

基于可拓层次分析法的盾构隧道近接施工风险评估

李敏*, 张学忠

中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙

收稿日期: 2023年7月25日; 录用日期: 2023年8月15日; 发布日期: 2023年8月25日

摘要

为进行盾构隧道近接施工风险评估, 分析风险影响因素, 确定风险等级, 本文基于层次分析法与可拓学理论, 建立可拓层次风险评价模型来对隧道近接施工风险进行评价, 构建多层次评价指标体系, 计算各指标的权重值与关联度。引入深惠城际某盾构隧道下穿既有隧道与桥梁桩基工程, 依据可拓层次风险评价模型进行施工风险评估。研究表明: 周边建构筑物的存在对施工风险的影响最大, 其次地层岩性也对施工风险的影响较大; 总目标最大综合关联度为0.114, 属于II级, 对应评价级别为“较轻”。该模型可为盾构隧道近接施工风险评估提供参考。

关键词

风险评估, 可拓层次分析法, 盾构隧道, 近接施工

Risk Assessment of Shield Tunnel Close Construction Based on Extension Analytic Hierarchy Process

Min Li*, Xuezhong Zhang

Sinohydro Engineering Bureau 8 Co., Ltd., Changsha Hunan

Received: Jul. 25th, 2023; accepted: Aug. 15th, 2023; published: Aug. 25th, 2023

Abstract

In order to carry out the risk assessment of shield tunnel proximity construction, analyze the risk

*通讯作者。

influencing factors and determine the risk level, this paper based on the analytic hierarchy process and extension theory, established the extension level risk assessment model to evaluate the tunnel proximity construction risk, built a multi-level evaluation index system, and calculated the weight value and correlation degree of each index. A shield tunnel under the existing tunnel and bridge pile foundation project is introduced in the Shenzhen-Huizhou intercity, and the construction risk assessment is carried out according to the extension level risk assessment model. The results show that the existence of surrounding structures has the greatest influence on the construction risk, followed by the formation lithology. The maximum comprehensive correlation degree of the total objective is 0.114, which belongs to the II level and corresponds to the "light" evaluation level. This model can provide a reference for risk assessment of shield tunnel proximity construction.

Keywords

Risk Assessment, Extension Analytic Hierarchy Process, Shield Tunnel, Proximity Construction

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着城市现代化的推进,城市轨道交通线网逐渐密集,各种形式的近接施工不断涌现。由于盾构隧道施工不可避免地会带来地层扰动,从而影响周边建构物的安全。复杂形式下的盾构隧道近接施工受多重因素影响,如盾构掘进、地质条件、周围环境等,如何综合多种因素对工程开展相应的施工风险评估,并针对风险因素采取相应的应对措施,在施工前极为重要。为了降低施工风险、提高施工效率,许多学者针对不同的工程项目采取了不同类型的施工风险评估:周圆媛等[1]采用贝叶斯网络对岩溶区溶洞分布规律和盾构隧道施工安全性进行研究,提出岩溶区盾构隧道施工安全性评价方法,建立岩溶区盾构隧道施工安全性评判参考标准;卢鑫月等[2]提出基于动态贝叶斯网络和模糊综合评价法的地铁施工动态风险评估方法,结合监测数据进行隧道下穿既有建筑物的风险实时动态评估;张楠等[3]采用层次分析法及专家打分法得出各项关键因素所占比重,并结合模糊综合评价法判断了隧道风险等级;张继超等[4]采用工作分解法辨识风险源,通过层次分析法建立风险评估体系,构造判断矩阵,结合风险值,对其进行风险评估定级。

经典的层次分析法将复杂问题按照影响因素分解,通过构建判断矩阵计算各因素权重,适用于多目标决策问题,实现评价目标的定量化分析解决[5]。层次分析法在选择最佳方案方面具有一定的优势,但是也存在着许多缺陷,如缺少对专家判断模糊性的考虑以及构造判断矩阵时要求矩阵必须满足一致性等。可拓学是研究事物的可拓性和事物开拓的规律与方法并用以解决矛盾问题的科学[6]。可拓层次分析法借助可拓学理论,在层次分析法的基础上,解决具有区间数的判断矩阵的权重向量,提供了一种新的评价方法。王志杰等[7]通过可拓层次分析法和建立风险评价模型,确定评价指标的综合权重,实现施工风险等级评定;张凯等[8]通过可拓评价模型对某岩溶区隧道某里程段进行涌水风险评估,其评价结果与实际观测结果具有较好的吻合性;郭永华等[9]基于层次可拓模型,结合工程实际和专家打分,得出既有隧道衬砌结构病害评价等级。王道隆等[10]构建层次可拓集的边坡稳定性评估模型对广连高速路基某段岩质路

质高边坡施工稳定性进行了评估, 得到的评估结果与现场勘测结果一致。

本文在综合现有研究成果的基础上, 构建了隧道近接施工风险评价指标体系, 通过层次分析法和可拓学的理论, 建立可拓层次风险评价模型来对隧道近接施工风险进行评价, 并引入工程实例对模型进行评估。

2. 可拓层次分析法理论基础

2.1. 层次分析法

层次分析法是将复杂问题分解为若干层次和若干因素, 在同一层次中将各因素进行比较、判断和计算, 得到不同方案的风险水平, 从而为方案的选择提供决策依据。

层次分析法的核心步骤是构造判断矩阵, 矩阵数值的准确性将影响最终评价的准确性, 构造的 n 阶判断矩阵见式 1:

$$\mathbf{A} = [a_{ij}]_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 a_{ij} 是两个指标重要性程度相互比较的判断结果, 本文邀请一些具有隧道专业背景的专业人员进行打分, 按照 1~9 标度法对指标两两比较, 来量化其相对重要性, 标度法含义见表 1。

Table 1. Meaning of scale method 1~9

表 1. 1~9 标度法含义

标度	含义
1	i 与 j 重要性等同
3	i 比 j 稍重要
5	i 比 j 明显重要
7	i 比 j 明显强烈重要
9	i 比 j 明显极其重要
2、4、6、8	判断处于上述中间值
倒数($1/a_{ij}$)	j 与 i 的比较结果

2.2. 可拓学

可拓学以矛盾问题的智能化处理为研究内容, 采用定性和定量相结合的方法去探讨解决矛盾问题。它需要先对各组成要素进行分析, 确定待评价对象的物元表达形式:

$$\mathbf{M} = (\mathbf{A}, \mathbf{C}, \mathbf{U}) \quad (2)$$

式中, \mathbf{A} 为事物对象, \mathbf{C} 为事物的特征, \mathbf{U} 为事物特征量值。

通过对分析对象进行物元分析, 划分集合 \mathbf{M} 为若干子集, 并构造它们的经典域物元和节域物元。

2.3. 可拓层次分析法的概念与应用路径

工程施工往往受多重因素影响, 如何综合多种因素对工程开展相应的施工风险评估, 在施工前极为重要。可拓层次分析法借助可拓学理论, 在常规的层次分析法基础上, 解决具有区间数的判断矩阵的权重向量, 提供了一种新的评价方法。通过可拓层次分析法针对具体工程建立评价模型, 进行风险评估, 需要根据实际情况构建风险评估体系, 借助层次分析法来量化评估体系中各指标的相对重要性, 借助可拓学理论对分析对象进行物元分析。基于可拓层次分析法, 可以从多角度、多方面评估工程项目施工的风险水平, 并采取相应措施来降低工程风险。

3. 可拓层次评价模型的构建

当影响工程风险的指标因素过多时, 想通过各指标的精确权重值来分析风险较为困难。通过建立可拓层次风险评价模型, 计算各指标与各风险的关联度, 再通过整体风险关联度大小来判定评估对象风险状况。可拓层次分析法评价流程见图 1。

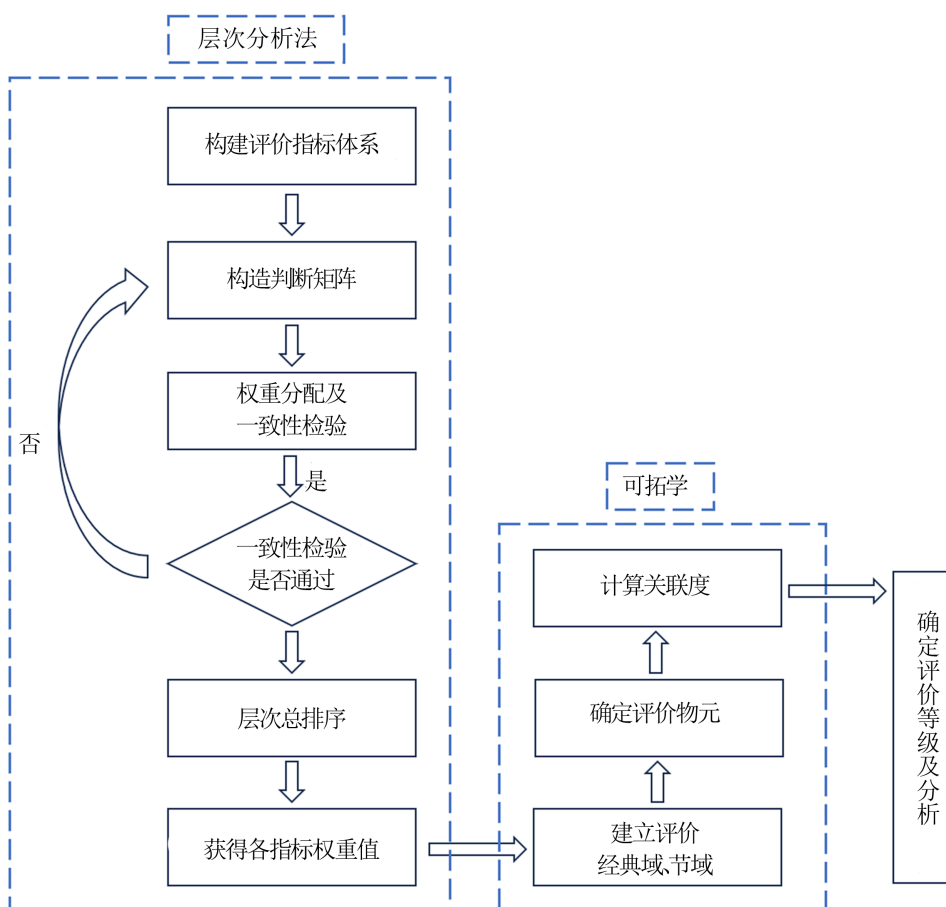


Figure 1. Extension analytic hierarchy process evaluation process

图 1. 可拓层次分析法评价流程

3.1. 构建评价指标体系

影响盾构隧道近接施工安全的因素较多, 选取部分对近接施工风险影响较大的地质条件因素、周边建构筑物因素、隧道设计因素、盾构施工因素 4 大类、16 个主要因素, 建立评价指标体系如图 2。

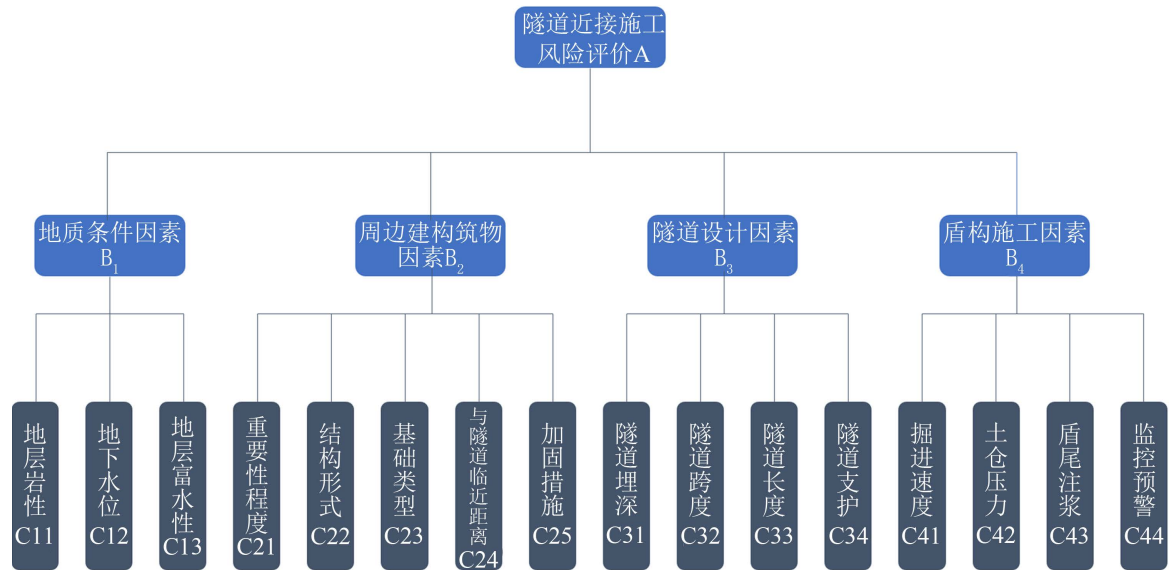


Figure 2. Risk evaluation index system of tunnel proximity construction

图 2. 隧道近接施工风险评价指标体系

3.2. 计算指标权重

按式 1 构造 n 阶判断矩阵, 采用几何平均法确定判断矩阵的特征向量, 具体步骤如下:

1) 计算判断矩阵每一行的乘积 M_i :

$$M_i = \prod_{j=1}^n a_{ij} \quad i=1,2,\dots,n \quad (3)$$

2) 计算 M_i 的 n 次方根 w_i :

$$w_i = \sqrt[n]{M_i} \quad (4)$$

3) 向量 $w_i = [\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_n]^T$ 进行归一化处理:

$$w_i = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (5)$$

4) 计算最大特征值:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{nw_i} \quad (6)$$

5) 计算一致性指标, 进行一致性检验:

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (7)$$

当随机一致性比率 $C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} < 0.10$ 时, 判别矩阵满足一致性检验, 如一致性检验不通过, 需要调整判别矩阵的元素取值。 $R.I.$ 为平均随机一致性指标。

3.3. 计算关联度

通过对分析对象进行物元分析, 划分集合 M 为若干子集, 并构造它们的经典域和节域。

1) 构建经典域和节域

按照设定的施工风险影响程度等级, 将分析对象的风险水平划分为 p ($p = 1, 2, \dots, m$) 种等级, 则风险评价分析经典域可表示为式 8, 节域表示为式 9:

$$M_{A0} = (A, C_{ij}, U_{p_{ij}}) = \begin{bmatrix} A & C_{11} & U_{p_{11}} \\ & C_{12} & U_{p_{12}} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_{ij} & U_{p_{ij}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i & C_{11} & \langle a_{p_{11}}, b_{p_{11}} \rangle \\ & C_{12} & \langle a_{p_{12}}, b_{p_{12}} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_{ij} & \langle a_{p_{ij}}, b_{p_{ij}} \rangle \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: M_{A0} 为系统经典域; $U_{p_{ij}} = \langle a_{p_{ij}}, b_{p_{ij}} \rangle$ 表示事物特征 C_{ij} 对应的风险影响评价指标第 p 级取值范围的极值范围。

$$M_{AP} = (P, C_{ij}, U_{ijp}) = \begin{bmatrix} P & C_{11} & U_{11p} \\ & C_{12} & U_{12p} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_{ij} & U_{ijp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & C_{11} & \langle a_{11p}, b_{11p} \rangle \\ & C_{12} & \langle a_{12p}, b_{12p} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_{ij} & \langle a_{ijp}, b_{ijp} \rangle \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: M_{AP} 为系统节域, p 表示节域风险影响状态分级的全体; $U_{p_{ij}} = \langle a_{p_{ij}}, b_{p_{ij}} \rangle$ 为风险影响评价指标 C_{ij} 对应全体等级总的取值范围。

2) 确定评估对象物元 M_{AK}

$$M_{AK} = (Q, C_{ij}, X_{ij}) = \begin{bmatrix} Q & C_{11} & x_{11} \\ & C_{12} & x_{12} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_{ij} & x_{ij} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: Q 为待评估对象, $X_{ij} = (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{ij})$ 为待评估物元环境影响评价指标实测特征量值。

3) 计算风险影响关联度

据点与有限区间距的定义, 按式 11 计算关联函数值。

$$t_{ij}^p = \begin{cases} \frac{-\rho(x_{ij}, U_{p_{ij}})}{|U_{p_{ij}}|} & x_{ij} \in U_{p_{ij}} \\ \frac{\rho(x_{ij}, U_{p_{ij}})}{\rho(x_{ij}, U_{ijp}) - \rho(x_{ij}, U_{p_{ij}})} & x_{ij} \notin U_{p_{ij}} \end{cases} \quad (11)$$

式中, t_{ij}^p 为待评估风险影响指标 C_{ij} 相对于第 p 级风险影响程度的关联度, 且有:

$$\rho(x_{ij}, U_{p_{ij}}) = \left| x_{ij} - \frac{1}{2}(a_{p_{ij}} + b_{p_{ij}}) \right| - \frac{1}{2}(b_{p_{ij}} - a_{p_{ij}})$$

$$\rho(x_{ij}, U_{ijp}) = \left| x_{ij} - \frac{1}{2}(a_{ijp} + b_{ijp}) \right| - \frac{1}{2}(b_{ijp} - a_{ijp})$$

$$|U_{p_{ij}}| = \left| \frac{b_{p_{ij}} - a_{p_{ij}}}{2} \right|$$

4) 待评价指标 B_i 关于第 i 个风险状态水平的综合关联度

$$\sigma_i^p = \sum_{j=1}^n w_{ij} t_{ij}^p \quad (12)$$

5) 隧道近接施工风险程度的确定

构造关联度向量:

$$\sigma_i = (\sigma_i^1, \sigma_i^2, \dots, \sigma_i^p) \quad (13)$$

确定风险影响程度:

$$\text{若 } \max(\sigma_i^p) = \sigma_i^l, l = 1, 2, \dots, p \quad (14)$$

则判定第 i 个待评估对象 B_i 属于第 l 种环境影响程度。

4. 工程应用

4.1. 工程概况

本文以深惠城际铁路怡海站~鲤鱼门站区间为例, 区段地质情况及周边环境复杂, 全段下穿桂庙路立交、地铁 11 号线南山站~前海湾站区间、电缆隧道、学府路立交、桂湾四路立交及地铁 1 号线大新站~鲤鱼门站区间, 面临连续穿越、密集近接等难题。鲤鱼门站南侧 10 m~30 m 处下穿 1 号线大新站~鲤鱼门站盾构区间, 怡鲤隧道距 1 号线盾构隧道最小净距仅 3.1 m。隧道与桂湾四路桩基冲突, 需进行桩基托换, 桂湾四路桥桩为直径 1.5 m 桩基, 桩长约 54 m。深惠城际怡鲤区间下穿地铁 1 号线平面图见图 3, 剖面图见图 4。

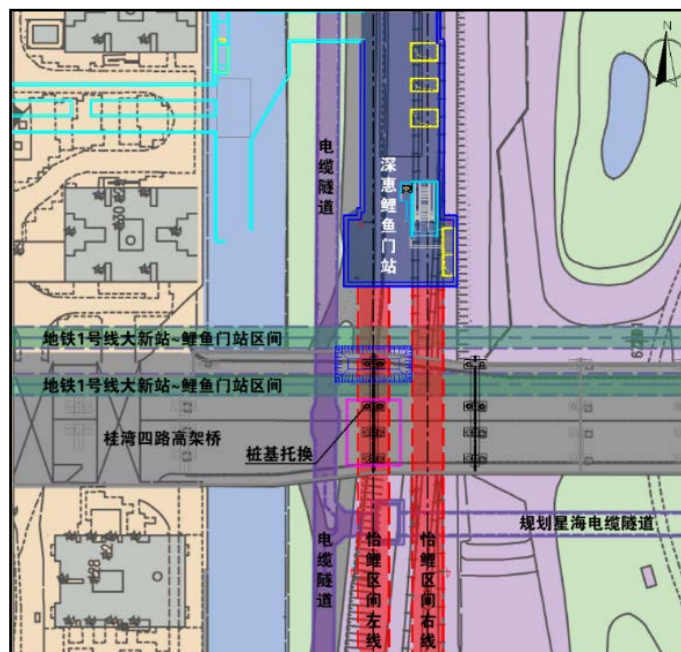


Figure 3. Plan of Shenzhen-Huizhou intercity tunnel under line 1
图 3. 深惠城际隧道下穿 1 号线平面图

隧道采用 EPB 盾构施工, 隧道结构形式为双洞单线 8.8 m 外圆形隧道, 衬砌为 400 mm 厚 C50、P12 盾构管片。该区间隧道上覆地层依次为杂填土、淤泥、粉质黏土、砾质粘性土、全风化花岗岩、土状及块状强风化花岗岩、中风化花岗岩和微风花岗岩, 水位埋深 0 m~1.4 m。

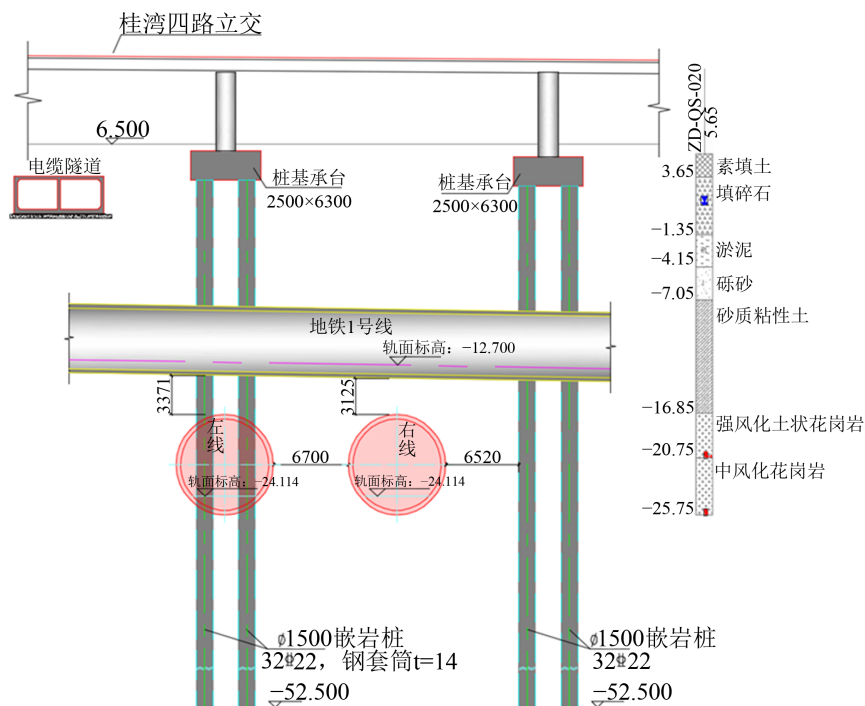


Figure 4. Section view of Shenzhen-Huizhou intercity tunnel section under line 1
图 4. 深惠城际隧道区间下穿 1 号线剖面图

4.2. 指标权重计算

基于隧道近接施工风险评价指标体系, 采用 1~9 标度法按层次构造如式 1 所示的判断矩阵, 通过式 2~7 来计算各指标的权重并进行一致性检验。将目标层 A-B 和准则层 B₁-C、B₂-C、B₃-C 以及 B₄-C 的权重分配分别列入表 2~6。

Table 2. A-B judgment matrix and weight distribution
表 2. A-B 判断矩阵及权重分配

A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	ω_i	一致性检验
B ₁	1	1/2	2	2	0.2761	
B ₂	2	1	2	2	0.3905	$\lambda_{\max} = 4.121$ CI = 0.04
B ₃	1/2	1/2	1	2	0.1953	CR = 0.046 < 1
B ₄	1/2	1/2	1/2	1	0.1381	

Table 3. B₁-C judgment matrix and weight distribution
表 3. B₁-C 判断矩阵及权重分配

B ₁	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	ω_i	一致性检验
C ₁₁	1	2	2	0.4934	$\lambda_{\max} = 3.054$ CI = 0.027
C ₁₂	1/2	1	2	0.3108	CR = 0.051 < 1
C ₁₃	1/2	1/2	1	0.1958	

Table 4. B₂-C judgment matrix and weight distribution
表 4. B₂-C 判断矩阵及权重分配

B ₂	C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	C ₂₄	C ₂₅	ω_i	一致性检验
C ₂₁	1	4	4	2	2	0.3861	$\lambda_{\max} = 5.136$ CI = 0.034 CR = 0.031 < 1
C ₂₂	1/4	1	1/2	1/4	1/4	0.0637	
C ₂₃	1/4	2	1	1/2	1	0.1274	
C ₂₄	1/2	4	2	1	2	0.2548	
C ₂₅	1/2	4	1	1/2	1	0.1681	

Table 5. B₃-C judgment matrix and weight distribution
表 5. B₃-C 判断矩阵及权重分配

B ₃	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	C ₃₄	ω_i	一致性检验
C ₃₁	1	1/2	2	1/2	0.1953	$\lambda_{\max} = 4.121$ CI = 0.04 CR = 0.046 < 1
C ₃₂	2	1	2	2	0.3905	
C ₃₃	1/2	1/2	1	1/2	0.1381	
C ₃₄	2	1/2	2	1	0.2761	

Table 6. B₄-C judgment matrix and weight distribution
表 6. B₄-C 判断矩阵及权重分配

B ₄	C ₄₁	C ₄₂	C ₄₃	C ₄₄	ω_i	一致性检验
C ₄₁	1	1/4	1/2	1/4	0.0899	$\lambda_{\max} = 4.061$ CI = 0.02 CR = 0.023 < 1
C ₄₂	4	1	2	1/2	0.3025	
C ₄₃	2	1/2	1	1/2	0.1799	
C ₄₄	4	2	2	1	0.4278	

由表 3~7 计算结果可知, 隧道近接施工风险分析中各层均满足一致性检验要求, 之后对各指标进行综合权重计算, 自高至低排序, 可得到隧道近接施工风险评价指标层次总排序见表 7。

Table 7. Hierarchical ranking of risk evaluation indexes of tunnel proximity construction
表 7. 隧道近接施工风险评价指标层次排序

总目标	一级指标	一级权重	二级指标	二级权重	综合权重	排序
A	B ₁	0.2761	C ₁₁	0.4934	0.1362	2
			C ₁₂	0.3108	0.0858	4
			C ₁₃	0.1958	0.0541	8
	B ₂	0.3905	C ₂₁	0.3861	0.1508	1
			C ₂₂	0.0637	0.0249	14

Continued

			C ₂₃	0.1274	0.0497	10
			C ₂₄	0.2548	0.0995	3
			C ₂₅	0.1681	0.0656	6
			C ₃₁	0.1953	0.0381	12
	B ₃	0.1953	C ₃₂	0.3905	0.0763	5
			C ₃₃	0.1381	0.0270	13
			C ₃₄	0.2761	0.0539	9
			C ₄₁	0.0899	0.0124	16
	B ₄	0.1381	C ₄₂	0.3025	0.0418	11
			C ₄₃	0.1799	0.0248	15
			C ₄₄	0.4278	0.0591	7

由表 8 可知, 盾构隧道近接施工风险评价指标中, 影响最大的是周边建构筑物的重要性程度, 其次是地层岩性、周边建构筑物与隧道的临近距离。

建立隧道近接施工风险等级表, 将风险划分为五个等级, 建立等级域 $U = \{\text{I级, II级, III级, IV级, V级}\} = \{\text{轻度, 较轻, 中度, 较重, 重度}\}$, 等级划分标准见表 8。研究相关文献并结合专家意见, 规定各级别计分标准为 90~100、80~90、70~80、60~70、0~60。

Table 8. Risk classification standard for tunnel proximity construction

表 8. 隧道近接施工风险等级划分标准

等级	划分标准
I级	风险很小, 施工基本不会发生安全事故, 近接建构筑物性能完好, 运营不受影响
II级	风险可控, 不会发生较大的安全事故, 近接建构筑物轻微破损, 性能减退, 运营不受影响
III级	有一定的风险, 可能发生较大的安全事故, 近接建构筑物破损, 运营尚未受到影响
IV级	风险较高, 可能发生大型安全事故, 近接建构筑物结构严重破损, 可能危及行车安全
V级	风险很高, 易发生大型安全事故, 近接建构筑物结构破坏, 危及行车安全

邀请一些具有隧道专业背景的专业人员, 针对本工程对盾构隧道近接施工风险评价指标进行打分, 各指标总分为 100 分, 分数随着风险程度的减小而增加, 取得各专家的评分后, 对偏离较大的分值进行修正, 再取平均值构建经典域, 各指标平均得分见表 9。

Table 9. Risk index scoring table

表 9. 风险指标打分表

一级指标	二级指标	得分
地质条件因素 B ₁	地层岩性 C ₁₁	83
	地下水位 C ₁₂	84

Continued

	地层富水性 C ₁₃	87
	重要性程度 C ₂₁	77
	结构形式 C ₂₂	81
周边建构筑物因素 B ₂	基础类型 C ₂₃	83
	与隧道临近距离 C ₂₄	76
	加固措施 C ₂₅	78
	隧道埋深 C ₃₁	81
隧道设计因素 B ₃	隧道跨度 C ₃₂	79
	隧道长度 C ₃₃	94
	隧道支护 C ₃₄	83
	土仓压力 C ₄₁	83
盾构施工因素 B ₄	掘进速度 C ₄₂	81
	盾尾注浆 C ₄₃	82
	监控预警 C ₄₄	84

根据式 11 计算盾构隧道近接施工风险评价二级指标关联度, 计算结果见表 10。

Table 10. Correlation degree of two indexes of shield tunnel proximity construction risk evaluation
表 10. 盾构隧道近接施工风险评价二级指标关联度

评估指标	I级	II级	III级	IV级	V级
C ₁₁	-0.2917	0.3	-0.15	-0.4333	-0.575
C ₁₂	-0.2727	0.4	-0.2	-0.4667	-0.6
C ₁₃	-0.1154	0.3	-0.35	-0.5667	-0.675
C ₂₁	-0.3611	-0.1154	0.3	-0.233	-0.425
C ₂₂	-0.3214	0.1	-0.05	-0.3667	-0.525
C ₂₃	-0.2917	0.3	-0.15	-0.4333	-0.575
C ₂₄	-0.3684	-0.1429	0.4	-0.2	-0.4
C ₂₅	-0.3529	-0.0833	0.2	-0.2667	-0.45
C ₃₁	-0.3214	0.1	-0.05	-0.3667	-0.525
C ₃₂	-0.3438	-0.0455	0.1	-0.3	-0.475
C ₃₃	0.4	-0.4	-0.7	-0.8	-0.85
C ₃₄	-0.2917	0.3	-0.15	-0.4333	-0.575
C ₄₁	-0.2917	0.3	-0.15	-0.4333	-0.575

Continued

C ₄₂	-0.3214	0.1	-0.05	-0.3667	-0.525
C ₄₃	-0.3077	0.2	-0.1	-0.4	-0.55
C ₄₄	-0.2727	0.4	-0.2	-0.4667	-0.6

结合表 10 得到的盾构隧道近接施工风险评价指标权重值, 根据式 12 计算一级指标及总目标的综合关联度, 根据式 13~14 确定风险程度评价结果, 计算结果见表 11。

Table 11. Risk evaluation results of shield tunnel proximity construction

表 11. 盾构隧道近接施工风险评价结果

目标层	I级	II级	III级	IV级	V级	级别
B ₁	-0.2513	0.3311	-0.2047	-0.4698	-0.6024	较轻
B ₂	-0.3502	-0.0504	0.2291	-0.2643	-0.4484	中度
B ₃	-0.2223	0.0293	-0.1088	-0.4188	-0.5642	较轻
B ₄	-0.2955	0.2643	-0.1322	-0.4214	-0.5661	较轻
A	-0.2904	0.1140	-0.0066	-0.3729	-0.5298	较轻

由表 11 所示的综合关联度可知, 本工程施工风险的总目标最大综合关联度为 0.114, 属于II级, 对应评价级别为“较轻”, 因此, 施工时应注意加强对周边建构筑物的监测, 及时采取相应的措施, 来降低盾构隧道下穿既有隧道与桥梁桩基的风险。

5. 结论

本文从地质条件因素、周边建构筑物因素、隧道设计因素、盾构施工因素 4 个方面, 根据隧道近接施工风险评价的 16 个因素, 建立了可拓层次风险评价模型, 对盾构隧道近接施工风险进行评价, 得出如下结论:

1) 通过计算盾构隧道近接施工风险评价指标的权重值, 发现影响最大的是周边建构筑物的重要性程度, 其次是地层岩性、周边建构筑物与隧道的临近距离。

2) 基于评价指标体系, 结合工程实例, 通过计算评价指标体系各级指标的关联度, 计算出该工程施工风险总目标最大综合关联度对应评价级别为“较轻”。

参考文献

- [1] 周圆媛, 何一韬, 赵璟璐, 张清照, 潘青. 基于贝叶斯网络的岩溶区盾构隧道施工安全性分析[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(S2): 764-771.
- [2] 卢鑫月, 许成顺, 侯本伟, 杜修力, 李立云. 基于动态贝叶斯网络的地铁隧道施工风险评估[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(4): 492-501.
- [3] 张楠. 大直径空推法盾构隧道施工风险模糊综合评判[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(S1): 364-369.
- [4] 张继超, 周建军, 孙飞祥, 杨振兴, 张兵, 游慧杰. 厦门地铁 4 号线过海段隧道盾构法与矿山法海下对接施工风险评估[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(2): 225-241.
- [5] 刘豹, 许树柏, 赵焕臣, 和金生. 层次分析法——规划决策的工具[J]. 系统工程, 1984(2): 25-32.
- [6] 蔡文. 可拓学概述[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 18(1): 76.
- [7] 王志杰, 李振, 蒋新政, 曾青, 王哲, 唐力, 李金宜, 蔡李斌. 新建隧道双侧近接既有隧道施工风险评估研究[J].

- 铁道工程学报, 2020, 47(5): 47-54.
- [8] 张凯, 陈寿根, 霍晓龙, 谭信荣. 岩溶地区隧道涌水风险的可拓评价模型及应用[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(4): 89-96.
- [9] 郭永华, 龚设, 康三月, 陶小钧, 林立宏, 吴丹红. 基于层次-可拓(AHP-Extenics)模型的既有隧道衬砌结构病害评价[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(S1): 115-122.
- [10] 王道隆, 向敬, 黄亚娥, 曾铃. 基于层次可拓集的公路边坡稳定性评估[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(2): 13-19.