

地铁车站深基坑施工风险识别与评价

郭健¹, 钱劲斗¹, 陈健², 殷俊¹, 柯晓峰¹

(1. 武汉轻工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430023;
2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要:软土地区的地铁车站深基坑工程因其施工环境复杂, 施工风险大, 施工风险因素之间的耦合作用, 致使深基坑施工的主要风险难以确定, 导致施工事故频发。本文基于深基坑工程类似施工风险经验, 识别风险因素, 按照工作分解结构分解方法, 建立风险清单。采用层次分析法和专家调查法, 分析深基坑施工风险因素的重要性及其主要风险, 估计风险发生概率与风险损失。采用梯形隶属函数计算风险事件的隶属度, 运用模糊综合评价法进行风险评估, 确定施工的风险等级。通过对厦门某地铁车站深基坑工程施工风险进行实证研究, 确定其施工总体风险等级为三级, 属于风险可控制的范围, 评价结果能反映实际施工风险情况。针对基坑施工中的风险评估结果, 本文提出相对施工措施, 为深基坑工程施工风险防控提供了依据。

关键词: 基坑工程; 施工风险; 模糊评价; 风险等级; 风险损失

中图分类号: U71 文献标识码: A 文章编号: 2095-0985(2017)05-0032-07

DOI: 10.13579/j.cnki.2095-0985.2017.05.006

Risk Identification and Evaluation for Foundation Pit Construction of Subway Station

GUO Jian¹, QIAN Jin-dou¹, CHEN Jian², YIN Jun¹, KE Xiao-feng¹

(1. School of civil engineering and architecture, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;
2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Due to the complex construction environment, the deep excavation of station foundation pits would inevitably cause the high risk in soft soil. It was difficult to determine the risk probability because of the coupling of risk factors, and the accidents were broken in foundation pit construction. In this paper, the risk factors were given based on in-situ experiences of similar engineering both in China and abroad. The risk list was established by identifying risk events or factors based on work breakdown structure (WBS). Expert investigation method and analytic hierarchy process (AHP) were employed to study the correlation of each one of the risk factors and the calculation of the risk weight. And then we established the risk occurrence probability, losses and level. The membership degree of the risk is calculated by trapezoidal membership function. The fuzzy comprehensive evaluation was used to identification the construction risk of station foundation pit. In the foundation pit construction of Xiamen subway station, the case study shows that the total risk is assessed as level 3, which is acceptable. The consequence is coincidence with the reality. And the risk reaction measures were presented by the risk level in this paper. These methods could provide decision-making basis for the risk control of deep foundation pit construction.

Key words: foundation pit; construction risk; fuzzy evaluation; risk level; risk loss

随着城市化的高速发展, 城市地下交通运输网和高层建筑的大量兴建, 城市建筑密集地区的超深深基坑工程越来越多, 由此引起的环境土工

问题也十分突出。城市地铁车站深基坑工程的施工往往是在地表建筑物密集、地下管网密布、工程地质复杂条件下进行, 存在着极大施工难度和风

收稿日期: 2016-07-31 修回日期: 2016-12-04

作者简介: 郭健(1968-), 男, 湖北武汉人, 博士, 教授, 研究方向为土木工程施工风险分析与控制(Email: guojianxh@163.com)

通讯作者: 钱劲斗(1990-), 男, 陕西榆林人, 硕士研究生, 研究方向为地下工程风险管理(Email: 421327303@qq.com)

基金项目: 住建部科学技术项目计划(2015-K3-04); 武汉轻工大学研究生教育教学改革研究与实践项目(Y2015006)

险, 施工事故的多发性和后果的严重性, 使得深基坑工程成为施工事故中的重大风险因素。如何有效评价深基坑工程施工风险, 保证工程施工安全已成为地下工程施工亟待解决的问题^[1, 2]。

国内外众多学者对深基坑的风险进行了大量研究, 常采用风险矩阵法、故障树分析法、蒙特卡洛模拟法及基于离散事件树的蒙特卡洛仿真等风险评估方法^[3], 但该类方法是以半定量半定性的分析为主, 而定量的风险分析及评估研究相对薄弱^[4]。自 Zadeh^[5] 针对信息的模糊性、不确定性问题提出模糊理论后; 何锡兴等^[6] 通过分析基坑安全施工风险因素, 评估基坑风险, 确定了基坑风险等级; 包小华等^[1] 应用模糊综合评价法, 构造基坑风险评断矩阵, 定量分析了基坑的风险等级; 张弛等^[7] 建立了基于模糊数学的基坑地表沉降分析模型, 评价了周边建筑物及管线的风险等级; 杜修力等^[8] 基于证据理论建立风险评估模型, 通过线性加权法对专家评语指标 Mass 函数进行合成, 建立了基于风险等级信度的决策规则; 吕超等^[9] 采用工作分解结构和风险分解结构方法, 识别了某超大深基坑施工过程中的控制要点, 建立超大深基坑施工控制的技术体系; 刘波等^[10] 采用 WBS-RBS (Work Breakdown Structure, WBS; Risk Breakdown Structure, RBS) 方法, 确定了深基坑工程施工风险因素, 通过模糊层次分析, 对基坑的风险等级进行了评价; 吴贤国等^[11] 基于贝叶斯网络, 通过专家群决策方法确定影响地铁风险管理的主要因素, 构建了风险拓扑结构模型; 周健

等^[12] 运用贝叶斯概率统计方法, 建立了某地铁隧道风险因素概率分布模型, 确定了该隧道的风险等级。

由于影响深基坑安全施工的风险因素多, 施工风险难以定量描述。因此, 根据工程经验和专家知识描述其性质及影响, 用模糊理论进行风险评价具有现实意义。本文借鉴国内外类似深基坑工程的施工经验, 依托厦门地铁工程项目, 按照 WBS 分解方法, 识别基坑施工可能发生的主要风险, 建立风险清单, 采用专家咨询法和层次分析法, 分析风险因素之间的重要性, 估算风险因素的发生概率, 确定风险损失值, 运用模糊综合评价法, 构建风险因素之间的隶属关系, 对基坑施工风险进行定级, 针对深基坑施工工况, 完成地铁车站深基坑工程施工风险评价, 提出施工风险应对措施, 为地铁基坑施工的风险控制提供科学的依据。

1 地铁站基坑工程

1.1 工程概况

厦门某地铁车站为地下双层三跨闭合框架结构, 总长 182.712 m。标准段底板埋深 16.41 m, 宽度 20.7 m; 端头井底板埋深 18.91 m, 宽度 24.5 m。基坑工程安全等级为一级, 基坑施工选用明挖法, 施工平面如图 1 所示, 采用“钻孔灌注桩+内支撑”体系, 钻孔桩直径 1000 mm, 间距 1200 mm, 桩长约 19~24 m; 钻孔桩桩间采用三重管高压旋喷桩止水帷幕, 三重管高压旋喷桩的成桩直径不小

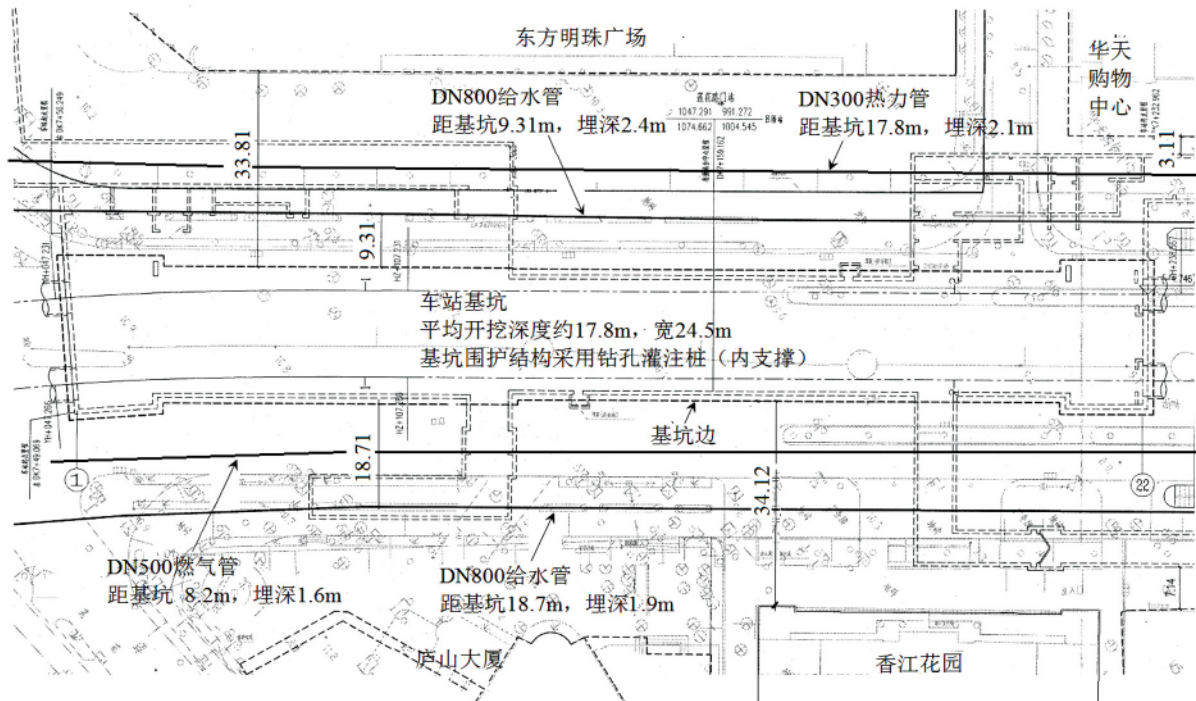


图1 车站深基坑施工平面

于 1.2 m。车站第一道横撑采用截面为 700 mm×1000 mm 的钢筋砼支撑,水平间距为 6 m;第二及第三道横撑采用φ 609 钢管撑、壁厚 16 mm,水平间距为 3 m。

1.2 工程地质

车站基坑平均开挖深度约 17.8 m,开挖涉及地层有素填土、残积砾质黏性土、全风化~微风化花岗岩,地下水埋深 2.2 m。底板位于全风化~微风化花岗岩中,左线中等~微风化基岩面略高于右线。

根据钻探揭露地层情况,本站存在以下不良地质与特殊地质:(1)人工填土,分布于场底表部,为新近人工堆填,厚度 0.60~7.00 m,主要为素填土,成份为中粗砂、黏性土夹碎石、块石等筑路材料,结构疏密不均,透水性不匀;(2)残积砾质黏性土,由花岗岩原地风化残积而成,厚度约为 3~15.10 m,其原岩矿物除石英外均已风化成交生黏土矿物,岩芯呈含砂砾黏性土状,可捏成团状,遇水强度急剧降低;(3)风化岩,岩体风化带比较明显,自上而下岩体的风化程度由全风化带向微风化带过渡,厚度约为 1.5~9.9 m。岩体

结构基本破坏,干钻易钻进,取出芯样呈砾质黏性土状;(4)场地基岩主要为燕山晚期侵入花岗岩,孔隙率高,遇水后由于亲水矿物迅速与水相结合,形成泥状物,强度急剧降低,在动水压力作用下,易产生涌泥和塌坍现象。

1.3 水文地质

场区地表水系不发育。地下水按赋存介质可分为三类:赋存于填土层中的松散岩类孔隙水;赋存于残积层及全、强风化带中的风化残积孔隙裂隙水;赋存于基岩强风化带以下的基岩裂隙水。

地下水受年降水量的影响,水位一般从 3 月开始上升,9 月逐渐下降,5~6 月达到峰值,但变化幅度又因地形、含水层的不同而有差异,总体上基岩裂隙水和风化残积孔隙裂隙水水位随降雨变化较大,第四系松散层地下水变幅较小。

1.4 周边环境

车站周边环境以居住、商业用地为主,车站东南侧及西北侧均为高层住宅或者商业大厦。工程现状道路及周边地下管网复杂,分布有:DN500 燃气管、DN800 给水管、DN300 热力管、D300 雨水管等管道(图 2)。

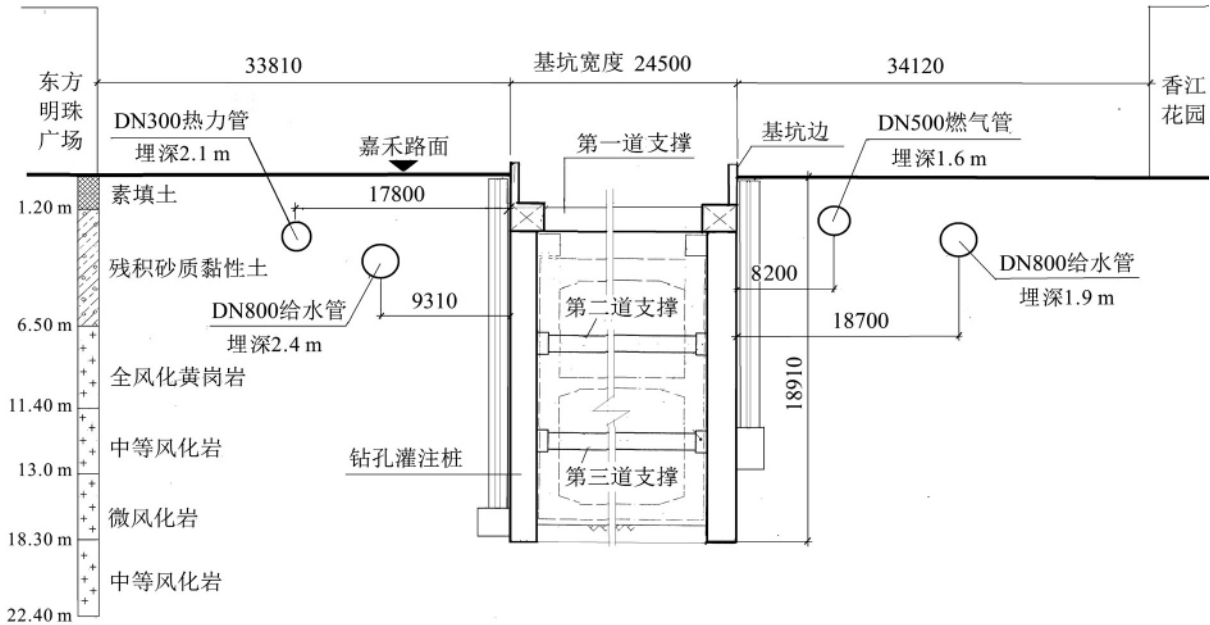


图 2 车站深基坑施工的周边建筑物和地下管线剖面 /mm

2 施工风险识别

厦门地铁基坑施工中存在的潜在风险因素多,本文借鉴类似工程施工经验,采用专家咨询法,按照 WBS 分解方法,识别地铁车站深基坑施工主要风险因素,分解基坑的施工风险为三个层级。

第一层级的风险因素为:施工技术风险

(U_1)、周边环境风险(U_2)、施工管理风险(U_3)与自然环境风险(U_4),如表 1 所示。第二层级及第三级风险因素分解清单,如表 2、3 所示。

表 1 第一层级风险事件及评价权重

目标层	第一层级因素	初始权重	归一化权重
地铁	U_1 施工技术	2.172	0.543
	U_2 周边环境	0.978	0.245
基坑	U_3 施工管理	0.544	0.136
	U_4 自然环境	0.306	0.077

表 2 第二层级风险因素及评价权重

第一层级	第二层级因素	初始权重	归一化权重
U ₁ 施工技术 风险	u ₁₁ 孔壁塌陷	1.126	0.225
	u ₁₂ 坑内土体滑坡	0.298	0.060
	u ₁₃ 围护结构渗漏	0.717	0.143
	u ₁₄ 支撑失稳	2.373	0.475
	u ₁₅ 坑底隆起	0.486	0.097
U ₂ 周边环境 风险	u ₁₆ 土体变形引发周边建筑物破坏	0.333	0.167
	u ₁₇ 施工降水引起土体沉降导致管线破坏	1.667	0.833

表 3 第三级层目标风险因素及评价权重

第二层级因素	第三层级因素	初始权重	归一化权重
u ₁₁ 孔壁塌陷	u ₂₁ 泥浆质量不合格	1.900	0.633
	u ₂₂ 存在地下障碍物	0.782	0.261
	u ₂₃ 桩壁受到侧向土压力过大	0.319	0.106
u ₁₂ 坑内土体滑坡	u ₂₄ 遭遇不良地质	1.667	0.833
	u ₂₅ 地下水或雨水浸泡导致土体失稳	0.333	0.167
u ₁₃ 围护结构渗漏	u ₂₆ 旋喷桩直径未达到设计要求	1.500	0.750
	u ₂₇ 坑外降水不力	0.500	0.250
u ₁₄ 支撑失稳	u ₂₈ 基坑支护方案选择不当	2.076	0.415
	u ₂₉ 围护结构施工不合理	0.841	0.168
	u ₂₁₀ 围护结构刚度、强度不够	1.240	0.248
	u ₂₁₁ 坡顶堆载过大	0.301	0.060
	u ₂₁₂ 水平支撑体系失效	0.542	0.108
u ₁₅ 坑底隆起	u ₂₁₃ 坑内土体加固不到位	0.566	0.141
	u ₂₁₄ 围护结构入土深度不够	1.744	0.436
	u ₂₁₅ 基坑超挖	1.363	0.341
	u ₂₁₆ 底板未及时浇筑	0.327	0.082

3 模糊综合评价

采用风险模糊综合评价法^[13]评价基坑施工风险,具体步骤如下:

(1) 确定评价因素

评价因素集为各种风险因素的集合,分为若干个层次,即 $U = [U_1, U_2, \dots, U_n]$ 。

(2) 计算各因素权重

采用层次分析法确定各指标层的权重,一般用权重向量表示。即 $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ 。

(3) 建立评价等级集

基于专家们对施工风险做出的各种评价结果,评价等级分为 5 级,即“轻微(取值 1),中等(取值 2),严重(取值 3),重大(取值 4),灾难性(取值 5)”,即 $V = [1, 2, 3, 4, 5]$ 。

(4) 确定隶属关系

基于隶属函数,构建一个由风险因素 U 到评价等级 V 的映射关系,形成隶属度向量,即:

$$R = [r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{ij}] \quad (1)$$

式中: r_{ij} 为第 i 层级第 j 个风险因素的隶属度值。

(5) 模糊综合评价

将风险因素的隶属度向量与风险因素权重向量进行运算,获取模糊评价矩阵,用以判别风险因素的风险等级,其评价矩阵 B 为:

$$B = W \cdot R \quad (2)$$

4 施工风险评价方法

4.1 风险事件估计

地铁车站基坑施工风险虽有其自身特点,但与一般的风险管理大致相同,可按风险定级法进行工程风险评价。风险因素的风险值 R_{ij} 由其发生概率 P_{ij} 与风险损失 C_{ij} 决定,其表达式为:

$$R_{ij} = P_{ij} \times C_{ij} \quad (3)$$

$$P_{ij} = \sum_{j=1}^n w_{ij} \times p_{ij} \quad (4)$$

$$C_{ij} = \sum_{j=1}^n w_{ij} \times c_{ij} \quad (5)$$

式中: p_{ij} 和 c_{ij} 分别为第 i 级层第 j 个风险因素的发生概率和损失值; w_{ij} 为第 i 级层第 j 个风险因素的权重值。

4.2 风险因素权重

采用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)^[14]与专家评分法,对风险因素重要性进行分析,确定风险因素权重。即首先请专家根据 1~9 级标度表(表 4),将两两风险因素进行重要性对比分析并进行数量标度,构造一个“判断矩阵”;然后通过判断矩阵运算,对其最大特征向量 λ_{max} 进行一致性检验,若 $CR \leq 0.1$ 时,则该矩阵满足一致性要求,否则应予以调整。当该矩阵通过一致性检验后,则其最大特征值所对应的特征向量为权重向量^[15]。

表 4 风险因素重要性判断准则

标度	两两因素重要性比较说明
1	因素 a 与因素 b 相比,同等重要
3	因素 a 与因素 b 相比,稍微重要
5	因素 a 与因素 b 相比,明显重要
7	因素 a 与因素 b 相比,重要得多
9	因素 a 与因素 b 相比,极为重要
2, 4, 6, 8	两两因素重要性比较介于上述标度值之间
倒数	上述重要性相反情况即 j 比 i 重要的情况

为了方便对各个风险因素的影响后果进行分级评价,对风险因素的初始权重进行归一化,处理

到(0,1)区间上,即为归一化权重,其表达式为:

$$w_{ij} = \frac{\hat{w}_{ij}}{\sum_{j=1}^n \hat{w}_{ij}}, \sum_{j=1}^n w_{ij} = 1 \quad (6)$$

式中: w_{ij} 为归一化后的权重值; \hat{w}_{ij} 为第 i 级层第 j 个风险因素的初始权重值。

基坑施工的主要风险事件(因素)判断矩阵如表5~7所示。

表5 风险事件 U 判断矩阵

因素	U_1	U_2	U_3	U_4
U_1	1	3	5	5
U_2	1/3	1	3	3
U_3	1/5	1/3	1	3
U_4	1/5	1/3	1/3	1

注: $\lambda_{\max} = 4.204, CR = 0.076 < 0.1$, 通过一致性检验

表6 风险因素 U_1 判断矩阵

U_1	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}	u_{15}
u_{11}	1	3	3	1/3	3
u_{12}	1/3	1	1/3	1/5	1/3
u_{13}	1/3	3	1	1/5	3
u_{14}	3	5	5	1	5
u_{15}	1/3	3	1/3	1/5	1

注: $\lambda_{\max} = 5.406, CR = 0.091 < 0.1$, 通过一致性检验

表7 风险因素 U_2 判断矩阵

U_2	u_{16}	u_{17}
u_{16}	1	5
u_{17}	1/5	1

注: $\lambda_{\max} = 2.000, CR = 0.000 < 0.1$, 通过一致性检验

按上述方法,可求得各风险因素判断矩阵的初始权重值与归一化权重值,如表1~3所示。

4.3 风险因素发生概率

在风险因素发生概率的判定中,请专家根据基坑工程安全风险情况,按国际隧道协会(ITA)风险发生概率划分的等级标准(表8),及GB 50652-2011《城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》的风险发生概率分级,结合已建和在建地铁深基坑工程项目施工风险发生统计数据,进行底层风险因素的发生概率判定。

表8 风险发生概率等级与估值

等级	描述	概率范围	估值区间
5	频繁	0.3~1	5.0~4.5
4	可能	0.03~0.3	4.5~3.5
3	偶尔	0.003~0.03	3.5~2.5
2	很少	0.0003~0.003	2.5~1.5
1	极少	<0.0003	<1.5

按照贝叶斯统计理论,根据风险因素清单,由底层向上逐层计算每一层级风险因素的发生概率,其计算结果如表9所示。

表9 风险因素评价指标及评价等级

风险因素	概率估值 P_{ij}	模糊损失 C_{ij}	风险值 R_{ij}	风险等级
U_1	3.67	2.30	8.44	3
U_2	3.48	2.28	7.94	3
U_3	3.02	2.34	7.06	3
U_4	2.75	1.84	5.05	2
u_{11}	2.28	2.07	4.71	2
u_{12}	3.37	2.03	6.85	2
u_{13}	3.13	1.93	6.02	2
u_{14}	3.66	2.36	8.65	3
u_{15}	3.58	2.48	8.87	3
u_{16}	3.46	1.80	6.23	2
u_{17}	3.40	2.20	7.48	3
u_{21}	3.09	2.20	6.79	2
u_{22}	3.39	1.90	6.44	2
u_{23}	3.56	3.10	11.04	4
u_{24}	3.69	2.70	9.96	3
u_{25}	3.35	3.70	12.40	4
u_{26}	2.08	1.70	3.54	2
u_{27}	3.11	2.60	8.10	3
u_{28}	3.05	2.20	6.71	2
u_{29}	3.02	2.70	8.15	3
u_{210}	3.33	2.70	8.98	3
u_{211}	3.53	2.20	7.76	3
u_{212}	3.41	3.70	12.64	4
u_{213}	3.10	2.60	8.06	3
u_{214}	2.96	3.20	9.47	3
u_{215}	3.72	1.70	6.33	2
u_{216}	3.60	1.70	6.14	2

为了提高评判风险因素发生概率的准确性,本文采用估值方法确定风险因素的发生概率,则风险发生概率估值区间可定义为:

$$\tilde{P}_i = 5 + \lg \tilde{p}_i \quad (7)$$

式中: \tilde{P}_i 为第 i 层级风险的发生概率估值区间, $\tilde{P}_i = [\tilde{P}_i^-, \tilde{P}_i^+]$; \tilde{p}_i 为第 i 层级风险的发生概率范围, $\tilde{p}_i = [\tilde{p}_i^-, \tilde{p}_i^+]$ 。

则风险因素发生概率的估值表达式为:

$$P_{ij} = 5 + \lg \hat{p}_{ij} \quad (8)$$

式中: \hat{p}_{ij} 、 P_{ij} 分别为第 i 层级第 j 个风险因素的发生概率及其估值。

4.4 风险损失值

采用模糊数学理论,根据风险因素的评价等级 V 隶属度,计算风险因素的模糊损失,确定风险因素的模糊损失向量。

以第三层级风险因素 u_{21} 为例,说明模糊损失向量 C_{21} 计算过程。10位专家对风险因素“泥浆质量不合格(u_{21})”的损失后果进行评价,其中:有2位专家认为此风险因素的损失轻微(取值1);5位专家认为损失中等(取值2);2位专家认为损失严重(取值3);1位专家认为损失重大(取

值 4)。按照专家评价等级估值的百分比值,构成损失后果评价等级的隶属度向量,即为:

$$Q_{21} = [0.2 \ 0.5 \ 0.2 \ 0.1 \ 0.0]$$

则风险因素 u_{21} 的模糊损失值为:

$$C_{21} = Q_{21} \cdot V^T = 2.20$$

依此类推,可计算得到各风险因素的模糊损失,如表 9 所示。

4.5 风险因素隶属度

本文按照 5 级风险等级评价标准,采用工程上应用较为广泛的、实用性较高的“L-R 模糊数”,选用“梯型”分布的线性函数,对应于 5 级风险等级评价指标的隶属函数,如图 3 所示。

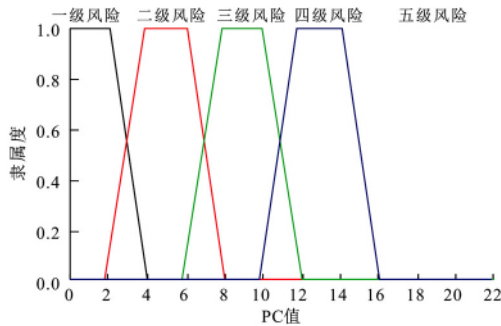


图 3 隶属函数

基于隶属关系分析,构造一个五级风险评价隶属函数:

$$\text{一级风险 } r_{11} = \begin{cases} 1, & x \leq 2 \\ -0.5x+2, & 2 < x \leq 4 \\ 0, & x > 4 \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{二级风险 } r_{12} = \begin{cases} 0.5x-1, & 2 < x \leq 4 \\ 1, & 4 < x \leq 6 \\ -0.5x+4, & 6 < x \leq 8 \\ 0, & 2 < x \text{ or } x > 8 \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{三级风险 } r_{13} = \begin{cases} 0.5x-3, & 6 < x \leq 8 \\ 1, & 8 < x \leq 10 \\ -0.5x+6, & 10 < x \leq 12 \\ 0, & 6 < x \text{ or } x > 12 \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{四级风险 } r_{14} = \begin{cases} 0.5x-5, & 10 < x \leq 12 \\ 1, & 12 < x \leq 14 \\ -0.5x+8, & 14 < x \leq 16 \\ 0, & x < 10 \text{ or } x > 16 \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{五级风险 } r_{15} = \begin{cases} 0.5x-7, & 14 < x \leq 16 \\ 1, & x > 16 \\ 0, & x < 14 \end{cases} \quad (13)$$

式中: x 为各风险因素的风险值。

将风险因素的发生概率值 P 与模糊损失值 C 相乘得到的风险值 R_{ij} ,带入风险因素对应风险等级的隶属函数,可得到各层级的风险因素隶属度值 r_{ij} ,形成各层级的隶属度向量,组成风险等级的

评价矩阵:

$$\text{孔壁塌陷 } R_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0.61 & 0.39 & 0 & 0 \\ 0 & 0.78 & 0.22 & 0 & 0 \\ 0 & 0.97 & 0.03 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{坑内土体滑坡 } R_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{围护结构渗漏 } R_{13} = \begin{bmatrix} 0.23 & 0.77 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{支撑失稳 } R_{14} = \begin{bmatrix} 0 & 0.65 & 0.35 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.12 & 0.88 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{坑底隆起 } R_{15} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.84 & 0.16 & 0 & 0 \\ 0 & 0.93 & 0.07 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4.6 风险模糊评价

根据式(2),对二级目标层风险因素进行模糊评价,计算可得该层级风险因素评价向量:

$$\text{孔壁塌陷 } B_{11} = [0 \ 0.59 \ 0.36 \ 0.05 \ 0]$$

$$\text{坑内土体滑坡 } B_{12} = [0 \ 0 \ 0.83 \ 0.17 \ 0]$$

$$\text{围护结构渗漏 } B_{13} = [0.17 \ 0.58 \ 0.25 \ 0 \ 0]$$

$$\text{支撑失稳 } B_{14} = [0 \ 0.28 \ 0.62 \ 0.11 \ 0]$$

$$\text{坑底隆起 } B_{15} = [0 \ 0.36 \ 0.64 \ 0 \ 0]$$

$$\text{土体变形引发周边建筑物破坏 } B_{16} = [0 \ 0.89 \ 0.11 \ 0 \ 0]$$

$$\text{施工降水引起土体沉降导致管线破坏 } B_{17} = [0 \ 0.26 \ 0.74 \ 0 \ 0]$$

根据式(2),对一级目标层风险因素进行模糊评价,计算可得该层级风险因素评价向量:

$$\text{施工技术 } B_1 = [0.03 \ 0.28 \ 0.52 \ 0.07 \ 0]$$

$$\text{周边环境 } B_2 = [0 \ 0.36 \ 0.64 \ 0 \ 0]$$

$$\text{施工管理 } B_3 = [0 \ 0.47 \ 0.53 \ 0 \ 0]$$

$$\text{自然环境 } B_4 = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

(3)对基坑施工总体风险进行模糊评价。根据式(2)计算可得:

$$B = \begin{bmatrix} 0.543 \\ 0.245 \\ 0.136 \\ 0.077 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} 0.03 & 0.28 & 0.52 & 0.07 & 0 \\ 0 & 0.36 & 0.64 & 0 & 0 \\ 0 & 0.47 & 0.53 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [0.01 \ 0.44 \ 0.51 \ 0.04 \ 0]$$

根据最大隶属度原则,可知该深基坑施工总体风险等级为三级风险,属于风险可控制的范围,但需要引起高度重视,应对相应风险事件做好风险防范与监控。

基坑工程重大事故的发生提供了科学的依据。

5 施工对策与建议

根据上述基坑风险分析,拟将三级及以上等级的风险因素确定为基坑施工的风险控制重点,其主要风险表现为:支撑失稳、坑底隆起、施工降水引起土体沉降导致管线破坏,尤其关注“地下水或雨水浸泡导致土体失稳、桩壁受到侧向土压力过大、水平支撑体系失效”等问题。施工中应引起足够重视,应对四级高风险因素采取合理的规避措施,降低风险等级,确保基坑施工安全。

施工安全风险控制建议如下:

(1) 根据基坑施工所处的水文地质条件,在施工区域内采取有效的截水、降排水措施,合理使用井点降水,在形成封闭隔水帷幕后实施降水,防止因地下水突涌导致土体塌方事故的发生。

(2) 为了避免因土体不均匀沉降对周围路面、建筑物和管线的破坏,尤其应对距基坑较近的光缆、雨水管、污水管、路灯电缆等管线进行重点保护,施工前尽可能做好管线改迁、土体加固保护工作,分析地下水降水对周围土体沉降影响,施工中严格按照主管部门要求加强变形监测,控制周边建筑物及地下管线差异沉降,减少基坑施工给周围环境的影响。

(3) 土方开挖施工中,针对水平支撑架设施工风险,安排专人负责管理,在软土区域开挖与支撑施工严格按照“先撑后挖”原则,做到“随挖随撑、留土护壁、对撑限时”;在第二、三道钢管支撑中,提高钢结构支撑的整体刚度和稳定性,加强水平支撑结构的监测,防止钢管偏心受压失稳,保证施工中的坑壁稳定。

6 结 语

厦门某地铁车站深基坑工程施工受多种复杂水文地质、环境因素影响,施工风险多。本文借鉴国内外类似工程施工经验,通过风险事件识别,获取风险事件清单,采用专家调查法和层次分析法,确定风险因素权重,估算风险损失值,运用模糊综合评价法进行风险评估,对基坑施工风险因素进行定级,提出了施工风险应对措施,为减少或遏制

参 考 文 献

- [1] 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, 36(s1): 192-197.
- [2] 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, 1(4): 611-614.
- [3] 周红波. 基于贝叶斯网络的深基坑风险模糊综合评价方法[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(9): 1474-1479.
- [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]. 地下空间与工程学报, 2004, 24(3): 301-305.
- [5] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8(3): 338-353.
- [6] 何锡兴,周红波,姚 浩. 上海某深基坑工程风险识别与模糊评估[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(s1): 1912-1915.
- [7] 张 弛,黄广龙,李 娟. 深基坑施工环境影响的模糊风险分析[J]. 岩土力学与工程学报, 2013, 32(s1): 2669-2675.
- [8] 杜修力,张雪峰,张明聚,等. 基于证据理论的深基坑工程施工风险综合评价[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 155-161.
- [9] 吕 超,彭 建,彭芳乐. 滨江超大超深基坑施工风险分析与控制[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(6): 1441-1448.
- [10] 刘 波,王凯强,黄 冕,等. 地铁深基坑工程风险模糊层次分析研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(s1): 257-264.
- [11] 吴贤国,丁保军,张立茂,等. 基于贝叶斯网络的地铁施工风险管理研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(1): 84-89.
- [12] 周 健,王红卫,吴邵海. 盾构法施工风险的多态贝叶斯网络模型分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 186-190.
- [13] 胡宝清. 模糊理论基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004.
- [14] 望应洛. 系统工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [15] 周红波,姚 浩,卢剑华. 上海某轨道交通深基坑工程施工风险评估[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(s1): 1902-1906.