

基于 D-AHP 原理上软下硬地层隧道施工风险评估研究

吴 波, 刘娉婷, 蒙国往, 黄 惟

(广西大学 土木建筑工程学院, 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘 要: 为了对上软下硬地层的隧道施工风险进行评估与分析, 运用 WBS-RBS 方法建立一个全面的风险评估指标体系, 通过 D-AHP 方法来进行评价指标权重的计算. 运用灰色理论来求解灰色评价矩阵. 在这两种方法结合的基础上, 对上软下硬复合地层的隧道施工进行综合评估, 并直观地表示出风险的评估结果. 通过实例对此分析, 运用 D-AHP 方法和灰色理论相结合的风险评估方法能够有效地解决评估信息不确定性问题以及评估过程信息资源不足的灰性特征, 计算方法简便, 风险评估结果量化, 对复合地层隧道施工的风险评估具有参考价值.

关键词: 灰色理论; D 数层次分析法; 隧道施工; 风险评估; 上软下硬地层

1 引言

随着我国城市化进程的不断深入, 高速铁路发展迅速. 铁路隧道在施工过程中不可避免地会遇到一些特殊的复合地层, 特别是隧道工程向深部发展中会遇到上软下硬地层, 施工难度系数巨大, 安全风险极高.

近年来, 许多学者和专家对于上软下硬复合地层的隧道施工进行了相关研究. 苏昂^[1]等人基于扩展有限单元法对盾构隧道施工中的管片病害进行了分析, 朱逢斌^[2]等人通过建立三维有限元数值模拟, 研究上软下硬地层中盾构隧道施工对邻近承载桩基工作性状的影响规律. 林荣安^[3]等人通过建立地表沉降预测模型来预测实际地铁隧道工程中所遇到的沉降问题, 张亚洲^[4]等人多角度分析研究得到上软下硬地层盾构施工所遇到的主要问题, 吴波^[5]等人采用 PRA 方法对上软下硬地层隧道施工风险进行了评估. 通过上述分析可以发现, 针对上软下硬地层隧道研究集中在施工稳定性和城市隧道中, 但对上软下硬地层的施工风险评估方法研究相对较少.

本文基于 D-AHP(D 数偏好层次分析法) 原理与灰色理论建立上软下硬隧道施工的风险评估和分析模型, 并结合金台铁路五峰山隧道典型的上软下硬地层隧道施工将对安全风险评估的实施流程进行分析, 给出施工风险管控建议.

2 上软下硬地层隧道施工风险分析

2.1 风险评估目标及风险管理流程

由于施工环境的复杂性、不确定性和上软下硬地层的特殊性, 隧道施工会受到多因素影响, 各种施工危险事件的发生可能性都相对较高, 因此, 对于施工安全风险水平的综合评估显

收稿日期: 2020-04-28

得尤为重要. 与此同时, 通过对隧道施工风险项目的评估数据进行分析讨论, 制定针对各种风险事件的初步风险处理方案, 将风险降低到可接受范围内, 减少不必要的人员伤亡和经济损失.

风险管理流程主要包括风险计划、风险识别、风险分析、风险估计、风险评价以及风险控制等, 而风险管理技术的部分又可归结为三大部分, 分别为风险识别、风险评估、风险控制.

2.2 隧道开挖风险评估指标体系

在地铁隧道的施工过程中, 往往会受到许多因素的干扰, 其中环境因素尤为重要, 环境因素能够影响隧道施工的方方面面, 同时, 各个施工流程中的安全风险之间有着一定的关系. 为了能够顺利进行隧道安全风险评估, 需要建立起一套合理、操作性强的风险评估指标系统. 在本文中, 通过调查分析国内外的隧道施工安全风险管理现状, 同时查阅文献, 研究复合地层下隧道施工的力学效应, 通过运用工作分解结构 (WBS) 的方法对隧道施工流程进行分解, 然后与风险分解结构 (RBS) 所得的矩阵向量交叉耦合, 通过对隧道施工风险源的识别, 建立完备的风险评估指标体系 [5]. 本文主要对隧道开挖施工安全按这一事件进行评估与分析, 通过所搜集到的相关隧道施工资料以及前文所建立体系, 构造合理的施工安全风险评估层次评价模型. 在该层次模型中, 隧道开挖洞身风险 U_1 为顶层目标元素. 目标层下设四个一级指标, 每个一级指标下又设有与之相关的其他二级指标: 地下水影响、围岩应力状态、开挖量、循环进尺、有效加固措施、监控量测、支护、爆破振动控制、二次衬砌、超前地质预报、施工组织、施工安全管理等 12 个二级指标, 共同构成了准则层, 所构建评估层次结构模型如图 1 所示.

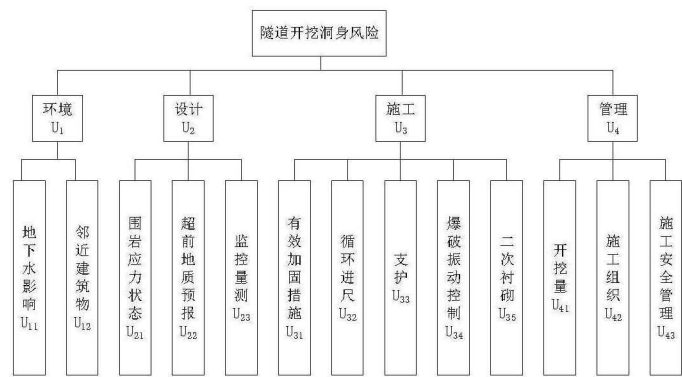


图 1 隧道开挖洞身安全风险评估指标体系

3 D-AHP 风险评估方法

3.1 D 数理论

D 数理论克服了原始 Dempster-Shafer(D-S) 证据理论的不足, 对 D-S 证据理论的辨识框架中元素互斥与完备的假设进行了相关的延伸, 相比较而言, D 数理论的应用范围更为广泛, 更加适用于对不确定信息的描述和处理问题, 本文将 D 数理论应用到上软下硬地层隧道施工风险的评估之中.

定义 1 假设存在一个有限的非空集合 Ω , D 数为一个映射, 将该映射定义为 $D : \Omega \rightarrow$

$[0, 1]$, 满足条件:

$$\sum_{B \subseteq \Omega} D(B) \leq 1 \quad (1)$$

$$D(\emptyset) = 0 \quad (2)$$

其中: \emptyset 代表空集, B 代表 Ω 的子集, 在 Ω 中的元素并不是相互排外的. 若得出

$$\sum_{B \subseteq \Omega} D(B) = 1 \quad (3)$$

则代表所得信息是完整的, 否则, 信息不完整. 若存在一个问题域 $\Omega = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_n\}$, 其中 b_i 为实数, 若 $i \neq j$, 则 $b_i \neq b_j$, 因此 D 数有一个特殊的表达形式:

$$\begin{aligned} D(\{b_1\}) &= v_1, \\ D(\{b_2\}) &= v_1, \\ &\dots\dots\dots, \\ D(\{b_n\}) &= v_n \end{aligned} \quad (4)$$

即

$$D = \{(b_1, v_1), (b_2, v_2), (b_3, v_3), \dots, (b_n, v_n)\} \quad (5)$$

满足 $v_i > 0$ 且 $\sum_{i=1}^n v_i \leq 1$.

定义 2 假设 $D = \{(b_1, v_1), (b_2, v_2), (b_3, v_3), \dots, (b_n, v_n)\}$ 为一个 D 数, 则 D 数的融合为

$$I(D) = \sum_{i=1}^n b_i v_i \quad (6)$$

其中, b_i 为实数, $v_i > 0$, 并且 $\sum_{i=1}^n v_i \leq 1$.

3.2 模糊偏好关系

假设存在指标 C , 模糊偏好关系 R 基于 $C \times C$ 且以模糊集的方式存在着, 是指标 C 的集合, 同时具有隶属函数的相关性质:

$$\mu_R : C \times C \rightarrow [0, 1] \quad (7)$$

指标基数偏小的情况下, 偏好关系选择 $n \times n$ 的矩阵来表示: $R = [r_{ij}]_{n \times n}$, $r_{ij} = \mu_R(C_i, C_j)$, $\forall i, j \in \{1, 2, 3, \dots, n\}$, 即:

$$R = \begin{bmatrix} & C_1 & C_2 & \cdots & C_n \\ C_1 & r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ C_2 & r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_n & r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, r_{ij} 表示指标 C_i 相较于 C_j 的偏好程度. 即专家 C_i 相较于 C_j 的偏好程度, r_{ij} 的取值

以及相对应的赋值含义如下:

$$r_{ij} = \mu_R(C_i, C_j) = \begin{cases} 0, & C_j \text{ 比 } C_i \text{ 绝对重要} \\ \in (0, 0.5), & C_j \text{ 比 } C_i \text{ 重要一些} \\ 0.5, & C_j \text{ 比 } C_i \text{ 同等重要} \\ \in (0.5, 1), & C_i \text{ 比 } C_j \text{ 重要一些} \\ 1, & C_i \text{ 比 } C_j \text{ 绝对重要} \end{cases}$$

模糊偏好关系在专家信息存在不确定性的情况下, 无法构造出一个合理的偏好矩阵^[6].

3.3 D 数理论偏好关系

由于模糊偏好关系本身所具有的局限性, 本文采用 D 数偏好关系, 通过运用 D 数理论来对模糊偏好关系进行改进与扩展, 扩大适用范围, 增加对不确定信息的处理能力. 该方法对应的矩阵称为 D 数偏好矩阵^[7].

设有一个集合 R_D , 即 D 数偏好关系, 存在形式为 D 数矩阵, 是指标 C 的集合, 其中的元素表示为

$$R_D : C \times C \rightarrow D \quad (9)$$

D 数偏好关系的矩阵形式如下所示.

$$R_D = \begin{bmatrix} & C_1 & C_2 & \cdots & C_n \\ C_1 & D_{11} & D_{12} & \cdots & D_{1n} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} & \cdots & D_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_n & D_{n1} & D_{n2} & \cdots & D_{nn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

该偏好矩阵需满足:

$$D_{ij} = \left\{ \left(b_1^{ij}, v_1^{ij} \right), \left(b_2^{ij}, v_2^{ij} \right), \cdots, \left(b_m^{ij}, v_m^{ij} \right) \right\} \quad (11)$$

$$D_{ji} = \left\{ \left(1 - b_1^{ij}, v_1^{ij} \right), \left(1 - b_2^{ij}, v_2^{ij} \right), \cdots, \left(1 - b_m^{ij}, v_m^{ij} \right) \right\} \quad (12)$$

其中, $\forall i, j \in \{1, 2, 3, \cdots, n\}$;

$$b_k^{ij} \in [0, 1], \quad \forall k \in \{1, 2, 3, \cdots, n\} \quad (13)$$

$$D_{ii} = \{(0.5, 1.0)\}, \forall i \in \{1, 2, \cdots, n\} \quad (14)$$

该式中, b_k^{ij} 代表 k 专家对 i 方案相较于 j 方案的重要程度的评分, v_k^{ij} 表示该专家对该重要程度的支持度.

显而易见, 传统的模糊偏好关系可以转化为 D 数偏好关系, 例如

$$R_D = \begin{bmatrix} & C_1 & C_2 & \cdots & C_n \\ C_1 & \{(r_{11}, 0)\} & \{(r_{12}, 0)\} & \cdots & \{(r_{1n}, 0)\} \\ C_2 & \{(r_{21}, 0)\} & \{(r_{22}, 0)\} & \cdots & \{(r_{2n}, 0)\} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_n & \{(r_{n1}, 0)\} & \{(r_{n2}, 0)\} & \cdots & \{(r_{nn}, 0)\} \end{bmatrix} \quad (15)$$

3.4 D-AHP 方法

层次分析法 (AHP) 将决策的系列相关目标分解成不同的层次, 例如目标层、准则层、方案层等, 通过层次的分解进行一个定性与定量的分析决策的方法.

然而传统的层次分析法不具备处理不确定主观评价问题的能力, D 数理论能够弥补这一理论上的缺陷, 并且能够融合专家评估意见, 建立群评估. 故可以通过改进层次分析法, 融合 D 数偏好关系得到 D-AHP 方法.

AHP 结构由三个层次构成: 目标层, 准则层, 方案层.

计算指标权重的 D-AHP 方法步骤描述如下^[6]:

步骤 1 邀请专家评议, 依照所建立评估标度成对比较风险指标, 评估重要程度, 构建偏好矩阵 R_D ;

步骤 2 矩阵转化;

步骤 3 构建概率矩阵 R_p , 计算偏好概率;

步骤 4 计算得三角化矩阵 R_p^T , 将风险指标并对指标按重要程度进行排序;

步骤 5 三角化实数矩阵 R_C ;

步骤 6 根据矩阵计算各个指标的相对权重.

3.5 风险评估权重

依据表 1 所建立的标度含义表对指标进行重要性比较, 并对指标权重进行赋值, 成对比较.

表 1 标度及含义

标度	含义
0.1, 0.2, 0.3, 0.4	反比较
0.5	两指标重要性相同
0.6	前指标稍微重要于后指标
0.7	前指标明显重要于后指标
0.8	前指标强烈重要于后指标
0.9	前指标极端重要于后指标

计算权重过程中, 需要对偏好矩阵进行一致性检验, 计算不一致度系数 I.D.:

$$I.D. = \frac{\sum_{i=1}^n R_P^T(i, j)}{n(n-1)/2}, j < i \quad (16)$$

式中, $R_P^T(i, j)$ 表示矩阵 R_P^T 中的某个元素, n 为被比较的指标数量.

对各级指标权重进行逐层集成, 求解综合权重的过程如下:

设向量 $A = (a_1, a_2, a_3, a_4)$, 式中, a_i 为一级指标 U_i 相对权重, $a_i \geq 0$ 且 $\sum_{i=1}^4 a_i = 1$.

设向量 $B_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{in})$, 式中, b_{ij} 为二级指标 U_{ij} 与 U_i 相比较而言的权重, $b_{ij} \geq 0$ 且 $\sum_{j=1}^{n_i} b_{ij} = 1$.

设向量 $W = (w_{11}, w_{12}, w_{13}, \dots, w_{ij}, \dots, w_{41}, \dots, w_{4n})$, 其中 $w_{ij} = a_i b_{ij}$ 表示 U_{ij} 相对于评估目标的综合权重, $w_{ij} \geq 0$ 且 $\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{n_i} a_i b_{ij} = 1$.

3.6 灰色理论

灰色系统由邓聚龙在 20 世纪 70 年代末、80 年代初提出的, 灰色理论主要研究的是“少数据不确定”问题, 灰理论的研究强调信息优化, 研究现实中的规律. 在灰色理论中, 将取值在某个区间的不确定数称为灰数, 灰数的可能取值称为白化值, 通过白化权函数的形式表达

白化值与白化权重之间的关系, 进而确定灰数隶属的灰类 [6].

3.6.1 白化权函数与灰色评价矩阵

1) 构建评价矩阵

设施工风险安全评估等级向量为:

$$V = (v_1, v_1, v_3, \dots, v_t)$$

本式中, t 为事先设定的风险评价等级数, 通过德尔菲法邀请 p 位专家对各个指标依照评估等级向量进行独立打分. $d_{ij}^{(q)}$ 表示第 q 位专家对二级指标 U_{ij} 的评价值, 最终评价矩阵 D 为 [8]:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11}^{(1)} & d_{12}^{(1)} & \dots & d_{ij}^{(1)} & \dots & d_{nn_i}^{(1)} \\ d_{11}^{(2)} & d_{12}^{(2)} & \dots & d_{ij}^{(2)} & \dots & d_{nn_i}^{(2)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{11}^{(q)} & d_{12}^{(q)} & \dots & d_{ij}^{(q)} & \dots & d_{nn_i}^{(q)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{11}^{(p)} & d_{12}^{(p)} & \dots & d_{ij}^{(p)} & \dots & d_{nn_i}^{(p)} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, n, j = 1, 2, 3, \dots, n_i, q = 1, 2, \dots, p$;

2) 白化权函数的确定

在传统的灰色统计法中, 常用的三种经典白化权函数分别为上类、中类、下类白化权函数, 用来构建灰色评价矩阵.

① $\otimes \in [d_1, +\infty)$ 时,

$$f_1(d_{ij}^{(q)}) = \begin{cases} \frac{d_{ij}^{(q)}}{d_1}, & d_{ij}^{(q)} \in [0, d_1) \\ 1, & d_{ij}^{(q)} \in [d_1, +\infty) \\ 0, & d_{ij}^{(q)} \in (-\infty, 0) \end{cases} \quad (18)$$

② $\otimes \in [0, d_1, 2d_1)$ 时,

$$f_2(d_{ij}^{(q)}) = \begin{cases} \frac{d_{ij}^{(q)}}{d_1}, & d_{ij}^{(q)} \in [0, d_1) \\ \frac{2 - d_{ij}^{(q)}}{d_1}, & d_{ij}^{(q)} \in [d_1, 2d_1] \\ 0, & d_{ij}^{(q)} \notin [0, 2d_1] \end{cases} \quad (19)$$

③ $\otimes \in [0, d_1, d_2)$ 时,

$$f_3(d_{ij}^{(q)}) = \begin{cases} 1, & d_{ij}^{(q)} \in [0, d_1) \\ \frac{d_2 - d_{ij}^{(q)}}{d_2 - d_1}, & d_{ij}^{(q)} \in [d_1, d_2] \\ 0, & d_{ij}^{(q)} \notin [0, d_2] \end{cases} \quad (20)$$

3) 构建灰色评价矩阵

假设灰类数目为 E , 白化权函数表示为 f_e , 计算样本的白化权值, 从而得到评价指标的灰色统计数:

$$n_{ij}^{(e)} = \sum_{q=1}^p f_e(d_{ij}^{(q)}) \quad (21)$$

$$n_{ij} = \sum_{e=1}^E n_{ij}^{(e)} \quad (22)$$

$$z_{ij}^{(e)} = \frac{n_{ij}^{(e)}}{n_{ij}} \quad (23)$$

式中, U_{ij} 属于第 e 个灰类的强烈程度表示为 $z_{ij}^{(e)}$.

$$Z_i = (z_{ij}^{(1)}, z_{ij}^{(2)}, \dots, z_{ij}^{(e)}, \dots, z_{ij}^{(E)}) \quad (24)$$

$$Z = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_i \\ \vdots \\ Z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11}^{(1)} & z_{11}^{(2)} & \cdots & z_{11}^{(e)} & \cdots & z_{11}^{(E)} \\ z_{12}^{(1)} & z_{12}^{(2)} & \cdots & z_{12}^{(e)} & \cdots & z_{12}^{(E)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ z_{ij}^{(1)} & z_{ij}^{(2)} & \cdots & z_{ij}^{(e)} & \cdots & z_{ij}^{(E)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ z_{nn_i}^{(1)} & z_{nn_i}^{(2)} & \cdots & z_{nn_i}^{(e)} & \cdots & z_{nn_i}^{(E)} \end{bmatrix} \quad i = 1, 2, \dots, E \quad (25)$$

3.7 施工安全的综合评价

依据 D 数偏好方法和重要性排序, 能够得到隧道施工过程中的安全漏洞, 通过采取相应的措施, 能够对工程重难点工程进行合理的风险管控 [9].

计算施工安全综合风险评价向量 H :

$$H = W * Z \quad (26)$$

式中, W 为所求得的权重向量, Z 为所得评价矩阵.

求隧道施工整体施工安全风险评估值 $RISK$:

$$Risk = H * V^T \quad (27)$$

式中, V 为风险等级向量.

通过量化评估值的形式来表现风险系统的状况, 确定施工安全的风评估等级, 从而能够为上软下硬复合地层隧道施工过程中安全风险的评估分析提供更为直观有效的数据, 从而科学有效的进行风险管控.

4 案例分析

本文依托浙江台州的金台铁路五峰山隧道工程, 运用 D-AHP 方法结合灰色理论, 对上软下硬复合地层下的隧道施工安全风险进行评估分析, 得出该工程的风险等级, 验证该方法的实用性.

4.1 工程介绍

金台铁路五峰山隧道穿越上部软弱下部坚硬的复合地层, 全长共 532m, 主要穿越地层如图 2 所示. 该隧道邻近还有一条既有营业隧道, 名为金岭头隧道, 与其并行间距为 57m, 五峰山隧道出口与金岭头隧道出口间距为 35m. 五峰山隧道穿越地层复杂, 地层岩性上部为粉质粘土, 下部为凝灰岩, 其褶皱构造不发育, 断裂多, 且大多为张性、张扭性断裂, 地质构造较为复杂, 岩石结构破碎, 容易引起塌方等地质灾害. 无论是从穿越复杂地层的地质情况而言, 还是从开挖过程中邻近既有有线对施工安全的影响来说, 五峰山隧道施工期间的安全性和稳定性都是研究的关键问题.



图 2 五峰山隧道掌子面岩层

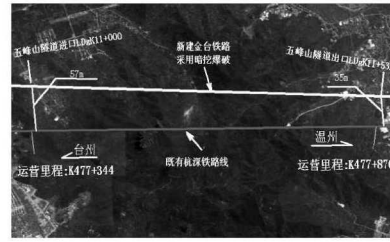


图 3 五峰山隧道与既有线对应关系

4.2 评估指标权重的计算

4.2.1 准则层下指标权重的计算

在进行施工风险分析时,邀请 4 位专家进行风险概率按 (0,1) 标度处理的打分,专家对指标进行两两比较判断,对专家评价信息运用 D 数汇总,构建 D 数偏好矩阵. 4 位专家的组成分别为设计单位 1 人,施工单位 2 人,监理单位 1 人,对环境、设计、施工、管理四个主要因素及进行打分风险打分^[10].

步骤 1 D 数矩阵的转化:

$$R_D = \begin{bmatrix} \{(0.5, 1)\} & \{(0.8, 0.8), (0.7, 0.2)\} & \{(0.7, 1)\} & \{(0.8, 1)\} \\ \{(0.2, 0.8), (0.3, 0.2)\} & \{(0.5, 1)\} & \{(0.3, 0.8)\} & \{(0.4, 0.2), (0.5, 0.8)\} \\ \{(0.3, 1)\} & \{(0.7, 0.8), (0.6, 0.2)\} & \{(0.5, 1)\} & \{(0.7, 0.8), (0.8, 0.2)\} \\ \{(0.2, 1)\} & \{(0.4, 0.2), (0.3, 0.8)\} & \{(0.3, 0.8), (0.2, 0.2)\} & \{(0.5, 1)\} \end{bmatrix}$$

$$R_C = I(R_D) = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.78 & 0.7 & 0.8 \\ 0.22 & 0.5 & 0.24 & 0.48 \\ 0.3 & 0.68 & 0.5 & 0.72 \\ 0.2 & 0.32 & 0.28 & 0.5 \end{bmatrix}$$

步骤 2 概率矩阵 R_P 的构建

$$R_P^T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.9 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0 \end{bmatrix}$$

步骤 3 指标排序

$$C_1 > C_3 > C_2 > C_4$$

步骤 4 矩阵转化

$$R_C^T = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.7 & 0.78 & 0.8 \\ 0.3 & 0.5 & 0.68 & 0.72 \\ 0.22 & 0.24 & 0.5 & 0.48 \\ 0.2 & 0.28 & 0.32 & 0.5 \end{bmatrix} \quad R_{C'}^T = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.7 & 0.78 & 0.8 \\ 0.3 & 0.5 & 0.72 & 0.72 \\ 0.22 & 0.28 & 0.5 & 0.58 \\ 0.2 & 0.28 & 0.42 & 0.5 \end{bmatrix}$$

步骤5 根据 R_C^T , 计算相应的指标权重

$$\begin{cases} \lambda(\omega_1 - \omega_3) = 0.7 - 0.5 \\ \lambda(\omega_3 - \omega_2) = 0.72 - 0.5 \\ \lambda(\omega_2 - \omega_4) = 0.58 - 0.5 \\ \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 = 1 \\ \lambda > 0 \\ \omega_i \geq 0, \forall i \in \{1, 2, 3, 4\} \end{cases}$$

专家的可信度较高, 所以取 $\lambda = 2$, 故四个指标的指标权重分别为: 环境因素 U_1 的指标权重为 0.32, 监控因素 U_2 的指标权重为 0.35, 施工因素 U_3 的指标权重为 0.22, 管理因素 U_4 的指标权重为 0.11.

4.2.2 二级准则层下权重的计算

评价指标权重见表 2.

表 2 评价指标权重系数

目标层	一级指标	权重	二级指标	权重	综合权重
隧道开挖洞身风险	环境因素	0.32	地下水影响	0.426	0.136
			邻近建筑物	0.574	0.184
	监控因素	0.35	围岩应力状态	0.553	0.194
			超前地质预报	0.373	0.131
			监控量测	0.074	0.025
			有效加固措施	0.324	0.071
	施工因素	0.22	循环进尺	0.113	0.025
			支护	0.335	0.078
			爆破振动控制	0.104	0.023
			二次衬砌	0.104	0.023
	管理因素	0.11	开挖量	0.635	0.070
			施工组织	0.254	0.028
			施工安全管理	0.111	0.012

说明: 综合权重 = 一级指标的权重 \times 二级指标的权重.

4.3 构建灰色评价矩阵

设风险评估等级共有 5 个, 分别为“很高”“高”“中等”“低”“很低”, 5 个等级对应打分 5、4、3、2、1. 邀请 4 名专家, 组成专家评判组结合实际情况, 对各个二级指标进行评估赋值, 构建相关安全风险评价矩阵. 例如, 一级风险指标 U_3 施工因素, 其评价矩阵 D_3 为:

$$D_3 = \begin{bmatrix} 3.50 & 4.00 & 2.50 & 3.00 & 4.00 \\ 3.00 & 4.00 & 2.50 & 3.50 & 4.00 \\ 4.00 & 3.00 & 3.00 & 3.00 & 3.50 \\ 4.50 & 3.50 & 2.50 & 4.00 & 4.50 \end{bmatrix}$$

由此可得 U_3 的各个白化权函数的表达为:

$$f_1(x) = \begin{cases} \frac{x}{5}, & x \in [0, 5) \\ 1, & x \in [5, +\infty) \\ 0, & x \in (-\infty, 0) \end{cases} \quad f_2(x) = \begin{cases} \frac{x}{4}, & x \in [0, 4) \\ \frac{8-x}{4}, & x \in [4, 8] \\ 0, & x \notin [0, 8] \end{cases} \quad f_3(x) = \begin{cases} \frac{x}{3}, & x \in [0, 3) \\ \frac{6-x}{3}, & x \in [3, 6] \\ 0, & x \notin [0, 6] \end{cases}$$

$$f_4(x) = \begin{cases} \frac{x}{2}, & x \in [0, 2) \\ \frac{4-x}{2}, & x \in [2, 4] \\ 0, & x \notin [0, 4] \end{cases} \quad f_5(x) = \begin{cases} 1, & x \in [0, 1) \\ 2-x, & x \in [1, 2] \\ 0, & x \notin [0, 2] \end{cases}$$

由计算可得, $n_{31}^{(1)} = 3.0$, $n_{31}^{(2)} = 3.5$, $n_{31}^{(3)} = 3.0$, $n_{31}^{(4)} = 0.75$, $n_{31}^{(5)} = 0$.

计算 U_{31} 灰色评价的相关结果为: $z_{31}^{(1)} = 0.2927$, $z_{31}^{(2)} = 0.3415$, $z_{31}^{(3)} = 0.2927$, $z_{31}^{(4)} = 0.0731$, $z_{31}^{(5)} = 0$, $Z_1 = (0.2927, 0.3415, 0.2927, 0.0731, 0)$.

同理可得 U_3 下二级指标 U_{32} 、 U_{33} 和 U_{34} 对于各个评价灰类的灰色评价权向量为:

$$Z_2 = (0.2777, 0.3472, 0.3033, 0.0718, 0) \quad Z_3 = (0.1913, 0.2392, 0.3189, 0.2506, 0)$$

$$Z_4 = (0.2494, 0.3118, 0.3233, 0.1155, 0) \quad Z_5 = (0.3243, 0.3801, 0.2703, 0.0253, 0)$$

总的计算结果如表 3 所示.

表 3 二级指标的总灰色统计数和灰色评价矩阵权向量

评估指标	总灰色统计数	灰色评价矩阵权向量
U11	10.825	(0.2494, 0.3118, 0.3233, 0.1155, 0)
U12	9.675	(0.3411, 0.4005, 0.2584, 0, 0)
U21	10.25	(0.2927, 0.3659, 0.2927, 0.0487, 0)
U22	9.4833	(0.3585, 0.3954, 0.2461, 0, 0)
U23	11.2083	(0.2230, 0.2788, 0.3420, 0.1562, 0)
U31	10.25	(0.2927, 0.3415, 0.2927, 0.0731, 0)
U32	10.442	(0.2777, 0.3472, 0.3033, 0.0718, 0)
U33	10.975	(0.1913, 0.2392, 0.3189, 0.2506, 0)
U34	10.825	(0.2494, 0.3118, 0.3233, 0.1155, 0)
U35	9.8667	(0.3243, 0.3801, 0.2703, 0.0235, 0)
U41	9.8083	(0.3164, 0.3951, 0.2888, 0, 0)
U42	10.825	(0.2494, 0.3118, 0.3233, 0.1155, 0)
U43	9.675	(0.3411, 0.4005, 0.2584, 0, 0)

由灰色评价权向量组成灰色评价矩阵 Z .

$$Z = \begin{bmatrix} 0.2494 & 0.3118 & 0.3233 & 0.1155 & 0.0000 \\ 0.3411 & 0.4005 & 0.2584 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.2927 & 0.3659 & 0.2927 & 0.0487 & 0.0000 \\ 0.3585 & 0.3954 & 0.2461 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.2230 & 0.2788 & 0.3420 & 0.1562 & 0.0000 \\ 0.2927 & 0.3415 & 0.2927 & 0.0731 & 0.0000 \\ 0.2777 & 0.3472 & 0.3033 & 0.0718 & 0.0000 \\ 0.1913 & 0.2392 & 0.3189 & 0.2506 & 0.0000 \\ 0.2494 & 0.3118 & 0.3233 & 0.1155 & 0.0000 \\ 0.3243 & 0.3801 & 0.2703 & 0.0253 & 0.0000 \\ 0.3161 & 0.3951 & 0.2888 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.2494 & 0.3118 & 0.3233 & 0.1155 & 0.0000 \\ 0.3411 & 0.4005 & 0.2584 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

由式 (24) 可得到综合评价向量 $H = W * Z = [0.2950, 0.3545, 0.2883, 0.0621, 0]$

再根据公式计算可得系统总体的信息安全风险评估值 $Risk = H * V^T = 3.8821$

4.4 结果分析

对上述施工期间的安全风险进行了评估和分析,由评估分析结果可知:

根据改进后的D数层次分析法所得到的风险因素权重计算结果如表2所示,对所得到的权重数据进行分析和排序之后可得,监控因素 U_2 所占权重最大, U_1 次之,因此在隧道施工过程中,需要加大对监控的投入。

根据所得到的综合评价向量以及安全风险评估值,比照上述评估风险等级,可以确定系统的总体风险等级为中等,这意味着风险仍然存在,施工过程中仍然需要根据评价结果进行安全隐患的排查,完善各项应急措施,始终保证隧道施工全过程中风险始终可控。

5 小结

在铁路隧道施工的过程中,上软下硬地层是一种较为复杂的地层情况,是一项有着高风险率的工作,具有较强的不确定性和模糊性,本文针对该地层中修建隧道施工安全风险进行研究,主要结论如下:

1) 依照D-AHP和灰色理论相结合的风险评估方法,借助专家评价法,构建了上软下硬复合地层情况下的隧道施工风险评估体系,克服了传统模糊偏好关系的局限性,借助D数偏好理论来扩大适用范围,改进该方法以缓解由于运用德尔菲法时专家之间的差异而导致的不确定性的缺陷,运用层次分析法计算各个指标的权重,综合分析各个风险因素之间的关系,灰色理论的应用能够有效地保留数据,避免信息的丢失,使得信息资源得到充分利用,从而提高了风险评估结果的可靠性,多种方法的结合,使得风险评估综合性高,量化风险评估结果,通过风险等级来对隧道施工的整体风险进行表示,为上软下硬复合地层的安全风险评估提供了新的思路。

2) 结合工程实例,对金台铁路的五峰山隧道进行隧道施工安全风险评估与管理,由分析结果可知,在隧道施工期间,监控因素和环境因素所占权重位居前列,对于隧道施工安全的影响更大,而在二级风险中,临近建筑物和围岩应力的影响对于上软下硬复合地层情况下的隧道施工安全影响更大,通过对风险因素的权重分析,我们应当密切关注临近建筑物和围岩应力的动向,采取相应的措施来正确地规避施工过程中可能遇到的风险并对其进行管理和控制。

3) 通过对隧道施工安全进行系统性的风险评估,建立评估体系,运用科学的方法计算评价,这些做法能够有针对性地根据风险结果与报告对一些重难点工程采取有效措施,减少施工过程中的损失,提高工程施工效率,降低施工期间的安全风险,减少风险损失等,但在本文所建立的方法中,仍然有很大一部分数据来源于专家评分以及相关经验取值,这在一定程度上增加了结果的主观性,影响了评估结果的客观性和科学性,如何主观评价与客观数据相结合,综合地来评判复合地层下的隧道施工安全风险,将是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] 苏昂等,复合地层盾构隧道管片施工病害特征及成因分析[J].岩土工程学报,2019,41(4):683-692.
- [2] 朱逢斌,杨平,林水仙.盾构隧道施工对邻近承载桩基影响研究[J].岩土力学,2010,31(12):3894-3900.
- [3] 林荣安等.基于RS-SVR的上软下硬地层盾构施工地表沉降预测[J].中国公路学报,2018,31(11):130-

137.

- [4] 张亚洲等. 上软下硬复合地层盾构隧道设计施工难点及对策研究隧道建设 (中英文) [J]. 2019, 39(4): 669-676.
- [5] 吴波等. 基于 PRA 方法的上软下硬地层隧道施工风险评估研究 [J]. 自然灾害学报, 2018, 27(4): 26-33.
- [6] 许硕, 唐作其, 王鑫. 基于 D-AHP 与灰色理论的信息安全风险评估 [J]. 计算机工程, 2019, 45(7): 194-202.
- [7] 许硕, 唐作其, 王鑫. 基于 D-AHP 与 TOPSIS 的突发事件应急管理评估 [J]. 计算机工程, 2019, 45(10): 314-320.
- [8] 林锦腾. 基于灰色模糊层次分析理论的斜拉桥施工风险评估 [J]. 城市道桥与防洪, 2019(8): 178-182+23.
- [9] 彭道刚等. 基于 D-AHP 和 TOPSIS 的火电厂控制系统信息安全风险评估. 控制与决策 [J], 2019, 34(11): 2445-2451.
- [10] 刘培德, 滕飞. 基于 D-AHP 的围填海对海洋资源影响评价 [J]. 广东海洋大学学报, 2017, 37(02):1-10.

Research on Safety Risk Assessment of Tunnel Construction in Complex Stratum Based on D-AHP Principle

WU Bo, LIU Pin-ting, MENG Guo-wang, HUANG Wei

(College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of the Ministry of Education, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to evaluate and analyze the tunnel construction risk of upper soft and lower hard stratum, a comprehensive risk assessment index system was established by using the WBS-RBS method, and the weight of the evaluation index was calculated by the D-AHP method. Grey evaluation matrix is solved by grey theory. On the basis of the combination of the two methods, the tunnel construction in the upper soft and lower hard composite stratum is comprehensively evaluated, and the result of risk assessment is presented intuitively. Through example analysis, the use of D combining AHP method and grey theory of risk assessment method can effectively solve the problem of uncertainty evaluation information and the evaluation process the gray feature of the information resources, the calculation method is simple, quantitative risk assessment results, on the risk assessment of compound formation tunnel construction has a reference value.

Keywords: Grey theory; D-Number analytic hierarchy process; Tunnel construction; Risk assessment; Soft upper and hard lower strata