

基于模糊集与改进证据理论的综合管廊施工安全风险评价

蔡孟龙, 胡庆国, 何忠明

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 针对目前综合管廊施工安全风险评价中专家评语无法定性评价的问题, 确定并划分 5 个影响因素, 引入 COWA 算子, 建立基于改进 D-S 证据理论的施工安全风险评价模型, 对重庆市开州综合管廊建设一期项目进行全面评价。评价结果表明该项目的施工安全风险为中等, 与现场实际情况吻合, 该评价方法能客观真实地反映综合管廊施工安全风险评价中的不确定性, 提高评价的精确性。

关键词: 工程管理; 综合管廊; 施工安全风险; 模糊集; 改进证据理论

中图分类号: U415.12

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)02-0161-06

综合管廊在规划市政管线建设与增强城市综合承载能力方面具有显著优势, 能解决地下基础设施建设中路面重复开挖、架空线网过密及管线安全事故频发等问题, 还能最大化节约土地资源与最优化利用有限的地下空间资源实现城镇化。但其实施过程中易对周遭环境产生不良影响, 并伴随着安全事故的发生, 对其施工安全及邻近重要构筑物安全性影响风险评价已成为城市地下综合管廊建设中十分必要的环节。杜修力等采用证据理论对长春轻轨三期的某地下站深基坑工程施工风险进行了评价; 何忠明等通过分析高边坡爆破施工的失稳因素, 建立集对可拓模型对广西某高速公路扩建段高边坡爆破施工安全风险进行了评价; 刘艳宇等建立基于层次分析法的模糊评价模型, 对某综合管廊 PPP 项目风险管理进行了研究; 张胜昔等构建 G-FAHP 评价模型, 对青岛某深基坑施工风险进行了综合评价, 并对关键风险要素进行了排序。目前针对城市地下综合管廊项目的风险评价大多以 PPP 项目全生命周期为出发点, 且在大多数定量评价中会涉及专家打分, 会受到专家主观意见和自身经验等不确定因素的影响。该文章将模糊集与改进 D-S 证据理论相融合, 建立综合管廊施工安全风险评价模型, 对城市地下综合管廊施工安全风险进行全面评价。

1 理论简介

1.1 模糊集理论

模糊集理论采用隶属函数表示不确定概念外延

中对象属于概念的程度。采用高斯隶属函数反映正态分布特征, 即:

$$y = e^{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)}$$

式中: μ 为函数的中心; σ 为宽度, 其值与专家意见的确信度成反比。

1.2 D-S 证据理论

Dempster 教授提出利用多值映射思想来界定不确定概率的上、下界。由合成法则可知, n 个独立证据 m_1, m_2, \dots, m_n 的融合结果为:

$$m(A) = \begin{cases} 0, A = \emptyset \\ \frac{\sum_{A_i \cap B_j \cap C_k \cap \dots = A} m_1(A_i) \cdot m_2(B_j) \cdot m_3(C_k) \dots}{1 - K} \\ A = \emptyset \end{cases} \quad (1)$$

式中: K 为 n 个独立证据 m_1, m_2, \dots, m_n 的冲突程度,

$$K = \sum_{A_i \cap B_j \cap C_k \cap \dots = A} m_1(A_i) \cdot m_2(B_j) \cdot m_3(C_k) \dots$$

2 风险评价指标体系

2.1 评价指标体系的建立

由于综合管廊是在地下建设, 其基坑工程和主体工程具有复杂性、综合性且易受周边环境的影响。参考 GB 50838-2015《城市综合管廊工程技术规范》、GB 51354-2019《城市地下综合管廊运营级安全技术标准》等, 结合问卷调查法, 充分考虑其缆线、干线、支线及干支混合等 4 种设计类型, 选取 5 个主要影响因素构建综合管廊施工安全风险评价指标体系(见表 1)。

表1 综合管廊施工安全风险评价指标体系

评价目标	一级评价指标	二级评价指标
综合管廊施工安全风险评价	人为因素 A ₁	技术熟练水平 A ₁₁
		安全意识 A ₁₂
		施工作业规范程度 A ₁₃
	设计 A ₂	舱数 A ₂₁
		断面尺寸 A ₂₂
		管线入廊 A ₂₃
		单元分区口 A ₂₄
	施工技术 A ₃	土方开挖 A ₃₁
		深基坑支护 A ₃₂
		主体结构 A ₃₃
		降排水措施 A ₃₄
	施工管理 A ₄	施工组织 A ₄₁
		安全管理制度 A ₄₂
		地质条件 A ₅₁
	外部环境 A ₅	地下水位与管线 A ₅₂
		邻近建筑物 A ₅₃

2.2 综合管廊施工安全风险等级划分

在查阅大量建筑、公路、市政工程等评价文献的基础上,结合综合管廊项目的特点,按照李克特量表的形式,将综合管廊施工安全风险评价指标的等级评语按照高低分为 VL、L、M、H、VH 5 个等级,其值分别为 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$, 构成评语集合 $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5\}$ 。风险等级划分见表 2。

表2 综合管廊施工安全风险等级

风险等级	量化值	风险等级	量化值
很低 VL	0.1	高 H	0.7
低 L	0.3	很高 VH	0.9
一般 M	0.5		

3 综合管廊施工安全风险评价模型

3.1 权重的确定

引入连续有序加权平均算子 COWA 确定权重,运算步骤如下:

(1) 指标 A_i 决策数据集结为 $(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})$, 根据其数值大小对数据重新进行递减排序,并将新集结数列重新编号为 $(b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{in})$ 。

(2) 利用组合数计算 b_i 的权重,求加权向量:

$$\omega_{j+1} = \frac{C_{n-1}^j}{\sum_{k=0}^{n-1} C_{n-1}^k} = \frac{C_{n-1}^j}{2^{n-1}}; j = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (2)$$

式中: C_{n-1}^j 为 $n-1$ 个数据中任意 j 个数据的排列组合数。

(3) 按下式计算 A_i 的绝对权重 $\bar{\omega}_i$:

$$\bar{\omega}_i = \sum_{j=1}^n \omega_j \cdot b_{ij}; \omega_j \in [0, 1] \quad (3)$$

(4) 按下式计算指标 A_i 的相对权重 ω_i :

$$\omega_i = \frac{\bar{\omega}_i}{\sum_{i=1}^m \bar{\omega}_i}; i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

式(4)所得即为指标的 COWA 权重值。

3.2 隶属度矩阵的建立

由隶属度求出各指标隶属于不同风险等级的程度。定义中心点 $\mu = (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1)$, 则隶属度函数如下:

$$\begin{cases} y_{VL}(x, \sigma) = e^{-x^2/(2\sigma^2)} \\ y_L(x, \sigma) = e^{-(x-0.25)^2/(2\sigma^2)} \\ y_M(x, \sigma) = e^{-(x-0.5)^2/(2\sigma^2)} \\ y_H(x, \sigma) = e^{-(x-0.75)^2/(2\sigma^2)} \\ y_{VH}(x, \sigma) = e^{-(x-1)^2/(2\sigma^2)} \end{cases} \quad (5)$$

按式(5),结合各评价指标构造隶属度矩阵如下:

$$H_{A_1} = \begin{bmatrix} y_{VL}(a_{11}, \sigma_{11}) y_L(a_{11}, \sigma_{11}) y_M(a_{11}, \sigma_{11}) y_H(a_{11}, \sigma_{11}) y_{VH}(a_{11}, \sigma_{11}) \\ y_{VL}(a_{12}, \sigma_{12}) y_L(a_{12}, \sigma_{12}) y_M(a_{12}, \sigma_{12}) y_H(a_{12}, \sigma_{12}) y_{VH}(a_{12}, \sigma_{12}) \\ y_{VL}(a_{13}, \sigma_{13}) y_L(a_{13}, \sigma_{13}) y_M(a_{13}, \sigma_{13}) y_H(a_{13}, \sigma_{13}) y_{VH}(a_{13}, \sigma_{13}) \end{bmatrix}$$

$$H_{A_2} = \begin{bmatrix} y_{VL}(a_{21}, \sigma_{21}) y_L(a_{21}, \sigma_{21}) y_M(a_{21}, \sigma_{21}) y_H(a_{21}, \sigma_{21}) y_{VH}(a_{21}, \sigma_{21}) \\ y_{VL}(a_{22}, \sigma_{22}) y_L(a_{22}, \sigma_{22}) y_M(a_{22}, \sigma_{22}) y_H(a_{22}, \sigma_{22}) y_{VH}(a_{22}, \sigma_{22}) \\ y_{VL}(a_{23}, \sigma_{23}) y_L(a_{23}, \sigma_{23}) y_M(a_{23}, \sigma_{23}) y_H(a_{23}, \sigma_{23}) y_{VH}(a_{23}, \sigma_{23}) \\ y_{VL}(a_{24}, \sigma_{24}) y_L(a_{24}, \sigma_{24}) y_M(a_{24}, \sigma_{24}) y_H(a_{24}, \sigma_{24}) y_{VH}(a_{24}, \sigma_{24}) \end{bmatrix}$$

$$H_{A_3} = \begin{bmatrix} y_{VL}(a_{31}, \sigma_{31}) y_L(a_{31}, \sigma_{31}) y_M(a_{31}, \sigma_{31}) y_H(a_{31}, \sigma_{31}) y_{VH}(a_{31}, \sigma_{31}) \\ y_{VL}(a_{32}, \sigma_{32}) y_L(a_{32}, \sigma_{32}) y_M(a_{32}, \sigma_{32}) y_H(a_{32}, \sigma_{32}) y_{VH}(a_{32}, \sigma_{32}) \\ y_{VL}(a_{33}, \sigma_{33}) y_L(a_{33}, \sigma_{33}) y_M(a_{33}, \sigma_{33}) y_H(a_{33}, \sigma_{33}) y_{VH}(a_{33}, \sigma_{33}) \\ y_{VL}(a_{34}, \sigma_{34}) y_L(a_{34}, \sigma_{34}) y_M(a_{34}, \sigma_{34}) y_H(a_{34}, \sigma_{34}) y_{VH}(a_{34}, \sigma_{34}) \end{bmatrix}$$

$$H_{A_4} = \begin{bmatrix} y_{VL}(a_{41}, \sigma_{41}) y_L(a_{41}, \sigma_{41}) y_M(a_{41}, \sigma_{41}) y_H(a_{41}, \sigma_{41}) y_{VH}(a_{41}, \sigma_{41}) \\ y_{VL}(a_{42}, \sigma_{42}) y_L(a_{42}, \sigma_{42}) y_M(a_{42}, \sigma_{42}) y_H(a_{42}, \sigma_{42}) y_{VH}(a_{42}, \sigma_{42}) \end{bmatrix}$$

$$H_{A_5} = \begin{bmatrix} y_{VL}(a_{51}, \sigma_{51}) y_L(a_{51}, \sigma_{51}) y_M(a_{51}, \sigma_{51}) y_H(a_{51}, \sigma_{51}) y_{VH}(a_{51}, \sigma_{51}) \\ y_{VL}(a_{52}, \sigma_{52}) y_L(a_{52}, \sigma_{52}) y_M(a_{52}, \sigma_{52}) y_H(a_{52}, \sigma_{52}) y_{VH}(a_{52}, \sigma_{52}) \\ y_{VL}(a_{53}, \sigma_{53}) y_L(a_{53}, \sigma_{53}) y_M(a_{53}, \sigma_{53}) y_H(a_{53}, \sigma_{53}) y_{VH}(a_{53}, \sigma_{53}) \end{bmatrix}$$

3.3 证据融合

依据传统 D-S 证据理论中的 Dempster 合成法则可对数据进行融合,但证据之间的冲突程度越大,其算法缺陷逐渐突出,特别是当冲突较高时,融合结果可能不太符合实际。根据文献[10],证据间的互相冲突对决策评价而言并非全都是无用的。综合管廊施工安全风险分为 5 个等级,融合 n 位专家意见时所需的计算量随着专家人数呈指数增长。为提高高冲突下证据融合的合理性与真实性,引入基于权值分配与矩阵分析的算法,具体运算过程参考文献[11]~[12]。基于权值分配与矩阵分析的 D-S 合成算法流程见图 1。

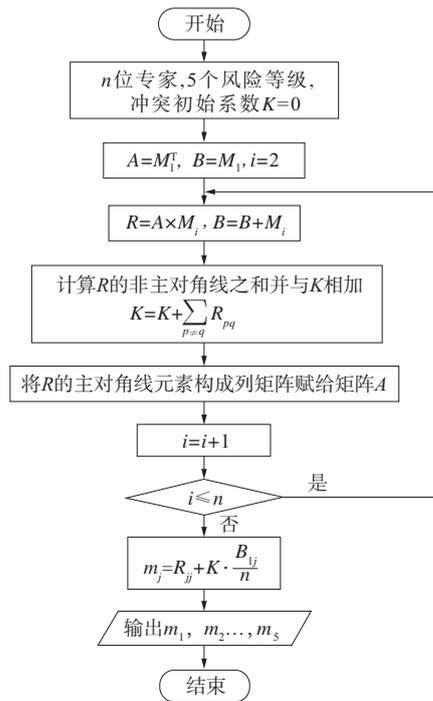


图 1 基于权值分配与矩阵分析的 D-S 合成算法流程

3.4 mass 函数合成

对所有指标函数按下式进行数据融合:

$$m(A) = \sum_{i=1}^5 \omega_i \sum_{j=1}^{n_i} \omega_{ij} m(A_{ij}) \quad (6)$$

式中: $m(A_{ij})$ 为指标 A_{ij} 对 A 的支持度,通过转化专家意见后得到; n_i 为指标 A_i 所含子指标的个数。

3.5 风险综合评价

根据统计学与概率学原理,风险评定的每一等级的概率大小在理论上是相等的,为使评价结果一目了然,将综合管廊施工风险评价等级的取值范围定为[0,1],并以此划分 5 个等级(见表 3)。

表 3 综合管廊施工安全风险等级划分

风险等级	取值	风险等级	取值
很低	[0,0.2]	高	(0.6,0.8]
低	(0.2,0.4]	很高	(0.8,1.0]
中	(0.4,0.6]		

将合成后的风险等级概率分配矩阵 P 与表 2 中的评价量化值 U 相乘,并进行单值化,得到风险综合评价结果。

4 实例分析

4.1 工程概况

重庆市开州区地下综合管廊建设一期项目起于滨湖北路丰太段 K0+000,止于滨湖北路大丘段 K6+091,全长 6 091 m。其中:K0+000—K4+180 段管廊基坑长度 4 180 m,自然放坡,坡比 1:1.5,基坑深度 8~13 m,采用分层明挖施工;K5+180—K6+091 段管廊基坑长度 911 m,桩板挡墙支护,基坑深度 8 m,采用分层明挖施工;K4+180—K5+180 段管廊基坑长度 1 000 m,锚喷支护,基坑深度 4.8 m,采用分层明挖施工。综合管廊采用矩形箱涵结构形式,分为两舱和三舱,断面净空尺寸分别为(1.6+4.2) m×2.8 m、(2.1+1.6+2.6) m×2.8 m~(2.1+1.6+4.2) m×2.8 m,设置监控中心一座(见图 2)。

4.2 指标权重的确定

通过调查问卷请 6 位从业人员对指标 $A_1 \sim A_5$ 的重要度进行打分,运用 COWA 算子确定各指标的权重。以 A_1 为例,按式(2)求得加权向量,根据式(3)计算绝对权重,得:

$$\bar{\omega}_1 = \sum_{j=1}^n \omega_j \cdot b_j = (0.031\ 25, 0.156\ 25, 0.312\ 5, 0.312\ 5, 0.156\ 25, 0.031\ 25) \cdot (5.0, 4.5,$$

$$4.5, 4.5, 4.0, 4.0)^T = 4.4219$$

同理可得 $\bar{\omega}_2 = 4.5781, \bar{\omega}_3 = 4.5000, \bar{\omega}_4 = 3.5156, \bar{\omega}_5 = 3.9219$ 。根据式(4),得综合管廊施工安全风险评级一级指标的权重 $\omega_0 = (0.211, 0.219,$

$0.215, 0.168, 0.187)$ 。同理,求得各二级指标的权重分别为: $\omega_1 = (0.36, 0.42, 0.22); \omega_2 = (0.23, 0.21, 0.20, 0.36); \omega_3 = (0.27, 0.28, 0.24, 0.21); \omega_4 = (0.42, 0.58); \omega_5 = (0.39, 0.32, 0.29)$ 。

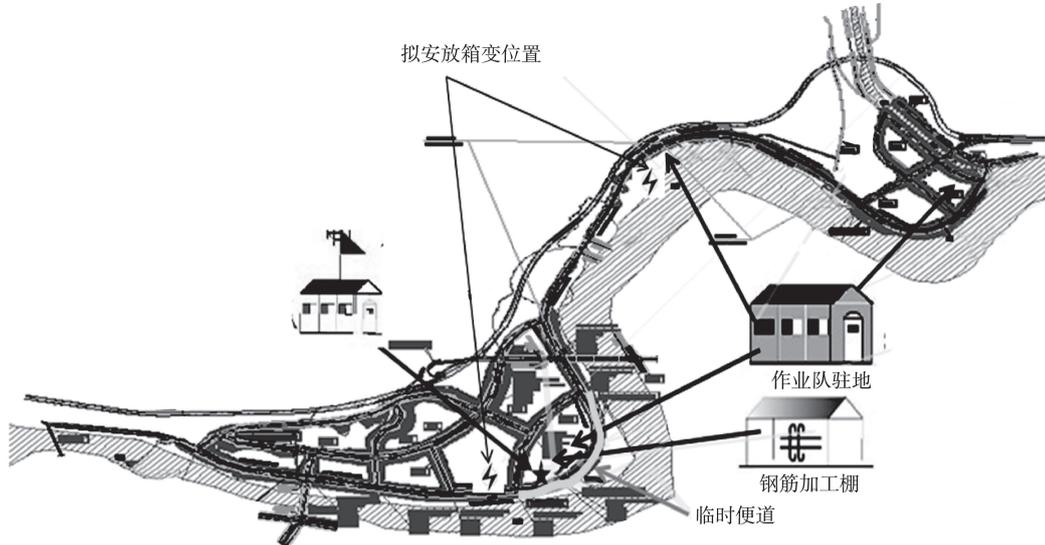


图2 重庆市开州区地下综合管廊平面布置

4.3 风险综合评价

为确保评价结果真实有效,邀请3位具有丰富经验和高级职称的评委(2位为某地综合管廊项目

的项目经理,1位为当地高校的教授)对该项目的施工安全风险进行评价,并将其评价意见带入隶属度矩阵进行计算,归一化后得表4~6。

表4 专家1基本概率分配

二级指标	很低 VL	低 L	中 M	高 H	很高 VH	二级指标	很低 VL	低 L	中 M	高 H	很高 VH
A ₁₁	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0	A ₃₂	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0
A ₁₂	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0	A ₃₃	0.000 0	0.000 0	0.131 6	0.857 6	0.010 8
A ₁₃	0.000 0	0.007 4	0.273 4	0.629 2	0.090 0	A ₃₄	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0
A ₂₁	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0	A ₄₁	0.010 8	0.857 6	0.131 5	0.000 1	0.000 0
A ₂₂	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0	A ₄₂	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0
A ₂₃	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0	A ₅₁	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0
A ₂₄	0.000 0	0.007 4	0.273 4	0.629 2	0.090 0	A ₅₂	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0
A ₃₁	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0	A ₅₃	0.010 8	0.857 6	0.131 5	0.000 1	0.000 0

表5 专家2基本概率分配

二级指标	很低 VL	低 L	中 M	高 H	很高 VH	二级指标	很低 VL	低 L	中 M	高 H	很高 VH
A ₁₁	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0	A ₃₂	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0
A ₁₂	0.000 0	0.007 4	0.273 4	0.629 2	0.090 0	A ₃₃	0.000 0	0.007 4	0.273 4	0.629 2	0.090 0
A ₁₃	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0	A ₃₄	0.021 9	0.228 5	0.499 1	0.228 5	0.021 9
A ₂₁	0.010 8	0.857 6	0.131 5	0.000 1	0.000 0	A ₄₁	0.010 8	0.857 6	0.131 5	0.000 1	0.000 0
A ₂₂	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0	A ₄₂	0.001 1	0.040 1	0.306 0	0.489 0	0.163 8
A ₂₃	0.000 0	0.007 4	0.273 4	0.629 2	0.090 0	A ₅₁	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0
A ₂₄	0.000 0	0.007 4	0.273 4	0.629 2	0.090 0	A ₅₂	0.000 0	0.007 4	0.273 4	0.629 2	0.090 0
A ₃₁	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0	A ₅₃	0.651 1	0.348 5	0.000 4	0.000 0	0.000 0

表 6 专家 3 基本概率分配

二级指标	很低 VL	低 L	中 M	高 H	很高 VH	二级指标	很低 VL	低 L	中 M	高 H	很高 VH
A ₁₁	0.000 0	0.000 0	0.131 6	0.857 6	0.010 8	A ₃₂	0.000 0	0.000 0	0.131 6	0.857 6	0.010 8
A ₁₂	0.021 9	0.228 5	0.499 1	0.228 5	0.021 9	A ₃₃	0.000 0	0.000 0	0.131 6	0.857 6	0.010 8
A ₁₃	0.000 0	0.007 4	0.273 4	0.629 2	0.090 0	A ₃₃	0.000 0	0.000 0	0.131 6	0.857 6	0.010 8
A ₂₁	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0	A ₄₁	0.163 8	0.489 0	0.306 0	0.040 1	0.001 1
A ₂₂	0.000 0	0.007 4	0.273 4	0.629 2	0.090 0	A ₄₂	0.021 9	0.228 5	0.499 1	0.228 5	0.021 9
A ₂₃	0.000 0	0.000 0	0.131 6	0.857 6	0.010 8	A ₅₁	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0
A ₂₄	0.163 8	0.489 0	0.306 0	0.040 1	0.001 1	A ₅₂	0.000 0	0.000 0	0.131 6	0.857 6	0.010 8
A ₃₁	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0	A ₅₃	0.163 8	0.489 0	0.306 0	0.040 1	0.001 1

采用图 1 所示 D-S 证据合成算法融合上述 3 位专家的基本评价概率,结果见表 7。

表 7 基于改进 D-S 证据理论的数据融合结果

二级指标	很低 VL	低 L	中 M	高 H	很高 VH	二级指标	很低 VL	低 L	中 M	高 H	很高 VH
A ₁₁	0.000 0	0.023 9	0.693 9	0.279 0	0.003 2	A ₃₂	0.000 3	0.023 9	0.693 9	0.279 0	0.003 2
A ₁₂	0.006 5	0.089 6	0.082 1	0.095 3	0.006 5	A ₃₃	0.052 5	0.161 4	0.296 1	0.431 9	0.058 1
A ₁₃	0.006 7	0.084 3	0.584 7	0.290 0	0.034 3	A ₃₄	0.001 4	0.129 2	0.718 8	0.129 2	0.001 4
A ₂₁	0.003 5	0.278 9	0.693 7	0.023 9	0.000 0	A ₄₁	0.235 8	0.628 0	0.124 5	0.001 4	0.000 3
A ₂₂	0.006 7	0.084 3	0.584 7	0.290 0	0.034 3	A ₄₂	0.035 2	0.614 3	0.276 7	0.067 5	0.006 3
A ₂₃	0.000 0	0.015 2	0.450 3	0.502 8	0.031 7	A ₅₁	0.000 0	0.009 5	0.981 0	0.009 5	0.000 0
A ₂₄	0.052 5	0.161 4	0.296 1	0.431 9	0.058 1	A ₅₂	0.000 0	0.015 2	0.450 3	0.502 8	0.031 7
A ₃₁	0.000 0	0.009 5	0.981 0	0.009 5	0.000 0	A ₅₃	0.235 8	0.628 0	0.124 5	0.011 4	0.000 3

根据式(3)和 COWA 算子所得各层指标权重,将表 8 所示指标数据输入 MATLAB 软件进行逐层合成,结果见表 8。

表 8 各层指标 Mass 函数合成

一级指标	很低 VL	低 L	中 M	高 H	很高 VL
A ₁	0.006 2	0.092 8	0.591 8	0.292 8	0.016 4
A ₂	0.021 1	0.143 0	0.479 0	0.322 4	0.034 5
A ₃	0.013 0	0.075 4	0.684 0	0.212 3	0.015 2
A ₄	0.086 2	0.450 1	0.429 6	0.031 3	0.002 7
A ₅	0.112 1	0.306 5	0.295 4	0.269 2	0.016 8
合成	0.044 2	0.200 1	0.504 3	0.233 6	0.017 9

综合评价值 $R = P \times U = 0.496 2$ 。由表 3 可知:开州城市地下综合管廊施工安全风险为中等。为分析各指标对综合管廊施工安全风险的影响大小,将指标 $A_1 \sim A_5$ 进行单值化处理,得指标风险值如下: $R_1 = 0.544 1, R_2 = 0.541 2, R_3 = 0.528 2, R_4 = 0.382 8, R_5 = 0.454 4$ 。将上述指标风险值按照大小进行排序, $R_1 > R_2 > R_3 > R_5 > R_4$,说明在综合管廊

施工安全风险中,人为因素与设计因素是较主要、影响较大的两个因素。该综合管廊项目各施工人员具有相应的资质,负责安全管理的专职人员能及时指出危险操作并要求防范;舱数、断面尺寸、分区投料口设置合理;在进行深基坑分层明挖施工时,根据各标段的边坡土质特性,分别采用桩板挡墙与喷锚等支护方法,可有效避免险情发生,安全风险为中等风险。

5 结论

(1) 针对施工安全风险评价中专家意见不集中等问题,建立基于模糊集与改进 D-S 证据理论的城市地下综合管廊施工安全风险综合评价模型,通过将模糊集与证据理论相结合,真实可靠地反映综合管廊施工中的不确定性,提高风险评价的准确度,且该评价模型逻辑清晰、计算简单、易于推广。

(2) 基于 COWA 算子的权重计算与传统层次分析法、德尔菲法相比更严谨、客观,可降低专家评价主观因素的影响。采用以高斯函数为隶属度函数构造 Mass 矩阵,并与权值分配和矩阵分析算法相

结合, 所得结果比传统证据理论更准确。

(3) 重庆开州区地下综合管廊建设一期项目的施工安全风险为中等, 与工程实际吻合度较高, 验证了该量化模型的正确性与可实践性, 可为项目的顺利进行提供有力保障。

参考文献:

[1] 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).

[2] 何忠明, 刘可, 付宏渊, 等. 基于集对可拓粗糙集方法的高边坡爆破施工安全风险评价[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2017, 48(8).

[3] 刘艳宇. L市综合管廊 PPP 项目风险管理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.

[4] 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).

[5] 李大波, 孟明明, 杨献军, 等. 地下综合管廊 PPP 项目风险管理研究[J]. 工程建设与设计, 2019(9).

[6] 有维宝, 王建波, 张樵民, 等. 基于 TOPSIS-UT 的城市地下综合管廊 PPP 项目风险分担[J]. 土木工程与管理学报, 2019, 36(2).

[7] 马世骁, 石小玉, 杨明泽. 全生命周期视角下综合管廊 PPP 项目风险识别与分配[J]. 沈阳建筑大学学报: 社

会科学版, 2018, 20(5).

[8] 李寿国, 周文珺. 基于 PPP 模式的地下综合管廊项目风险分担机制分析[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(3).

[9] 陈雍君, 李宏远, 汪雯娟, 等. 基于贝叶斯网络的综合管廊运维灾害风险分析[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(6).

[10] 向阳, 史习智. 证据理论合成规则的一点修正[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(3).

[11] 王姣, 范科峰, 莫玮. 基于模糊集和 DS 证据理论的信息安全风险评估方法[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(11).

[12] 申建红, 盖立庭, 万索妮, 等. 基于模糊集与改进证据理论的深基坑施工风险评价[J]. 土木工程与管理学报, 2019, 36(2).

[13] 盖立庭. 基于模糊集与改进证据理论的深基坑施工风险管理研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.

[14] 朱嘉. 城市综合管廊安全风险辨识及评价体系研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.

[15] 莫冬华, 张耀文, 蒋田勇. 基于预应力锚索支护的综合管廊深基坑施工监测研究[J]. 公路与汽运, 2019(5).

[16] 刘柯汝. 城市地下综合管廊的施工安全风险评价[J]. 价值工程, 2018(31).

[17] 赵玉苗, 卢卫军, 张兴民, 等. 城市地下综合管廊的施工安全风险评价[J]. 居舍, 2019(2).

收稿日期: 2019-11-12

(上接第 140 页)

6 结语

邻近地铁线路的基坑工程施工的重点和难点在于控制基坑围护结构施工及开挖过程中的变形。在地铁保护范围内的相邻基坑工程, 二次开挖扰动引起的累积叠加变形大于整体开挖变形, 不利于既有高架桥梁的运营安全。可在既有高架桥梁下方采用全套管全回旋施工工艺施工围护桩, 满足低净空场地条件, 同时应用全套管设备降低对周边地层的扰动。

参考文献:

[1] 伍尚勇, 杨小平, 刘庭金. 双侧深基坑施工对紧邻地铁隧道变形影响的分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 21(增刊 1).

[2] 贾瑞华. 隧道施工对不同基础类型桥梁的影响评价及工程应用[D]. 长沙: 中南大学, 2010.

[3] 石钰锋, 阳军生, 白伟, 等. 紧邻铁路偏压基坑围护结构变形与内力测试分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4).

[4] 梁发云, 褚峰, 宋著, 等. 紧邻地铁枢纽深基坑变形特性

离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3).

[5] 吴薪柳. 复杂基坑施工对相邻地铁站沉降的影响分析[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(2).

[6] 安玉红. CSM 水泥土搅拌隔离桩在地铁基坑紧邻桥桩时的保护效果研究[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(5).

[7] 冯国健. 紧邻深长大基坑的地铁结构保护对策与实践[J]. 隧道建设, 2018, 38(1).

[8] 深圳市地铁集团有限公司. 地铁运营安全保护区和建设规划控制区工程管理办法[EB/OL]. https://max.book118.com/html/2018/0805/5114232101001304_shtm, 2018-08-05.

[9] 中国铁路设计集团有限公司. 深圳市城市轨道交通 14 号线工程详细勘察阶段岩土工程勘察报告[R]. 深圳: 中国铁路设计集团有限公司, 2017.

[10] SJG 05-2011, 深圳市基坑支护技术规范[S].

[11] 卞佳, 闫文亮. 滨海复杂地层高承压水区域悬索桥锚碇深基坑施工技术[J]. 公路与汽运, 2017(5).

[12] 张秀峰. 基于 Geo-studio 的基坑分步开挖围护桩力矩和锚索轴力变化特征分析[J]. 公路与汽运, 2015(6).

收稿日期: 2019-07-23