

基于模糊数学理论探讨评判地铁工程中地下水风险

周念清¹, 魏诚寅¹, 娄荣祥², 缪俊发²

(1. 同济大学 水利工程系, 上海 200092; 2. 上海广联建设发展有限公司, 上海 200438)

摘要: 采用模糊综合评价法, 以上海地铁 10 号线南京东路车站为例, 在全面识别勘察、设计、施工和运营过程中地下水风险因子的基础上, 结合统计资料和专家评价, 详细阐述了风险评估模型的建立及评价过程, 得到了不同阶段地下水风险因子的权重, 并对地下水风险进行了综合评判. 研究结果对上海地铁工程地下水风险控制具有指导意义.

关键词: 地铁; 地下水; 模糊综合评价; 风险评估; 风险控制

中图分类号: U 231.1; P 641.7

文献标识码: A

Groundwater Risk Assessment of Metro Project Based on Fuzzy Mathematical Method

ZHOU Nianqing¹, WEI Chengyin¹, LOU Rongxiang², MIAO Junfa²

(1. Department of Hydraulic Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Guanglian Construction Development Co. Ltd., Shanghai 200438, China)

Abstract: Fuzzy comprehensive evaluation method is used to do the groundwater risk assessment of East Nanjing Road Station of Metro Line 10 in Shanghai. Meanwhile, the establishment of risk assessment model and evaluation process is described in detail based on the comprehensive identification of groundwater risk factors during the process of investigation, design, construction and operation, combining with the analysis of project information and expert evaluation. Weights of groundwater risk factors are obtained, as well as a comprehensive evaluation on the groundwater risk. The research conclusion may provide a technical guidance for the groundwater risk analysis of metro projects in Shanghai.

Key words: metro; groundwater; fuzzy comprehensive method; risk assessment; risk control

近些年来, 随着城市轨道交通的快速发展, 大中城市都开始纷纷兴建地铁. 由于地铁工程投资巨大、施工周期长、技术复杂、不可预见风险因素众多, 致使地铁施工事故频发, 其中地下水问题是导致地铁事故发生的重要因素, 特别是地铁车站深基坑和盾构隧道施工面临的风险尤为突出.

风险评价始于 20 世纪 60 年代, 国内外不少学者曾对此进行了研究, 取得了许多成果. 有关地铁与隧道工程风险分析与评价, Sturk 等在瑞典的斯托克霍姆环线隧道建设中, 提出了一种大型地下工程建设风险决策分析系统^[1]; Kampmann 等结合哥本哈根地铁工程提出了 40 多种灾害、10 种风险类型和 48 个风险减轻措施^[2]; 兰守奇等利用模糊综合评判法对地铁车站深基坑施工进行了风险评估^[3]; 王岩等运用层次-模糊综合评判法对地铁隧道进行了安全评估^[4]; 徐岩等对沈阳地铁的降水工程专门进行了风险分析^[5].

这些研究成果有不少内容涉及到地下水风险, 但没有一个专门针对地下水风险的评估体系. 本文以上海地铁 10 号线南京东路站为例, 根据勘察、设计、施工和运营过程中的地下水问题, 建立了地下水风险因子评估模型, 对风险进行综合评价, 提出了适合上海地铁工程的地下水风险评价体系及风险控制措施, 为地铁建设风险防患服务.

1 地下水风险类型及评估方法

1.1 地下水风险类型

地铁工程地下水风险是地下水对地铁工程产生危害的可能性, 地铁工程地下水的危害有多种表现形式, 常见的危害主要有以下几种: ①车站基坑坑底突涌(承压水水头压力); ②坑底隆起; ③坑侧渗漏、

收稿日期: 2010-09-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40872178); 同济大学土木工程学院光华团队基金资助项目

第一作者: 周念清(1964—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为工程地下水数值模拟与水环境评价.

E-mail: nq.zhou@tongji.edu.com

底侧突涌(围护缺陷,水头差造成渗漏);④管涌、流砂;⑤基坑斜坡滑移、坍塌;⑥降水诱发地层压缩导致过量沉降;⑦车站和隧道渗漏.其中,基坑底突涌、管涌、流砂等主要是发生在细颗粒(尤其是粉土、粉砂等)饱和含水的土层中.

1.2 风险评估方法

风险评估的方法有很多,每一种方法都有它的适用范围和不足之处.近几年来许多学者对各种经典的评估方法进行了改进,吸取了各种方法的优点.为了克服传统风险矩阵方法的不精确和不确定性,Markowski等在风险矩阵法中引入了模糊逻辑的概念^[6];Chin等利用数据包络分析进行了失效模式和后果分析,对传统的风险优先数(risk priority number, RPN)做了改进^[7];Shalev等将故障树方法与状态监测数据结合,使其能够在系统的整个生命周期内实时更新并且进行维护,而不仅限于设计阶段^[8];Rezaie等提出了推广蒙特卡罗模拟法,考虑了时间、成本等不确定因素之间的联系^[9].

地铁工程是一个复杂的体系,具有隐蔽性和不确定性.地铁工程地下水风险因子就更为繁杂多样.如要将各种因素尽量全面概括,又要使整个评估模型可以有序、有效地运行,就需要通过层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)来将各类风险因子进行分层分析,确定各因子的权重,使管理者明确应该在哪方面引起更多的重视.同时,针对地铁工程地下水产生危害的不确定性和模糊性特点,可以利用模糊数学原理(Fuzzy)来得到一个更为接近真实情况且更为精确的评价.因此,这里采用层次-模糊分析法对地铁车站工程进行地下水风险分析.

2 地下水风险评估模型的建立

基于模糊数学理论建立地铁工程地下水风险评估模型,模型主要分成三部分:前期准备、模糊综合评判、风险评价.

2.1 前期准备

2.1.1 建立风险评估小组

风险评估对专家的要求很高,信息的不完备就对专家的知识 and 经验提出了更高的要求.评估选择的专家应该是既具有系统的理论知识,又具有丰富的相关工程经验,进行风险辨识以及之后的隶属度确定都是由专家来完成.

2.1.2 识别风险来源

风险分析及评价建立在风险因子识别基础之上,

必须全面系统地识别所有可能的潜在风险因子,对于没有识别出来的因子是不能对其进行分析的.地铁工程从勘察、设计到施工和运营,无不与地下水的活动有关,而且不同阶段风险因子的作用和影响有别.

2.1.3 构建风险层次结构模型

工程背景是构建风险层次结构模型的基础.上海地铁 10 号线南京东路车站为地下三层,主体结构长 152 m,宽 21.1 m.在场地地面以下 75.4 m 深度范围内,按地层成因、土层结构及工程特性可划分为 8 层,地层多呈水平层状分布,属滨海平原相古河道沉积,沿地铁站基坑轴向分布的地层及岩性如图 1 所示.图中,括号内,外数字分别表示地层的标高和深度.受古河道沉积影响,地层埋藏分布与上海市区正常沉积地层存在差异,其中第⑥层缺失.与本工程设计、施工有关的地下水为赋存于场地浅部土层中的潜水及深部承压水,场地第⑤层以上为潜水含水层,水位埋深为 0.82~1.50 m(标高为 1.33~1.95 m);下部第⑦、⑨层分别为第 I、II 承压含水层,承压水水位埋深为 10.85 m(标高为 -6.97 m),高出基坑底板 14.67~16.23 m.

根据上海地区的土体性质及地下水分布规律,结合本工程特点,将地下水风险从勘察、设计、施工和运营四个方面分成 14 项指标.层次结构分析模型如图 2 所示.

建立层次结构分析模型之后,对每一层次中各因子相对重要性要由专家分析判断给出.但通常人们只能较为精确地对两个事物的重要性做出比较,而要对两个以上的事物做出精确的综合判断,就需要通过层次分析法来构造判断矩阵,通过两两比较来确定各因子的相对权重.为了避免判断失误,对构造的判断矩阵还需检验其一致性.在构建判断矩阵时,假设因子 i 与 j 比较得到判断 C_{ij} ,则因子 j 与 i 比较得到判断 $C_{ji} = 1/C_{ij}$, $C_{ii} = 1$.权重计算的实质是计算该判断矩阵的最大特征根及相应的特征向量,即求解满足判断矩阵 R 的特征根 λ_{\max} 和特征向量 W :

$$RW = \lambda_{\max} W \quad (1)$$

式中: W 的分量 W_i 是对应于单元单排序的权值.

将 λ_{\max} 对应的特征向量归一化后, $\sum_{i=1}^n w_i = 1$, 记为 $w = (w_1, \dots, w_m)$, w 为权重向量.如果判断矩阵不具有完全一致性时,则 $\lambda_{\max} > n$,为了衡量不一致程度,需要计算它的一致性指标(consistence index, CI),用 C_1 表示如下:

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

表 2 总判断矩阵

Tab.2 The total judgement matrix

	U_1	U_2	U_3	U_4	W_0	w_0 归一化
U_1	1	2	1/5	6	1.245	0.202
U_2	1/2	1	1/7	2	0.615	0.100
U_3	5	7	1	7	3.956	0.644
U_4	1/6	1/2	1/7	1	0.330	0.054

子制约层因素对准则层 U_i 的判断矩阵 U_1 见表 3.

表 3 U_1 判断矩阵Tab.3 Judgement matrix of U_1

	U_{11}	U_{12}	U_{13}	U_{14}	W_1	w_1 归一化
U_{11}	1	5	4	6	3.310	0.588
U_{12}	1/5	1	1/2	3	0.740	0.131
U_{13}	1/4	2	1	5	1.257	0.223
U_{14}	1/6	1/3	1/5	1	0.325	0.058

判断矩阵 U_1 的最大特征值 $\lambda_{\max} = 4.161$, 计算得到一致性比率 $C_R = 0.060 < 0.1$, 矩阵一致性可以接受. 同理, 可得到判断矩阵 U_2, U_3, U_4 的最大特征值 λ_{\max} 分别为 3.037, 4.146, 3.056; 权重向量分别为 $w_2 = (0.258, 0.637, 0.105)$, $w_3 = (0.605, 0.202, 0.083, 0.110)$, $w_4 = (0.092, 0.217, 0.691)$, 并且各矩阵都通过了一致性检验.

2.2 模糊综合评判

2.2.1 定义语言变量

当工程信息不完备的时候, 即使是专家也很难给出精准的评估, 而只能给出一个大概的评价. 在这种情况下, 就需要用到语言变量, 其主要功能是用于提供一种系统化的方法以近似刻画复杂及没有明确定义现象的特征, 如: 在评价一个结构时, “安全性” 是论域 Q , 则“很安全、安全、不是很安全、不安全” 就是论域 Q 的一个模糊子集, 称为评语等级论域 V . 针对南京东路地铁站工程各项指标进行评判, 建立评语集 $V = (\text{好, 较好, 较差, 差})$.

2.2.2 确定模糊关系矩阵及隶属度

多层次系统的模糊综合评判是从最低层开始逐层向上做出多层次综合评判, 直至最高的目标层次得到原问题的综合评判结果. 这里从影响指标出发, 先对制约层各因素进行一级模糊综合评判, 再对目标层因素进行二级模糊综合评判.

(1) 一级模糊综合评价. 令隶属度 $R_{ij} = \{r_{ij1}, r_{ij2}, \dots, r_{ijn}\}$, 则第 2 层次单因素评价矩阵为

$$R_i = \begin{bmatrix} R_{i1} \\ R_{i2} \\ \vdots \\ R_{im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & \cdots & r_{i1n} \\ r_{i21} & r_{i22} & \cdots & r_{i2n} \\ \vdots & \vdots & r_{ijk} & \vdots \\ r_{im1} & r_{im2} & \cdots & r_{imn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

得到一级模糊综合评价集:

$$B'_i = w_i \circ R_i = [w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in}] \circ$$

$$\begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & \cdots & r_{i1n} \\ r_{i21} & r_{i22} & \cdots & r_{i2n} \\ \vdots & \vdots & r_{ijk} & \vdots \\ r_{im1} & r_{im2} & \cdots & r_{imn} \end{bmatrix} = [b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{in}] \quad (4)$$

式中, “ \circ ” 为模糊算子, 根据不同情况, 选择相应的合适算法.

对于南京东路地铁站工程采用专家调查法来获取评价矩阵, 模糊算子取为两矩阵的点积, 即采用加权平均模糊综合评判模型. 得到 $B'_1 = (0.464 \quad 0.445 \quad 0.091 \quad 0)$, $B'_2 = (0.752 \quad 0.248 \quad 0 \quad 0)$, $B'_3 = (0.510 \quad 0.490 \quad 0 \quad 0)$, $B'_4 = (0.621 \quad 0.379 \quad 0 \quad 0)$. 将评语集中“好、较好、较差、差” 分别用分值代替, $V = (4 \quad 3 \quad 2 \quad 1)$, 进一步可以得到勘察这一因素的综合评价分值 $I_B = B'_1 V^T = (0.464 \quad 0.445 \quad 0.091 \quad 0) \cdot (4 \quad 3 \quad 2 \quad 1)^T = 3.373$. 同理可以得出 $I_{B2} = 3.752$, $I_{B3} = 3.510$, $I_{B4} = 3.621$. 勘察在 4 个因素中分值最低, 可见勘察是此工程的薄弱环节, 需要引起重视.

(2) 二级模糊综合评价. 二级模糊综合评价集为

$$B = w_0 \circ B' = w_0 \circ \begin{bmatrix} w_1 \circ R_1 \\ w_2 \circ R_2 \\ \vdots \\ w_p \circ R_p \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (5)$$

由一级模糊评价集得出:

$$B' = \begin{bmatrix} B'_1 \\ B'_2 \\ B'_3 \\ B'_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.464 & 0.445 & 0.091 & 0 \\ 0.752 & 0.248 & 0 & 0 \\ 0.510 & 0.490 & 0 & 0 \\ 0.621 & 0.379 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

则 $B = w_0 \circ B' = (0.531 \quad 0.451 \quad 0.018 \quad 0)$. 同样, 模糊算子取为两矩阵的点积. 最后得到整个工程地下水风险综合评价分值 $I_B = 3.513$. 对比各分值对应的语言变量, 可见整个工程总体状况“较好”.

2.3 风险评价

通过对上海地铁 10 号线南京东路站工程的风

险分析,可以看出工程总体状况较好,但是与设计、施工、运营相比较而言,在勘察这一环节中略有欠缺.而之前的权重分析中得出勘察是仅次于施工的第二重要环节,因此,如果在施工中发现异常情况,有必要进行补充勘察.

3 地铁工程地下水风险控制

通过建立地铁工程地下水风险评估模型及分析,可以得到上海地区的地铁地下水风险特点.根据层次分析法得出的各因素权重,在勘察、设计、施工和运营中,施工阶段(U_3)的权重最大,即施工阶段对于地铁地下水风险的影响最为重大,其次为勘察阶段,因此对于这两方面要特别引起重视.勘察期间应进行专项水文地质工作,通过各类试验充分了解含水层特性,并且实行动态设计和施工;地铁工程设计过程中,尤其要注意对地下水的处理.必要时要结合数值模拟方法,对降水方案进行优化,评价降水井分布方案的合理性和经济性^[10];施工中地下水的风险最大,如掉以轻心,不按图施工,或偷工减料,往往会造成严重的工程事故.因此,应严格按照设计方案和相关规范进行施工,实行严格管理;运营期间则存在较多的潜在风险因素,如列车长期动荷载造成周围土体孔隙水压变化从而导致地面沉降等,应建立完善的地铁监测体系,对地铁周围建筑物及管线沉降等进行实时监控,并建立合适的应急预案.

4 结论

(1) 在上海地区地铁工程地下水风险影响因素中,施工是为最重要的工程环节,需要给予重视.同时,勘察中的土层划分、设计中的基坑抗突涌验算占权重较大的部分,都是引起工程事故的主要因素,应重点予以关注.

(2) 通过模糊综合评判方法,对信息不完备的地铁工程地下水风险进行了分析,得出上海地铁 10 号线南京东路地铁站工程总体安全状况较好,但勘察是其薄弱环节,容易出现问题.尤其是在水文地质

参数的选取方面,有待在今后的工程中引起重视,建议对类似工程作详细的水文地质勘察,查明含水层特性,以避免不必要的风险.

参考文献:

- [1] Sturk R, Olsson L, Johansson J. Risk and decision analysis for large underground projects, as applied to the Stockholm ring road tunnels [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 1996, 11(2): 157.
- [2] Kampmann J, Summers J W, Eskesen S D. Risk assessment helps select the contractor for the Copenhagen Metro System [C]// *Proceedings of World Tunnel Congress '98 Tunnels and Metropolises*. [S. l.]: WTC, 1998(1): 123 - 128.
- [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, 31(4): 648.
LAN Shouqi, ZHANG Qinghe. Risk assessment of deep excavation during construction based on fuzzy theory [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(4): 648.
- [4] 王岩, 黄宏伟. 地铁区间隧道安全评估的层次-模糊综合评判法[J]. *地下空间*, 2004, 24(3): 32.
WANG Yan, HUANG Hongwei. Hierarchy-fuzzy comprehensive judgment for safety evaluation of metro running tunnel [J]. *Underground Space*, 2004, 24(3): 32.
- [5] 徐岩, 赵文. 沈阳地铁降水工程风险分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2008, 4(7): 1382.
XU Yan, ZHAO Wen. The risk analysis of Shenyang subway precipitation project [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2008, 4(7): 1382.
- [6] Markowski A S, Mannan M S. Fuzzy risk matrix [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 159: 152.
- [7] Chin Kwaisang, Wang Yingming, Gary Ka Kwai Poon, et al. Failure model and effects analysis by data envelopment analysis [J]. *Decision Support Systems*, 2009, 48: 246.
- [8] Shalev Dan M, Tiran Joseph. Condition-based fault tree analysis (CBFTA): a new method for improved fault tree analysis (FTA), reliability and safety calculations [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2007, 92: 1231.
- [9] Rezaie K, Amalnik M S, Gereie A, et al. Using extended Monte Carlo simulation method for the improvement of risk management: consideration of relationships between uncertainties [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2007, 190: 1492.
- [10] Zhou Nianqing, Vermeer P A, Lou Rongxiang, et al. Numerical simulation of deep foundation pit dewatering and optimization of controlling land subsidence [J]. *Engineering Geology*, 2010, 116(3 - 4): 251.