃	U ₃₁	U ₃₂	U ₃₃	U ₃₄	U ₄₁	U ₄₂	U ₄₃
中	0.000	0.000	0.000	0.357	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
良	0.861	0.278	0.039	0.291	0.000	0.238	0.119	0.000	0.371	0.649	0.861	0.543	0.039	0.000
优	0.000	0.371	0.609	0.000	0.689	0.410	0.530	0.861	0.278	0.000	0.000	0.106	0.609	0.662
符合等级	良	优	优	中	优	优	优	优	良	良	良	良	优	优

于“优”等级。由此可以说明:南宁地铁一号线火车站站工程关于地下水专项勘察资料较详尽,对地层结构及含水层划分、地下水补给来源等水文地质条件调查比较清楚,对水文地质参数的计算与选取合理;设计中对降水方案进行了数值模拟计算,降水井布置的数量满足工程要求,优化的降水方案可行;施工阶段按照设计方案和相关规范的要求进行,对地下水进行动态监测,并对周围建筑因工程降水引起的地面沉降进行监控;运营阶段建立了完善的地铁周围地下水动态监测,对地铁站主体结构沉降与变形、周围建筑物及管线沉降等实施监控,并建立相应的应急预案体系。不过,地下水的腐蚀性评估等级为“中”,说明整个工程对地下水腐蚀性造成的风险指标重视程度不够,可能会增加地下水产生风险的几率,需要在后续地铁工程建设中引起足够的重视。

4 结 语

(1)通过对南宁地铁工程地下水风险影响因素分析,分别从勘察、设计、施工和运营管理4个环节提取14个地下水风险影响因子,采取专家打分的方式对地下水的风险识别和影响程度进行预判。

(2)基于区间数模糊综合评估方法,构建区间数层次分析模型,利用区间数代替层次分析法中确定数值来判断风险,引入区间数理论中综合互补矩阵、区间符合度判断计算结果的符合等级,综合考虑不同专家对工程中地下水风险评估的模糊性,最终得

到不同影响因子对工程风险的影响等级。通过建立模型对南宁轨道交通一号线火车站站地下水风险进行分析,大部分风险因子的评估等级为“优”,地下水风险综合判断等级为“良好”。判断结论与实际工程风险评估结果相符,且计算结果为多组区间数,符合人们对风险不确定性的认识,解决了风险评估过程中存在的模糊性与局限性问题。

(3)地下水对施工的影响最大,其中防管涌、流砂等施工质量和现场抽水管理是决定地下水风险大小的的重要因素,施工过程中要引起高度重视;勘察资料的准确性也不容忽视,尤其是含水层的划分以及水文地质参数的选取,对地铁工程降水设计和施工方案的选择也非常重要,应重视勘察阶段水文地质调查和抽水试验工作。评估过程中,地下水的腐蚀性考虑不足,存在一定的风险,需要在以后的工程中给予关注。此外,南宁市开展水城建设抬高地表水水位会因入渗引起地下水位的抬升,对地铁运营可能会产生一定的影响,也应给予重视。

参考文献:

References:

[1] GHOBADI M H, FIRUZI M, ASGHARI-KALJAH E. Relationships Between Geological Formations and Groundwater Chemistry and Their Effects on the Concrete Lining of Tunnels (Case Study: Tabriz Metro Line 2)[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75:987.

- [2] 许增容. 铁路隧道工程地下水风险评估探析[J]. 铁道工程学报, 2011(6): 39-43.
XU Zeng-rong. Discussion and Analysis of Underground Water Risk Evaluation for Railway Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011 (6): 39-43.
- [3] 胡绮琳. 地下水对地铁工程影响及防治对策研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2009.
HU Qi-lin. Study on the Metro Construction About Ground Water and the Control Measures[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2009.
- [4] CHAE G T, YUN S T, CHOI B Y, et al. Hydrochemistry of Urban Groundwater, Seoul, Korea: The Impact of Subway Tunnels on Groundwater Quality[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2008, 101(1/2/3/4): 42-52.
- [5] BENARDOS A G, KALIAMPAKOS D C. A Methodology for Assessing Geotechnical Hazards for TBM Tunnelling—illustrated by the Athens Metro, Greece [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41(6): 987-999.
- [6] ISAKSSON T, STILLE H. Model for Estimation of Time and Cost for Tunnel Projects Based on Risk Evaluation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2005, 38(5): 373-398.
- [7] 王志杰, 王宁, 李昭, 等. 应用模糊层次分析法研究隧道施工对地下水环境的影响[J]. 铁道建筑, 2016(11): 80-83.
WANG Zhi-jie, WANG Ning, LI Zhao, et al. Study on Influence of Tunnel Construction on Groundwater Environment Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process[J]. Railway Engineering, 2016(11): 80-83.
- [8] 周念清, 魏诚寅, 娄荣祥, 等. 基于模糊数学理论探讨评判地铁工程中地下水风险[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(11): 1629-1633.
ZHOU Nian-qing, WEI Cheng-yin, LOU Rong-xiang, et al. Groundwater Risk Assessment of Metro Project Based on Fuzzy Mathematical Method[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(11): 1629-1633.
- [9] 曾文艺, 罗承忠, 肉孜阿吉. 区间数的综合决策模型[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(11): 48-50.
ZENG Wen-yi, LUO Cheng-zhong, ROZI Haji. Comprehensive Decision Model of Interval-number [J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 1997, 17(11): 48-50.
- [10] WU Y, XU H, XU C, et al. Uncertain Multi-attributes Decision Making Method Based on Interval Number with Probability Distribution Weighted Operators and Stochastic Dominance Degree [J]. Knowledge-based Systems, 2016, 113: 199-209.
- [11] 马丽叶, 卢志刚, 胡华伟. 基于区间数的城市配电网经济运行模糊综合评价[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 163-171.
MA Li-ye, LU Zhi-gang, HU Hua-wei. A Fuzzy Comprehensive Evaluation Method for Economic Operation of Urban Distribution Network Based on Interval Number [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 163-171.
- [12] 潘国营, 秦永泰, 马亚芬. 基于改进模糊层次分析法的煤层底板突水危险性评价[J]. 煤矿安全, 2016, 47(9): 194-197.
PAN Guo-ying, QIN Yong-tai, MA Ya-fen. Risk Evaluation of Coal Floor Water Inrush Based on Improved Fuzzy Analytic Hierarchy Process [J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(9): 194-197.
- [13] LOURENZUTTI R, KROHLING R A. A Generalized TOPSIS Method for Group Decision Making with Heterogeneous Information in a Dynamic Environment [J]. Information Sciences, 2016, 330: 1-18.
- [14] YUE Z L. An Extended TOPSIS for Determining Weights of Decision Makers with Interval Numbers [J]. Knowledge-based Systems, 2011, 24(1): 146-153.
- [15] 李文. 基于类高斯隶属函数的自适应模糊推理建模研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(6): 1433-1437.
LI Wen. Research on Adaptive Fuzzy Inference Modeling Method Based on Gaussian-type Membership Function [J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(6): 1433-1437.
- [16] DAS A, BERA U K, MAITI M. A Breakable Multi-item Multi Stage Solid Transportation Problem Under Budget with Gaussian Type-2 Fuzzy Parameters [J]. Applied Intelligence, 2016, 45(3): 923-951.
- [17] 陆顺. 模糊多层次综合评价在边坡岩体稳定性评价中的应用[J]. 勘察科学技术, 2014(4): 32-37.
LU Shun. Application of Multi-level Fuzzy Comprehensive Evaluation Method in Stability Evaluation of Slope Rock Mass [J]. Site Investigation Science and Technology, 2014(4): 32-37.
- [18] 王大洋, 莫崇勋, 钟欢欢, 等. 基于综合权重可变模糊集的最严格水资源管理评价[J]. 人民珠江, 2016, 37(5): 10-14.
WANG Da-yang, MO Chong-xun, ZHONG Huanhuan, et al. Evaluation of Strictest Water Resources Management Level Based on Comprehensive Weight Variable Fuzzy Set Method [J]. Pearl River, 2016, 37(5): 10-14.