

盾构隧道下穿高速铁路站场安全风险评估管理方法*

郑余朝¹,周贤舜¹,李俊松²

(1.西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室,土木工程学院,成都 610031;
2.中国中铁二院工程集团有限责任公司,成都 610031)

摘 要:为提高风险评估对工程设计的指导性,本文结合某地铁区间盾构隧道下穿高速铁路站场工程实例,尝试将风险评估、数值模拟和工程设计结合起来形成反馈机制。首先采用安全风险层次-模糊综合评价法(AHP-FE)对工程进行了初步评估,得到了初步的设计阶段风险等级“高度”和主要风险源及排序;然后采用数值模拟方法对盾构下穿铁路站场进行了施工模拟,得到了主要风险源相关指标的预测值,并提出了系列控制措施;在此基础上,再一次采用安全风险模糊评估理论对工程进行风险分析,最后得到设计阶段允许的“中度”风险等级和相应的风险源排序。本文所遵循的风险评估方法和流程可以提高风险评估的准确性和合理性。

关键词:风险评估;反馈;盾构隧道;下穿;高速铁路

中图分类号:U455 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2018)02-0523-07

Security Risk Assessment Management on Shield Tunnel
under-crossing High-Speed Railway Station

Zheng Yuchao¹, Zhou XianShun¹, Li Junsong²

(1. MOE Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P.R.China;2. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu 610031, P.R.China)

Abstract: In order to improve the instructive effect of risk assessment for engineering design, a feedback mechanism was formed by taking risk assessment, numerical simulation and engineering design into consideration, based on an metro engineering with shield tunnels under-crossing high-speed railway station. A primary risk assessment with the Analytic Hierarchy Process and Fuzzy Evaluation Method (AHP-FE) was made firstly, primary risk grade of high, major risk sources and their ranking were concluded then. In order to analyze the major risk source accurately, a numerical simulation for the tunnel construction was adopted and the related indexes of the major risk source was acquired accordingly, therefore, a series of regulatory measures was proposed. On this basis, a risk assessment with fuzzy analysis for the engineering was accomplished again, the ultimate reasonable risk ranking and allowable risk grade of moderate was obtained. The risk assessment method and process in this paper is efficient to improve the accuracy and rationality of risk assessment.

Keywords: risk assessment; feedback; shield tunnel; under-crossing; high-speed railway

* 收稿日期:2017-11-23(修改稿)
作者简介:郑余朝(1975-),男,浙江余姚人,博士,副教授,主要从事地下工程近接施工及风险管理研究。
E-mail:zhengyc218@126.com
基金项目:国家自然科学基金(51008252,51478394,51678494);中央高校基本科研业务费专项资金(SWJTU11ZT33)

0 引言

近些年,随着我国城市轨道交通的大规模建设,隧道与地下工程近接施工案例层出不穷。然而,在复杂多变的工程地质条件及周围环境影响下,地下工程近接施工安全风险较高,工程事故时有发生。许多学者对隧道和地下工程的风险评估和管理理论进行了研究,并在工程风险管理中得到了一定应用。Haos 等^[1]和 Einstein 等^[2]指出了隧道工程风险分析应遵循的理念及其特点;刘凌云等^[3]采用传统层次分析法对隧道盾构进出洞进行风险分析;侯艳娟等^[4]引入模糊数学综合评判方法,对建筑物风险的不同程度用模糊语言进行评价。李俊松等^[5]基于岩土力学与可靠度原理,在对类似工程地勘资料和监测数据统计分析的基础上,推导出近接房屋的隧道基坑失稳风险计算模型,分析了近接房屋的隧道基坑失稳风险,并提出风险控制措施。卢裕杰^[6]采用专家分析法和数值模拟法对盾构隧道下穿昆明火车站股道的施工风险进行了综合分析。上述研究一般结合理论分析对风险进行评价,受主观影响大,对经验依赖性较强,或虽然结合数值模拟方法进行了风险评估,但未能在此基础上再次复评。

盾构隧道下穿高速铁路站场工程,其线路对轨道平顺性要求高,受多项不确定因素控制,施工风险较大。一旦设计或施工不当,引起线路变形过大,会严重威胁高速铁路运营安全,造成不可估量的损失。因此,采取合理有效的风险评价方法和流程指导工程设计显得尤为重要。

本文以某城市地铁盾构隧道下穿高速铁路站场工程为背景,采用基于专家打分法、层次分析法(AHP)和模糊评判法(FE)的层次-模糊综合评价法(AHP-FE),对工程进行安全风险评估,风险评估的后果、等级及接受标准根据规范确定为“不期望”的情况^[7-10]。为满足工程安全要求,采用数值模拟对主要风险源(路基和轨道沉降、挡墙沉降、倾斜)进行量化分析,以规范允许值作参考基准,对潜在风险较大的指标量影响因素制订相应的应对措施加以控制。在此基础上,提取相应的风险指标再次应用层次-模糊综合评价法(AHP-FE)进行风险评估,确定相应的风险等级和制定相应的应对措施。通过“风险初评—数值模拟分析—风险复评”评估流程,以提高风险评估的可靠性和设计方案的针对性与有效性。

1 层次-模糊综合评价法(AHP-FE)原理

层次-模糊综合评价法是基于模糊数学理论^[11-12],应用隶属函数表达风险评价因素间模糊关系;然后利用层次分析法(AHP)来确定各评价因素的权重,将工程风险评价中边界不清、不易定量的因素定量化;最后采用模糊综合评价法模糊隶属关系整合各评价因素的影响关系进行综合评价的一种风险评估方法。盾构隧道下穿高速铁路站场工程,施工力学行为复杂,潜在风险因素众多。为综合体现各风险因素权数作用,又充分考虑单因素评价信息,本文选取“乘和”合成算子建立加权平均型模糊综合评价模型进行风险评估,确定风险等级。

1.1 层次分析法(AHP)

1.1.1 各底层权重计算

组织专家评审团在熟悉工程资料(包括水文地质、工程规划、周围建(构)筑物及类似工程风险设计等)的基础上进行实地考察,为初步风险界定与辨识提供依据。专家评审团针对识别出的各层风险因素建立层次评价模型,再由评审团按照 1-9 标度法对各层次风险评价指标进行两两比较,从而构建出两两比较判断矩阵如下:

$$A = \begin{pmatrix} \frac{W_1}{W_1} & \frac{W_1}{W_2} & \cdots & \frac{W_1}{W_n} \\ \frac{W_2}{W_1} & \frac{W_2}{W_2} & \cdots & \frac{W_2}{W_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{W_n}{W_1} & \frac{W_n}{W_2} & \cdots & \frac{W_n}{W_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \tag{1}$$

根据相关矩阵及运筹学理论,判断矩阵 A 满足正互反矩阵条件,其最大正特征根对应的特征向量体现多步累积效应,可作为各因素的权重向量。按公式(2),计算出每一个判断矩阵的最大特征根及其对应的特征向量。

$$A \cdot \xi = \lambda \cdot \xi \tag{2}$$

式中: λ 是正互反矩阵 A 的某一特征值,而非零向量 ξ 则为矩阵 A 对应于特征值 λ 的特征向量。

最后,再利用式(3)对矩阵 A 的最大正特征根所对应的特征向量进行归一化处理,处理后的特征向量即为各因子的权重。

$$w_i = \frac{\overline{w_i}}{\sum_i^n \overline{w_i}} \tag{3}$$

1.1.2 权重一致性检验

在构造判断矩阵并计算出相对权重后,应对该矩阵进行一致性检验,进行相容性和误差分析,计算式如下:

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \tag{4}$$

式中: $C.R.$ 为随机一致性比例; $R.I.$ 为平均随机一致性指标; $C.I.$ 为一致性指标,可利用式(5)计算。

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{5}$$

一致性指标 $C.R.$ 应小于 0.10, 否则说明建立的判断矩阵具有较大的分歧, 计算出的权重无效, 应重新组织专家意见建立判断矩阵。

1.2 模糊综合评价法 (FE)

1.2.1 确定评语集

评语集是针对评价对象的所有评价结果的集合, 即 $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)^T$, n 通常根据工程的重要性和复杂程度来确定, 一般取 $4 \leq n \leq 7$ 。

1.2.2 建立模糊综合评价矩阵

运用专家打分法求得各底层因素 U_i 针对于评语集的隶属向量 $r_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$, 然后将所有隶属向量合成便可得到模糊综合评价矩阵:

$$R = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \dots \\ r_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{pmatrix} \tag{6}$$

矩阵元素 r_{ij} 表示因素 U_i 对应于 V_j 评语等级的隶属度, 假设对因素 U_i 有 n 个评价结果 ($V_1 \sim V_n$), 对应于 V_j 评语结果有 v_{ij} 个认同数, 即有 v_{ij} 个参与者认为因素 U_i 会出现 V_j 评语结果, 则因素 U_i 对应于 V_j 评语的隶属度 $r_{ij} = v_{ij} / \sum_{j=1}^n v_{ij}$; m 为底层因素的个数。

1.2.3 模糊综合评价

本文采用加权平均型模糊综合评价模型进行总体评价^[13-14]。其实质是通过两矩阵相乘进行模糊关系合成, 如式(7)所示。

$$R' = W \times R \tag{7}$$

式中: W 为底层因素的整体权重向量, 由层次分析

法求得; R 为模糊综合评价矩阵; R' 表示工程风险对评语集合 V 的隶属向量。

然后, 可利用式(8) 计算工程风险的综合评价分值 M , 并确定风险等级。

$$M = R' \times V^T \tag{8}$$

2 工程风险评估流程

工程风险评估流程如图 1 所示。风险识别阶段, 专家开展风险界定、辨识工作, 并针对识别出的各层风险因素建立层次评价模型。在此基础上进行风险初评, 得到了初步的设计阶段风险等级和主要风险源及排序, 为数值计算指明方向。结合数值模拟计算结果, 制订经济、可行、主动的风险减轻措施, 并将数值模拟结果和设计措施再次反馈专家团队进行风险复评, 从而使评价参数更加合理, 减轻人为主观性影响, 进一步提高风险评估结果的客观性。

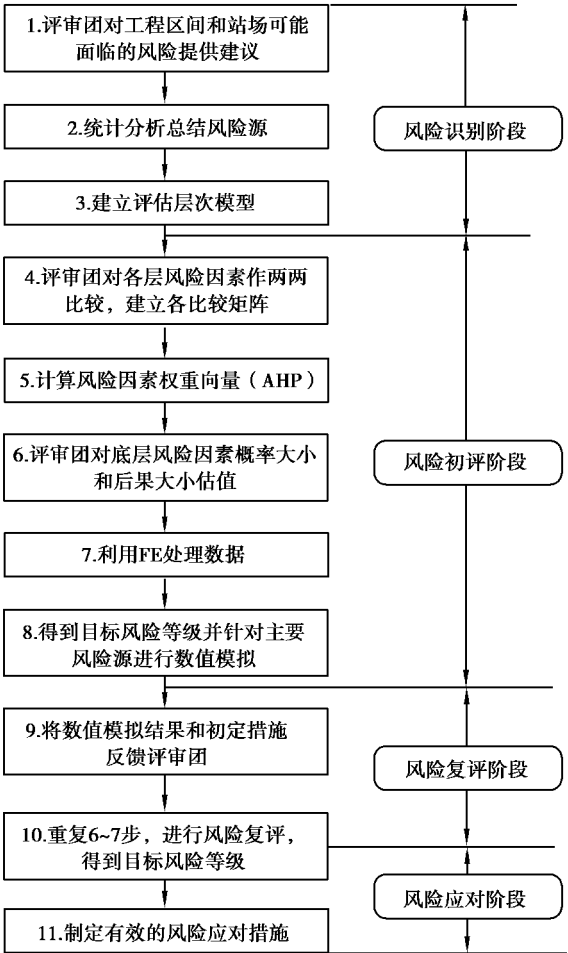


图 1 风险评估流程

Fig. 1 Risk assessment process

3 实例应用分析

3.1 工程概况

以天津地铁 6 号线北竹林站—天津西站地铁区间下穿高速铁路天津西站站场段隧道工程进行分析。该隧道为双洞单线隧道,线间距约为 17 m,曲线半径为 350 m,立面上为单向坡,最大坡度为 1.37‰。隧道采用盾构法施工,长 528 m;主体结构为由管片错缝拼装而成的环形结构,结构内径为 5.50 m,管片厚度为 0.35 m,环宽 1.20 m,环间通过螺栓连接。下穿隧道洞身主要通过地层为粉质黏土、黏土、粉砂、粉土层,表层地下水类型为第四系孔隙潜水,赋存于第Ⅱ陆相层以下粉砂及粉土中的地下水具有微承压性,为微承压水。地面国铁站场设置了 13 个站台,24 条到发线,包括 2 条京沪高铁正线,2 条津浦线正线,津浦线过站不停车。隧道与高铁线路的剖面关系如图 2 所示。

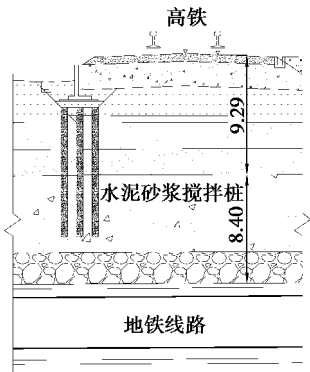


图 2 隧道与高铁线路剖面(单位:m)

Fig. 2 Profile section of tunnel and railway (unit: m)

3.2 风险评价指标体系

盾构隧道下穿高速铁路站场工程项目控制因素较多,在综合参考近些年国内外近接工程研究和高速铁路工程风险研究成果^[1-14]的基础上,结合熟悉此项目的 20 名专家评审团的问卷调查和建议(评审团成员包括地质、设计、施工、业主等方面的专家学者),对本工程风险因素进行识别,建立风险指标体系,其中包括 18 个三级指标、8 个二级指标、3 个一级指标,如表 1。

表 1 工程安全风险指标及整体权重
Table 1 Security risk indexes and overall weight

一级指标	二级指标	三级指标	整体权重 W_i	权重
站场 U_1	设备 U_{11}	施工导致铁路设备倾斜 U_{111}	0.035 8	8
		施工导致铁路设备沉降 U_{112}	0.011 9	15
	线路 U_{12}	施工导致水平不顺 U_{121}	0.068 0	4
		施工导致轨距变化 U_{122}	0.042 3	6
		施工导致轨道纵向不顺 U_{123}	0.152 4	2
		施工导致轨向变化 U_{124}	0.014 6	14
	挡墙 U_{13}	盾构压力过大地面隆起挡墙倾斜 U_{131}	0.086 7	3
		搅拌桩承载力降低导致挡墙倾斜 U_{132}	0.336 3	1
		搅拌桩承载力降低导致挡墙失稳 U_{133}	0.037 3	7
	盾构机 U_{21}	盾构机选型不当 U_{211}	0.009 5	17
		开挖面失稳导致地面沉降 U_{212}	0.031 3	10
		盾尾密封失效导致地面沉降 U_{213}	0.020 4	11
		过站场时刀片损坏迫使换刀 U_{214}	0.004 8	19
	区间 U_2	推进控制不当致地面隆起或下沉 U_{215}	0.064 1	5
		管片设计未充分考虑站场荷载 U_{221}	0.001 1	21
环境 U_3	衬砌管片 U_{22}	管片制作不规范致承载力降低 U_{222}	0.005 1	18
		管片材料不达标致使承载力降低 U_{223}	0.010 7	16
		管片安装不合格致使承载力降低 U_{224}	0.001 7	20
		管线 U_{31}	0.016 4	12
	周边房屋 U_{32}	周边房屋 U_{32}	0.032 9	9
		周边构筑物 U_{33}	0.016 4	13

3.3 工程风险评估初评

3.3.1 层次分析法权重计算结果

采用层次分析法处理专家评语,利用式(1)建立判断矩阵,然后在满足一致性的前提下由式(2)、式(3)处理判断矩阵计算出安全风险底层因素整体权重,如表 1 所示。

3.3.2 下穿安全风险模糊综合评价结果

统计专家评语集,利用加权平均型模糊评价模型对风险指标体系进行模糊综合评判,得到各底层因素的模糊评价参数矩阵:

$$R_{11} = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.15 & 0.65 & 0.15 & 0 \\ 0.10 & 0.45 & 0.45 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{12} = \begin{bmatrix} 0.10 & 0.75 & 0.15 & 0 & 0 \\ 0 & 0.40 & 0.60 & 0 & 0 \\ 0.05 & 0.35 & 0.50 & 0.10 & 0 \\ 0 & 0.15 & 0.70 & 0.15 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{13} = \begin{bmatrix} 0 & 0.40 & 0.60 & 0 & 0 \\ 0.05 & 0.35 & 0.50 & 0.10 & 0 \\ 0 & 0.05 & 0.30 & 0.65 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0.25 & 0.40 & 0.35 & 0 \\ 0 & 0 & 0.55 & 0.40 & 0.05 \\ 0 & 0.50 & 0.50 & 0 & 0 \\ 0 & 0.15 & 0.35 & 0.50 & 0 \\ 0.10 & 0.55 & 0.35 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.20 & 0.75 & 0.05 \\ 0 & 0.55 & 0.40 & 0.05 & 0 \\ 0.10 & 0.60 & 0.30 & 0 & 0 \\ 0 & 0.15 & 0.25 & 0.60 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.30 & 0.70 & 0 \\ 0 & 0.05 & 0.45 & 0.50 & 0 \\ 0 & 0.10 & 0.40 & 0.50 & 0 \end{bmatrix}$$

将各模糊评价参数矩阵合成即得模糊综合评价矩阵 $R = [R_{11} \ R_{12} \ R_{13} \ R_{21} \ R_{22} \ R_3]^T$,再利用式(7)计算出地铁隧道下穿西站站场段安全风险模糊评价向量:

$$R' = [0.042 \ 0.350 \ 0.470 \ 0.137 \ 0.002]^T$$

结合风险发生可能性打分标准,按式(8)计算出该指标体系在安全风险概率方面的总得分 $M = 3.293$,同理可得风险损失方面的总得分 $M' = 3.97$,

综合评判风险等级 $R = f(M, M')$,结果为“高度”,风险接受准则为“不期望——必须采取风险处理措施并加强监测”。其中主要风险源(前 6 位)从高到低分别为:搅拌桩承载力降低导致挡墙倾斜、施工导致线路轨道纵向不平顺、盾构压力过大导致地面隆起挡墙倾斜、施工导致线路水平不平顺、推进控制不当导致地面隆起或下沉和施工导致线路轨距变化。

按照风险接受准则的要求采取控制和降低风险的处理措施:综合考虑风险源主次关系以及实际发生概率,决定通过对施工过程展开数值模拟,计算出重点位置可能发生的挡墙沉降、倾斜以及路基和轨道可能发生的沉降后,结合数值模拟计算结果拟定针对性的风险减轻措施,以达到降低安全风险的效果。

3.4 下穿施工数值分析

3.4.1 计算模型

采用通用有限元软件 ANSYS 对盾构隧道下穿高速铁路站场进行三维数值模拟。综合考虑边界效应及计算效率,所取模型范围为:隧道轴向长度为 116 m,水平横向为 100 m,竖向为 50 m。铁路线与模型约束:前、后及左、右面边界均采用水平约束,底边界受竖向约束,顶面为自由面。计算模型共划分 79 260 个单元,79 296 个节点。模拟单元:模型中盾构壳(SHELL 63)、盾构管片(SHELL 93)均采用弹性壳单元模拟,土层、道床采用八节点空间实体单元(SOLID 45)模拟。岩土体本构方程采用 Drucker-Prager 弹塑性非线性本构模型。两轨道被当作连续支承无限长 Euler 梁,与轨枕一起采用弹性梁单元(BEAM3)进行模拟,两者之间用弹簧单元连接,模型如图 3。

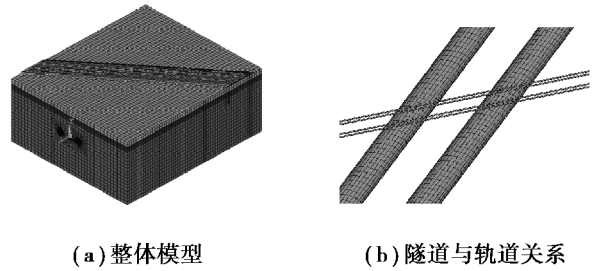


图 3 有限元模型
Fig. 3 FEM model

根据地勘报告,选取的地层和管片混凝土物理力学参数列于表 2。

表 2 物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical indexes of aaterials

地层 编号	土层名称	密度/ ($\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
1	人工填土	1.8	7.0	0.35
2	粉质黏土	1.88	12.2	0.3
3	黏土	1.98	17	0.3
4	粉土	2.02	40	0.35
5	管片 C50	2.5	0.75×35.5	0.17
6	盾构盾壳	7.8	11.7	0.2

注:管片材料考虑接头因素,刚度折减系数取 0.75。

列车行驶过程中,实际作用于轨道上的竖直力为车轮的动载。由于轮轨作用力的复杂性,将作用在计算模型上的动载荷简化成静载的形式施加于轨道上。考虑最不利情况为最大轴重 250 kN 加荷于隧道正上方时。

采用改变刚度和生死单元的方法模拟盾构施工的动态过程,其核心是将管片施作和荷载的移动随着盾构机的推进而前进,视作一个以一环管片施作为周期的动态过程^[15]。利用 ANSYS 的“生死”单元功能以及载荷(正面土压力、摩擦力)的同步调整来模拟盾构推进。盾构推进过程中,通过降低土体刚度模拟土体扰动和盾尾空隙。与此同时,逐步改变惰性浆液的材料性能来模拟同步注浆,充分体现浆液的凝结和注浆压力的消散。

3.4.2 计算结果分析

经过计算和统计分析,得出相应指标结果如表 3 所示。轨道静态几何尺寸控制值相关指标均小于按“ $V_{\text{max}} > 160 \text{ km/h}$ 正线-临时补修”的允许变形值,其中轨道高低、水平偏差均与允许值在一个量级上,其余指标均小于允许值一个数量级,因此,高低偏差与水平偏差为隧道施工引起轨道静态几何尺寸变化的控制指标,需予以重点控制。从挡墙的变形来看,挡墙最大累计沉降值和倾斜率均小于控制值,但量值较为接近,鉴于计算和实际情况存在的差异,对挡墙的变形也必须予以重点控制。

表 3 变形指标计算结果

Table 3 Calculation results of deformation

项目	轨道静态几何尺寸	允许	是否
	最大变化值	变形值	满足
轨距/mm	0.21	+2	满足
	-0.24	-2	满足
水平/mm	1.03	3	满足
高低/mm	1.67	3	满足
轨向(直线)/mm	-0.51	3	满足
挡墙最大沉降值/mm	24.1	30	满足
挡墙倾斜/‰	0.84	2	满足

3.4.3 对策建议

采用数值模拟方法对施工过程进行模拟,得到了针对主要风险源相关指标的预测值。将计算报告(重点是相关风险源的数值预测值)、建议措施和调研的结果反馈给专家组,专家组再次对安全风险底层因素和后果进行定性评价。依据专家组二次反馈信息,经过统计和分析,并在原有设计方案基础上增加了几条应对措施:确定合理的盾构推进路线方向;对国铁线路增加扣轨和限速(80 km/h)等有效措施。

3.5 工程风险复评

由于前面已经计算出相对权重并给出了排序,故在对残留风险进行评价时,沿用初评阶段层次分析法处理得到的权重结果,直接进行风险模糊评价。风险指标体系模糊综合评判包括 18 个三级指标、8 个二级指标、3 个一级指标。邀请评审团对下穿站场段方案设计阶段安全残留风险底层因素重新评价,利用模糊隶属关系对专家评语集进行处理(方法同 3.3),得到各底层因素的模糊评价参数矩阵:

$$R_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0.10 & 0.40 & 0.50 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0.55 & 0.20 & 0 \end{bmatrix}$$
$$R_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0.15 & 0.40 & 0.45 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0.45 & 0.30 & 0 \\ 0 & 0.10 & 0.25 & 0.40 & 0.25 \\ 0 & 0.15 & 0.40 & 0.45 & 0 \end{bmatrix}$$
$$R_{13} = \begin{bmatrix} 0 & 0.20 & 0.30 & 0.50 & 0 \\ 0 & 0.10 & 0.15 & 0.30 & 0.45 \\ 0 & 0.05 & 0.30 & 0.65 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} R_{21} &= \begin{bmatrix} 0 & 0.25 & 0.40 & 0.35 & 0 \\ 0 & 0 & 0.40 & 0.55 & 0.05 \\ 0 & 0.25 & 0.50 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0.15 & 0.35 & 0.50 & 0 \\ 0 & 0.10 & 0.25 & 0.65 & 0 \end{bmatrix} \\ R_{22} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.20 & 0.75 & 0.05 \\ 0 & 0.30 & 0.40 & 0.30 & 0 \\ 0 & 0.40 & 0.60 & 0 & 0 \\ 0 & 0.15 & 0.25 & 0.60 & 0 \end{bmatrix} \\ R_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.30 & 0.70 & 0 \\ 0 & 0.05 & 0.45 & 0.50 & 0 \\ 0 & 0.10 & 0.40 & 0.50 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

将复评的模糊评价参数矩阵与初评的模糊评价参数矩阵进行对比:复评阶段的安全风险概率方面的总得分为 $M=2.331$, 风险损失方面的总得分 $M'=3.04$, 明显低于初评的总得分 $M=3.293$, $M'=3.97$ 。可知,复评阶段在综合考虑各项处理措施和计算结果的基础上,地铁下穿站场段安全风险为“中度”,较初期安全风险为“高度”有了明显降低。

4 结论

相比于常规的工程风险评估存在的单一地观察判断和经验分析问题,不能将工程实际状况的定量分析和风险指标因素比较客观地结合起来,本文着眼于工程实例,尝试了一种风险评估与工程状况相互反馈的动态评估模式,提出对风险进行“初评、数值模拟分析、复评”的理念,将风险评估与数值模拟和工程设计紧密地结合起来。具体结论如下:

- (1)通过“初评-数值模拟分析-风险复评”这一动态风险评估方法和流程,有利于减少专家评价的主观性,加强数值分析的针对性,从而提高风险评估对工程设计的指导作用。
- (2)通过科学、合理的安全风险评估过程,得到本工程设计阶段的安全风险等级为“中度”,其中挡墙的倾斜、轨道高低偏差与水平偏差为盾构隧道下穿国铁站场工程的重点风险源,可为辅助优化设计及类似工程风险设计提供依据。
- (3)除按设计要求加强盾构施工时的综合控制,减少对地层的扰动和地层损失,以及采取严密

的监控量测和应急管理等措施外,还需结合地铁线路的具体形态确定合理的盾构推进路线方向,并对国铁线路增加扣轨和限速等有效措施。

参考文献 (References)

[1] Haos C, Einstein H H. Updating the decision aids for tunneling [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2002, 128 (1) :40-48.

[2] Einstein, H H, Vick S G. Geologic model for a tunnel model [A] // Proceedings of Rapid Excavation and Tunneling Conference [C]. 1974: 1701-1720 .

[3] 刘凌云,杨德磊,郭海柱.隧道盾构进出洞施工风险分析[J].低温建筑技术,2010(8):51-53. (Liu Lingyun, Yang Delei, Guo Haizhu. Risk analysis of tunnel shield machine driving in and driving out construction process in tunnel engineering[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2010(8):51-53. (in Chinese))

[4] 侯艳娟,张顶立.浅埋大跨隧道穿越复杂建筑物安全风险分析及评估[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增2):3718-3726. (Hou Yanjuan, Zhang Dingli. Safety risk analysis and assessment of complex buildings in shallow-buried large-span tunnel construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.2):3718-3726. (in Chinese))

[5] 李俊松,仇文革.近接房屋的隧道基坑失稳风险分析与管理[J].中国铁道科学,2011,32(6):76-80. (Li Junsong, Qiu Wenge. Instability risk analysis and management for tunnel foundation pit close to building [J]. China Railway Science, 2011, 32(6):76-80. (in Chinese))

[6] 卢裕杰.盾构隧道穿越火车站股道风险分析及对策[J].地下空间与工程学报,2013,9(6):1413-1418. (Lu Yujie. Analysis and measures for risk of metro shield tunneling crossing underneath tracks of railway station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013,9(6):1413-1418. (in Chinese))

[7] 中国土木工程学会主编.地铁及地下工程建设风险管理指南[S].北京:中国建筑工业出版社,2007. (China Civil Engineering. Guideline of risk management for construction of subway and underground works [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2007. (in Chinese))