

# 深基坑工程施工风险评价方法及应用\*

钟玉明<sup>1</sup>, 傅鹤林<sup>2</sup>, 黄震<sup>2</sup>, 刘永成<sup>1</sup>, 蓝洋<sup>1</sup>

(1. 中铁隧道局集团有限公司, 广东 广州 511400; 2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

**摘要:** 城市深基坑工程风险事件具有不确定性, 且风险事件产生的后果严重。文中结合广东金光东隧道明挖暗埋深基坑工程施工, 采用失效模式与效应分析(FMEA)、故障树分析(FTA)、层次分析—数据包络分析(AHP—DEA)相结合的方法进行深基坑工程施工风险综合评价。结果表明, 基坑塌方风险>基坑大变形破坏风险>对周边环境影响风险>支护结构失稳风险>基底隆起风险>基坑突水或涌泥风险; 风险事件的优先级 RPN 分值为 0.2~0.4, 风险等级为 2 级。

**关键词:** 工程管理; 深基坑; 风险评价; 模糊理论; 失效模式与效应分析(FMEA); 故障树分析(FTA); 层次分析—数据包络分析(AHP—DEA)

中图分类号: U415.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)05-0159-07

城市深基坑工程与周边建筑物、环境关系密切, 对其施工工艺、施工场地和开挖形状提出了更高要求。同时深基坑开挖中存在大量不确定性风险事件, 采用合理风险评价方法分析深基坑施工风险事件等级, 并对施工风险较高事件采取对应控制措施, 成为大规模深基坑施工风险评价的必要环节。

施工风险管理的目的是识别风险来源并分析其影响, 最终通过开发相应管理工具实现项目风险管理。风险管理包括风险识别、风险评估、风险控制和风险监测等。风险评估方法有很多, 其中模糊评价法由于具有反映评价对象模糊性的特点, 已广泛应用于各行各业风险管理中。风险产生原因分析可帮助项目管理者找到风险控制关键点并制定应对策略, 最终实现最大限度减少风险源。故障树分析法(FTA)具有快速搜索风险事件根本原因的特点, 其

中模糊故障树分析法作为一种较新的风险分析方法, 在施工风险评价中已有应用。该文采用失效模式与效应分析(FMEA)、故障树分析(FTA)、层次分析—数据包络分析(AHP—DEA)相结合的方法对深基坑工程施工风险进行综合评价。

## 1 工程概况

广州市国际创新城金光东隧道位于广州市东南部, 连接广州市番禺区大学城和新造镇, 处于新华快速路与南沙港快速路之间, 距下游新华快速路约 2 km。隧道全长 2 710 m, 按双向四车道标准设计, 设计行车速度主线 50 km/h、匝道 30 km/h。

金光东隧道明挖段被江中沉管法隧道和南岸元岗山矿山法隧道分隔为 3 段, 分别为新造侧南段、新造侧临江段和大学城段, 明挖隧道设计范围见图 1。

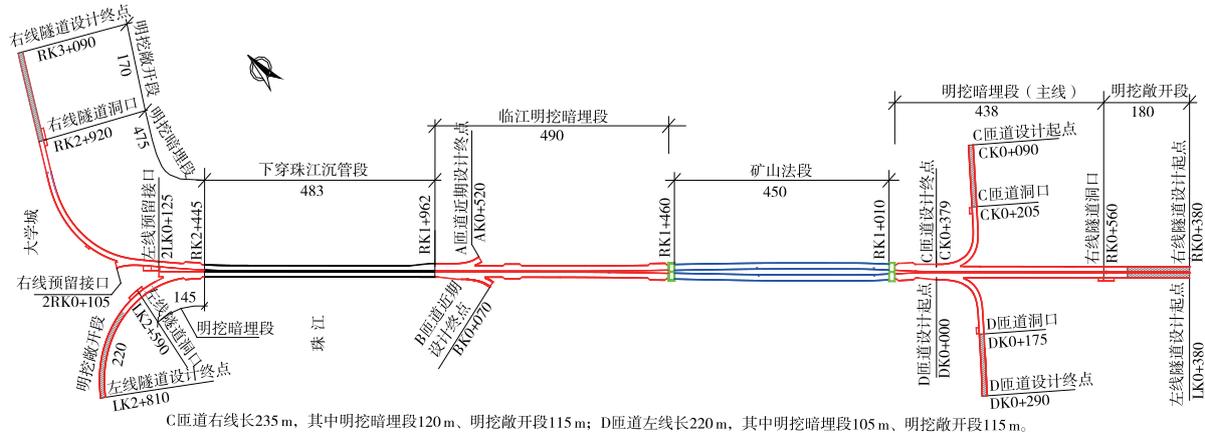


图 1 金光东隧道工程平面布置(单位: m)

\* 基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助课题(51538009); 中铁隧道集团科技创新计划(2017-43)

新造侧:基坑开挖深度大于 18 m 处,围护结构采用  $\phi 1\ 200@1\ 400$  钻孔灌注桩;开挖深度 18~5 m 处,采用  $\phi 800@950$  钻孔灌注桩支护;临江段端头围护结构采用 C30 素砼连续墙+ $\phi 1\ 200@1\ 400$  钢管桩;1#、2# 竖井明挖范围围护结构采用 C30 钢筋砼连续墙;临江段端头钻孔桩距离沉管与明挖分界净距 15 m,沉管与明挖分界位置设置钢筋砼承台,承台宽 3 m、高 1 m。基坑宽度大于 26 m 处,基坑中间设置双排 520 mm $\times$ 520 mm 钢格构立柱,立柱基础采用  $\phi 1\ 200$  钻孔灌注桩;宽度 26~20 m 处,立柱基础采用  $\phi 1\ 000$  钻孔灌注桩。

大学城侧:基坑开挖深度 16~4 m 处,围护结构采用  $\phi 1\ 000@1\ 200$  钻孔灌注桩;开挖深度小于 4 m 处,围护结构采用拉森 IV 型钢板桩;临江段端头围护结构采用下部  $\phi 1\ 000@1\ 200$  钻孔灌注桩+上部  $\phi 1\ 000@1\ 200$  钢管桩,方便后期割除;临江段端头沉管与明挖分界净距 15 m,沉管与明挖分界位置设置桩基+承台,承台宽 3 m、高 1 m,承台底部桩基为双排  $\phi 1.0\ m@2.5\ m$  钻孔灌注桩。基坑宽度大于 24 m 处,基坑中间设置 520 mm $\times$ 520 mm 钢格构立柱,立柱基础采用  $\phi 1\ 000$  钻孔灌注桩。

## 2 施工风险分析方法

### 2.1 模糊集理论

目前用于施工项目风险评估的方法大多是基于语言评估而不是数值评估。运用模糊逻辑理论时,数据用语言变量定义,如概率低、极端严重或高风险,变量不能用数值来量化。而模糊集理论可量化这些变量,反映事物的不确定性和模糊性。模糊数是凸模糊集和正规模糊集的特例,模糊数的特征在于给定的实数区间,每个实数具有 0~1 的隶属度。语言变量由自然语言或人工语言中的词或句子来表示,模糊数可适当地表达语言变量。

#### 2.1.1 模糊隶属函数

模糊隶属函数有三角形模糊数、梯形模糊数和高斯模糊数等,其中前二者运用较多。但三角模糊数隶属函数的形状较简单,不能很好地反映决策者的决策信息,尤其是当决策方案依据一定的因素时,评价结果往往与实际情况存在很大差异。梯形模糊数的隶属函数更复杂,能更好地处理实际决策信息,反映因素不确定性和决策者的主观态度。

采用梯形隶属函数对专家知识中的主观不确定性和模糊不确定性进行量化,如图 2 所示,可将梯形

模糊数  $A$  定义为  $(a_1, a_2, a_3, a_4)$ 。

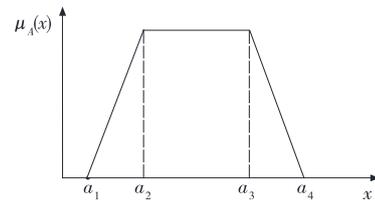


图 2 梯形模糊数  $A$

#### 2.1.2 模糊集的 $\alpha$ 截集

为便于数值计算,将模糊数表示为有限个  $\alpha$  截集的上界和下界集合。对于梯形模糊数  $(a, b, c, d)$ ,每个  $\alpha$  截集水平方向上的下限和上限分别为:

$$\text{下限} = a_i + (b_i - a_i)\alpha \quad (1)$$

$$\text{上限} = d_i - (d_i - c_i)\alpha \quad (2)$$

若  $A$  和  $B$  是区间  $\alpha_A = [a_1, d_1]$ 、 $\alpha_B = [a_2, d_2]$  上的两个模糊集合,则  $\alpha_A + \alpha_B$ 、 $\alpha_A - \alpha_B$  和  $\alpha_A \times \alpha_B$  可定义为:

$$\alpha_{(A+B)} = \alpha_A + \alpha_B = [a_1 + a_2, d_1 + d_2] \quad (3)$$

$$\alpha_{(A-B)} = \alpha_A - \alpha_B = [a_1 - d_2, d_1 - a_2] \quad (4)$$

$$\alpha_{(A \times B)} = \alpha_A \times \alpha_B = [\min(a_1 \times a_2, a_1 \times d_2, d_1 \times a_2, d_1 \times d_2), \max(a_1 \times a_2, a_1 \times d_2, d_1 \times a_2, d_1 \times d_2)] \quad (5)$$

#### 2.1.3 去模糊化处理

按下式进行去模糊化处理:

$$M = \frac{a + 2(b + c) + d}{6} \quad (6)$$

### 2.2 失效模式与效应分析(FMEA)

FMEA 是一种能定义、识别和消除来自系统、设计或过程的已知及潜在故障、问题和错误的工程技术。传统的 FMEA 方法通过计算风险优先级  $RPN$  确定故障模式的临界程度, $RPN$  为严重程度  $S$ 、发生度  $O$  和检测/控制难易度  $D$  的乘积。由于传统 FMEA 方法存在缺陷,引入模糊数取代清晰数字来测量  $S$ 、 $O$ 、 $D$ ,这些模糊数可基于专家判断或其他技术语言变量。

### 2.3 故障树分析(FTA)

FTA 通过关系图形追溯系统的危害,并找到其根本原因。但收集足够的统计数据来准确评估故障率或失效概率往往较困难,为克服这个问题,结合模糊集理论。故障树分析用于识别风险的根本原因、评估顶上事件的发生概率。

假设事故树中不含重复或相同的基本事件,各事件互相独立,顶上事件发生概率可根据故障树结

构通过公式计算。该文基于  $\alpha$  截集的概念计算顶上事件发生概率,“与门”、“或门”的模糊数形式的故障树顶上事件概率分别见式(7)和式(8)。

$$FPro_T(\text{顶上事件})^\alpha = \{ \Pi_{i=1}^n [(a_i + (b_i - a_i)\alpha)], \Pi_{i=1}^n [(d_i - (d_i - c_i)\alpha)] \} \quad (7)$$

$$FPro_T(\text{顶上事件})^\alpha = \{ 1 - \Pi_{i=1}^n [1 - (a_i + (b_i - a_i)\alpha)], 1 - \Pi_{i=1}^n [1 - (d_i - (d_i - c_i)\alpha)] \} \quad (8)$$

### 2.4 层次分析—数据包络分析(AHP—DEA)

AHP 是一种多准则决策方法,通过该方法可评估备选方案并计算其费率。该方法基于结构分解、判断比较和优先级分层组合 3 个基本原则,适用于主观专家判断及使用定性和定量数据的决策情况。该方法创建每个专家决策或判断的优先级指标,并通过确保它们的一致性来总结这些判断结果。

对于  $N$  个决策选项,采用判断矩阵,若给定大量不同的标准和决策选项,决策者需进行大量比较分析。为解决这个问题,采用数据包络分析(DEA)的 AHP 方法。DEA 是一种评价性能的非参数方法,包括多输入和多输出变量,是建立具有多个指标的评价机制及无法客观确定权重时的最佳方法。

为明确各风险的相对重要性,为每个标准制订备选方案,按式(9)为每个标准引入一组评估度。

$$G = \{H_{j1}, \dots, H_{jk}\} \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (9)$$

式中: $H_{j1}, \dots, H_{jk}$ 表示标准  $j$  的评估分数从最高显著性到最低显著性; $k_j$ 表示每个标准的评估分数。

如果标准  $j$  由  $N_j$  专家评估,则结果可由式(10)的分布评价向量表示。

$$R(C_j(A_i)) = \{(H_{j1}, NE_{ij1}), \dots, (H_{jk_j}, NE_{ijk_j})\} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m) \quad (10)$$

用于确定  $s(H_{jk})$  值的 DEA 模型可表述为:

$$\alpha \leq v_{ij} = \sum_{k=1}^{k_j} s(H_{jk}) NE_{ijk} \leq 1 \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

$$s(H_{j1}) \geq 2s(H_{j2}) \geq \dots \geq k_j s(H_{jk_j}) \geq 0 \quad (11)$$

式中: $s(H_{j1}), \dots, s(H_{jk_j})$ 为决策变量。

每个决策备选方案的局部权重也可用式(12)中的信任结构来定义。

$$v_{ij} = \sum_{k=1}^{k_j} s(H_{jk}) NE_{ijk} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m) \quad (12)$$

最后通过下式生成总体权重:

$$V(A_i) = \sum_{j=1}^m \omega_j v_{ij} = \sum_{j=1}^m \omega_j [\sum_{k=1}^{k_j} s(H_{jk} NE_{ijk})] \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

式中: $\omega_j (j=1, 2, \dots, m)$ 为 AHP 确定的因素权重; $v_{ij}$ 为 DEA 方法确定的局部权重; $V(A_i) (i=1, 2, \dots, n)$ 为  $n$  个备选方案的总权重。

根据以上权重,可对  $n$  个备选方案进行排序。

## 3 施工风险综合评价过程

### 3.1 施工风险评估流程(见图 3)

#### 3.2 风险辨识

由隧道工程专家、科研单位主要技术人员、设计院主要技术人员、监理工程师及项目部主要技术人员组成项目风险评估小组(不少于 10 人),对工程项

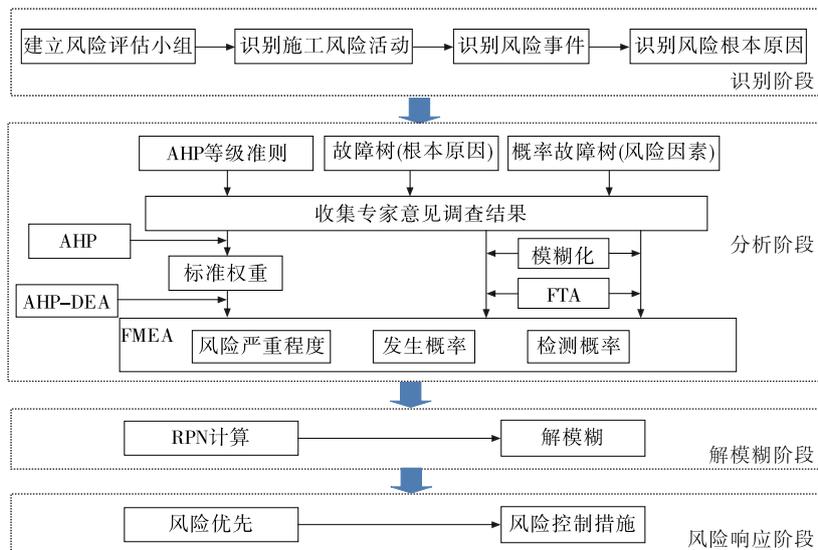


图 3 施工风险评估流程

目的主要任务及其风险进行辨识。

### 3.3 风险分析

(1) 针对风险因素和不期望事件的原因建立层次结构。在模糊 FTA 中,通过给基本事件的概率赋值并计算传播概率确定顶上事件(TE)的发生概率。采用语言变量(非常低、低、中、高和非常高)为故障树

和每个风险的影响制作调查问卷,由评估小组成员评估基本事件发生的模糊概率。表 1 为语言变量及对应的梯形模糊数,图 4 为不同语言变量所对应的模糊隶属度函数。将基本事件的模糊概率代入式(8),得到不同  $\alpha$  截集下顶上事件的模糊概率。该方法同时用于计算发生概率和风险检测/控制概率。

表 1 发生概率和识别危险对应的评估语言变量

语言变量	梯形模糊数	发生概率 $O$	检测概率 $D$
非常低	(0,0,0.01,0.01)	危险几乎不发生	完全可检测风险事件
低	(0,0.01,0.05,0.10)	危险最多发生一次	检测风险事件的概率很高
中	(0.05,0.10,0.20,0.30)	可能发生不止一种危险	检测风险事件的概率一般
高	(0.20,0.30,0.40,0.50)	至少有一种危险或更多风险发生	检测风险事件的概率很低
非常高	(0.40,0.50,1,1)	肯定会发生几种危险	几乎不可能检测风险事件

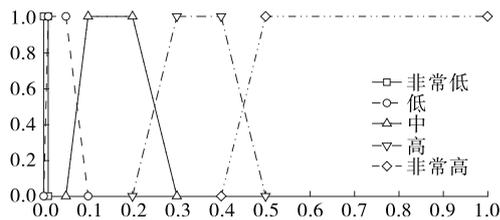


图 4 语言评估值的隶属函数

(2) 采用 AHP-DEA 方法计算风险影响因素的权重。考虑风险对个人的伤害、财产损失、施工进度和环境影响,利用专家的认知(收集问卷调查结果)进行相互比较,并采用 AHP 法对个人伤害、财产损失、施工进度和环境影响进行加权。

(3) 根据模糊 FMEA 方法对每个识别风险的  $S$ 、 $O$ 、 $D$  结果进行分析。

### 3.4 风险优先级 $RPN$

结合  $\alpha$  截集和式(5),将发生概率、检测/控制概率和风险影响 3 个参数相乘得到风险优先级  $RPN$ ,并利用式(6)对  $RPN$  进行去模糊化处理。

### 3.5 风险控制

根据  $RPN$  对风险事件进行排序,并对那些具有较高优先级的风险进行风险控制分析,提出对应预防措施。

## 4 明挖段深基坑施工风险分析

### 4.1 风险识别

通过调查该隧道明挖施工及基坑施工事故,分析项目周边建筑环境、水文地质条件、施工工艺、人员管理、施工进度等,咨询隧道行业专家和安全技术管理人员,确定 6 个主要风险事件(见表 2)。

表 2 深基坑施工风险事件的模糊发生概率的  $\alpha$  截集

风险因素	不同 $\alpha$ 下的发生概率		
	0	0.5	1
基坑大变形破坏	[0.46,0.90]	[0.55,0.84]	[0.62,0.83]
基坑塌方	[0.44,0.89]	[0.51,0.87]	[0.57,0.81]
支护结构失稳	[0.36,0.86]	[0.41,0.79]	[0.49,0.78]
基坑突水或涌泥	[0.67,0.90]	[0.72,0.83]	[0.84,0.79]
基底隆起	[0.48,0.91]	[0.55,0.90]	[0.67,0.88]
对周边环境的影响(建筑物、地表沉降等)	[0.55,0.93]	[0.65,0.91]	[0.72,0.90]

### 4.2 发生概率计算

绘制相关风险的故障树。以图 5 所示基坑大变形破坏故障树为例,根据问卷调查数据计算基本事件的发生概率。然后将语言变量转化为梯形模糊数,并使用表 1 中的语言变量校正基本事件的模糊发生概率。最后通过故障树分析,根据  $\alpha$  割集计算顶部事件的模糊概率。

根据式(1)、式(7)和式(8),顶上事件的模糊概率可表示为:

$$FPro(\text{顶上事件}) = 1 - [(1 - FPro(A)_\alpha) \times (1 - FPro(B)_\alpha) \times (1 - FPro(C)_\alpha) \times (1 - FPro(D)_\alpha) \times (1 - FPro(E)_\alpha) \times (1 - FPro(F)_\alpha) \times (1 - FPro(G)_\alpha) \times (1 - FPro(H)_\alpha) \times (1 - FPro(I)_\alpha)] \quad (14)$$

按式(5)求解式(8)中的乘法算子,利用式(14)计算顶上事件发生的模糊概率,结果见表 2。

### 4.3 检测概率计算

绘制用于所有风险的检测故障树(见图 6),按发生概率计算过程计算风险检测概率,结果见表 3。

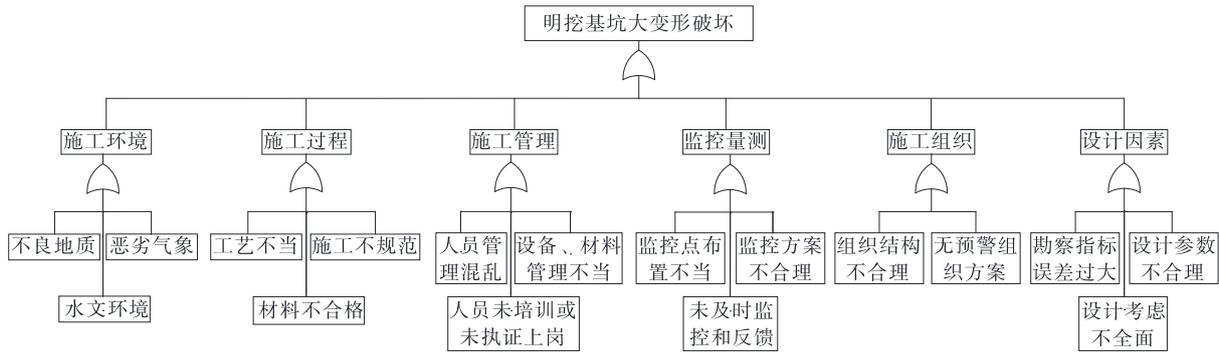


图5 明挖深基坑大变形事故树

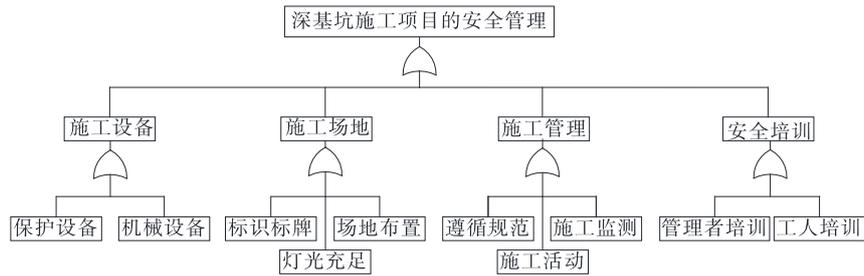


图6 风险检测概率的故障树

表3 α截集的模糊检测概率

风险因素	不同 α 下的发生概率		
	0	0.5	1
基坑大变形破坏	[0.31,0.85]	[0.40,0.84]	[0.48,0.79]
基坑塌方	[0.34,0.91]	[0.41,0.90]	[0.53,0.88]
支护结构失稳	[0.36,0.79]	[0.45,0.71]	[0.52,0.67]
基坑突水或涌泥	[0.37,0.92]	[0.40,0.90]	[0.54,0.85]
基底隆起	[0.30,0.90]	[0.38,0.87]	[0.46,0.86]
对周边环境的影响	[0.45,0.99]	[0.49,0.98]	[0.55,0.97]

4.4 风险影响计算

采用 AHP-DEA 方法,考虑风险对个人的伤害、财产损失、施工进度和环境影响,利用专家认知进行两两比较,并采用 AHP 法对个人伤害、财产损失、施工进度和环境影响进行加权处理,得其得分分别为 0.315、0.221、0.276 和 0.188,适应率为 0.06。适应率小于 0.1,表明因素值计算结果正确,且参与者的响应具有一定的可靠性。

按式(11)计算,结果如下:个人伤害的最优解为  $S(\text{非常高})=0.0605, S(\text{高})=0.0512, S(\text{中})=0.0409, S(\text{低})=0.0236, S(\text{非常低})=0.0223$ ;财产损失的最优解为  $S(\text{非常高})=0.0615, S(\text{高})=0.0534, S(\text{中})=0.0413, S(\text{低})=0.0272, S(\text{非常低})=0.0131$ ;施工进度的最优解为  $S(\text{非常高})=0.0735, S(\text{高})=0.0658, S(\text{中})=0.0443, S(\text{低})=$

$0.0302, S(\text{非常低})=0.0157$ ;环境影响的最优解为  $S(\text{非常高})=0.0770, S(\text{高})=0.0696, S(\text{中})=0.0422, S(\text{低})=0.0347, S(\text{非常低})=0.0164$ 。

基于上述最优解,通过式(12)计算 4 个因素的局部风险得分,结果见表 4。

表4 风险严重程度总分

风险因素	局部风险得分				综合影响得分
	个人伤害	财产损失	施工进度	环境影响	
基坑大变形破坏	0.85	0.89	0.67	0.31	0.708
基坑塌方	0.86	0.84	0.65	0.30	0.692
支护结构失稳	0.77	0.81	0.57	0.28	0.632
基坑突水或涌泥	0.35	0.41	0.43	0.45	0.404
基底隆起	0.48	0.46	0.53	0.31	0.457
对周边环境的影响	0.54	0.53	0.58	0.81	0.440

按式(13)计算每个风险因素的综合影响得分,以第一个风险因素即基坑大变形破坏风险为例,其综合影响得分= $(0.315 \times 0.85) + (0.221 \times 0.89) + (0.276 \times 0.67) + (0.188 \times 0.31) = 0.708$ 。同理可计算得到其他风险因素的综合影响得分(见表 4)。

4.5 风险优先级

以基坑大变形破坏为例,根据表 2~4,基坑大变形破坏风险的 O、D 和 S 值分别为:

$$O=(0.46,0.62,0.83,0.90)$$

$$O_{\alpha_0} = [0.46, 0.90]$$

$$O_{\alpha_1} = [0.62, 0.83]$$

$$D = (0.31, 0.48, 0.71, 0.85)$$

$$D_{\alpha_0} = [0.31, 0.85]$$

$$D_{\alpha_1} = [0.48, 0.71]$$

$$S = 0.708$$

采用式(5)求解乘法算子,计算 $\alpha=0$ 和 $\alpha=1$ 的RPN如下:

$$RPN_{\alpha_0} = S \times O \times D = 0.708 \times [(0.46 \times 0.31, 0.90 \times 0.85)] = [0.101, 0.542]$$

$$RPN_{\alpha_1} = S \times O \times D = 0.708 \times [(0.62 \times 0.48, 0.83 \times 0.79)] = [0.211, 0.417]$$

$$RPN = (0.101, 0.211, 0.417, 0.542)$$

根据式(6)计算基坑大变形破坏的去模糊化值:

$$M = \frac{a + 2(b + c) + d}{6} = \frac{0.101 + 2(0.211 + 0.417) + 0.542}{6} = 0.3321$$

同理,计算其他风险因素的风险优先级RPN,并对风险进行评级排序,结果见表5。

表5 风险因素的优先级RPN

风险因素	RPN	排序
基坑大变形破坏	0.3321	2
基坑塌方	0.3448	1
支护结构失稳	0.2490	4
基坑突水或涌泥	0.2240	6
基底隆起	0.2356	5
对周边环境的影响	0.2718	3

根据表6中的风险分级标准,上述风险事件的优先级RPN分值为0.2~0.4,风险等级为2级,表明该基坑施工风险等级较低。可针对具有较高优先级的风险事件采取一定控制措施加以预防。

表6 施工安全风险等级

风险等级	RPN	风险控制措施
5	$RPN \geq 0.7$	必须采取控制措施
4	$0.55 \leq RPN < 0.7$	优先采取控制措施
3	$0.40 \leq RPN < 0.55$	适度采取控制措施
2	$0.20 \leq RPN < 0.40$	可采取一定控制措施
1	$RPN \leq 0.2$	没有必要采取任何控制措施

## 5 结论

(1) 广东金光东隧道明挖暗埋深基坑工程施工

中,基坑塌方风险>基坑大变形破坏风险>对周边环境的影响风险>支护结构失稳风险>基底隆起风险>基坑突水或涌泥风险,风险事件优先级RPN分值为0.2~0.4,风险等级为2级,可针对这些风险事件采取一定控制措施加以预防。该基坑工程施工风险事件较低的原因主要是该工程地下管线和周边建筑物较少、施工方案合理、施工风险预控措施完善、施工设计较合理、勘察资料齐全。

(2) 采用失效模式与效应分析(FMEA)、故障树分析(FTA)、层次分析-数据包络分析(AHP-DEA)相结合的方法进行深基坑施工风险评价,可较好地反映施工风险因素对个人的伤害、财产损失、施工进度和环境的影响程度,筛选深基坑施工风险重要事件。

## 参考文献:

- [1] 申建红,盖立庭,梁竞之.基于D-S证据理论的深基坑施工风险评价[J].工程管理学报,2018,32(5).
- [2] 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).
- [3] 刘俊伟,尚文昌,于秀霞,等.基于模糊评判理论的深基坑施工风险评价[J].地下空间与工程学报,2016,12(3).
- [4] Cheng Min, Lu Yujie. Developing a risk assessment method for complex pipe jacking construction projects [J]. Automation in construction, 2015, 58.
- [5] 黄震,傅鹤林,尹光明,等.地铁隧道结构灾变模型及应用研究[J].灾害学,2018,33(3).
- [6] 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).
- [7] 黄震,傅鹤林,黄宏伟,等.一种运营地铁盾构隧道结构健康状况评价方法[J].地下空间与工程学报,2018,14(5).
- [8] 程敏,王倩露,林慧龙,等.基于改进FMEA法的深基坑施工风险评价[J].土木工程与管理学报,2018,35(1).
- [9] 张胜昔,陈为公,王会会,等.基于G-FAHP的深基坑施工风险评价[J].土木工程与管理学报,2016,33(5).
- [10] 刘俊伟,尚文昌,于秀霞,等.基于模糊评判理论的深基坑施工风险评价[J].地下空间与工程学报,2016,12(3).
- [11] 郭健,钱劲斗,陈健,等.地铁车站深基坑施工风险识别与评价[J].土木工程与管理学报,2017,34(5).
- [12] 刘敬辉.基于FTA-AHP的铁路安全风险综合评估方法[J].中国铁道科学,2017,38(2).
- [13] Abdelgawad M, Fayek A. Fuzzy reliability analyzer:

quantitative assessment of risk events in the construction industry using fuzzy fault-tree analysis[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2011, 137(4).

- [14] Mentis A, Helvacioğlu I H. An application of fuzzy fault tree analysis for spread mooring systems[J]. Ocean engineering, 2011, 38(2-3).
- [15] 李文锋, 游庆和, 廖强, 等. 基于 T-S 模糊 FTA 的远程故障诊断方法研究[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 25(9).
- [16] Zadeh L. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8.
- [17] Braglia M, Frosolini M, Montanari R. Fuzzy criticality assessment model for failure modes and effects analysis[J]. International Journal of Quality & Reliability Management, 2003, 20(4).
- [18] Pillay A, Wang J. Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2003, 79(1).
- [19] Vario J K. Fault tree analysis of phased mission system with repairable and non-repairable components[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2001, 74(2).
- [20] Vidal L A, Marle F, Bocquet J C. Using a delphi process and the analytic hierarchy process (AHP) to evaluate the complexity of projects[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(5).
- [21] Wang Y M, Liu J, Elhag T M S. An integrated AHP-DEA methodology for bridge risk assessment[J]. Computers & Industrial Engineering, 2008, 54(3).

收稿日期: 2019-03-11

\*\*\*\*\*  
(上接第 120 页)

可从桥梁构造的角度采取措施预防桥梁桩基破坏。

#### 参考文献:

- [1] 郑新亮, 王东升, 唐亮, 等. 液化场地桥梁桩基础震害及其抗震研究概述[J]. 中外公路, 2008, 28(4).
- [2] Kawashima K, Unjoh S. Impact of Hanshin Awaji Earthquake on seismic design and seismic strengthening of highway bridge[J]. Strural Engineering and Earthquake Engineering, JSCE, 1996, 13(2).
- [3] 鲁晓兵, 谈庆明, 王淑云, 等. 饱和砂土液化研究新进展[J]. 力学进展, 2004, 34(1).
- [4] 刘汉龙, 周云东, 高玉峰. 砂土地震液化后大变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2).
- [5] Baziar M H, Dobry R, Alemi M. Evaluation of lateral ground deformation using sliding block model[A]. Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering[C], 1992.
- [6] 周云东. 地震液化引起的地而大变形试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2003.
- [7] 马远刚, 茜平一. 横向土运动作用下群桩的性状研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(4).
- [8] 陈鹏, 李文华, 范涛, 等. 土体冲刷对桥梁桩基影响的三维差分模拟计算分析[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2007, 26(4).
- [9] 童立元, 王斌, 刘义怀. 地震地基液化大变形对桥梁桩基危害性二维数值分析[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(3).
- [10] JTG/T B02-01-2008, 公路桥梁抗震设计细则[S].
- [11] JTG B02-2013, 公路工程抗震规范[S].
- [12] 日本道路协会. 道路橋示方書(V耐震設計編)・同解説[S].

收稿日期: 2018-10-12

\*\*\*\*\*  
(上接第 158 页)

准设计, 2011(10).

- [4] 李俊松, 喻渝, 胖涛, 等. BIM 技术在铁路隧道工程全生命周期中的应用研究[A]. 第八届中国智慧城市建设技术研讨会论文集[C], 2013.
- [5] 刘鹏. 铁路工程设计 BIM 技术的差异化与解决方案[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(2).
- [6] 赵路, 翟世鸿, 陈富强, 等. BIM 技术在铁路项目隧道施工中的应用研究[J]. 施工技术, 2016, 45(18).
- [7] 智鹏, 史天运, 王万齐, 等. 高速铁路隧道工程精益化建设管理关键技术[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(6).
- [8] 孙建诚, 蒋浩鹏, 朱双晗. 基于 BIM 技术的三维公路模型设计探讨[J]. 重庆: 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2019, 38(1).
- [9] 喻钢, 胡珉, 高新闻, 等. 基于 BIM 的盾构隧道施工管理的三维可视化辅助系统[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(1).
- [10] 邓小军, 刘肖群, 董春晖. 基于 BIM 技术的隧道工程施工信息集成与管理应用研究[J]. 浙江建筑, 2018(8).

收稿日期: 2019-05-26