

基于AHP-CM的地铁隧道突水风险评估

张啸雨, 张伟国, 张拥军, 胥正总, 冯志昊

(青岛理工大学, 山东 青岛 266520)

摘要: 隧道施工过程中常会发生突水灾害,对隧道开挖安全造成巨大威胁。以青岛地铁某区间隧道为工程背景,通过对评级层建立云模型,实现风险隶属度动态映射,形成了一种盾构隧洞突水灾害危险性等级评价新方法。筛选关键评价指标并对各致灾因子进行定量表征,使用层次分析法构建指标间的判断矩阵,通过对评级层建立云模型,使综合评价等级的隶属度更加客观。研究结果表明,青岛地铁隧道突水风险评估结果验证了盾构隧洞突水灾害危险性等级指标及评价方法的可靠性。对类似隧道工程施工有效预防突水灾害发生提供了新思路与新建议。

关键词: 层次分析法;风险评估;突涌水;盾构隧道;云模型

中图分类号: U455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)07-0424-05

Assessment of Water Inrush Risk in Subway Tunnels Based on AHP-CM

ZHANG Xiaoyu, ZHANG Weiguo, ZHANG Yongjun, XU Zhengzong, FENG Zhihao

(Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: During the tunnel construction, the water inrush disasters often occur, posing a huge threat to the safety of tunnel excavation. Taking a tunnel section of Qingdao Metro as the engineering background, a new method for evaluating the risk level of water inrush disasters in shield tunnels has been developed by establishing a cloud model for the rating layer and dynamically mapping the risk membership degree. Key evaluation indicators are screened, and various hazard-causing factors are quantitatively characterized. The Analytic Hierarchy Process (AHP) is used to construct a judgment matrix among indicators. By establishing a cloud model for the rating layers, the membership degree of the comprehensive evaluation grade is made more objective. The research results indicate that the risk assessment of water inrush in Qingdao subway tunnels has verified the reliability of the risk level indicators and evaluation methods for shield tunnel water inrush disasters, which provides new ideas and suggestions for effectively preventing water inrush disasters in tunnel construction projects.

Keywords: Analytic Hierarchy Process; risk assessment; sudden water influx; shield tunnel; cloud model

0 引言

在经济发展与社会进步齐头并进的背景下,我国的地铁隧道建设也得到了长足发展。然而,在修建地铁隧道工程时,在构造破碎带、富水地层等复杂地质构造与动态水文环境的综合作用下,突涌水灾害已演化为地铁隧道典型工程风险,造成工期受阻、成本损耗乃至人员伤亡的不良后果。地铁隧道突水灾害不仅对施工稳定性构成直接威胁,更会触发链

式效应:一方面导致水土流失加剧,另一方面诱发地表形变沉降等地质环境灾害,形成施工安全与生态环境的双重风险。因此,科学预测突水风险、保障施工安全对当今隧道工程具有重要意义。

国内外研究团队已从多角度开展了对隧道突涌水风险评估的研究。魏晓悦等^[1]基于PCA-改进的RBF神经网络模型,建立铁路隧道风险评估新方法;袁青等^[2]运用人工神经网络技术,构建了隧道断层带突涌水风险评价模型;包其刚等^[3]将综合运用正态云模型与突变理论,在层次分析-熵权法基础上,构建了更为优化的风险评价体系;李慧等^[4]通过变权重-云模型的建立了基于正态云模型的隧道突水风险评价方法;王青松等^[5]通过Delphi法(专家调查法)构建评价框架,并整合模糊层次分析法(FAHP)与模糊数学理论,对隧道突水高风险区段进行风险

收稿日期: 2025-12-30

基金项目: 贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2025]一般071)

作者简介: 张啸雨(2000—),男,硕士,从事岩土工程研究工作。

通信作者: 张拥军(1974—),男,博士,教授,从事岩土工程研究工作。电子信箱: zyjun@qut.edu.cn

评估;刘建坡等^[6]基于决策树方法,构建了透水发生风险评估模型。

在隧道突水风险评估中,现有研究多侧重于单一模糊性的刻画,缺乏对主观判断模糊性与客观数据随机性双重不确定性的有效整合方法。本研究从隧道突涌水灾害成因出发,筛选评价指标并对各致灾因子进行定量表征,建立了适用于盾构隧道的突涌水风险分级评价体系。通过结合模糊层次分析法与云模型,提出了一种用于评估盾构隧道突涌水危险等级的新方法,为弥补这一短板提供了参考思路。

1 隧道突水风险评估指标体系建立

当前隧道突涌水风险评价体系的典型评价模型多基于工程地质特征、水文地质条件、隧道结构参数及施工工艺等要素构建。整合现行隧道工程技术标准与文献资料,揭示突涌水风险关系主要受控于围岩特征、水文条件及施工因素三重复合作用。选取这三个主要因素以及 10 个从属因素作为一级指标及二级指标,建立隧道突涌水风险评价指标体系(见图 1)。

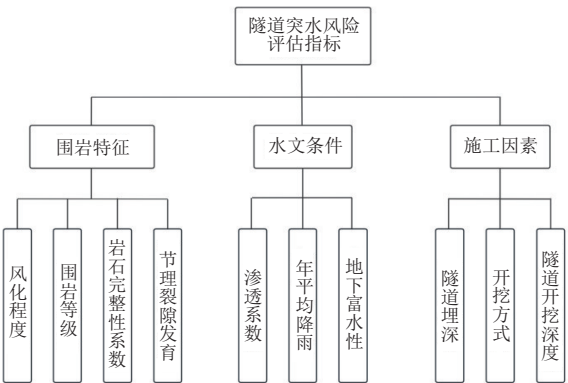


图 1 隧道突水风险评估指标体系

1.1 围岩特征

风化程度决定了岩体强度的劣化水平,风化越强烈,岩体的承载能力和自稳性越差,越易在开挖和地下水作用下失稳。围岩等级是对岩体质量和稳定性的综合分级,等级越低,意味着整体稳定性越差,发生变形与突水的风险越高。岩石完整性系数与岩体破碎程度负相关,系数越小,岩体裂隙越发育、地下水的储存与运移空间越充足,突水发生的可能性显著增加。节理裂隙发育情况直接控制着岩体的渗透性和各向异性,发育密集的节理网络会显著增强围岩的透水性,形成潜在的突水优势通道。

1.2 水文条件

渗透系数反映了岩土体允许水流通过的能力,其数值越大,流体通过岩石裂隙的难度越小,地下水

渗透能力越强,一旦隧道与含水层连通,突水时的涌水速度和规模也会相应增大。平均降雨量直接影响地下水补给量,降雨量越大,地下水补给越充足,地下水位易随之上升,围岩所受水压力增加,为突水灾害提供物质基础和动力条件。地下富水性反映含水层的地下水储存能力,富水性越强,地下水储量越丰富,若隧道开挖过程中揭露该含水层,突水爆发后的涌水持续时间和危害程度将显著提升。

1.3 施工因素

隧道埋深与地应力场密切相关,埋深增大通常导致初始地应力增高,开挖卸荷引起的稳定性下降更为显著,可能破坏隔水层或激活原有导水构造。开挖方式(如全断面法、台阶法)的选择影响着对围岩的扰动范围和强度,不当的开挖方式会过度破坏围岩的原有结构,降低其自承和隔水能力。开挖深度影响地下水位与隧道的相对位置关系,深度增加可能使隧道更接近承压水层,突水瞬间涌水压力及涌水量增大。

通过查阅《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016)等相关文献资料,基于对隧道突水风险评估领域文献的系统梳理,结合行业规范与工程实践需求,将已选择的指标划分安全等级,将指标所处状态通过定量分析划为 5 个区间:低度风险(Ⅰ级)、较低风险(Ⅱ级)、中度风险(Ⅲ级)、较高风险(Ⅳ级)、极高风险(Ⅴ级),见表 1。

2 研究方法

2.1 层次分析法

2.1.1 构建层级体系

结合青岛地铁突水风险评估的具体目标,首先构建包含目标层、准则层与指标层的层次结构体系。目标层为突水风险评估本身,准则层确立为围岩特征、水文条件及施工设计因素三大致灾因子,其下细分的具体二级指标则构成指标层。

2.1.2 构建判断矩阵

邀请专家从隧道突水涌泥风险分级体系的 3 个一级指标和 10 个二级指标方面综合打分评级,以准则层一级指标为核心,通过对各指标的相对重要性进行两两对比判定,据此构建对应的判断矩阵。判断矩阵形式需满足式(1)。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & a_{jk} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{jk}} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

表1 隧道突水风险评价等级

一级指标	二级指标	安全等级				
		I	II	III	IV	V
围岩特征(A ₁)	风化程度(a ₁₁)	未风化	微风化	中等风化	强风化	全风化
	围岩等级(a ₁₂)	I/II	III	IV	V	VI
	岩石完整性系数(a ₁₃)	>0.75	0.75~0.55	0.55~0.35	0.35~0.15	<0.15
	节理裂隙发育(a ₁₄)	不发育	弱发育	中等发育	较发育	强发育
水文条件(A ₂)	渗透系数(a ₂₁)/(m·d ⁻¹)	<0.01	0.01~1	1~5	5~10	>10
	年平均降雨(a ₂₂)/mm	<200	200~400	400~800	800~1200	>1200
	地下富水性(a ₂₃)	不含水	贫水	较富水	富水	极富水
施工设计因素(A ₃)	隧道埋深(a ₃₁)/m	100~200	200~300	300~400	400~500	>500或<100
	开挖方式(a ₃₂)	双侧壁导坑	CRD或CD	环形开挖留核心土法	台阶法	全断面开挖
	隧道开挖深度(a ₃₃)/m	<8.5	8.5~12	12~14	14~16	>16

式中: a_{jk} 需依据专家咨询意见结合自身知识、经验和判断进行确定, j,k 为不同因素的因素代号。

2.1.3 一致性检验

判断矩阵的单层次排序结果是否具备有效性,需通过一致性检验予以验证。一致性检验公式如下:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

(2)

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

(3)

式中: $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征根。一致性指标CI可对判断矩阵偏离完全一致性的程度进行定量表征,一致性比率CR用于判断构建的判断矩阵逻辑是否可靠,随机一致性指标RI为固定参考值,可以通过查表得到,见表2。

表2 随机一致性指标

判断矩阵阶数 n	1	2	3	4	5
RI	0	0	0.58	0.90	1.12

通常情况,若CR值低于0.1,可判定矩阵通过一致性检验且权重分配合理;反之则需重新调整判断矩阵,直至满足一致性检验要求。

2.2 云模型方法

云模型借助期望值 E_x 、熵值 E_n 与超熵值 H_e 三个数字特征,实现对自然语言基元——语言值数学属性的表征。

其中, E_x 对应云滴在论域空间的分布期望,是定性概念的核心表征点; E_n 承担着衡量定性概念不确定性程度的功能; H_e 由熵的随机性与模糊性共同作用形成,可进一步表征熵自身的不确定属性。

$$E_x = \frac{C_{\max} + C_{\min}}{2}$$

(4)

$$E_n = \frac{E_x - C_{\min}}{\sqrt{\ln(8)}}$$

(5)

$$H_e = k$$

(6)

式中: $C_{\max}$ 与 $C_{\min}$ 分别为区间边界值,离散度调节系数 k 为常数,表示熵和超熵的线性关系,本文取0.01。

2.3 云模型优化层次分析法

通过云模型优化层次分析法的步骤:步骤一:基于AHP确定评价指标权重并评分;步骤二:构建风险评级标准云模型,将隧道突水风险划分为若干等级,并为每个等级划定明确的定量论域区间;利用逆向云发生器,将每个风险等级的数值区间转化为以数字特征表示的标准云模型;步骤三:将步骤一所得到的评分作为确定度。根据最大确定度原则,选择综合确定度最大的等级作为该隧道段的最终风险评级结果。

将李德毅院士^[9]提出的云模型与层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)相结合,构建的融合评价模型具有鲜明优势:其一,依托层次分析法的层级化分析,可清晰科学确定各影响指标的相对权重,充分吸纳专家经验与工程实践认知;其二,通过云模型“期望-熵-超熵”的三维特征,实现定性语言评价与定量数值的自然转换,同步表征风险因素的模糊性与随机性,弥补传统风险评估对双重不确定性刻画不足的局限;其三,有效降低单一主观赋权导致的偏差,使权重确定与风险等级判定既贴合工程实际,又具备量化支撑,提升评估结果的客观性与稳健性。

3 工程实例应用

3.1 工程背景

青岛地铁15号线南万站—四方厂站区间,坐落于棘洪滩街道南万站与四方厂站的连接区段。线路自南万站驶出后,沿中车大道呈西向延伸态势,在下穿洪江河后调整走向为西偏北,随后继续沿该道路朝西北方向布设,终点接入四方厂站。该区间隧道

拱顶埋深介于 8.7 ~ 22.0 m,线路水平净距处于 13 ~ 14.2 m。工程洞身穿越的地层主要为中风化砂质泥岩,以及中至微风化安山岩,围岩等级评定为Ⅲ2级至Ⅵ级。

本区间隧道主体结构沿锦宏西路下穿洪江河。洪江河桥及线路邻近河段的地表水与地下水存在紧密水力联系。区间场地水文地质单元分区主要分布于基岩裂隙水与河流阶地松散岩类孔隙水区域。该段地下水以第四系孔隙潜水-微承压水为主,辅以基岩裂隙水;该区间起点至终点段归为剥蚀残丘向剥蚀堆积缓坡过渡的地貌单元,地下水类型以基岩裂隙水为主。受复杂地质构造影响,施工期间可能面临突水风险隐患,故针对该区域开展隧道突涌水专项风险评估具有关键性实践意义。

3.2 风险分析

以青岛地铁 15 号线南万段为工程案例,系统应用新建评价方法开展突涌水风险分析。

3.2.1 各层次影响因素判断矩阵及影响权重

通过邀请专家综合评分的方式,建立了各层级影响因子的判断矩阵,进而求解得到相应的权向量见表 3,实现了风险因素的系统量化评估。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 6 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/6 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$
$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1/6 & 1/6 & 1/4 \\ 6 & 1 & 1 & 3 \\ 6 & 1 & 1 & 3 \\ 4 & 1/3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$
$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 5 \\ 1/2 & 1 & 4 \\ 1/5 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}$$
$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

表 3 各级风险评价指标的权向量

权向量	权向量取值	$\lambda_{\max}$	CR
$W(A)$	(0.654 81, 0.249 86, 0.095 338)	3.018 3	0.015 771
$W(A_1)$	(0.055 733, 0.392 92, 0.392 92, 0.158 420)	4.060 6	0.022 462
$W(A_2)$	(0.569 40, 0.333 07, 0.097 39)	3.024 6	0.021 203
$W(A_3)$	(0.636 99, 0.258 28, 0.104 73)	3.038 5	0.033 199

经一致性检验,该判断矩阵的一致性比率 CR 显著低于 0.1,满足模糊层次分析法-云模型耦合分析的精度要求。

3.2.2 评分值的计算

根据水文地质勘察数据,对 10 个风险指标进行致灾强度量化赋分:首先依据《工程岩体分级标准》确定各一级指标权重值,再通过加权求和法计算突涌水风险综合评价值。

一级指标分值计算公式如下:

$$I_i = \sum_{j=1}^4 \omega_{ij} I_{ij}$$

(7)

式中: I_i 为第*i*种一级指标的分值; I_{ij} 为第*i*种一级指标下第*j*种二级指标的分值; ω_{ij} 为二级指标分值对应的权向量。

危险性总评分的计算公式如下:

$$T = \sum_{i=1}^3 \omega_i I_i$$

(8)

式中: ω_i 为一级指标分值对应的权向量。

3.2.3 云模型确定突涌水危险等级

基于对青岛地铁隧道勘察资料、监测报告,以及突水特点和施工规范的整合分析,突涌水灾害危险性评级层的区间划分设定为:极高风险(Ⅴ级: $T > 85$)、较高风险(Ⅳ级: $85 \geq T > 65$)、中度风险(Ⅲ级: $65 \geq T > 45$)、较低风险(Ⅱ级: $45 \geq T > 25$)、低度风险(Ⅰ级: $T \leq 25$)5个等级。

通过式(3)、式(4)计算各风险等级特征值参数见表 4,基于正向云发生器生成风险隶属度云模型,实现风险状态的模糊概率映射。依托各评级层的数字特征,通过正向云发生器得到的标准云模型见图 2。

表 4 目标层云模型的特征值

危险性分级	$E_x = \frac{C_{\max} + C_{\min}}{2}$	$E_n = \frac{E_x - C_{\min}}{\sqrt{\ln(8)}}$	$H_e = k$
极高风险	85	6.935	0.01
较高风险	75	6.935	0.01
中度风险	55	6.935	0.01
较低风险	35	6.935	0.01
低度风险	12.5	8.668	0.01

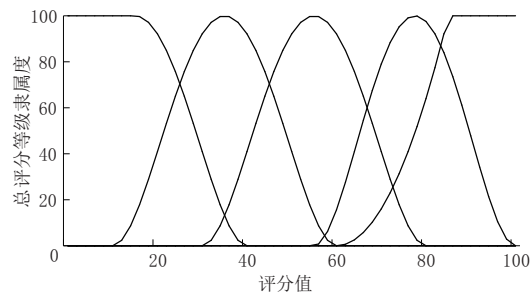


图 2 突涌水危险性等级评级层云模型

3.3 突涌水灾害程度预测

3.3.1 计算一级指标

根据青岛地铁 15 号线《南万站—四方厂站区间

盾构始发、掘进、到达专项施工方案》获得各指标数据,基于表1对各二级指标量化打分(例:通过对上覆地层渗透系数进行加权分析,可计算得渗透系数为2.007 8。故从表1查得分值为45分),利用式(7)计算各一级指标相应分值。

$$I_1 = \sum_{j=1}^4 w_{1j} I_{1j} = 39.94 \text{ 分。}$$

$$I_2 = \sum_{j=1}^3 w_{2j} I_{2j} = 48.58 \text{ 分。}$$

$$I_3 = \sum_{j=1}^3 w_{3j} I_{3j} = 70.13 \text{ 分。}$$

3.3.2 危险性总评分

依据式(8)完成危险性总评分计算,获得 $T=44.97$ 分的总评分结果。

3.3.3 等级判定阶段

基于上述计算结果,对照图2所示分级标准,确定该段危险性等级处于Ⅱ~Ⅲ级区间。

3.3.4 突涌水灾害程度预测

基于危险性等级Ⅲ级的判定结果,预测该段突涌水危险性等级为中度风险级,可能影响隧道施工。

4 结 语

(1)本研究构建的隧洞突涌水灾害风险评估体系,适用于盾构隧洞工程场景。其方法创新主要体现在:引入云模型算法,将传统危险性等级划分拓展为基于概率分布的模糊评价云图;开发标准化评估流程,提升工程实践的决策效能。为解决这一工程问题提供了参考思路,对提升风险评估结果可靠性具有一定研究意义。

(2)整理汇总各层次影响因素判断矩阵,计算得到各准则层影响因素的权重依次为0.654 81、0.249 86、0.095 338。表明围岩特征是本工程中可能导致隧道发生突水灾害的主要风险因素。

(3)以青岛地铁15号线为例,开展盾构隧道突涌水风险工程应用。并对青岛地铁15号线南万区间进行了突涌水危险性等级评价。经评价,该段突

涌水危险性等级为中度风险级,可能影响隧道施工。

参考文献:

- [1] 魏晓悦,靳春玲,贡力,等.基于PCA-改进RBF神经网络模型的铁路隧道突水风险评价[J].铁道科学与工程学报,2021,18(3):794-802.
- [2] 袁青,于锦,熊齐欢,等.基于人工神经网络的隧道断层带突涌水风险评估[J].人民长江,2023,54(1):140-144.
- [3] 包其刚,许家伟,张健伟.基于正态云模型-突变理论的富水岩溶隧道突涌水风险评价实验[J].实验技术与管理,2025,42(1):114-122.
- [4] 李慧,魏兴萍,刘程,等.基于变权重-云模型的岩溶隧道涌突水灾害风险评估——以中梁山隧道为例[J].中国岩溶,2023,42(3):548-557;572.
- [5] 王青松,刘凯.基于Delphi法和模糊层次分析法的隧道突水风险评价[J].铁道建筑技术,2023(2):174-178.
- [6] 刘建坡,徐孝男,武峰,等.基于决策树的地下工程透水事故发生风险定量评估[J].金属矿山,2023(2):217-224.
- [7] 侯东赛,张霄,王磊.基于综合赋权-TOPSIS法隧道突涌水风险评价及应用[J].隧道建设,2017,37(6):691-699.
- [8] 王飞,刘桂卫,陈则连,等.基于GIS及AHP-熵权法的长大深埋隧道富水评价[J].铁道工程学报,2021,38(10):66-72.
- [9] 付斌,李道国,王慕快.云模型研究的回顾与展望[J].计算机应用研究,2011,28(2):420-426.
- [10] 许增光,王亚萍,肖瑜,等.长深隧洞突涌水危险性等级指标及评价方法[J].中国公路学报,2018,31(10):91-100.
- [11] 许振浩,李术才,李利平,等.基于层次分析法的岩溶隧道突水突泥风险评估[J].岩土力学,2011,32(6):1757-1766.
- [12] 李利平,李术才,陈军,等.基于岩溶突涌水风险评价的隧道施工许可机制及其应用研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(7):1345-1355.
- [13] 李术才,周宗青,李利平,等.岩溶隧道突水风险评价理论与方法及工程应用[J].岩石力学与工程学报,2013,32(9):1858-1867.
- [14] 刘桂卫,王飞,孙琪皓,等.基于GIS的岩溶隧道富水程度评价技术研究[J].铁道工程学报,2023,40(10):93-98.
- [15] 张鑫,靳春玲,贡力,等.基于PSO-RBF神经网络模型的铁路隧道突水危险性评价[J].铁道标准设计,2022,66(10):143-148.
- [16] 沈桢洛,周伦顺,董家兴.基于层次分析法的隧道突水灾害风险评价指标体系[J].中国水运,2024(11):150-152.
- [17] 吕桂军.基于层次分析法(AHP)的岩溶隧道突水风险评估研究[J].中国水运,2024(7):145-147.
- [18] 王升,韦芹,李利平.隧道突水突泥灾变机理研究现状及发展趋势[J].现代隧道技术,2025,62(4):15-25.