

基于粗糙集与模糊理论的公路隧道塌方风险评价*

姜安民^{1,2}, 董彦辰^{1,2}, 张晓波¹, 熊奇伟³, 李旋¹

(1.湖南城建职业技术学院, 湖南 湘潭 411100; 2.中南林业科技大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410004;

3.湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 引发公路隧道塌方风险的因素较多、较复杂, 准确地对公路隧道塌方风险进行评价是降低风险的有效途径。文中通过文献研究及专家调查, 建立包含 3 个一级指标、8 个二级指标的公路隧道塌方风险评价指标体系; 基于粗糙集与层次分析法确定各评价指标综合权重, 通过构造隶属度函数确定各评价指标的隶属度, 引入模糊理论构建公路隧道塌方风险评价模型; 结合某隧道工程进行实例研究, 得出该工程中勘察设计风险、地质条件风险、施工风险等级分别为较低、较高、低, 总体风险较低。

关键词: 工程管理; 公路隧道; 风险评价; 塌方; 粗糙集; 模糊理论

中图分类号: U415.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)03-0156-05

公路隧道施工过程中塌方事故较为常见, 是较严重的工程地质灾害之一。近年来, 随着隧道工程建设的增多, 塌方事故愈发频繁。隧道塌方严重影响工程的正常进度, 威胁施工人员的生命安全并带来巨大经济损失。苏永华等通过隧道塌方事故统计, 找出了地质因素、设计施工质量等六大塌方风险因素, 引入重心理论计算客观权重, 基于该权重给出了公路隧道塌方评估方法; 关晓吉建立塌方风险等级评价因子体系, 运用可拓联系云模型对隧道塌方风险等级进行了评价; 杨卓等建立塌方风险评价指标体系, 基于熵权物元可拓理论构建隧道塌方风险分级评估模型, 并运用该模型进行了实例研究; 秦胜伍等选取围岩级别、地下水状况等 7 个因素建立隧道塌方风险评价指标体系, 基于最大熵原理和属性区间识别理论建立了山岭隧道塌方风险评价模型; 孙彦峰选取岩石单轴饱和抗压强度等 12 个具有代表性的影响因素作为隧道塌方风险评价指标, 建立基于理想点法的隧道塌方风险等级评价模型, 并利用 2 个典型隧道样本对该模型进行了验证。该文借鉴前人研究成果, 基于粗糙集与模糊理论对公路隧道塌方风险进行评价。

1 公路隧道塌方风险评价指标体系

导致公路隧道塌方的风险因素较多, 从不同角度对风险因素进行划分会有所差异。如: 陈建宏等将隧

道塌方风险因素划分为静态孕险因子与动态致险因子两类, 其中静态孕险因子包含围岩等级、隧道埋深等 5 项指标, 动态致险因子包含大气降水、开挖跨度等 4 项指标; 陈诚将隧道塌方风险因素划分为工程地质、水文气象、设计施工三类, 其中工程地质包含岩石单轴饱和抗压强度、岩体完整性指数等 5 项指标, 水文气象包含地下水渗水量、含水层透水性 2 项指标, 设计施工包含隧道跨度、隧道埋深等 3 项指标。对隧道潜在风险因素进行梳理、归类, 听取专家意见, 结合评价对象的工程背景, 重点参考文献[1], 建立表 1 所示公路隧道塌方风险评价指标体系, 该评价指标体系包含 3 个一级评价指标、8 个二级评价指标。

2 粗糙集理论及权重确定方法

2.1 粗糙集理论

粗糙集理论是研究知识与数据的数学理论和方法, 主要用于不精确、不确定与不完整信息的分析处理, 它主要是应用数据集自身的数据进行决策推理, 问题所需处理的数据集合之外的信息不需提供, 具有较强的客观性。

定义一个信息系统 S , S 可表达成一个有序四元组信息系统 $S = (U, A, V, f)$, 简记为 $S = (U, A)$ 。其中: U 为论域, 是全体样本集合; A 为属性集合, $A = C \cup D (C \cap D = \emptyset)$; C 为条件属性集合, 反映对象特征; D 为决策属性集合, 反映对象类别; V

* 基金项目: 湖南省教育厅科学研究项目(18C1254; 19C0339); 湖南城建职业技术学院科学研究项目(16KTYB04)

表 1 公路隧道塌方风险评价指标体系

目标层	一级评价指标	二级评价指标	指标说明
公路隧道 塌方风险	勘察设计 风险 U_1	地质条件风险 U_{11}	勘察资料搜集是否完整,地形、地质调查准确与否,气象与环境调查是否充分(资料越不完整、不准确,风险越高)
		开挖跨度风险 U_{12}	开挖跨度大小(跨度越大,风险越高)
		围岩级别风险 U_{21}	围岩级别的高低(级别越低,风险越高)
	地质条件 风险 U_2	地下水风险 U_{22}	地下水发育情况(地下水发育程度越高,风险越高)
		偏压风险 U_{23}	偏压作用的大小(偏压越大,风险越高)
		埋深风险 U_{24}	埋深大小(埋深越小,风险越高)
	施工风险 U_3	施工技术风险 U_{31}	技术水平高低(技术水平越低,风险越高)
		施工管理风险 U_{32}	管理水平高低(管理水平越低,风险越高)

为属性值集合, $V = \bigcup a \in AV_a$; f 为信息函数, $U \times A \rightarrow V$, 即对于 $\forall x \in U, a \in U$, 有 $f(x, a) \in V_a$ 。

2.2 基于粗糙集理论的权重计算

在保持分类能力不变的情况下,删除冗余的条件属性,形成一个简化的决策表,此即为粗糙集属性简约的主要思想。条件属性的重要度高低决定决策属性所受影响程度的大小,二者呈正相关。冗余条件属性对决策属性的取值不产生影响,即属性重要度为零。权重确定步骤如下:

(1) 确定决策表。决策表 $S = (U, A), A = C \cup D$ 。

(2) 计算条件属性的重要度。计算 D 的 C 正域 $POS_C(D)$, D 对 C 的依赖度见式(1)。逐个去除条件属性 $\{C_i\}$, 按式(2)计算 D 的 $C - \{C_i\}$ 正域和 $POS_{C-\{C_i\}}(D)$ 依赖度 $r_{C-\{C_i\}}(D)$ 。条件属性 C_i 的重要度 k_i 按式(3)计算。

$$r_C(D) = \frac{|POS_C(D)|}{|U|} \quad (1)$$

式中: $|s|$ 为集合 s 的元素个数。

$$r_{C-\{C_i\}}(D) = \frac{|POS_{C-\{C_i\}}(D)|}{|U|} \quad (2)$$

$$k_i = r_C(D) - r_{C-\{C_i\}}(D) \quad (3)$$

(3) 进行归一化处理,得指标权重 w_i^1 如下:

$$w_i^1 = \frac{k_i}{\sum k_i} \quad (4)$$

3 基于粗糙集与模糊理论的公路隧道塌方风险评价模型

3.1 模糊理论

自然界中存在很多模糊的概念或现象,而各学

科都要求量化、数字化,促使人们寻找一种研究处理模糊概念或现象的数学方法,模糊数学及相关理论应运而生。导致公路隧道塌方的风险因素较多,具有一定的模糊性与不确定性,故引入模糊理论构建公路隧道塌方风险评价模型。

3.2 公路隧道塌方风险评价

3.2.1 建立评价模型

通过文献研究和专家调查,基于粗糙集与模糊理论,构建图 1 所示公路隧道塌方风险评价模型。

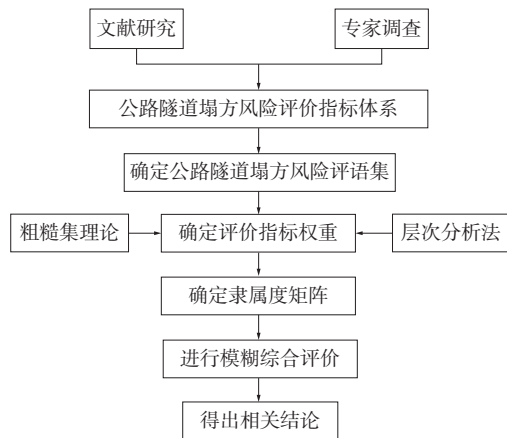


图 1 公路隧道塌方风险评价模型

3.2.2 评价步骤

(1) 确定评价指标体系,即评价因素集合 $U = \{U_1, U_2, U_3, \dots, U_n\}$, 其中 $U_1 = \{U_{11}, U_{12}, \dots, U_{1n}\}$ 。如表 1 所示,公路隧道塌方风险评价指标体系包括 3 个一级评价指标、8 个二级评价指标。

(2) 确定风险评价等级,即因素评语集合 $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$ 。将公路隧道塌方风险划分为 5 个等级(见表 2)。

(3) 确定评价指标权重,即因素权重集合。采用

表2 公路隧道塌方风险等级划分

评价等级	风险描述	赋分区间
v_1	风险高	(0,2]
v_2	风险较高	(2,4]
v_3	风险中等	(4,6]
v_4	风险较低	(6,8]
v_5	风险低	(8,10]

粗糙集计算评价指标的客观权重 w_i^1 。为兼顾评价者的阅历和经验,采用层次分析法计算评价指标的主观权重 w_i^2 ,对粗糙集权重进行修正。修正模型如下:

$$W_i = \frac{\sqrt{w_i^1 \times w_i^2}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{w_i^1 \times w_i^2}} \quad (5)$$

式中: W_i 为评价指标最终权重; w_i^1 为评价指标客观权重; w_i^2 为评价指标主观权重; n 为评价指标个数。

(4) 确定隶属度矩阵。采用定量法确定隶属度矩阵,该方法采用线性分析法,主要通过构造隶属度函数计算指标隶属度。构造图2所示梯形隶属度函数,其中 a 、 b 、 c 、 d 表示每个指标的阈值范围, $x_1 \sim x_8$ 表示每个指标临近阈值的线性取值。公路隧道塌方风险分为 v_1 、 v_2 、 v_3 、 v_4 、 v_5 5个等级,各级隶属度函数分别见式(6)~(10)。根据隶属度函数计算各评价指标对风险等级的隶属度 r_{ij} ,形成隶属度矩阵[见式(11)]。

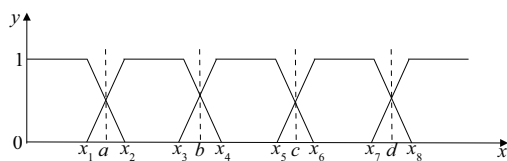


图2 梯形隶属度函数

$$f_1 = \begin{cases} 1 & x_i \leq x_1 \\ \frac{x_2 - x_i}{x_2 - x_1} & x_1 < x_i < x_2 \\ 0 & x_i \geq x_2 \end{cases} \quad (6)$$

$$f_2 = \begin{cases} 0 & x_i \leq x_1 \text{ 或 } x_i \geq x_4 \\ \frac{x_i - x_1}{x_2 - x_1} & x_1 < x_i < x_2 \\ 1 & x_2 \leq x_i \leq x_3 \\ \frac{x_4 - x_i}{x_4 - x_3} & x_3 < x_i < x_4 \end{cases} \quad (7)$$

$$f_3 = \begin{cases} 0 & x_i \leq x_3 \text{ 或 } x_i \geq x_6 \\ \frac{x_i - x_3}{x_4 - x_3} & x_3 < x_i < x_4 \\ 1 & x_4 \leq x_i \leq x_5 \\ \frac{x_6 - x_i}{x_6 - x_5} & x_5 < x_i < x_6 \end{cases} \quad (8)$$

$$f_4 = \begin{cases} 0 & x_i \leq x_5 \text{ 或 } x_i \geq x_8 \\ \frac{x_i - x_5}{x_6 - x_5} & x_5 < x_i < x_6 \\ 1 & x_6 \leq x_i \leq x_7 \\ \frac{x_8 - x_i}{x_8 - x_7} & x_7 < x_i < x_8 \end{cases} \quad (9)$$

$$f_5 = \begin{cases} 0 & x_i \leq x_7 \\ \frac{x_i - x_7}{x_8 - x_7} & x_7 < x_i < x_8 \\ 1 & x_i \geq x_8 \end{cases} \quad (10)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (11)$$

(5) 进行模糊综合评价。按式(12)计算综合评价结果,根据最大隶属度原则确定公路隧道塌方风险所处等级,并给出合理建议。

$$B = W \circ R = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_n) \quad (12)$$

4 工程算例

4.1 工程概况

A市拟建某分离式公路隧道,左线起迄桩号 ZK28+126—ZK29+145,长1 019m,最大埋深约145 m;右线起迄桩号 K28+134—K29+142,长1 008m,最大埋深约150 m。隧道进口采用端墙式,出口采用削竹式。净宽10.45 m,净高5 m。围岩级别为V级,节理裂隙发育,地下水较丰富,施工技术水平及管理水平较高。

4.2 隧道塌方风险评价

评价指标体系见表1,风险评价等级划分见表2。

(1) 确定评级指标权重。按式(5)计算,得各级评价指标权重 W_i 如下:

$$W = (0.220 \ 1, 0.679 \ 9, 0.100 \ 0)$$

$$W_1 = (0.454 \ 5, 0.545 \ 5)$$

$$W_2 = (0.397 \ 1, 0.308 \ 8, 0.191 \ 2, 0.102 \ 9)$$

$$W_3 = (0.5000 \ 0, 0.500 \ 0)$$

(2) 确定隶属度矩阵。邀请10位对该工程较

熟悉的专家,根据风险量大小,对各项指标进行初始评分,分值取 0~10。对所有评分加权平均确定综合评分,评分结果见表 3。将梯形隶属度函数中 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_8$ 分别赋值 1, 2, 3, \dots , 8, 将表 3 中各指标评分结果代入式(6)~(10),得评价指标的隶属度矩阵如下:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 1.000 & 0 & 0.000 & 0 \\ 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 0.300 & 0 & 0.700 & 0 & 0.000 & 0 \end{bmatrix}$$
$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.700 & 0 & 0.300 & 0 & 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 0.000 & 0 \\ 0.000 & 0 & 0.950 & 0 & 0.050 & 0 & 0.000 & 0 & 0.000 & 0 \\ 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 0.250 & 0 & 0.750 & 0 & 0.000 & 0 \\ 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 1.000 & 0 \end{bmatrix}$$

表 3 风险评价指标综合评分

指标	各专家的评分										综合评分
	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5	专家 6	专家 7	专家 8	专家 9	专家 10	
U_{11}	5.5	6.5	6.0	5.5	6.5	6.0	7.0	6.0	6.0	5.5	6.05
U_{12}	6.0	5.5	5.5	6.0	5.5	6.0	5.5	5.5	6.0	5.5	5.70
U_{21}	1.0	1.5	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.0	1.0	1.5	1.30
U_{22}	3.0	3.5	3.0	2.5	3.0	3.0	3.0	3.5	3.0	3.0	3.05
U_{23}	5.5	6.0	6.0	5.5	6.0	6.0	5.5	6.0	5.0	6.0	5.75
U_{24}	9.5	9.5	9.5	9.0	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.0	9.40
U_{31}	9.0	9.5	9.0	9.0	8.5	8.5	9.0	9.0	8.5	8.5	8.90
U_{32}	8.5	9.0	9.0	9.0	8.5	9.0	8.5	9.0	9.0	9.0	8.85

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 1.000 & 0 \\ 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 0.000 & 0 \end{bmatrix}$$

(3) 进行模糊综合评价。1) 一级模糊综合评价。按式(12)计算,得一级模糊综合评价结果分别见式(13)~(15)。根据最大隶属度原则,勘察设计风险所处等级为 v_4 级,风险较低;地质条件风险所处等级为 v_2 级,风险较高;施工风险所处等级为 v_5 级,风险低。2) 二级模糊综合评价。按式(12)计算,得二级模糊综合评价结果见式(16)。根据最大隶属度原则,公路隧道塌方总体风险所处等级为 v_4 级,风险较低。

$$B_1 = W_1 \circ R_1 = (0.454 \ 5, 0.545 \ 5) \circ$$
$$\begin{bmatrix} 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 1.000 & 0 & 0.000 & 0 \\ 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 0.300 & 0 & 0.700 & 0 & 0.000 & 0 \end{bmatrix} =$$
$$(0.000 \ 0, 0.000 \ 0, 0.163 \ 7, 0.836 \ 3, 0.000 \ 0) \quad (13)$$

$$B_2 = W_2 \circ R_2 = (0.397 \ 1, 0.308 \ 8, 0.191 \ 2, 0.102 \ 9) \circ$$
$$\begin{bmatrix} 0.700 & 0 & 0.300 & 0 & 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 0.000 & 0 \\ 0.000 & 0 & 0.950 & 0 & 0.050 & 0 & 0.000 & 0 & 0.000 & 0 \\ 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 0.250 & 0 & 0.750 & 0 & 0.000 & 0 \\ 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 1.000 & 0 \end{bmatrix} =$$
$$(0.278 \ 0, 0.412 \ 5, 0.063 \ 2, 0.143 \ 4, 0.102 \ 9) \quad (14)$$

$$B_3 = W_3 \circ R_3 = (0.500 \ 0, 0.500 \ 0) \circ$$
$$\begin{bmatrix} 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 1.000 & 0 \\ 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 0.000 & 0 \end{bmatrix} =$$

$$(0.000 \ 0, 0.000 \ 0, 0.000 \ 0, 0.000 \ 0, 1.000 \ 0) \quad (15)$$

$$B = W \circ R = (0.220 \ 1, 0.679 \ 9, 0.100 \ 0) \circ$$

$$\begin{bmatrix} 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 0.163 & 7 & 0.836 & 3 & 0.000 & 0 \\ 0.278 & 0 & 0.412 & 5 & 0.063 & 2 & 0.143 & 4 & 0.102 & 9 \\ 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 1.000 & 0 \end{bmatrix} =$$
$$(0.189 \ 0, 0.280 \ 5, 0.079 \ 0, 0.281 \ 6, 0.170 \ 0) \quad (16)$$

5 结论与建议

通过查阅相关文献资料,并听取专家意见,结合评价工程的实际情况建立公路隧道塌方风险评价指标体系,该评价指标体系包含勘察设计风险、地质条件风险等 3 个一级评价指标,地质勘察风险、开挖跨度风险等 8 个二级评价指标。基于粗糙集理论确定评价指标客观权重,同时运用层次分析法对客观权重进行修正,充分考虑决策者的阅历、经验,使权重分配更合理。运用该评价模型对某拟建公路隧道塌方风险进行评价,得出一级指标勘察设计风险、地质条件风险、施工风险所处风险等级分别为 v_4 、 v_2 、 v_5 级,即风险较低、风险较高、风险低,隧道塌方总体风险为 v_4 级,风险较低。虽然总体风险处于较低状态,但一级指标中地质条件风险较高。该工程围岩级别为 V 级,节理裂隙发育,地下水较丰富,建议提前采取相应措施加以应对。

参考文献:

- [1] 何美丽,刘霖,刘浪,等.隧道塌方风险评价的未知测度模型及工程应用[J].中南大学学报:自然科学版,2012,43(9).
- [2] 苏永华,刘科伟,张进华.基于粗糙集重心理论的公路隧道塌方风险分析[J].湖南大学学报:自然科学版,2013,40(1).
- [3] 关晓吉.基于可拓联系云模型的隧道塌方风险等级评价方法[J].中国安全生产科学技术,2018,14(11).
- [4] 杨卓,戎晓力,卢浩,等.基于熵权物元可拓理论的隧道塌方风险评估[J].安全与环境学报,2016,16(2).
- [5] 秦胜伍,吕江峰,陈剑平,等.基于最大熵一属性区间识别的隧道塌方风险评价[J].人民长江,2017,48(19).
- [6] 孙彦峰.理想点法在隧道塌方风险等级评价中的应用[J].隧道建设,2016,36(11).
- [7] 陈建宏,宋灿,邬书良,等.改进未知测度理论的隧道塌方风险评估及控制[J].黄金科学技术,2016,24(6).
- [8] 陈诚.基于改进熵权-TOPSIS的隧道塌方风险等级分类[J].水力发电,2016,42(6).
- [9] 陈洁金.山岭隧道塌方风险模糊层次分析[J].岩土力学,2009,30(8).
- [10] 吕擎峰,霍振升,赵本海,等.基于模糊层次和后果当量法的隧道塌方风险评估[J].隧道建设,2018,38(增刊2).
- [11] 周建昆,吴坚.岩石公路隧道塌方风险事故树分析[J].地下空间与工程学报,2008,4(6).
- [12] 安岩,邹志红,王晓静.基于粗糙集理论的水质模糊综合评价[J].工业工程,2015,18(1).
- [13] Pawlak Z. Rough sets [J]. International Journal of Information and Computer Science, 1982, 11(5).
- [14] 万荣,阎瑞霞.基于粗糙集和模糊层次分析法的客户需求权重确定方法[J].科技管理研究,2018(4).
- [15] 王先甲,张熠.基于 AHP 和 DEA 的非均一化灰色关联方法[J].系统工程理论与实践,2011,31(7).
- [16] 曹未,蒲光杰.基于 AHP-熵权的模糊物元模型在 DSM 效果综合评价中的运用[J].电力与能源,2015,36(5).
- [17] 徐文娟.城市生态文明建设模糊综合评价[J].上海工程技术大学学报,2017,31(4).

收稿日期:2020-01-19

(上接第 103 页)

公路立交设计采用菱形立交方案时,为方便收费管理、控制投资,通过调整匝道布置减少收费站的设置,控制投资、节约造价;基于交通安全、通行效率考虑而进行变异的菱形立交,其目的主要是改善菱形立交中次要道路转向交通的交通组织、通行效率,通过适当的变形提高菱形立交的交通适应性。在进行具体菱形立交方案设计时,应综合各方面因素,因地制宜地选择立交形式,安全、经济地实现立交功能,达到立交设计目标。

参考文献:

- [1] 刘俊,代茂华,龚凤刚,等.菱形立交在“不收费”高速公路中的应用探讨[J].华东公路,2014(5).
- [2] 刘子剑.互通式立体交叉设计原理与应用[M].北京:人民交通出版社,2015.
- [3] 胡鹏.基于用地限制的菱形立交改型研究[J].城市道桥与防洪,2015(7).

收稿日期:2019-07-26

(上接第 143 页)

(5) 整治结束后,对整治地段进行检测,达不到要求的返工处理。

4 结语

该文针对隧道后期缺陷整治处理措施进行梳理,根据隧道工程缺陷特性选择合适的整治方法,确保缺陷整治处理到位不留隐患,保证列车的安全运行。隧道施工中应重视过程控制、过程管理,防患于未然,以尽量少地出现工程缺陷,将损失降到最低。

参考文献:

- [1] 铁运函[2004]174号,铁路运营隧道衬砌安全等级评定暂行规定[S].
- [2] GB 50010-2010,混凝土结构设计规范[S].
- [3] 黄可臣.隧道病害整治施工工艺[J].建筑工程技术与设计,2015(10).
- [4] 段超.浅谈高速铁路隧道防水施工技术[J].科技创新导报,2011(29).
- [5] 田单,张炜.浅谈高速铁路隧道质量缺陷整治方法[J].江西建材,2017(15).

收稿日期:2020-01-25