

基于属性识别理论的隧道突涌水危险性评价

陈仲达¹, 齐国庆², 刘剑锋², 陈航博¹

(1. 中交第三航务工程局有限公司, 上海 200032;

2. 重庆交通大学 水工建筑物健康诊断技术重庆市高校工程研究中心, 重庆 400074)

摘要: 岩溶突水是隧道建设面临的主要地质灾害问题,在西南地区尤为严重,为确保隧道修建顺利,实现对其的专项突涌水危险性评估,依托西南地区某隧道工程实际,结合突涌水致灾因素的统计分析成果,根据该隧道工程的水文地质情况,以围岩分级、岩石可溶性、地质构造、地形地貌等参数作为一级评价指标及其相关表征参数作为二级指标,并采用层次分析法确定对应指标的权重,建立了基于属性识别理论的隧道突涌水危险性评价模型,通过进行单指标属性测度分析、多指标属性测度分析和属性识别,实现了对该隧道突涌水的危险性评估。评估结果可为后续设计排水及施工进度安排提供理论支持。

关键词: 隧道;突涌水;危险性评估;属性识别

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2023)02—0101—07

Hazard Analysis of Tunnel Water Inrush Based on Attribute Recognition Theory

CHEN Zhongda¹, QI Guoqing², LIU Jianfeng², CHEN Hangbo¹

(1. CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2. Engineering Research Center of Health Diagnostic Technology for Hydraulic Structures, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Karst water inrush is the main geological disaster problem faced by tunnel construction, especially in the southwest region. In order to ensure the smooth construction of the tunnel, a special risk assessment of water inrush has been carried out. Based on the engineering background of the tunnel, this work statistically analyzed the hydrogeological condition of the tunnel and the disaster factors caused by water inrush in Southwest China. Parameters such as surrounding rock classification, rock properties, stratigraphic structure and geomorphology were taken as the primary evaluation indexes and related characterization parameters were taken as the secondary indexes, and the weight of indexes was determined by analytic hierarchy process. In this paper, through single index attribute measure analysis, multi-index attribute measure analysis and attribute recognition, the identification model of water inrush danger attribute of the tunnel based on attribute identification theory is established. The model has completed the risk assessment of water inrush in the tunnel. This risk assessment results can provide theoretical support for subsequent drainage design and construction schedule arrangement.

Keywords: tunnel; water inrush; hazard assessment; attribute identification

随着我国西南地区经济的进一步发展,对交通发展的要求日益提高。而我国西南是属于多山地

区,且岩溶发育分布较广,岩溶突水已成为该地区隧道施工中遇到的主要地质灾害之一。一旦发生将出

现不同程度的危害,成为制约交通发展的一个重要因素。

针对隧道工程突涌水的预测和评估问题,学界开展了大量的研究,如周宗青等^[1]以具体的工程为例,综合单、多项属性测度分析及属性识别方法,对工程隧道突涌水的安全进行了有效评估;杜毓超等^[2]基于专家评价法的基础上,利用层次分析法对主要的影响因素进行量化或半定量集成,用于判断不同水文地质构造下隧道突水的危险性;杨艳娜^[3]通过收集大量涌突水事故资料,利用统计方法从量上讨论了评估因子与涌突水概率的相关性,并找到了两者的一般联系方程;刘玮^[4]在进行隧道突水安全估计时,结合了新型神经网络方法进行分析,但需要手动调节 BP 神经网络的参数,较同类神经网络也需要更多迭代。李利平等^[5]通过统计分析突水事故发生概率与影响指标和发生次数之间的隶属函数,建立了岩溶隧道涌突水危险模糊评价模型,并且在施工过程中进行动态评价并进行动态修正,为后续施工提供有效的理论支持。李术才等^[6]在优化超前预报的基础上提出了隧道地质灾害的四色预警系统,并采用不同组合探测方法探测不同类型水文地质结构,极大提高了准确率与可靠性;吴毅江等^[7]为评估边坡安全性,选择了七个潜在影响因子作为权重评估项,先后应用属性测度函数以及灰色关联法对工程边坡进行安全性的评估。秦胜伍等^[8]综合了最大熵和属性区间识别两种方法,对山岭的隧道塌方进行了风险性讨论。上述研究证明属性识别方法能有效针对隧道的突涌水发生进行危险性评估,但在西南区域内隧道的应用案例还较少。

鉴于此,本文结合西南地区某在建隧道工程,开展基于属性识别理论的隧道突涌水危险性评价。该隧道穿过区域为向斜核心部分,聚水作用更强,应力集中区域因地质构造力而生成,向斜核心部分的地层中的应力集中区域缝隙也将更加发育,缝隙相互连通而形成岩溶水的流动通道,因此极易发生岩溶涌水事故,提前进行隧道的突涌水危险评估,可以为隧道施工管理与决策提供相应的理论支持。

1 评价体系的生成

1.1 评价指标的确定

隧道区域的工程地质以及控制岩溶逐步发展的主要因子可作为该隧道突涌水发生的危险评估指标。参考殷颖等^[9]提到的相关西南地区隧道岩溶突涌水的实际例子,总结了统计意义下的诸多影响

隧道岩溶突涌结果的控制因子各占比情况,如表 1 所示。

该隧道整个路段蕴含丰富的岩溶水,路段中含有可溶性碳酸盐占到总程的 90% 多。另外,隧道中检测到有长达 40 m 左右的断层带,同时该处理深较大。参考相关地质地形条件,该隧道可进一步划分为如图 1 中逐级分层的评价指标体系。

表 1 岩溶发展的控制因子比例	
控制因子	比例(单位为 1)
地下水聚集量大小	0.62
破碎带	0.64
地质构造	0.73
地表集水性	0.81
表层岩石可溶性	0.99

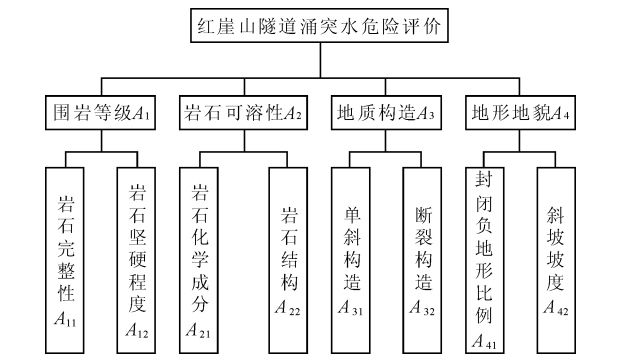


图 1 评估指标体系

1.2 评估指标的量化取值与风险分级

结合隧道所处的水文地质条件,确定诱发岩溶涌突水灾害主要因素,进而选择评估指标。为准确描述隧道涌突水风险级别,将选择的评估指标以定性/定量的形式做更精细的划分,结合王亚萍^[10]的方法,具体划分情况如表 2 所示。

表 2 含可溶性岩的隧道突涌水风险分级		
风险级别	灾害情况(风险程度 1—5 表示从低到特别重大)	最大集中涌水量 / (10 ⁴ m ³ · d ⁻¹)
V	1	[0, 0.01)
IV	2	[0.01, 0.1)
III	3	[0.1, 1)
II	4	[1, 5)
I	5	[5, +∞)

(1) 围岩分级与取值。岩石与水不断相互发生作用,可造成岩溶突水突泥的现象。生成过程中,围岩的力学参数也是重要的制约因子。介于围岩整体性不足,且一般承载能力较低,岩体受到扰动后,内

部裂隙容易发展并贯穿,岩溶突水突泥程度增大。所以围岩等级的二级评估指标可选定岩体的完整性指标以及坚硬度指标,具体分级如表 3、表 4^[11]。岩石完整性与岩石坚硬度取值根据隧道各段地勘报告中对围岩完整性描述与围岩钻探结果进行确定,属于定性与半定量取值。

表 3 A₁₁ 岩石完整性评价

等级	破碎程度	结构面发育程度		主要结构面		完整性评价
		组数	平均间距/m	结合等级	结构性质	
V	1	1 或 2	(1.0, +∞)	A/B	节理、裂隙、层面	(0, 0.2]
IV	2	1 或 2	(1.0, +∞)	C	节理、裂隙、层面	(0.2, 0.4]
		2 或 3	(0.4, 1.0]	A/B		
III	3	2 或 3	(0.4, 1.0]	C	节理、裂隙、层面、小断层	(0.4, 0.6]
		3 以上	(0.2, 0.4]	B/A		
II	4	3 以上	(0.2, 0.4]	C	各种类型	(0.6, 0.8]
			(0, 0.2]	B/C		
I	5	—	不规则	—	散体状	(0.8, 1)

注:破碎程度中 1、2、3、4、5 分别表示完整到极破碎;结合等级中 A、B、C 分别表示结合程度好、一般、差。

表 4 A₁₂ 岩石坚硬度评价

等级	名称	定性判定			坚硬等级评价
		敲击声	回弹程度	可碎情况	
V	坚硬岩	清脆	有且反震于手	无吸水反应	(0, 0.2]
IV	较硬岩	较清脆	轻度	稍难,有轻微吸水反应	(0.2, 0.4]
III	较软岩	不清脆	否	较易	(0.4, 0.6]
II	软岩	哑	否	易	(0.6, 0.8]
I	极软岩	哑	否	徒手能碎	(0.8, 1)

(2) 岩石可溶性分级与取值。河流向下侵蚀所到达的极限即最低侵蚀基面决定着岩溶水的活动范围。因该隧道所在位置与该范围距离不大,隧道在相当范围内受到了岩溶突涌水的作用,故前者的水系统主要受后者的控制。在本文中将岩石的可溶性将从岩石可溶性和岩石结构的角度来进行分析,如表 5。地层岩石中的可溶性化学成分和结构化差异引起的分异可以说是控制岩溶发育的基础。依托工程沿线可溶性碳酸盐岩地表分布占比高达 92.3%,岩石可溶性指标可以使用岩石中碳酸钙含量百分数来刻画^[12]。为岩石半定量及定名的方法可用于解决缺乏 CaCO₃ 含量数据的问题^[13]。通过地勘报告中查询不同隧道段穿越过的围岩确定围岩名称,查询该类岩石的碳酸钙含量百分数用以确定。

表 5 A₂ 岩石可溶性评价

等级	岩石化学成分 A ₂₁		岩石结构 A ₂₂	
	定性	定量	岩石结构类型	评分
	岩石定名	CaCO ₃ 质量比		
V	泥质白云岩	(0, 0.05]	粗晶	(0, 0.2)
IV	泥质灰岩、泥质灰云岩	(0.05, 0.25]	亮晶	[0.2, 0.4)
III	灰质白云岩、白云岩	(0.25, 0.50]	粒屑	[0.4, 0.6)
II	白云质灰岩、泥质云灰岩	(0.50, 0.75]	泥晶	[0.6, 0.8)
I	灰岩	(0.75, 1)	生物碎屑	[0.8, 1)

岩石结构控制岩石中原始裂隙及孔隙度,是岩溶发育最开始的通道。岩石的结构对岩石的可溶性影响过程比较复杂。根据地勘报告中对不同隧道段围岩结构面描述对其进行定性取值。

(3) 地理地质断层构造等级分级与取值。地理地质断层构造是岩溶发展的主要控制因素,岩溶能发展到的程度以及发展的朝向受其控制^[14]。共有三条预想破碎带及一条断层带位于该隧道所处地段。断层的存在意味着该处地质地层结构不致密且含有较多裂隙,因此常作为岩溶水渗透路径的廊道和溶洞多被发现于断层较多处。断层宽度通过隧道的剖面图量取断层宽度确定,该指标为定量指标。

岩层的导水性能由岩层倾角确定。但其导水方向并非是单一方向,而是各向异性,且渗透系数在平行于岩层方向时远大于垂直方向,根据量测数据发现岩溶发展最快的方向是岩层倾角为 25°~65°左右,具体数值有待进一步确认^[14]。结合该隧道的地理地质资料获取情况,及其所处范围内的地理地质状况,选择单斜构造和断层两个因子作为地理地质断层构造分级的二级评估值,如表 6 所示。岩层倾角可通过量取隧道剖面图中隧道所穿越的岩层与水平面的夹角确定,属于定量指标。

(4) 地形地貌分级与取值。地面等高线坡比及地面集水大小控制着隧道突涌水变化情况,因此地面水下沉到地面以下形成地下水的量可由一定范围内岩溶洼地与总范围的面积比表示,两者具体关系为正比关系。通过对隧址区地形图确定分水岭并进行分区,确定集水高程,量取隧道穿越不同分区时所占的负地形比例,该指标为定量指标。

地形坡度对涌水灾害一般呈负相关^[12],危险等级划分如表 7 所示,通过对隧道剖面图进行分析,作不同隧道段所对应垂直方向坡面的切线,取其平均值,该指标为定量指标。

表 6 A₃ 地质构造评价

等级 划分	断层宽 度/m	岩层倾角/(°)		倾角修正 公式
		岩层原倾角	修正后	
V	(0, 0.5]	(35, 45] (45, 55]	[35, 45)	$\varphi' = \varphi$ $\varphi' = 35 + (55 - \varphi)$
IV	(0.5, 1]	(25, 35] (55, 65]	[25, 35)	$\varphi' = \varphi$ $\varphi' = 25 + (65 - \varphi)$
Ⅲ	(1, 5]	(10, 25] (65, 85]	[10, 20)	$\varphi' = \varphi$ $\varphi' = 10 + (80 - \varphi)$
II	(5, 10]	(80, 90]	[5, 10)	$\varphi' = (90 - \varphi)/2 + 5$
I	(10, +∞)	[0, 10)	[0, 5)	$\varphi' = \varphi/2$

表 7 A₄ 地形地貌等级评价

等级	地表负地形比例 A ₄₁	斜坡坡度 A ₄₂ 余角/(°)
V	(0, 0.1]	[45, +∞)
IV	(0.1, 0.25]	[30, 45)
Ⅲ	(0.25, 0.5]	[20, 30)
II	(0.5, 0.7]	[10, 20)
I	(0.7, 1)	[0, 10)

1.3 评估指标权重确定

权重表示为各评估因子对整个评估系统所作贡献之间的比例关系,现需要对各指标相对权重依次估测。本文为确定指标权重,结合层次分析法,但该方法偏向经验性,评判等级空间难重合,解决方法是应用粒子群算法优化^[15],计算结果如表8—表10所示。代入评估指标得到判断矩阵,求出该矩阵的特征向量,且归一化最后可算出需要的评估指标权重。其中求特征向量采用方根法:先求出目标矩阵A各行

乘积 $M_i = \prod_j^m a_{ij}(i,j = 1,2,\cdots,m)$,计算 M_i 的 m 次根 $\overline{M}_i = \sqrt[m]{M_i}$,并进行归一处理,最后即可得到需要的权重矩阵向量 $M = [M_1, M_2, \cdots, M_m]^T$ 。其中, M_i $= \frac{\overline{M}_i}{\sum_{k=1}^m \overline{M}_k}$ 。判断矩阵特征最大值: $\lambda_{\max} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m \frac{(AM)_i}{\overline{M}_i}$,且 $(AM)_i$ 为向量中序号为 i 元素:

$$AM = \begin{bmatrix} (AM)_1 \\ (AM)_2 \\ \vdots \\ (AM)_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_m \end{bmatrix}$$

得到权重之后需要对其进行准确度检验一致性,令 CI 表示一致指标, $CI = (\lambda_{\max} - m)/(m - 1)$, RI 表示对应随机一致性控制性指标^[1],则 CR 表示随机一致比值,且 $CR = \frac{CI}{RI}$ 。当算出的 $CR < 0.1$ 表示具

有目标判断矩阵A一致性合理,否则需要对起算的A矩阵进行微调,直至符合CR条件为止^[15]。

表 8 原始权重表

评价指标	A ₄	A ₃	A ₂	A ₁
A ₄	1	1/2	2	1/2
A ₃	2	1	2	2
A ₂	1/2	1/2	1	3
A ₁	2	1/2	1/3	1

其中: $\lambda_{\max} = 4.5522$; $CR = 0.2068$; $CI = 0.1841$ 。

表 9 修正后计算用权重矩阵表

	A ₄	A ₃	A ₂	A ₁	权重 ω_j
A ₄	1	0.5721	1.5791	0.5840	0.2044
A ₃	1.7480	1	2.2305	1.7206	0.3860
A ₂	0.6333	0.4483	1	1.9890	0.2079
A ₁	1.7124	0.5812	0.5028	1	0.2017

其中: $\lambda_{\max} = 4.2598$; $CR = 0.0973$; $CI = 0.0866$ 。

表 10 权重计算结果表

一级指标	二级指标	全局权重	同级权重
A ₄	A ₄₁	0.1533	0.7500
	A ₄₂	0.0511	0.2500
A ₃	A ₃₁	0.1287	0.3333
	A ₃₂	0.2573	0.6667
A ₂	A ₂₁	0.1386	0.6667
	A ₂₂	0.0693	0.3333
A ₁	A ₁₁	0.0672	0.3333
	A ₁₂	0.1345	0.6667

2 属性区间识别模型

2.1 单指标测度分析

设定数量为 n 的样本: $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 位于样本空间 H 。这里 H 表示为模型中的隧道,样本点 x_i 表示相应隧道的评估段。所有样本点需测出各自对应的 m 个指标: $I_1, I_2, \cdots, I_m$,其中 I_j 表示对应隧道评估段下的一个评估指标。 x_{ij} 表示隧道的第 i 个评估段下的第 j 个指标的评估实际值,且其值下又对应 K 个评估级别,危险属性空间 $C_k(k = 1, 2, \cdots, K)$ 对应特定的评估指标。参考属性区间识别理论模型理论^[8]构建标准分类矩阵和计算单指标测度 $[\mu_{ijk}] = [\underline{\mu}_{ijk}, \overline{\mu}_{ijk}]$ 。

$$\begin{matrix} & C_1 & C_2 & \cdots & C_k \\ \begin{bmatrix} [\alpha_{11}, \beta_{11}] & [\alpha_{12}, \beta_{12}] & \cdots & [\alpha_{1K}, \beta_{1K}] \\ [\alpha_{21}, \beta_{21}] & [\alpha_{22}, \beta_{22}] & \cdots & [\alpha_{2K}, \beta_{2K}] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ [\alpha_{m1}, \beta_{m1}] & [\alpha_{m2}, \beta_{m2}] & \cdots & [\alpha_{mK}, \beta_{mK}] \end{bmatrix} \end{matrix}$$

β_{jk}, α_{jk} 对应整个评估空间中第 j 个评估指标在级别为 k 时所取得上限值和下限值, 则 $\alpha_{jk} < \beta_{jk}; \alpha_{j1} < \alpha_{j2} < \cdots < \alpha_{jk}; \beta_{j1} < \beta_{j2} < \cdots < \beta_{jk}$ 。

$x \leq \alpha_{j1}$ 时, $\underline{\mu}_{ij1} = 1, \underline{\mu}_{ij2} = \underline{\mu}_{ij3} = \cdots = \underline{\mu}_{ijk} = 0$;

$x \geq \alpha_{jK}$ 时, $\underline{\mu}_{ijk} = 1, \underline{\mu}_{ij2} = \underline{\mu}_{ij3} = \cdots = \underline{\mu}_{ij(K-1)} = 0$;

$x \leq \beta_{j1}$ 时, $\bar{\mu}_{ij1} = 1, \bar{\mu}_{ij2} = \bar{\mu}_{ij3} = \cdots = \bar{\mu}_{ijk} = 0$;

$x \geq \beta_{jK}$ 时, $\bar{\mu}_{ijk} = 1, \bar{\mu}_{ij2} = \bar{\mu}_{ij3} = \cdots = \bar{\mu}_{ij(K-1)} = 0$;

$\alpha_{jl} \leq x_{ij} \leq \alpha_{j(l+1)}$ 且 $1 \leq l \leq K-1$,

$$\underline{\mu}_{ijl} = \frac{|x_{ij} - \alpha_{j(l+1)}|}{|\alpha_{jl} - \alpha_{j(l+1)}|}, \underline{\mu}_{ij(l+1)} = \frac{|x_{ij} - \alpha_{jl}|}{|\alpha_{jl} - \alpha_{j(l+1)}|},$$

$\underline{\mu}_{ijk} = 0, K < l+1$ 或 $K > l+1$;

$\beta_{jl} \leq x_{ij} \leq \beta_{j(l+1)}$ 且 $1 \leq l \leq K-1$,

$$\bar{\mu}_{ijl} = \frac{|x_{ij} - \beta_{j(l+1)}|}{|\beta_{jl} - \beta_{j(l+1)}|}, \bar{\mu}_{ij(l+1)} = \frac{|x_{ij} - \beta_{jl}|}{|\beta_{jl} - \beta_{j(l+1)}|},$$

$\bar{\mu}_{ijk} = 0, K < l$ 或 $K > l+1$ 。

2.2 综合因子测度计算

针对评估对象归类定义级别时, 评估指标的类别对最终的综合因子的测度计算中, 各自所作的权重贡献不相等^[15]。

根据表 10 所求出各评价指标权重 $\omega_j, 0 \leq \omega_j \leq 1$, 且 $\sum_{j=1}^m \omega_j = 1$, 可求综合属性测度区间 $[\underline{\mu}_{ik}, \bar{\mu}_{ik}]$, 计算如下:

$$\underline{\mu}_{ik} = \sum_{j=1}^m \omega_j \underline{\mu}_{ijk}, \bar{\mu}_{ik} = \sum_{j=1}^m \omega_j \bar{\mu}_{ijk} \tag{1}$$

2.3 属性识别计算

本文属性识别采用置信度准则, 如果 $C_1 > C_2 > \cdots > C_k$, 表示 C_1 安全度最高, C_2 稍低, $\cdots, C_k$ 安全度最低, 则可划分出相应的安全等级:

$$k_m = \min \{k: \sum_{i=1}^k \mu_{il} \geq \lambda, 1 \leq k \leq P\} \tag{2}$$

$\lambda = 0.65^{[5]}$, 下同。

评估目标 x_i 对应 C_{km} 。

如果 $C_1 < C_2 < \cdots < C_k$, 表示 C_1 安全度最低, C_2 稍高, $\cdots, C_k$ 安全度最高, 则可划分出相应的安全等级:

$$k_m = \max \{k: \sum_{i=k}^K \mu_{il} \geq \lambda, 1 \leq k \leq K\} \tag{3}$$

评估目标 x_i 对应 C_{km} 。

3 隧道突涌水危险性评估

依托工程跨云南昭通市鲁甸县境内, 主干总长将近 6 km, 隧道类型为特长分离两洞式。隧道所处的地形地貌具体为构造剥蚀, 具体工程地质图如图 2 所示。该隧道中间段高程最大点约为 1 657.96 m, 隧道出口最低点约为 957.49 m, 相对高差 700.47 m, 因此隧道设计高程 957.49 m ~ 1 074.48 m, 埋深最大处约 686.18 m。气候明显受地形影响, 尤其针对高程。

现根据各评估因子的危险等级划分情况, 构建危险等级评价矩阵:

	C_5	C_4	C_3	C_2	C_1
A_{11}	[0, 20]	[20, 40]	[40, 60]	[60, 80]	[80, 100]
A_{12}	[0, 20]	[20, 40]	[40, 60]	[60, 80]	[80, 100]
A_{21}	[0, 5]	[5, 25]	[25, 50]	[50, 75]	[75, 100]
A_{22}	[0, 20]	[20, 40]	[40, 60]	[60, 80]	[80, 100]
A_{31}	[0, 5]	[5, 10]	[10, 20]	[20, 35]	[35, 45]
A_{32}	[0, 0.2]	[0.2, 1]	[1, 2]	[2, 10]	[10, + \infty]
A_{41}	[0, 10]	[10, 25]	[25, 50]	[50, 70]	[70, 100]
A_{42}	[0, 15]	[15, 60]	[60, 70]	[70, 80]	[80, 90]

选择左线 ZK68+390—ZK74+295 隧道进行突涌水危险评价。评价指标具体取值是根据依托工程的隧道地形地貌图、水文地质图、隧道沿线地质剖面图和相关地质资料经过一定数据处理得到的, 如表 11 所示, 表中目标矩阵 A_{ij} 表示对应参量角度, 如岩层倾角等。

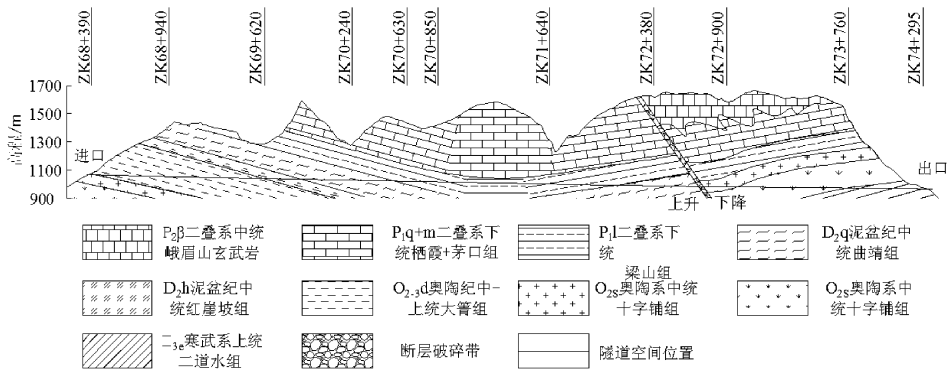


图 2 隧道工程地质示意图

表 11 评估指标取值表

隧道分段	围岩级别 A_1		岩石可溶性 A_2		地质构造 A_3			地形地貌 A_4	
	A_{11}	A_{12}	A_{21}	A_{22}	A_{31}	A_{31} (修正)	A_{32}	A_{41}	A_{42}
ZK73 + 760—ZK74 + 295	35	20	20	60	8	4	0	0.2	67.0
ZK72 + 900—ZK73 + 760	52	20	60	70	6	6	0	0.4	37.0
ZK72 + 380—ZK72 + 900	60	55	80	60	6	3	38	0.8	72.0
ZK71 + 640—ZK72 + 380	30	30	75	60	8	4	0	0.7	30.0
ZK70 + 850—ZK71 + 640	65	70	80	65	10	5	0	0.9	68.0
ZK70 + 630—ZK70 + 850	25	15	10	20	11	8	0	0.1	65.0
ZK70 + 240—ZK70 + 630	30	30	49	70	14	14	0	0.2	32.0
ZK69 + 620—ZK70 + 240	60	25	20	60	14	14	0	0.7	35.0
ZK68 + 940—ZK69 + 620	60	30	70	60	14	14	0	0.4	52.5
ZK68 + 390—ZK68 + 940	65	30	60	65	11	11	0	0.3	38.0

表 12 总体属性测度值表

隧道段分段	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
ZK73 + 760—ZK74 + 295	0.00	0.05	0.20	0.30	0.45
ZK72 + 900—ZK73 + 760	0.05	0.17	0.20	0.20	0.38
ZK72 + 380—ZK72 + 900	0.45	0.24	0.16	0.06	0.09
ZK71 + 640—ZK72 + 380	0.15	0.18	0.09	0.18	0.40
ZK70 + 850—ZK71 + 640	0.26	0.24	0.11	0.07	0.32
ZK70 + 630—ZK70 + 850	0.00	0.03	0.09	0.34	0.54
ZK70 + 240—ZK70 + 630	0.02	0.13	0.26	0.24	0.35
ZK69 + 620—ZK70 + 240	0.08	0.17	0.22	0.20	0.33
ZK68 + 940—ZK69 + 620	0.06	0.21	0.27	0.16	0.30
ZK68 + 390—ZK68 + 940	0.05	0.16	0.28	0.21	0.30

表 13 隧道各洞段突涌水危险等级评价结果

隧道段分段	隧道突涌水风险等级
ZK73 + 760—ZK74 + 295	Ⅳ
ZK72 + 900—ZK73 + 760	Ⅲ
ZK72 + 380—ZK72 + 900	Ⅰ
ZK71 + 640—ZK72 + 380	Ⅲ
ZK70 + 850—ZK71 + 640	Ⅱ
ZK70 + 630—ZK70 + 850	Ⅳ
ZK70 + 240—ZK70 + 630	Ⅲ
ZK69 + 620—ZK70 + 240	Ⅲ
ZK68 + 940—ZK69 + 620	Ⅲ
ZK68 + 390—ZK68 + 940	Ⅲ

各评估因子指标的属性值结合危险评价等级矩阵和单一指标因子测算区间计算规则,可以算出对应各评价洞段的各指标因子测算区间,根据权重分配计算各洞段的总体属性测度区间,最后求其平均算出相应隧道段总体属性测度值,如表 12 所示。

由表 12 中的有序集合 $\{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5\}$ 内各个元素表示的风险等级依次降低,等级越低越有利:

$C_5 > C_4 > C_3 > C_2 > C_1$,再利用 2.3 中属性识别计算公式以及置信度法则可得到各计算洞段涌突水危险评估等级结果如表 13 所示。现场施工过程中,在 ZK69 + 230—ZK69 + 265 已出现涌水,且涌水量较大,在本次预测中,该段隧洞处于隧道涌突水风险等级为Ⅲ级,说明突涌水风险较高,与实际情况基本一致,在一定程度上说明本次预测的可靠性。

4 结 论

(1) 由于考虑到该隧道所在地的特殊性,本文通过参考西南岩溶隧道造成灾害因素的汇总分析,对其主要的致灾因素进行排序,遴选致灾因素。选取了围岩等级、岩石的溶解性、岩层地质构造、地理地形等评估因子指标对该岩溶隧道分段计算风险等级并对其进行评估。最终评估等级在极大程度上受控于评估因子的贡献,为排除人为干扰,在临近该隧道区域内,应将足够多的潜在导致岩溶的因子或数据考虑在内。

(2) 依托工程的突涌水危险性总体较高,其中 ZK72 + 380—ZK72 + 900 容易引起特大型涌水事故。分析结果为该隧道地面整体范围内地质成分中碳酸盐达到 90% 多,进而造成岩石溶解可能性大幅提升,相关评估因子比例相应提高,由此主导了结果。

参考文献:

[1] 周宗青,孔 军,杨为民,等. 改进的属性区间识别方法及其在隧道突涌水风险评估中的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版),2020,51(6):1703-1711.

[2] 杜毓超,韩行瑞,李兆林. 基于 AHP 的岩溶隧道涌水专家评判系统及其应用[J]. 中国岩溶,2009,28(3):281-287.

[3] 杨艳娜. 西南山区岩溶隧道涌突水灾害危险性评价系

统研究[D]. 成都:成都理工大学,2009.

[4] 刘 玮. 基于 BP 神经网络下的深长隧道突水预测分析与数值模拟研究[D]. 长沙:中南大学,2014.

[5] 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.

[6] 李术才,李 貅,薛翊国,等. 高风险岩溶地区隧道施工地质灾害综合预报预警关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(7):1297-1307.

[7] 吴毅江,陈 波,阮 航,等. 基于改进属性识别模型的塔基山坡稳定性评价方法[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(S1):3138-3146.

[8] 秦胜伍,吕江峰,陈剑平,等. 基于最大熵-属性区间识别的隧道塌方风险评价[J]. 人民长江,2017,48(19):91-96.

[9] 殷 颖,田 军,张永杰. 岩溶隧道灾害案例统计分析研究[J]. 公路工程,2018,43(4):210-214,273.

[10] 王亚萍. 超长深埋隧洞(道)突涌水灾害危险性评价及水量预测方法[D]. 西安:西安理工大学,2019.

[11] 沙 鹏,赵逸文,高书宇,等. 隧道层状岩体质量评价的 BQ 分级改进[J]. 工程地质学报,2020,28(5):942-950.

[12] 李志山,蒲 端,钟 鸣. 公路隧道岩溶构造地质雷达正演与探测实例波形特征对比研究[J]. 公路交通技术,2019,35(2):110-117.

[13] 郭永春,周其健,屈智辉,等. 水岩相互作用下钙芒硝盐岩强度衰减机理[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(4):1045-1051.

[14] 徐建强,阎宗岭,李海平,等. 黔西岩溶区公路土岩混合边坡致灾模式及调控技术[J]. 公路交通技术,2019,35(6):25-30,42.

[15] 杨新庆,张善从. 基于模糊层次分析法-粒子群算法的载人航天工程项目重要工序识别研究[J]. 科技管理研究,2019,39(24):217-224.

[16] 靳 昊,陈彦好,周宗青,等. 基于属性识别理论的金属矿山采空区塌陷灾害风险评估[J]. 金属矿山,2021(3):184-190.

[17] 阎锡东,高 军,韩 翡,等. 隧道穿越活动断裂带风险评价研究及工程应用[J]. 现代隧道技术,2020,57(5):10-22,60.

~~~~~

(上接第 80 页)

[13] 吴 刚,顾冬生,蒋剑彪,等. 玄武岩纤维与碳纤维加固混凝土圆柱抗震性能比较研究[J]. 工业建筑,2007(6):19-23.

[14] Ouyang Lijun, Gao Wanyang, Zhen Bin, et al. Seismic retrofit of square reinforced concrete columns using basalt and carbon fiber-reinforced polymer sheets: A comparative study[J]. Composite Structures, 2017, 162: 294-307.

[15] 唐协波. 玄武岩纤维布加固钢筋混凝土方柱抗震性能研究[D]. 成都:西南交通大学,2019.

[16] Ma Gao, Li Hui. Experimental study of the seismic behavior of predamaged reinforced-concrete columns retrofitted with basalt fiber-reinforced polymer[J]. Journal of Composites for Construction, 2015,19(6):04015016.

[17] 黄镜淳,高 鹏,马翠玲,等. BFRP 布加固钢筋混凝土圆柱的抗震性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2022,54(2):291-297.

[18] 孙兴武,倪国葳,董 卓,等. 基于 ABAQUS 预应力 BFRP 网格加固混凝土梁的力学行为研究[J]. 混凝土,2022(7):59-62,73.

[19] 张景杭,姜绍飞,吴兆旗,等. BFRP 模壳不排水加固墩柱轴压性能有限元分析[J]. 福州大学学报(自然科学版),2020,48(4):517-524.

[20] Priestley M J N, Seible F, Calvi G M. Seismic Design and Retrofit of Bridge[M]. John Wiley and Sons, 1996. 北京:人民交通出版社,桥梁抗震设计与加固(中译本). 1997:226-230.

[21] Seible F, Priestley M J N, Hegemier G A, et al. Seismic retrofit of RC columns with continuous carbon fiber jackets[J]. Journal of Composites for Construction, 1997,1(2):55-62.

[22] 叶爱君,管仲国. 桥梁抗震[M]. 北京:人民交通出版社,2002.

[23] Pantelides C P, Moran D A. Design of FRP jackets for plastic hinge confinement of RC columns[J]. Journal of Composites for Construction, 2013,17(4):443-442.

[24] Mander J B, Priestley M J N. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988,114(8):1804-1826.

[25] 董振华,韩 强,杜修力. FRP 约束矩形空心截面桥墩分析模型及试验验证[J]. 工业力学,2013,30(12):57-64.

[26] 欧阳利君,许 峰. 多因素影响下 FRP 约束柱 FRP 有效极限拉应变研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料,2017(10):94-103.

[27] 杜修力,董振华,韩 强,等. FRP 约束 RC 矩形空心截面桥墩抗震性能[J]. 北京工业大学学报,2014,40(2):214-222.