

基于 IAHP 扩展 TOPSIS 法引水隧洞实时风险识别

张社荣^{1,2}, 尚超^{1,2}, 王超^{1,2}

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350;
2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350)

摘要:基于区间层次分析(IAHP)法和扩展逼近理想解排序(TOPSIS)法,建立了合理的引水隧洞实时安全风险识别模型,通过在某大型引水工程接近城区隧洞段中的运用,在不同施工阶段做出安全风险区间多指标决策,并根据相应阶段的工程数据对安全风险因子进行排序,检验了实时安全风险识别模型的可行性和有效性。

关键词:引水隧洞;区间层次分析法;扩展逼近理想解排序法;安全风险识别

中图分类号:TV672+.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)04-0015-06

Real-time safety risk identification of water diversion tunnel based on IAHP and extended TOPSIS methods// ZHANG Sherong^{1,2}, SHANG Chao^{1,2}, WANG Chao^{1,2} (1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Based on the interval analytic hierarchy (IAHP) method and the extended approximation ideal solution sequencing (TOPSIS) method, a reasonable real-time security risk identification model was established. The proposed model was employed in the risk analysis of a large-scale water diversion project near the urban tunnel section. The multiple-index decisions were made on the number of safety risk intervals at different construction stages. According to the engineering data of the corresponding stage, the safety risk factors are sorted. The feasibility and effectiveness of the real-time security risk identification model was tested.

Key words: water diversion tunnel; IAHP method; extended TOPSIS method; safety risk identification

为了提高水资源配置效率和促进区域协调发展,国内开展多项大型引水工程建设^[1],在穿越山体或城区时多为隧洞形式。但是,引水隧洞工程存在工程地质^[2]、施工技术^[3]、密集周边建筑物/结构^[4]和自然灾害^[5]等安全风险,对工程施工质量、运行安全^[6]造成威胁。因此,亟须研究契合长距离引水隧洞工程特点的高效风险识别方法,为引水工程施工和运行阶段中的潜在安全风险实时管理提供基础^[7],从而确保工程项目安全。

国内外科研人员针对地下隧洞工程的风险评估进行了很多研究,并提出了相应的风险识别方法。罗倩钰^[8]基于事故场景对输水隧洞风险评估进行了分析研究;Ding等^[9]基于图形识别提出了安全风险识别系统;在地下工程施工前期通过施工图进行风险评估;El-Karim等^[10]通过问卷调查、文献综述和专家意见收集风险因子数据,并通过 Crystal Ball

软件计算相应数值和误差;Li等^[11-12]基于 BIM 研究了安全风险识别流程和系统;Liu等^[13]基于综合探索性因子分析和结构方程模型识别了地下工程中的安全风险因子。

此外,为了解决地下隧洞工程风险评估的复杂性和主观性,许多学者采用模糊理论更加准确地评估风险,Subramanyan等^[14]基于层次分析法(AHP)开发了风险评估模型;Nieto-Morote等^[15]基于 AHP 和模糊集理论开展了项目风险评估研究;陈婷婷^[16]基于 AHP-TOPSIS 法对地下工程的施工方案进行了比选;龚剑等^[17]基于 AHP-TOPSIS 法对岩爆倾向性进行预测。但是,实际工程中的多标准权重分配往往是不确定的,通过 IAHP 法的成对比较可以使多标准的权重分配更加客观和准确。

大型引水工程涉及的技术种类多、时空跨度长、参建单位多,潜在风险贯穿引水隧洞的全生命周期,

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0406905);云南省重点研发计划(2017IB014);国家自然科学基金创新群体基金(51621092)
作者简介:张社荣(1960—),男,教授,博士,主要从事水工结构安全研究。E-mail:tjuzsr@126.com
通信作者:尚超(1991—),女,博士,主要从事地下工程安全研究。E-mail:shangch_1018@tju.edu.cn

因此潜在安全风险因子权重并非一成不变^[18]。上述方法主要用于施工前期,根据初期的工程信息识别工程安全风险,然而长距离引水隧洞工程中安全风险在不同施工阶段不尽相同。本文基于 IAHP 法和扩展区间 TOPSIS 法,提出一种适用于长距离引水隧洞施工阶段的实时安全风险识别模型,并通过典型引水工程案例进行验证,从而为引水隧洞工程的预警与风险管理系统和类似工程提供理论基础。

1 引水隧洞实时安全风险识别模型

根据中国应急管理部网站、学术文献^[3]和近几年的事故新闻提供的事故数据来源,隧洞施工事故类型主要包括:由于围岩和支护结构失稳引起的塌方、地面塌陷,防渗措施不当引起的渗水和渗漏,以及施工不当引起的机械事故、管线受损、火灾和爆炸等。此外,接近城区施工会对周边社会、自然和生态环境产生较大影响,由此带来的施工监测覆盖范围和密度的变化也对接近城区隧洞施工风险识别提出更高要求。

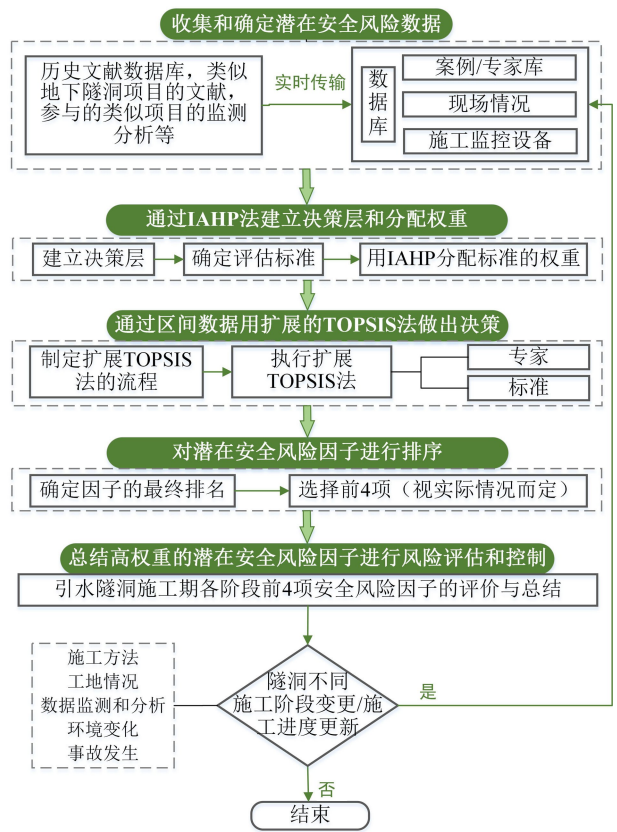


图1 引水隧洞工程安全风险识别模型框架

对于长距离引水隧洞工程,其安全风险的类别和权重在各个施工阶段都会发生变化。因此,实时安全风险识别对于确保长期有效的风险控制尤为重要。下面提出一种适用于长距离引水工程施工期实时安全风险识别模型,该模型通过 IAHP 和扩展

TOPSIS 法实现^[19-22]。模型的规划和执行阶段可分为 5 个主要步骤,流程图如图 1 所示。由于技术种类、环境和监测数据的变化,模型应在所有阶段进行实时迭代,通过 MATLAB 编程计算。

1.1 潜在安全风险数据的收集和确定

通过实时数据收集来识别风险因子。有 3 种主要的数据来源:案例/专家库,现场状况和监测设备。数据将在不同阶段发生变化并更新。

确定潜在安全风险是风险识别规划和执行阶段的基础,关键风险因子会影响施工期和运营维护阶段的项目安全。因此,应进一步完善安全风险数据,以保证风险识别的准确性。安全风险识别和评估过程包括传感层、传输层、分析层和控制层^[19],本文重点介绍分析层。实时安全风险数据的收集是通过传感层和传输层,并将其发送到中央远程控制服务器,通过用户界面登录到数据库。潜在的安全风险因子根据安全风险数据库确定。

1.2 基于 IAHP 法建立决策层和分配权重

首先,明确潜在的安全风险因子,确定决策层等级。然后,建立用于风险评估的标准,并与决策者的建议相结合。决策者包括项目业主、工程师、在特定领域具有相关知识的专家或利益相关者等。最后,基于 IAHP 法进行权重分配,其中各阶段权重是动态变化的。引水隧洞安全风险识别的标准及其定义:地质条件(C_1)、复杂施工(C_2)、环境所受影响(C_3)、结构安全(C_4)、自然灾害(C_5)。所有标准都被认为是重要的。

a. 建立决策层。层次结构是将多指标决策问题分解和简化为至少 3 层(即目标层,标准层和指标层)的关键^[17]。

b. 建立判断矩阵。基于 IAHP 法将权重分配给标准和决策者。根据成对比较的标度和判断原则,采用二元对比法比较和分配同一层次的相关指标^[23],这种方法同时反映了主、客观性。若 $C=(c_j)$ ($j=1,2,\dots,n$) 是一个判断矩阵, n 个标准的成对比较结果可以概括为 $(n\times n)$ 区间判断矩阵 A ,其中每个元素都表示对风险的影响程度:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 $a_{ii} = 1, a_{1ji} = 1/a_{uij}, a_{ij} \neq 0$) 式中: a_{1ij} 为两个风险因子比较重要性的下限; a_{uij} 为它们之间比较的上限。

c. 检查判断矩阵的一致性。验证矩阵一致性

比例 C_R 的公式为^[19]:

$$C_R = \frac{S_I}{R_1} \quad (2)$$

$$S_I = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

式中: S_I 为一致性检验指数; $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征值; n 为成对比较因子的阶数, 此处 $n=5$; R_1 为平均随机一致性指数, 由 n 确定不同的值, 这里 $R_1=1.12$ 。

判断矩阵的一致性必须满足 $S_I < 0.1$ 。否则, 必须调整判断矩阵的权重。

d. 确定标准的权重

通过区间数特征向量法 (IEM), 使用和积法排序得出最大特征值。

1.3 基于扩展区间 TOPSIS 法做出决策

基于 TOPSIS 法对各潜在安全风险因子的距理想解贴进度进行求解之前, 首先要确定: 标准可能具有不同的权重; 对所有决策者而言, 标准是相同的, 但每位决策者的权重是不同的。

建立一个矩阵 $D = (f_{1,jn}, f_{u,jn})$, 使得 m 个决策者应该有 m 个决策矩阵, 并计算每项指数的归一化决策矩阵 $R = (r_{1,ij}, r_{u,ij})$ 。 ($r_{1,ij}, r_{u,ij}$) 是标准化值。

建立区间群决策矩阵 $G = (g_{1,jn}, g_{u,jn})$, 其中:

$$\begin{cases} g_{1,ij} = \sum_{p=1}^m M_i r_{1,ij} \\ g_{u,ij} = \sum_{p=1}^m M_i r_{u,ij} \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, J; j = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中: M_i 为决策者的权重, 且 $\sum_{p=1}^m M_i = 1$ 。

然后, 构建加权归一化决策矩阵, 可以通过将归一化矩阵乘以其相关权重来计算。

加权归一化值 ($v_{1,ij}, v_{u,ij}$) 求解: $v_{1,ij} = w_j g_{1,ij}, v_{u,ij} = w_j g_{u,ij}$ ($i = 1, 2, \dots, J; j = 1, 2, \dots, n$), 其中 w_j 为第 j 个属性或标准的权重。

定量指标可分为收益性指标和消耗性指标, 根据收益性指标集和消耗性指标集确定正理想解和负理想解^[17,22]。 $A_{1,k}^+, A_{u,k}^+$ 为正理想解; $A_{1,k}^-, A_{u,k}^-$ 为负理想解; I^+ 是收益性指标集, 其收益性指标越大越好; I^- 是消耗性指标集, 应尽可能减小的消耗性指标。

计算 n 维的理想解距离^[17,21]。 $d_{u,k}^+, d_{1,k}^+$ 为第 k 个评判对象与正理想解的距离; $d_{u,k}^-, d_{1,k}^-$ 为第 k 个评判对象与负理想解的距离。

指标值 R_k 为替代 k 的相对贴进度, 在闭区间 $[0, 1]$ 内取值。指标值越大, 评判对象的表现越好。

$$\frac{d_{1,k}^-}{d_{u,k}^- + d_{u,k}^+} \leq R_k \leq \frac{d_{u,k}^-}{d_{1,k}^- + d_{1,k}^+} \quad (5)$$

1.4 确定主要安全风险因子排序

通过计算与理想解的相对贴进度在施工期各阶段进行潜在安全风险因子的排序, 选出排名前 4 的风险因子 (取决于实际情况)。由于技术种类多、外界环境的变化、监测数据的反馈和结构的损耗等, 潜在风险因子权重的排序会发生变化, 因此需要对实际工程的风险识别进行实时迭代。

1.5 总结高权重的潜在安全风险因子

基于风险识别模型, 输入新的潜在风险数据和决策信息更新安全风险因子排序结果, 得到并总结排名前 4 的风险因子, 进行风险评估和控制 (本文着重研究风险识别模型), 以达到引水隧洞工程施工期实时有效安全风险管理的目的。

2 工程案例

滇中引水工程输水总干渠昆明段的输水线路经昆明市区。受地质条件、地面建筑物的影响, 该段工程围岩稳定性差, 特别是在施工期, 常规施工方法成洞困难, 实施过程对地表影响极大, 对引水隧洞运行期的结构安全也有较大影响。按照上述安全风险识别模型的 5 个主要步骤, 下面对滇中引水工程昆明段施工期输水隧洞进行安全风险识别。

2.1 确定潜在安全风险因子

引水隧洞工程时空跨度大, 会遇到深埋^[24-25]/浅埋下的多种技术种类、复杂的地质条件和密集周边建筑情况, 参考第 1 节中所述主要隧洞施工事故类型, 根据历史文献和类似引水项目的风险数据库, 将主要的潜在安全风险来源分为以下 5 类:

a. 工程地质风险: 由不确定的工程地质参数或非理想工程地质条件引起的风险。经过昆明城区段的引水隧洞穿越软岩地质, 地下水位高, 个别区段出现软土地质, 在软弱围岩中施工更易发生较大变形。

b. 施工技术风险: 软弱围岩施工期间因施工方法不当而产生的结构和围岩失稳风险。隧洞围岩及支护结构监测数据的准确性和时效性也对隧洞施工风险产生重要影响。相较于矿山法施工, TBM 施工对地质条件的准确预估要求较高, 会影响到 TBM 的正确选型和设备配置。此外, 施工作业不当可直接或间接造成机械事故、火灾或者爆炸等。

c. 环境风险: 工程施工作业使环境发生变化, 对周边建筑物/结构产生不利影响, 以及支洞施工排水对地表水及地下水环境产生的影响。例如, 本工程需要重点关注下穿盘龙江段施工期隧洞的支护结构安全、外水压力和渗水问题; 考虑近接施工对周边

建筑物/结构的影响(①近接地下管沟;②下穿自来水管;③近接小区高层建筑物)。滇中近接城区引水隧洞施工期可按上述近接建筑物隧洞典型断面分为3个阶段。

d. 结构安全:减少施工期事故的发生,是保证输水隧洞在设计寿命内的安全运行的关键。①支护结构安全的监测覆盖范围、密度和准确性对隧洞运行风险^[26]产生重要影响;②围岩-支护力学变化和支护结构病害风险。

e. 自然灾害风险:地震可能诱发隧洞沿线的围岩失稳、支护结构失效甚至洞内坍塌等事故。

基于案例/专家库,通过传感器实时收集安全风险数据,并将其传输到后台服务器进行处理,收集和分析针对本工程项目各方面的信息,并确定潜在的安全风险数据。

2.2 建立引水隧洞安全风险决策层和分配权重

根据上述内容,建立了隧洞潜在安全风险的决策层如图2所示。由于接近施工会对周围环境的建筑物/结构产生较大干扰,在上述典型断面的施工阶段确定潜在安全风险。

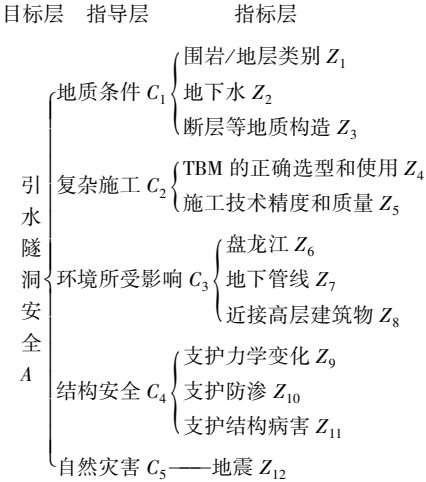


图2 潜在安全风险因子

从标准和决策者的描述性程度到相关度量中间值的关系:几乎确定(9)、极有可能(7)、容易(5)、可能(3)、不会(1)。表1为标准的区间数互补判断矩阵,表2列出了3个决策者 $Q_1 \sim Q_3$ 的区间成对比较矩阵(实际有很多决策者),表3为基于IAHP法得到的各标准和决策者的权重。

表1 标准的区间互补判断矩阵

标准	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
C_1	[1,1]	[2/3,5/6]	[5/8,5/7]	[5/2,10/3]	[10/3,5]
C_2	[1.2,1.5]	[1,1]	[5/6,9/10]	[10/3,5]	[10/3,20/3]
C_3	[1.4,1.6]	[0.9,1.2]	[1,1]	[2.2,5]	[10/3,20/3]
C_4	[0.3,0.4]	[0.2,0.3]	[0.2,0.3]	[1,1]	[5/3,2]
C_5	[0.2,0.3]	[0.15,0.3]	[0.15,0.3]	[0.5,0.6]	[1,1]

表2 决策者的区间互补判断矩阵

决策者	Q_1	Q_2	Q_3
Q_1	[1,1]	[1,3]	[2,3]
Q_2	[0.333,1]	[1,1]	[1,2]
Q_3	[0.333,0.5]	[0.5,1]	[1,1]

表3 标准和决策者的权重

标准	标准权重	不确定性	决策者	决策者权重
C_1	0.181	0.020	Q_1	0.299
C_2	0.211	0.023	Q_1	0.299
C_3	0.251	0.021	Q_2	0.290
C_4	0.279	0.014	Q_3	0.305
C_5	0.060	0.001	Q_3	0.305

2.3 确定标准和排列潜在安全风险因子

参考其他隧洞/隧道工程的数据,适用于滇中引水工程过昆明城区段隧洞的风险识别标准的合理度量如表4所示。表中, C_2 的标准构成收益性指标集,其值越大越好; C_1 、 C_3 、 C_4 和 C_5 构成消耗性指标集,其值应尽可能小。

表4 滇中引水过昆明城区段隧洞的风险识别标准的度量

程度	C_1	C_2	C_3 和 C_4	C_5
几乎确定	V	不适用	>控制值	VIII
极有可能	IV	不太适用	80%控制值~控制值	VII
容易	III	适用	60%警戒值~80%控制值	VI
可能	II	非常适用	警报值~60%警报值	V
不会	I	最高适用性	<警报值	IV以下

注:可以更改风险识别标准的度量以适合相应国家和地区。

根据上述信息,要求每个决策者通过分别比较每个标准下的潜在风险因子来建立决策矩阵,结合标准和决策者的权重得到区间数群决策矩阵。然后,计算每个潜在风险因子的距理想解的贴近度。潜在安全风险因子的最终排序如表5所示。

2.4 确定主要安全风险因子最终排序

根据潜在风险因子的排名,前4项(Z_5 、 Z_9 、 Z_{10} 和 Z_6)被选为下穿盘龙江的主要安全风险因子。结合最新的施工监测数据和不断变化的环境,需要根据实际监测和紧急情况,在各阶段实时识别主要潜在安全风险因子。

2.5 关键安全风险因子

潜在安全风险因子的权重在不同的施工阶段会有所不同。选择3个典型的阶段来说明结果:下穿盘龙江;下穿自来水管和近接管沟段;近接小区高层建筑段。

在这项研究中,3个典型施工阶段潜在风险因子的最终排名前4项大小排序分别为:阶段1 Z_5 、 Z_9 、 Z_{10} 、 Z_6 ;阶段2 Z_7 、 Z_9 、 Z_5 、 Z_1 ;阶段3 Z_8 、 Z_5 、 Z_9 、 Z_1 。在该阶段基于关键风险因子进行风险评估、风险评级和采取措施,以防止隧洞运行后潜在的结构安全和管理问题。

表 5 滇中引水过昆明城区段隧洞的风险识别标准的度量

风险因子	d_u^+	d_l^+	d_u^-	d_l^-	指数区间	指数中值	排序
Z_1	0.033 9	0.037 7	0.029 1	0.031 4	[0.497 6,0.422 1]	0.459 8	10
Z_2	0.030 1	0.029 6	0.024 2	0.030 4	[0.560 2,0.403 4]	0.481 8	6
Z_3	0.043 2	0.046 9	0.037 5	0.042 4	[0.525 8,0.420 1]	0.472 9	7
Z_4	0.044 8	0.044 3	0.041 4	0.046 6	[0.540 1,0.455 7]	0.497 9	5
Z_5	0.014 5	0.017 4	0.009 8	0.017 6	[0.594 1,0.469 1]	0.531 6	1
Z_6	0.051 9	0.042 0	0.047 4	0.059 0	[0.723 4,0.279 3]	0.501 4	4
Z_7	0.035 8	0.037 4	0.030 0	0.032 9	[0.500 6,0.426 3]	0.463 5	9
Z_8	0.044 5	0.042 1	0.040 2	0.047 3	[0.540 6,0.402 5]	0.471 6	8
Z_9	0.037 5	0.031 0	0.033 6	0.043 4	[0.610 0,0.451 9]	0.530 9	2
Z_{10}	0.040 7	0.041 3	0.032 6	0.039 6	[0.558 6,0.449 7]	0.504 1	3
Z_{11}	0.055 5	0.069 3	0.055 8	0.044 5	[0.400 0,0.490 1]	0.445 1	12
Z_{12}	0.035 8	0.038 5	0.029 0	0.032 9	[0.508 3,0.406 1]	0.457 2	11

对于近接城区的浅埋引水隧洞开挖后周边土体位移特性汇总如图 3 所示。

各典型阶段的高风险因子排序和图 3 的结果规律基本一致。在典型的施工阶段中,因下穿盘龙江,

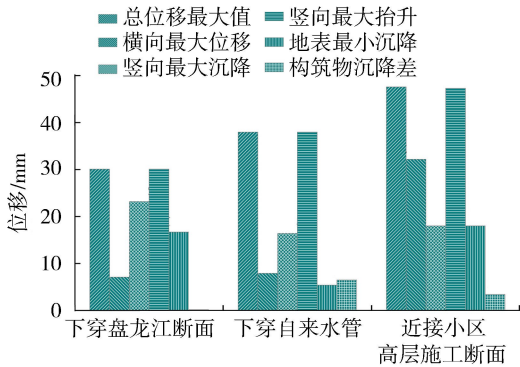


图 3 各典型阶段的位移特性统计

隧洞洞顶土体竖向变形和渗水情况风险增大;在典型的施工阶段中,管线的风险相较其他建筑物更大,隧洞盾构施工对自来水管造成的不均匀沉降为 6.5 mm (宽 30 m),平均倾斜率为 0.022%,小于 1/800;在典型的施工阶段中,隧洞底部的回弹变形(48 mm)、横向变形(32.5 mm)和地表沉降(18 mm)相较于其他阶段都较大,因此施工技术和管理风险权重增加,对小区高楼地基造成的不均匀沉降为 3.4 mm(宽 25 m),平均倾斜率为 0.014%,小于 0.25%。

遵循这些程序,可以在施工期间成功识别关键的安全风险。综合 3 个典型段结果,盾构隧洞在施工期对周边土体及构筑物的影响较小,满足近接施工土体变形要求。所有建筑物/结构都在其正常安全运行状态内受到控制。

3 结 论

随着国家多项大型引水工程的发展和建设,其施工期全过程的风险评估、决策和控制是一个重要问题,首先需要准确的实时安全风险识别。本文提出了引水工程隧洞实时安全风险评估模型,在潜在

安全风险中确定了关键风险因子,并通过工程实例证明了模型的可行性和合理性。

a. 隧洞施工的潜在安全风险来自多个方面,如工程和水文地质风险、施工技术风险、环境风险(包括周边建筑物/结构和生态)和自然灾害风险等。风险可能由多种风险因子引起,单一风险因子可能导致多种风险。

b. 将 IAHP-扩展 TOPSIS 法运用在引水隧洞工程安全风险识别模型上,能够有效地减小风险识别的复杂性和主观性,同时避免了 TOPSIS 法因指标过多分配权重难度增加的问题,可以使风险识别更加全面和准确,并具有时效性。

c. 安全风险因子的排序在引水隧洞工程各施工阶段发生变化,安全风险识别和风险评估在各关键施工阶段实时更新,确定关键风险因子从而规避风险。通过工程实例验证风险识别结果与实际结果相吻合。

参考文献:

[1] 寇青青, 运剑苇, 刘淑婧, 等. 南水北调中线工程生态补偿计算研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(1): 112-117. (KOU Qingqing, YUN Jianwei, LIU Shujing, et al. A study of eco-compensation calculation for the middle route project of south-to-north water diversion [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2020, 42(1): 112-117. (in Chinese))

[2] YU Q Z, DING L Y, ZHOU C, et al. Analysis of factors influencing safety management for metro construction in China[J]. Accident, Analysis and Prevention, 2014, 68 (7): 131-138.

[3] 李皓燃, 李启明, 陆莹. 2002—2016 年我国地铁施工安全事故规律性的统计分析[J]. 都市轨道交通, 2017, 30(1): 12-19. (LI Haoran, LI Qiming, LU Ying. Statistical analysis on regularity of subway construction accidents from 2002 to 2016 in China[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2017, 30(1): 12-19. (in Chinese))

- [4] 梁宏浩. 地铁隧道施工安全风险评估及其应用研究[D]. 成都:西南交通大学, 2017.
- [5] 臧万军, 王峥峥. 山岭隧道洞身段震害规律与地震风险模糊综合评价分析[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(1): 45-53. (ZANG Wanjun, WANG Zhengzheng. A fuzzy comprehensive evaluation of the seismic hazard rule and relevant risks for mountain tunnel bodies[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(1): 45-53. (in Chinese))
- [6] 唐亮. 隧道病害调查分析及衬砌结构的风险分析与控制研究[D]. 杭州:浙江大学, 2008.
- [7] DING L Y, ZHOU C. Development of web-based system for safety risk early warning in urban metro construction[J]. Automation in Construction, 2013, 34:45-55.
- [8] 罗倩钰. 基于事故场景分析的调水工程输水隧洞风险评估方法研究[D]. 西安:西安理工大学, 2018.
- [9] DING L Y, YU H L, LI H, et al. Safety risk identification system for metro construction on the basis of construction drawings[J]. Automation in Construction, 2012, 27: 120-137.
- [10] EL-KARIM A A, NAWAWY A, MOHAMEDABDELALIM A. Identification and assessment of risk factors affecting construction projects[J]. HBRC Journal, 2017, 13(2): 202-216.
- [11] LI M, YU H, LIU P. An automated safety risk recognition mechanism for underground construction at the pre-construction stage based on BIM[J]. Automation in Construction, 2018, 91(2): 284-292.
- [12] ZHANG L, WU X, DING L, et al. Bim-based risk identification system in tunnel construction[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2016, 22(4): 529-539.
- [13] LIU W, ZHAO T, ZHOU W, et al. Safety risk factors of metro tunnel construction in china: an integrated study with EFA and SEM[J]. Safety Science, 2018, 105: 98-113.
- [14] SUBRAMANYAN H, SAWANT P H, BHATT V. Construction project risk assessment: development of model based on investigation of opinion of construction project experts from India[J]. Journal Construction Engineering Management, 2012, 138(3): 409-421.
- [15] NIETO-MOROTE A, RUZ-VILA F. A fuzzy approach to construction project risk assessment[J]. International Journal of Project Management, 2011, 29: 220-231.
- [16] 陈婷婷. 基于 AHP-TOPSIS 的地铁车站施工方案比选研究[D]. 大连:大连理工大学, 2011.
- [17] 龚剑, 胡乃联, 崔翔, 等. 基于 AHP-TOPSIS 评判模型的岩爆倾向性预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1442-1448. (GONG Jian, HU Nailian, CUI Xiang, et al. Rockburst tendency prediction based on AHP-TOPSIS evaluation model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(7): 1442-1448. (in Chinese))
- [18] 余佳, 焦铮, 苏哲, 等. 考虑风险因素影响的引水隧洞施工方案优选[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(2): 155-161. (YU Jia, JIAO Zheng, SU Zhe, et al. Construction scheme optimization of diversion tunnel considering influence of risk factors[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(2): 155-161. (in Chinese))
- [19] ZHANG S, SHANG C, WANG C, et al. Real-time safety risk identification model during metro construction adjacent to buildings[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2019, 145(6): 04019034.
- [20] IRFAN E, NILSEN K. Performance evaluation of turkish cement firms with fuzzy analytic hierarchy process and TOPSIS methods[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(1): 702-715.
- [21] ZHANG S, SUN B, YAN L, et al. Risk identification on hydropower project using the IAHP and extension of TOPSIS methods under interval-valued fuzzy environment[J]. Natural Hazards, 2013, 65(1): 359-373.
- [22] 谷向东, 童中翔, 郭辉, 等. IAHP 和熵权相结合的 TOPSIS 法的空战目标威胁评估[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(1): 69-72. (GU Xiangdong, TONG Zhongxiang, GUO Hui, et al. Target threat assessment for air combat based on topsis combining by iahp and entropy weight[J]. Fire Control and Command Control, 2012, 37(1): 69-72. (in Chinese))
- [23] 吴育华, 诸为, 李新全, 等. 区间层次分析法:IAHP[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 1995, 28(5): 700-705. (WU Yuhua, ZHU Wei, LI Xinquan, et al. Interval approach to analysis of hierarchy process[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 1995, 28(5): 700-705. (in Chinese))
- [24] 施毅, 朱珍德, 李志敬. 考虑温度效应时深埋洞室围岩变形特性[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(3): 33-36. (SHI Yi, ZHU Zhende, LI Zhijing. Deformation characteristics of deep-buried caverns considering thermal effect[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(3): 33-36. (in Chinese))
- [25] 王青, 朱珍德, 朱江棚, 等. 长大引水隧洞岩爆的数值模拟及其应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(3): 363-366. (WANG Qing, ZHU Zhende, ZHU Jiangpeng, et al. Numerical simulation of a rock burst in long and wide diversion tunnel[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2008, 36(3): 363-366. (in Chinese))
- [26] 杨阳, 何勇军, 徐海峰, 等. 输水隧洞动态监控指标拟定方法[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(5): 81-85. (YANG Yang, HE Yongjun, XU Haifeng, et al. Determination method of dynamic monitoring indexes for water conveyance tunnels[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(5): 81-85. (in Chinese))

(收稿日期:2020-04-29 编辑:郑孝宇)