

贺华刚.深埋特长隧道的突涌水危险性评价研究[J].中国岩溶,2020,39(3):384-390.
DOI:10.11932/karst20200306

深埋特长隧道的突涌水危险性评价研究

贺华刚

(重庆工商职业学院,重庆 401520)

摘要:为评价隧道突涌水风险,确保施工安全,本文结合工程实例,利用层次分析法和模糊理论构建了隧道突涌水危险性评价模型,并利用P×C分级法确定隧道突涌水危险性等级。实例检验表明:该模型的权值求解方法具操作简单、准确性高等优点,能有效通过一致性检验,且隶属度求解过程有效综合了定性分析与定量评价,保证了分析结果的准确性;同时,该评价模型可定量评价隧道突涌水的危险性等级,且判别结果与现场实测值的判别结果具较好的一致性,验证了该评价模型的可靠性和准确性,为隧道突涌水危险性评估提供了一种有效途径。

关键词:隧道突涌水;层次分析法;模糊理论;危险性评价;风险等级

中图分类号:U453.61 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2020)03-0384-07 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

随着我国交通运输业的迅速发展,大量隧道工程应运而生,但受地质条件、水文条件等因素的影响,隧道工程事故也日益增加,其中,隧道突水、涌水是一种常见的施工灾害,轻则造成工期延误,重则造成人员伤亡,给国家带来严重的经济损失。2013年5月31日,湖北尚家湾隧道发生突水灾害,造成支护设施损毁,施工工期延误;同年6月30日,成兰铁路跃龙门隧道发生突水灾害,也造成了严重的经济损失。由此可见,对隧道突水、涌水危险性评价的研究是十分必要的。许多学者已在这方面取得了相应的研究成果,如胡建华等^[4]结合云模型理论和层次分析法,构建了隧道突水危险性评价模型,有效地保证了评价结果的客观性和可靠性;李雪平等^[5]以数值模拟和GIS系统为基础,构建了隧道突水危险分析的数据库,实现了突水危险的合理划分,对指导现场施工具有重要意义;叶志华等^[6]先利用关联函数确定危险性指标的权重值,再利用加权平均法构建隧道突水危险性评价的综合预测模型,实现了多目标决策评价;武亚遵等^[7]以溶蚀扩展理论和渗流理论为基础,构建

了隧道岩溶的溶蚀演化模型,为隧道突水、涌水危险性评价提供了参考依据。上述研究虽为隧道突水、涌水危险性评价积累了宝贵经验,但其隶属度确定原则仍存在一定不足,且隧道突水、涌水影响因素受区域地质条件及施工条件的影响较大,因此,仍有必要结合工程实际重构合理的突水、涌水危险性评价模型,以便更好地指导现场灾害防治。本文基于现场监测成果,先以层次分析法构建隧道突水、涌水的危险性评价体系,并采用1-9标度法,确定各影响因素的权重;再利用模糊理论实现各影响因素的危险性区间划分,进而求得不同危险性等级下的隶属度;最后,利用P×C分级法确定隧道突涌水的危险等级。本文的研究方法结合了定性分析与定量分析,不仅发挥了经验判断的适宜性,也体现了定量评价的规范化,是一种合理且全面的危险性评价方法。

1 评价体系的构建及评价

1.1 评价体系的构建

隧道突涌水受多种因素的影响,如地表水因素、地下水因素、围岩因素及施工因素等,结合工程实

作者简介:贺华刚(1981—),男,讲师,硕士,研究方向:桥梁与隧道工程,道路工程施工。E-mail:2048394599@qq.com。
收稿日期:2019-03-06

际,将隧道突涌水危险性评价体系的一级指标设定为地表水特征因素、地下水特征因素和围岩特征及施工因素,并进一步利用层次分析法对各影响因素的二级风险指标进行筛选及确定,分述如下^[8-11]。

1.1.1 地表水特征因素

隧道突涌水虽直接来自于地下水,但地下水常接受地表水补给,地表水对隧道涌水具有间接影响作用。若地表水补给充足,隧道涌水量将相对越大,因此,鉴于汇水面积及降雨量对隧道涌水的影响,将其作为地表水特征因素的二级风险指标。

1.1.2 地下水特征因素

地下水是隧道突涌水灾害的直接水源,具直接影响作用,且地下水能提供的水量越大,发生灾害时的涌水量也会越大,因此,地下水的静水压力和地下水高程差将会直接影响隧道突涌水发生时的涌水强度,故将上述两指标作为地下水特征因素的二级风险指标。

1.1.3 围岩特征及施工因素

围岩特征也直接影响隧道突涌水灾害的发生及其灾害发生的强度,如围岩裂隙较宽时,更易发生突涌水灾害,且发生涌水时涌水强度也会越大;围岩水系的连通性越好时,地下水的补给性也相对越好;因施工过程会不同程度地造成围岩劣化损伤,进而影响涌水灾害的发生及强度,其中,施工过程中的爆破作业对围岩的劣化损伤相对最大。因此,将围岩特征及施工因素的二级风险指标确定为突水通道宽度、围岩水系连通性和爆破振动速率。

根据上述隧道突涌水危险性评价指标筛选,将

突涌水评价体系的结构关系统计如图 1 所示,共计有三个一级风险评价指标和 7 个二级风险评价指标。

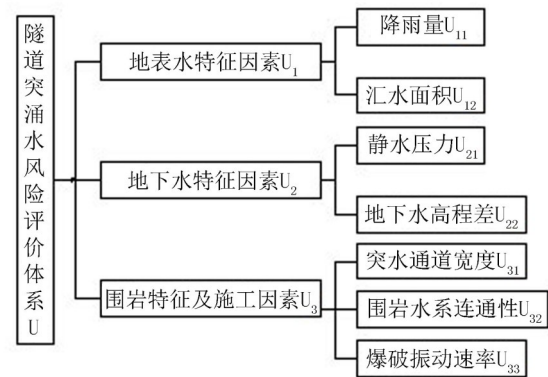


图 1 隧道突涌水危险性评价体系

Fig. 1 Assessment system of tunnel water intrush risk

1.2 突涌水危险性评价

隧道突涌水危险性评价方法为 P×C 分级法,这是一种多级模糊分析方法,具有层次分析法和模糊分析法的综合优点,适用于隧道突涌水的危险性评价;同时,该方法的重点是确定影响因素的权值和隶属度,为求得两指标,提出利用 1~9 标度法确定各评价指标的权值,再采用危险性区间划分来确定隶属度,两者的具体实现过程如下^[12-14]:

1.2.1 评价指标的权重确定

1~9 标度法不仅可以明显区分各影响因素间的重要性,也可折中区分各影响因素间的不确定性,其适用范围较强。同时,在权值求解过程中,主要参照表 1 中的定义构建判断矩阵。

在判断矩阵的构建过程中,矩阵应具如下性质:

$$a_{ij} > 0; a_{ij} = 1 / a_{ji}; a_{ii} = 1 \tag{1}$$

表 1 1~9 标度法权值评分表
Table 1 Scores of 1-9 scale weighted values

分值 a_{ij}	定义
1	i 因素与 j 因素同样重要
3	i 因素比 j 因素略重要
5	i 因素比 j 因素稍重要
7	i 因素比 j 因素重要得多
9	i 因素比 j 因素重要得很多
2、4、6、8	i 与 j 两因素比较结果处于以上结果的中间
倒数	j 与 i 两因素比较结果是 i 与 j 两因素重要性比较结果的倒数

即判断矩阵为互反矩阵,且各元素之间具相对独立性。

同时,利用 matlab 软件计算判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 及其对应的特征向量 b ,并利用下式求解判断矩阵的 CI 值,进行一致性检验。

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

(2)

当 $CI=0$ 时,说明判断矩阵的构造效果最佳,但实际过程中难以到达这种效果,因此,改用一致性比率 CR 值进行一致性检验。

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

(3)

式中: RI 为误差控制值。

当 $CR<0.1$ 时,认为判断矩阵具可接受性,达到了误差控制要求;反之,需对构造矩阵进行调整,直至满足一致性检验。

当通过上述一致性检验后,对对应特征向量 b 进行归一化处理,所得归一化值即为对应指标的相对权重值。

1.2.2 评价指标的隶属度确定

采用模糊统计的危险性区间划分来确定隶属度。其实现过程主要包括两个步骤,一是基于现场监测结果,结合经验判断,将各评价指标对隧道突涌水的危险程度进行区间划分;二是根据各评价指标的危险性等级,对不同危险性等级的隶属度值及其对应的隶属度评价值进行求解。

首先,结合现场监测成果及文献[12]的危险性等级划分标准,将各评价指标对隧道突水、涌水的危险程度划分为四个等级,且各等级的区间限值如表2所示。

表2 各评价指标的危险性评级标准
Table 2 Risk assessment criteria for each index

突涌水影响因子U		极高风险 I 级	较高风险 II 级	中度风险 III 级	低度风险 IV 级
地表水特征因素 U ₁	降雨量(U ₁₁)/mm	>20.0	[20.0~10.0)	[10.0~5.0)	≤5.0
	汇水面积(U ₁₂)/km ²	>6.0	[6.0~4.0)	[4.0~2.0)	≤2.0
地下水特征因素 U ₂	静水压力(U ₂₁)/Mpa	>0.75	[0.75~0.55)	[0.55~0.35)	≤0.35
	地下水高程差(U ₂₂)/m	>25.0	[25.0~15.0)	[15.0~5.0)	≤5.0
围岩特征及施工因素 U ₃	突水通道宽度(U ₃₁)/m	>0.65	[0.65~0.45)	[0.45~0.25)	≤0.25
	围岩水系连通性(U ₃₂)	>0.80	[0.80~0.55)	[0.55~0.20)	≤0.20
	爆破振动速率(U ₃₃)/cm·s ⁻¹	>1.20	[1.20~0.90)	[0.90~0.60)	≤0.60

其次,针对不同评价指标的危险性等级赋予对应的隶属度值,赋值标准如表3所示;同时,对不同的

隶属度值在不同等级上的评价值进行设定,对应标准如表4所示。

表3 各评价指标的隶属度赋值标准
Table 3 Criteria of membership assignment for each assessment index

影响因子	影响程度评价	隶属度值
降雨量(U ₁₁)	极大,较大,一般,很小	$u_1=[0.7,0.4,0.1,0.0]$
汇水面积(U ₁₂)	极大,较大,一般,很小	$u_2=[0.9,0.6,0.4,0.3]$
静水压力(U ₂₁)	极大,较大,一般,很小	$u_3=[1.0,0.7,0.5,0.3]$
地下水高程差(U ₂₂)	极高,较高,一般,较小	$u_4=[1.0,0.6,0.4,0.1]$
突水通道宽度(U ₃₁)	极宽,较宽,一般,较窄	$u_5=[1.0,0.7,0.5,0.2]$
围岩水系连通性(U ₃₂)	极好,较好,一般,较差	$u_6=[0.9,0.7,0.5,0.2]$
爆破振动速率(U ₃₃)	极高,较高,一般,较小	$u_7=[0.8,0.6,0.4,0.2]$

表 4 不同隶属度值的评价值

Table 4 Assessment values of different membership values

隶属度值	危险性评价等级			
	I 级	II 级	III 级	IV 级
0.0	0.0	0.0	0.1	0.9
0.1	0.0	0.1	0.2	0.7
0.2	0.0	0.2	0.3	0.5
0.3	0.1	0.2	0.2	0.5
0.4	0.2	0.2	0.2	0.4
0.5	0.3	0.4	0.2	0.1
0.6	0.4	0.4	0.1	0.1
0.7	0.5	0.3	0.2	0.0
0.8	0.6	0.3	0.1	0.0
0.9	0.7	0.3	0.0	0.0
1.0	0.8	0.2	0.0	0.0

1.2.3 风险评估

如前所述,可求得各评价指标的权值和隶属度,再利用 P×C 分级法确定各评价指标的危险性;同时,基于隧道突水、涌水危险性等级的常用分级标准,将隧道突水、涌水的危险性等级划分为 4 级,各级对应的风险分、风险等级评分及相应的决策措施如表 5 所示。

据表 5,隧道突水、涌水危险性等级共分为 4 级,每级对应相应的风险分及等级划分标准,且可根据对应的风险等级,确定相应的风险决策,以便更好的

指导现场灾害防治。

2 实例分析

2.1 工程概况

云雾山隧道隶属渝遂高速,最大埋深约 800 m,全长 6.64 km,属深埋特长隧道。隧道进、出洞口高程分别为 801.31 m 和 877.14 m,高差 75.83 m,呈单面上坡形式。隧址区岩性以寒武系下统灰岩、白云岩为主,地质构造复杂,穿越白果坝背斜,使得区内溶洞、暗河发育,具较好水力条件。在施工过程中,发现两个较大充水溶腔,一是位于 DK245+526 里程,溶腔直径约 5 m,部分填充,填充物主要为黏土、细砂,通过超前钻孔,共计排出 3 000 m³水和 1 000 m³泥沙;二是位于 DK245+617 里程,溶腔主要由两部分组成,充填少量泥沙。

隧址区地下水主要接受大气降雨补给,使得隧址区的地下水具良好补给来源,为隧道突涌水提供了较好的水力条件^[15]。同时,在隧道施工过程中,常发生涌水事故,造成了不同程度的损失,也侧面体现出隧道突涌水危险性评价的必要性。根据现场监测统计,共计得到 12 组突涌水监测样本,如表 6 所示,且为充分评价该隧道突涌水危险性等级,也为验证前述危险性评价模型的合理性,对 12 组监测样本均进行危险性评价。

表 5 隧道突涌水风险等级划分

Table 5 Risk classification of water intrush in tunnels

风险水平等级	风险分	风险等级评分	风险决策准则
I 级	100	90~100	不可接受;必须排除或转移风险
II 级	85	80~90	不希望发生;须采取措施降低风险或转移风险
III 级	70	60~80	勉强接受,应采取一定的措施
IV 级	45	0~60	可接受且不必采取特别措施

2.2 突涌水危险性评价

限于文章篇幅,仅对样本 1 的危险性评价过程进行详述,且据隧道突水、涌水危险性评价方法,先利用 1-9 标度法确定各评价指标的权重值,并以一级评价指标的权值求解过程进行详述。在一级风险指标中,地下水特征因素对隧道突涌水的影响程度要高于围岩特征及施工因素,且前两因素又要强于地表水特征因素,进而得到一级风险指标的判断矩阵如下所示:

$$P_1 = \begin{bmatrix} \text{风险因素} & U_1 & U_2 & U_3 \\ U_1 & 1 & 1/4 & 1/3 \\ U_2 & 4 & 1 & 1/2 \\ U_3 & 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

通过 matlab 软件计算得到上述矩阵的 $\lambda_{\max}$ 为 3.05,并求得一致性比率 CR 值为 0.046,结果小于 0.1,说明上述判断矩阵满足一致性检验,且对应的特征向量 $b=[0.2184\ 0.8257\ 0.5201]$,将其进行归一化处理,得到三个一级风险指标的权重为:

$$[U_1\ U_2\ U_3]=[0.140\ 0.528\ 0.332]$$

表6 隧道突涌水现场监测样本

Table 6 Field monitoring samples of tunnel water inrush

序号	地表水特征因素 U_1		地下水特征因素 U_2		围岩特征及施工因素 U_3			突涌量/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$
	降雨量/ mm	汇水面积/ km^2	静水压力/ MPa	地下水高程 差/m	突水通道宽 度/m	围岩水系连 通性	爆破振动速率/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	
1	5.7	2.44	0.70	13.24	0.34	0.54	0.98	8 288
2	26.0	2.93	0.65	20.91	0.36	0.63	0.68	7 045
3	0.1	2.53	0.52	20.45	0.47	0.72	1.80	12 914
4	0.1	1.63	0.70	11.08	0.24	0.69	0.74	11 460
5	8.6	1.63	0.71	12.25	0.28	0.52	0.19	2 790
6	0.8	4.23	0.65	12.85	0.31	0.74	1.88	14 200
7	0.8	6.53	0.65	17.61	0.28	0.75	1.91	13 470
8	0.2	4.83	0.65	21.28	0.28	0.81	1.15	15 060
9	1.5	4.83	0.80	23.47	0.20	0.67	1.46	10 900
10	18.7	3.33	0.64	25.65	0.46	0.65	0.90	9 077
11	6.2	1.63	0.84	14.65	0.20	0.53	1.09	3 409
12	20.1	2.53	0.73	19.70	0.68	0.62	0.38	7 490

类比上述求解过程,可求得其余二级风险指标的权重,结果如表7所示。

同时,基于表6中的现场监测数据,采用表2~4中的取值标准,可求得地表水特征因素、地下水特征因素和围岩特征及施工因素的二级风险指标隶属度矩阵分别为 R_1 、 R_2 和 R_3 ,具体如下:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.1 & 0.2 & 0.7 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.4 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0.0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.4 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \\ 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \\ 0.4 & 0.4 & 0.1 & 0.1 \end{bmatrix}$$

表7 各风险指标的权值

Table 7 Weights of risk indexes

一级指标	二级指标	一级指标权重值	二级指标权重值
地表水特征因素	降雨量	0.140	0.352
	汇水面积		0.648
地下水特征因素	静水压力	0.528	0.443
	地下水高程差		0.557
围岩特征及施工因素	突水通道宽度	0.333	0.405
	围岩水系连通性		0.341
	爆破振动速率		0.254

同时,根据表7可得地表水特征因素、地下水特征因素、围岩特征及施工因素的二级风险指标权重矩阵分别为 A_1 、 A_2 和 A_3 :

$$A_1 = [0.352 \quad 0.648]$$

$$A_2 = [0.443 \quad 0.557]$$

$$A_3 = [0.405 \quad 0.341 \quad 0.254]$$

根据上述隶属度矩阵和权值矩阵,可计算得到

一级指标的隶属度模糊矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} A_1 R_1 \\ A_2 R_2 \\ A_3 R_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.13 & 0.16 & 0.20 & 0.51 \\ 0.33 & 0.24 & 0.20 & 0.22 \\ 0.33 & 0.40 & 0.17 & 0.10 \end{bmatrix}$$

由表7可得到对应的一级权值矩阵为:

$$A = [0.140 \quad 0.528 \quad 0.333]$$

进而可求得样本1危险性评价的得分矩阵为:

$$U = AR = [0.30 \quad 0.29 \quad 0.19 \quad 0.22]$$

最后,根据表 5 可得各级风险的风险评分向量 $E=[100\ 85\ 70\ 45]^T$,可以求解得到样本 1 的风险得分为:

$F=UE=77.85$ (分)

由上计算得到样本 1 的突水、涌水危险性得分为 77.85 分,危险性等级为Ⅲ级,说明该样本的突水、涌水危险性中等,应采取一定的措施。

类比样本 1 的危险性得分求解过程,再对其余样本的危险性得分进行求解,并对其危险性等级进行相应的评价,结果如表 8。由表 8 可知,不同样本的风险得分存在一定差异,危险性等级主要为Ⅱ级和Ⅲ级为主,其中,风险等级为Ⅱ级的样本有 5 个,占样本总数的 41.67%;风险等级为Ⅲ级的样本有 6 个,占样本总数的 50%,仅样本 5 的风险等级最低,为Ⅳ级风险。总体来说,云雾山隧道的突水、涌水危险以中等及中等偏上为主,在施工过程中,需做好超前地质预报,并采取必要措施防止灾害发生。

表 8 不同突涌水位置处的危险性评价
Table 8 Risk assessment of different water inrush sites

样本 编号	风险 得分	风险 等级	样本 编号	风险 得分	风险 等级
1	77.85	Ⅲ级	7	85.31	Ⅱ级
2	74.69	Ⅲ级	8	87.02	Ⅱ级
3	84.17	Ⅱ级	9	79.54	Ⅲ级
4	82.16	Ⅱ级	10	78.69	Ⅲ级
5	58.42	Ⅳ级	11	64.28	Ⅲ级
6	86.44	Ⅱ级	12	75.15	Ⅲ级

2.3 可靠性验证

为验证前述危险性评价结果的准确性,基于文献[13]的研究成果,以绝对涌水量为评价指标,对隧道突涌水的危险性等级进行划分(表 9)。

表 9 隧道突涌水等级划分标准
Table 9 Classification criteria of water inrush in tunnels

序号	涌水量/ $m^3\cdot d^{-1}$	风险等级
1	$<2\ 000$	Ⅳ级
2	$2\ 000\sim10\ 000$	Ⅲ级
3	$10\ 000\sim20\ 000$	Ⅱ级
4	$>20\ 000$	Ⅰ级

结合现场统计结果(表 6)及等级划分标准(表 9),对前述分析结果和现场实测分析结果进行统计(表 10),对比危险性评价体系与现场突涌水量的危险性判别结果表明,两者结果的一致性较好,其中,危险性判别结果一致的样本有 10 个,占样本总数的 83.33%,判别结果不一致的样本有 2 个,约占 16.67%,比例较小,说明该隧道突水、涌水危险性评价模型具较高的可靠性。

表 10 危险性评价结果与实测结果间的对比
Table 10 Comparison between risk assessment results and measured results

样本编号	危险性评价体系的等级判别	突涌水量的危险性等级判别	结果的一致性
1	Ⅲ级	Ⅲ级	一致
2	Ⅲ级	Ⅲ级	一致
3	Ⅱ级	Ⅱ级	一致
4	Ⅱ级	Ⅱ级	一致
5	Ⅳ级	Ⅲ级	不一致
6	Ⅱ级	Ⅱ级	一致
7	Ⅱ级	Ⅱ级	一致
8	Ⅱ级	Ⅱ级	一致
9	Ⅲ级	Ⅱ级	不一致
10	Ⅲ级	Ⅲ级	一致
11	Ⅲ级	Ⅲ级	一致
12	Ⅲ级	Ⅲ级	一致

根据前述分析和验证,得出云雾山隧道突水、涌水危险性评价模型能较好的评价隧道突涌水灾害的危险性等级,可为现场灾害防治及预报提供参考依据。

3 结 论

基于层次分析法及模糊综合评价法的联合应用,构建了隧道突涌水危险性评价模型,通过实例检验,得出如下主要结论:

(1)层次分析法可综合区分突水、涌水影响各因素间的相互关系,保证危险性评价体系的层次性和合理性;同时,模糊分析法可较为科学地、合理地量化评价指标的权值和隶属度,实现评价过程的定量分析;

(2)实例验证本研究模型可用于评价隧道突涌

水的危险性等级,且判别结果与现场实测值的判别结果具较好的一致性,验证了该评价模型的可靠性和准确性,加之该模型操作简单、适用性强,较好地

为隧道突水、涌水灾害防治及预报提供了参考;
(3)鉴于不同隧道所处地质条件、环境条件及施工条件,应用该评价模型,应充分结合工程实际,“具体问题具体分析”,适当调整各指标所占权重,构建出适用于具体工程的突水、涌水危险性评价模型。

参考文献

- [1] 周宗青,李术才,李利平,等.岩溶隧道突涌水危险性评价的属性识别模型及其工程应用[J].岩土力学,2013,34(3):818-826.
- [2] 杨艳娜,曹化平,许模.岩溶隧道涌突水灾害危险性评价指标体系及量化取值方法[J].现代地质,2015,29(2):414-420.
- [3] 张志成,卢浩,李集,等.一种深长隧道涌突水灾害危险性评价模型及其应用[J].中国地质灾害与防治学报,2015,26(4):67-74.
- [4] 胡建华,景佳美,邓煜林,等.基于AHP—云模型的铁路隧道突水危险性综合评价[J].科技促进发展,2018,14(4):311-317.
- [5] 李雪平,李云安.基于GIS的水下隧道突水危险性评价:以武汉长江隧道江底段为例[J].现代隧道技术,2013,50(4):104-108,137.
- [6] 叶志华,袁永才,徐学军,等.基于关联函数与加权平均法的岩溶隧道突水危险性评价及应用[J].中外公路,2016,36(1):204-208.
- [7] 武亚遵,万军伟,林云,等.基于岩溶演化模型的隧道突水危险性评价[J].地质科技情报,2015,34(5):166-171,179.
- [8] 张敏,朱江华,肖洪,等.沉管隧道健康状态评价中权重确定的主—客观融合方法[J].隧道建设(中英文),2016,36(9):1071-1075.
- [9] 薛亚东,李硕标,丁文强,等.隐伏溶洞对隧道施工安全影响的风险评估体系[J].现代隧道技术,2017,54(4):41-47.
- [10] 冯成奎,杜召华,曾威,等.浅埋偏压隧道施工风险评估指标体系的研究[J].公路工程,2018,43(2):45-48,100.
- [11] 吴梦军,方林,贺欣悦,等.西南岩溶地区公路隧道生态环境影响评价[J].环境科学与技术,2018,41(S1):325-330.
- [12] 张文泉,刘毓.岩溶隧道突涌水危险性的多级模糊综合评价[J].西安科技大学学报,2016,36(2):187-192.
- [13] 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(中英文),2017,37(6):691-699.
- [14] 杨卓,马超.基于BP神经网络方法的岩溶隧道突涌水风险预测[J].隧道建设(中英文),2016,36(11):1337-1342.
- [15] 冯宝俊,刘敦文,褚夫蛟.基于PSO—SVM模型的隧道水砂突涌量预测研究[J].中国安全生产科学技术,2014,10(7):123-129.

Assessment of water inrush risk in deep buried long tunnels

HE Huagang

(Chongqing Technology and Business Institute, Chongqing 401520, China)

Abstract Assessment the risk of tunnel water inrush is vital to the construction safety. Combining engineering examples, this work constructs an assessment model of tunnel water inrush by using Analytic Hierarchy Process (AHP) and fuzzy theory, and determines the risk level of tunnel water inrush using the $P \times C$ classification method. The example test shows that the weight solution method of the model has the advantages of simple operation and high accuracy. It can effectively pass the consistency test, and the process of solving membership degree effectively synthesizes the qualitative analysis and quantitative evaluation to ensure the accuracy of the analysis results. At the same time, the assessment model can quantitatively estimate the risk level of tunnel water inrush, and the theoretical estimates are well consistent with the field measured values, which verifies the reliability and accuracy of the assessment model, and provides an effective way for the risk assessment of tunnel water inrush.

Key words tunnel water inrush, Analytic Hierarchy Process(AHP), fuzzy theory, risk assessment, risk grade

(编辑 张玲)