

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2015.04.12

一种深长隧道涌突水灾害危险性评价模型及其应用

张志成¹, 卢浩¹, 李集¹, 常乐², 左翠凤¹

(1. 解放军理工大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏南京 210007;

2. 解放军94968部, 江苏南京 211100)

摘要: 由于用层次分析法进行深长隧道涌突水灾害危险性评价难以充分反映涌突水灾害危险性评价的高维非线性化特征和致灾因子间的正反馈作用, 本文保留了层次分析法层次化、数量化的优点, 同时引入致灾因子之间“乘”的形式和致灾因子影响系数(如地层岩溶发育影响系数), 建立了深长隧道涌突水灾害危险性评价模型。以某隧道的涌突水危险性评价为例, 模型计算结果表明风险段的危险性等级变化趋势与专家定性评价的一致, 并且评价结果更客观。危险性评价模型更加贴近涌突水致灾因子间的正反馈作用, 更好反映风险的非线性变化特征, 有助于深长隧道施工阶段涌突水风险动态评估和风险即时控制。

关键词: 涌突水; 危险性; 评价模型; 深长隧道

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2015)04-0067-08

A risk assessment model of water inrush in long deep-located tunnels and its applications

ZHANG Zhicheng¹, LU Hao¹, LI Ji¹, CHANG Le², ZUO Cuifeng¹

(1. PLA University of Science and Technology, State Key Laboratory of Explosion & Impact and Disaster Prevention & Mitigation, Nanjing, Jiangsu 210007, China;

2. 94968 PLA Troops, Nanjing, Jiangsu 211100, China)

Abstract: In the process of evaluating water inrush risks in long deep-located tunnels, owing to the difficulty of reflecting the high dimensional nonlinear feature of water inrush risk assessment and the positive feedback of hazard factors by using analytic hierarchy process, this paper reserves the hierarchical and quantitative advantages of analytic hierarchy process, and introduces the form of multiplication between the hazard factors and the influential coefficient of hazard factor (such as the influential coefficient of stratum karst factor). Then the evaluation model was established. Taking the risk assessment of water inrush in one tunnel as example, the variation trend of risk grade evaluated by the new model is consistent with that evaluated by qualitative assessment. And the results gained from the new model are more objective. The new evaluation model is closer to the positive feedback of hazard factors and nonlinear mutative feature of water inrush risk; it is helpful to dynamic risk evaluation and instantaneous risk control during construction period in long deep-located tunnels.

Keywords: water inrush; risk; assessment model; long deep-located tunnels

收稿日期: 2015-03-20; 修订日期: 2015-07-30

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB036005)

第一作者: 张志成(1990-), 男, 福建福安人, 硕士研究生, 主要从事岩土力学及地质灾害风险管理学习与研究。E-mail: zzcheng2288@163.com

0 引言

深长隧道涌突水灾害危险性评价是对各种复杂致灾风险因素进行系统化分析的过程,也是针对涌突水灾害发生的可能性进行定量化的过程^[1]。国内外学者在隧道灾害风险方面、煤矿灾害风险及其他地下工程灾害风险评估方法及应用方面做了大量研究,取得了很多有益成果。黄小城等^[2]基于可拓理论建立岩溶隧道可拓风险评价模型;匡星等^[3]基于模糊变换原理和最大隶属度原则,针对岩溶涌突水灾害,建立了模糊综合评价模型;杜毓超等^[4]基于 AHP 对岩溶涌水危险性因素进行量化,建立了专家评判系统;周宗青等^[5]基于属性数学理论建立了岩溶隧道涌突水危险性评价属性识别模型;许振浩等^[6]利用频数统计法得出涌突水致灾因素的客观权重,同时基于层次分析法提出三阶段的风险评估和控制方法;张隆等^[7]把层次分析法与 GIS 相结合,进行了煤层底板突水脆弱性评价; Aalianvari A 等^[8]利用层次分析法和模糊德尔菲法对隧道发生突水时的突水量进行预测和评估分级; Jurado A 等^[9]开发了一个通用的概率风险评估模型框架,将信息提取、随机微分方程解法和专家评判相结合; Aliahmadi 等^[10]通过把模糊层次分析法和对策论结合在一起,提出了可应用于隧道设计、施工、运营的智能专家决策法。这些学者关于风险的模糊不确定性、权重的优化以及风险的控制等方面展开了研究,但基于突水致灾模式下的风险评价较少或者对权重的优化不够。

针对上述问题,本文受层次分析法启发,结合突水致灾模式对突水灾害进行层次化分析和权重优化,建立一种深长隧道涌突水灾害危险性评价模型,以期更好考虑突水灾害风险的高维非线性特征和致灾因子间的正反馈作用,并将该评价模型应用于某隧道工程。

1 深长隧道涌突水灾害危险性评价模型

1.1 涌突水致灾因子体系的建立

大量专家学者通过对深长隧道涌突水成灾机理的研究,发现导致涌突水灾害发生的因素众多^[11-13],而致灾地质构造和地下水是最主要的两个方面。致灾地

质构造为含水构造能量的存储提供地质条件,其关键导水通道作用的发挥有利于地下水的溶蚀。地下水作为涌突水灾害发生的物质基础,其动力性能是致灾地质构造扩展的控制因素,地下水头高度可以很好表征地下水的充盈程度。为了反映这两个致灾因子间的相互作用,引入“乘”的形式,即隧道涌突水危险度(Z)评分值等于致灾地质构造(C_1)评分值与地下水头高度影响(C_2)评分值相乘,其中涌突水灾害危险性用危险度(Z)来度量。

致灾地质构造分为不良地质构造、岩溶构造和裂隙构造,它们分别以不同的构造形态因素为主要控制因素对应着不同的致灾模式,在对隧道涌突水事故案例统计分析发现,岩溶突水居多且危害最大,其次是断层突水,再次是裂隙突水。从致灾的模式来看,不良地质构造、岩溶构造和裂隙构造三者之间的联系较少、独立性强,分别对致灾地质构造因素的影响作用可以通过权重来考虑。

隧道涌突水灾害的发生是含水构造能量的存储与释放的过程,含水构造能量的存储是致灾的关键环节,是通过含水构造存储围岩应变能和地下水势能完成的。用地下水头高度来考虑地下水势能对致灾的控制作用,围岩的应变能是通过地下水、重力以及构造应力作用而形成的。因此,构建致灾体系需以地下水头高度影响为基础,地下水头高度影响评级标准^[6]见表 1。

表 1 地下水头高度影响致灾因子评级

Table 1 Grade of hazard factors of ground water height

致灾因子	IV	III	II	I
地下水头高度影响 (地下水头与隧道底板间的高差 h/m)	$h \geq 60$	$60 > h \geq 30$	$30 > h \geq 0$	$h > 0$

基于致灾因子的层次化结构,通过分析各层次致灾因子的关系确定合适的数学表达关系式,致灾因子的层次化结构框图见图 1。

1.1.1 不良地质构造

不良地质构造包括断层构造(C_{112})和褶皱构造(C_{111}),断层不仅是地下水的赋存和导水空间,而且影响着岩溶的发育方向,断层规模(C_{1121})、断层性质(C_{1122})和断层两侧的岩石性质(C_{1123})是地下水贮存、运移的基础,用断裂破裂带宽度(C_{1121-1})和断裂

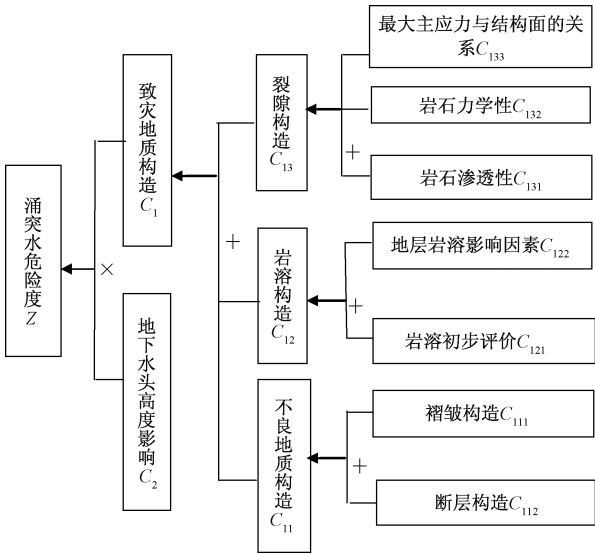


图 1 深长隧道涌突水致灾因子结构

Fig.1 The structure of hazard factors in deep and long tunnels

注:结构框图中“×”号代表本层次致灾因子评分值相乘,而“+”代表本层次致灾因子评分值与权重值乘积的结果相加。

影响带宽度 (C_{1121-2}) 来表征断层规模,断层性质决定着断层的导水性质和导水能力,断层两侧的岩石性质决定着断层充填物的岩性和结构,影响着断层发展的方向。褶皱的不同部位的变形机理和岩体的破裂程度为地下水的富集提供条件,褶皱构造 (C_{111}) 通过褶皱倾角 (C_{1111}) 和褶皱形态 (C_{1112}) 来表征,前者是通过定量的评价,而后者是通过定性的判断,两者共同描述了褶皱的变形特征,这些致灾因子的评级标准^[11]见表 2。

表 2 不良地质构造致灾因子评级						
Table 2 Grade of hazard factors of unfavorable geology						
致灾因子		V	IV	III	II	I
断层 规模	断裂破碎带宽度/m	> 10	2 ~ 10	1 ~ 2	0.1 ~ 1	< 0.1
	断裂影响带宽度/m	> 50	20 ~ 50	10 ~ 20	5 ~ 10	1 ~ 5
断层性质		张性	张扭	扭性	压扭	压性
断层两侧的岩石性质		—	—	两侧硬岩或可溶岩	一侧硬岩、一侧软岩	两侧软岩
褶皱倾角		—	—	> 60°	30° ~ 60°	< 30°
褶皱形态		—	—	紧闭型	中缓型	宽缓型

1.1.2 岩溶构造

岩溶突水是深长隧道涌突水的主要方面,岩溶构造在致灾地质构造中占主要地位,岩溶构造 (C_{12}) 由岩

溶初步评价 (C_{121}) 和地层岩溶影响因素 (C_{122}) 共同决定,岩溶初步评价表征利用现有的地质勘查手段,并结合岩溶层组地表出露条件,对岩溶发育情况做一个初步的评判。仅仅凭借初步评价是难以评价岩溶的实际发育情况,因此,地层岩溶影响因素是表征诸多影响岩溶发育的因素共同对岩溶发育的作用,是对岩溶初步评价的补充,两者独立性强,按权重对岩溶构造起主控作用。

(1) 岩溶初步评价

对岩溶发育情况的初步评价主要通过五个特征性致灾因子来实现,即地表岩溶发育密度 (C_{1211})、钻孔岩溶率 (C_{1212})、钻孔遇洞率 (C_{1213})、泉流量 (C_{1214}) 和单位涌水量 (C_{1215}),根据《岩溶地区工程地质调查规程》^[15],这些致灾因子的评级标准见表 3。

表 3 岩溶初步评价致灾因子评级			
Table 3 Grade of hazard factors of preliminary evaluation to the karst development			
致灾因子	III	II	I
地表岩溶发育密度/(个/km)	>5	5~1	<1
钻孔岩溶/%	>10	10~3	<3
钻孔遇洞/%	>60	60~30	<30
泉流量/(L/s)	>100	100~10	<10
单位涌水量/(L/s·m)	>1	0.1~1	<0.1

(2) 地层岩溶影响因素

地层岩溶影响因素是以岩溶发育地质基础为基础的,岩溶发育地质基础 (C_{1221}) 通过岩石的结构类型 (C_{1221-2}) 和方解石的百分含量 (C_{1221-1}) 来表征;其他因素对地层岩溶影响因素的影响通过地层岩溶发育影响系数 (C_{1222}) 来考虑,这些因素包括围岩强度 (C_{1222-1})、岩层组合 (C_{1222-2})、不良地质构造 (C_{1222-3})、地下水动力循环条件 (C_{1222-4})、隧道所处地下流通带 (C_{1222-5})、岩层产状 (C_{1222-6})、与非可溶岩的接触地带 (C_{1222-7}) 和地表汇水条件 (C_{1222-8})。地层影响因素评分值等于岩溶发育地质基础评分值乘与地层岩溶发育影响系数,地层岩溶影响因素结构图见图 2。

为了考虑不良地质构造对岩溶发育的正反馈作用,即不良的断层构造和褶皱构造促进岩溶的发育,在对地层岩溶发育影响系数的计算中考虑不良地质构造的作用,即计入不良地质构造 (C_{1222-3}) 对地层岩溶发育影响系数 (C_{1222}) 的影响。地表汇水条件由负地形

面积比($C_{1222-81}$)、斜坡坡度($C_{1222-82}$)和地表岩溶形态($C_{1222-83}$)按权重进行控制。地层岩溶发育影响系数控制在 0~1,地层岩溶影响因素下层的致灾因子评级标准^[16]见表 4。

1.1.3 裂隙构造

裂隙构造(C_{13})主要受控于岩石的渗透性(C_{131})、岩石力学性质(C_{132})和最大主应力与结构面的关系(C_{133}),岩石的渗透性为地下水的赋存和运移提供条件;岩石的力学性质是岩石受力破坏的内在因素,一般认为与基岩透水性有关的裂隙主要发生在坚硬的岩石中;地应力与岩石主要结构面的关系影响着裂隙的发育方向和导水性。三者独立性强,按权重对裂隙起主控作用,裂隙构造致灾因子评级标准见表 5。

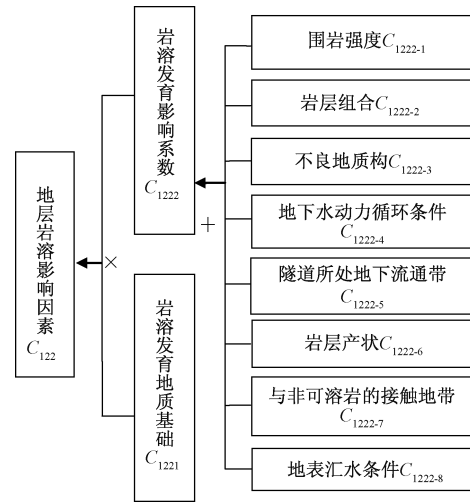


图 2 地层岩溶影响因素结构

Fig.2 The structure of hazard factors of stratum factors

表 4 地层岩溶影响因素致灾因子评级

Table 4 Grade of hazard factors of stratum karst factors

风险指标	V	IV	III	II	I
岩石结构类型	灰岩	白云质灰岩、泥质云灰岩	灰质白云岩、白云岩、大理岩	泥质灰岩、泥质灰云岩	泥质白云岩、其他非碳酸盐类
方解石百分含量/%	>75	50~75	25~50	5~25	0~5
围岩强度	—	围岩级别 V 或 VI	围岩级别 IV	围岩级别 III	围岩级别 II 或 I
岩层组合	—	厚而纯的可溶岩	可溶岩层中夹非可溶性岩	可溶性岩层与非可溶性岩层相间排列	非可溶性岩层中夹可溶性岩
地下水动力循环条件 (地下水中 Ca^{2+} 饱和指数)	>1.2	0.8~1.2	0.4~0.8	0~0.4	<0
隧道所处地下流通带	—	水平径流带	水平-垂直交替带	垂直渗流带	深部循环带
岩层产状(岩层倾向)	—	$25^{\circ} \leq \varphi \leq 65^{\circ}$	$10^{\circ} \leq \varphi < 25^{\circ}$ 或 $65^{\circ} < \varphi \leq 80^{\circ}$	$80^{\circ} < \varphi \leq 90^{\circ}$	$0^{\circ} \leq \varphi < 10^{\circ}$
与非可溶岩的接触地带	—	—	—	是	否
负地形面积比/%	70~100	50~70	25~50	10~25	0~10
斜坡坡度	<10°	20°~10°	30°~20°	45°~30°	>45°
地表岩溶形态	峰丛、落水洞、峰林	溶蚀平原、缓坡台地	陡坡台地、槽谷、溶沟、溶丘	中完整斜坡	完整斜坡

表 5 裂隙构造致灾因子评级

Table 5 Grade of hazard factors of crack formation

风险指标	IV	III	II	I
岩石透水性 (渗透系数表征 m/d)	3~10	1~3	0.1~1	<0.1
岩石力学性质	—	硬岩	硬岩-软岩	软岩
最大主应力与结构面关系	—	平行	斜交	垂直

1.1.4 涌突水危险性评价模型计算公式

本层次致灾因子按权重对上层次致灾因子起控制作用的分值计算采用危险性评价一般模型公式: $R = \sum_{i=1}^n w_i \times c_i$,同时引入“乘”的形式和致灾因子的影响系数,隧道涌突水危险度(Z)评分值限定在百分制内、

致灾因子影响系数限制在 0~1,以及其他致灾因子评分值控制在十分以内。建立涌突水灾害危险性评价数学计算公式,具体形式如下:

第一层结构: $Z = C_1 \times C_2$ (1)

第二层结构: $C_1 = W_{11} \times C_{11} + W_{12} \times C_{12} + W_{13} \times C_{13}$ (2)

第三层结构: $C_{11} = W_{112} \times C_{112} + W_{111} \times C_{111}$ (3)

$C_{12} = W_{121} \times C_{121} + W_{122} \times C_{122}$ (4)

$C_{13} = W_{131} \times C_{131} + W_{132} \times C_{132} + W_{133} \times C_{133}$ (5)

第四层结构: $C_{122} = C_{1221} \times C_{1222}$ (6)

$C_{111} = W_{1111} \times C_{1111} + W_{1112} \times C_{1112}$ (7)

$$C_{112} = W_{1123} \times C_{1123} + W_{1122} \times C_{1122} + W_{1121} \times C_{1121} \quad (8)$$
$$C_{121} = W_{1211} \times C_{1211} + W_{1212} \times C_{1212} + W_{1213} \times C_{1213} + W_{1214} \times C_{1214} + W_{1215} \times C_{1215} \quad (9)$$

第五层结构: $C_{1221} = W_{1221-1} \times C_{1221-1} + W_{1221-2} \times C_{1221-2} \quad (10)$

$$C_{1222} = W_{1222-1} \times C_{1222-1} + W_{1222-2} \times C_{1222-2} + W_{1222-3} \times C_{1222-3} + W_{1222-4} \times C_{1222-4} + W_{1222-5} \times C_{1222-5} + W_{1222-6} \times C_{1222-6} + W_{1222-7} \times C_{1222-7} + W_{1222-8} \times C_{1222-8} \quad (11)$$

第六层结构: $C_{1222-8} = W_{1222-81} \times C_{1222-81} + W_{1222-82} \times C_{1222-82} + W_{1222-83} \times C_{1222-83} \quad (12)$

注: W_i 为致灾因子权重值, C_i 为致灾因子评价价值

李术才给出了主观与客观评价致灾因子的权重值^[14], 本文在此基础上将涌突水灾害各层次致灾因子按重要度进行排序, 根据致灾因子重要度排序引入比率标度法构建判断矩阵来计算本层次致灾因子相对上层致灾因子的权重, 计算得公式(2)~(12)致灾因子权重值 W_i (不包括按“乘”或者按权重线性相加求得的致灾因子)见表 6。

表 6 各层致灾因子权重值

Table 6 Grade of hazard factors in every grade

致灾因子 层次结构	致灾因子(权重值)			
第二层	C_{11} (0.2583)	C_{12} (0.6370)	C_{13} (0.1047)	
	C_{121} (0.25)	C_{122} (0.75)	C_{111} (0.1667)	C_{112}
第三层	(0.8333)	C_{131} (0.7306)	C_{132} (0.1884)	C_{133}
	(0.0810)			
第四层	C_{1211} (0.1651)	C_{1212} (0.0934)	C_{1213} (0.0598)	
	C_{1214} (0.0353)	C_{1215} (0.6464)	C_{1121} (0.7306)	
	C_{1122} (0.1884)	C_{1123} (0.0810)	C_{1111} (0.0875)	
	C_{1112} (0.1250)			
第五层	C_{1221-1} (0.0833)	C_{1221-2} (0.1667)	C_{1121-1} (0.0833)	
	C_{1121-2} (0.1667)	C_{1222-1} (0.2241)	C_{1222-2} (0.1478)	
	C_{1222-3} (0.3587)	C_{1222-4} (0.0736)	C_{1222-5} (0.0468)	
	C_{1222-6} (0.0213)	C_{1222-7} (0.0959)	C_{1222-8} (0.0318)	
第六层	$C_{1222-81}$ (0.7854)	$C_{1222-82}$ (0.1488)	$C_{1222-83}$	
	(0.0658)			

1.2 涌突水灾害危险度等级的划分

参考《铁路隧道风险评估与管理暂行规定》给出的事故发生概率等级标准^[17-19], 将隧道涌突水灾害发生概率确定见表 7。涌突水灾害危险性评价的结果实际上就是在施工期内涌突水灾害事件出现的可能性大小(概率), 无论定性分析模型得出的危险性评价结果多是诸如“较危险”、“危险”的描述性判断, 还是定量数学模型得出的危险性评价结果的一

个综合表征。在实际应用中, 得出的危险性评价结果往往不具备明确的时间标度, 针对涌突水灾害危险性等级进行概率化的表达是尤其困难, 为此, 参考以往涌突水灾害危险性评价的成熟经验和工程界普遍接受的风险接受准则, 涌突水风险的危险度分级(概率分级)主要以综合描述和单点最大涌突水量为依据(表 8)。

表 7 涌突水灾害发生概率等级标准

Table 7 Grade division standard of water intrush

概率范围	中心值	概率等级描述	概率等级
>0.3	1	很可能	I
0.03~0.3	0.1	可能	II
0.003~0.03	0.01	偶然	III
0.0003~0.003	0.001	不可能	IV

表 8 隧道涌突水灾害危险度等级划分依据

Table 8 Grade division basis of water intrush in tunnels

涌突水综合描述和单点最大涌突水量	概率等级
产生大规模突发性涌突水灾害单点最大涌突水量为 $10^3 \sim 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$	I
产生中等规模突发性涌突水灾害单点最大涌突水量为 $10^2 \sim 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$	II
产生较小规模突发性涌突水局部灾害单点最大涌突水量为 $10 \sim 10^2 \text{ m}^3/\text{h}$	III
产生小规模突发性涌突水灾害单点最大涌突水量为 $< 10 \text{ m}^3/\text{h}$	IV

按照表 8 中的标准, 选取以往涌突水灾害案例进行估计打分, 通过分析灾害案例计算分值的聚类特征, 将隧道涌突水风险危险度(Z 评分)分级标准确定见表 9。基于已发生的涌突水灾害建立的危险度分级标准能更客观的定级, 这样能避免风险评价中主观的风险等级“就高避低”的保守做法。

表 9 隧道涌突水灾害危险度等级划分标准

Table 9 Grade division standard of water intrush risk

I	II	III	IV
>40	26~40	10~26	<10

2 评价模型在某隧道的应用

2.1 工程概况

某隧道左线 D2K91+020~D2K110+994.3, 全长 19974.3 m; 右线 YD2K91+002~YD2K111+046, 全长 20044.0 m, 隧道为单面上坡, 最大埋深约 1445.5 m。隧道自东向西主要有 3 条主干断裂带, 同时, 隧道穿越 4 个断层, 隧道开挖地段地表水主要为常年性流水, 受大

气降水补给,部分受基岩裂隙水补给,地表水受降雨影响明显,而隧道所处地区地下水有孔隙水、基岩裂隙水、构造裂隙水、岩溶水分布;隧道所处的岩溶段主要有 D1K91 + 020 ~ D1K91 + 560、D1K93 + 440 ~ D2K96 + 250、D2K96 + 580 ~ D2K96 + 770,其余段落为含有夹层或透镜状灰岩,岩溶段岩溶发育主要以中等发育为主。

2.2 评价模型应用及对比较验证

选取某隧道全线 D2K91 + 004 ~ D2K110 + 985,分成 129 段,现举其中一段进行分析。例如,D2K91 + 550 ~ D2K91 + 570 风险段主要处于泥盆系中统雾组以白云质灰岩为主的可熔岩地层区,该段岩溶初步发育为“弱”,处于可熔岩与非可溶岩接触地带,以 V 级围岩为主;隧道段穿越断层,断层破碎带宽度为 80 ~ 100 m,断裂影响宽度为 325 m,断层两侧为硬岩;隧道处于地下水深部循环带,地层含基岩裂隙水,静止水位至隧道底深度为 50 m,按照表 1 ~ 表 5 评级标准评级,各致灾因子分值可以通过等级进行十分制换算或者下层次致灾因子的计算求得,各致灾因子具体分值见表 10。

表 10 D2K91 + 550 ~ D2K91 + 570 风险段各致灾因子评分值
Table 10 The value of hazard factors from D2K91 + 550 to D2K91 + 570

致灾因子 层次结构	致灾因子(分值)			
第一层	$C_2(7.5)$			
第三层	$C_{121}(2)$	$C_{131}(5)$	$C_{132}(10)$	$C_{133}(6.67)$
第四层	$C_{1111}(0)$	$C_{1112}(0)$	$C_{1221}(4)$	$C_{1122}(8)$
	$C_{1123}(0)$	$C_{1121-1}(10)$	$C_{1121-2}(10)$	$C_{1222-1}(8.33)$
第五层	$C_{1222-2}(10)$	$C_{1222-3}(8.81)$	$C_{1222-4}(4)$	$C_{1222-5}(2.5)$
	$C_{1222-6}(0)$	$C_{1222-7}(5)$	$C_{1222-81}(6)$	$C_{1222-82}(8)$
第六层	$C_{1222-83}(6)$			

将各层的致灾因子权重值代入模型计算公式之中,求得涌突水灾害危险度为,根据表 9 危险性等级划分标准可以确定该段等级是 I 级,而专家定性评价该段等级为 II 级,通过反观地质情况,认为确定等级为 I 级是更合理的。由于该风险段长 20 m,主要为断层破碎带,设计图纸在该段有断层破碎带的特殊设计和帷幕注浆设计,同时在施工时提前打超前小导管,并有多台抽水设备排水,进行多次全断面超前注浆和围岩加固,从而有效的避免涌突水灾害的发生,应用模型确定的风险等级对设计和施工都具有指导意义。现把全线 129 段的模型计算结果和专家定性评价(等级以百分制换算)制作成柱状图见图 3 和图 4。

根据隧道涌突水灾害危险度等级划分标准(表

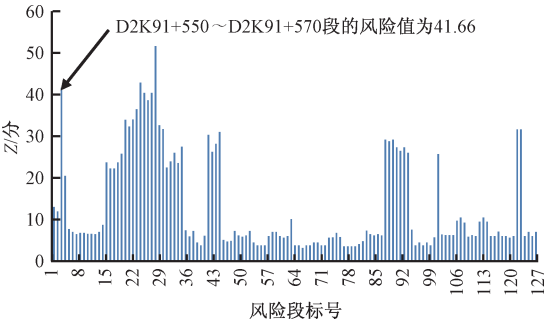


图 3 风险段危险度定量评价分值分布
Fig.3 The value distribution of quantitative evaluation for risk segment

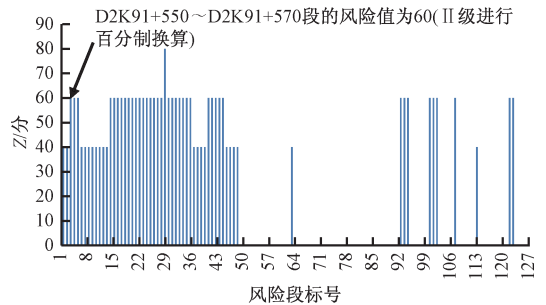


图 4 风险段危险度定性分析评级分布
Fig.4 The grade distribution of qualitative risk evaluation for risk segment

9),统计隧道 129 段风险段的危险度等级所占的比例,见图 5 和图 6。

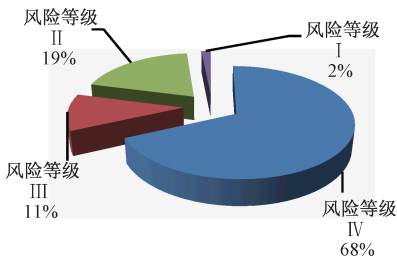


图 5 风险段涌突水定量评价分级
Fig.5 The grade division of quantitative evaluation for risk segment

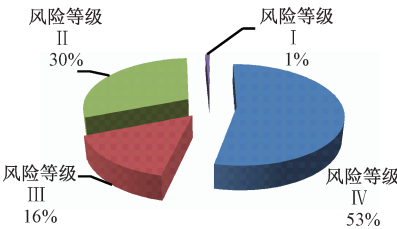


图 6 风险段涌突水定性分析评级
Fig.6 The grade division of qualitative analysis for risk segment

通过统计隧道 129 段风险段定量和定性所评等级有差异的风险段数(表 11),可以看出部分风险段的定性分析评级与量化的风险危险度评级不相一致,大部分量化评级都相对低一级,部分定性评级为高风险的风险段量化评级为极高风险。针对出现评级不一致的风险段,反查铁路隧道勘察资料与风险评估报告,通过综合分析了突水风险因素关系,认为新的量化涌突水危险性评价方法更加合理,评价结果更加适用。

表 11 定量评价与定性评价涌突水等级差别
Table 11 The grade difference of water intrush risk between quantitative evaluation and qualitative evaluation

定量评价	定性评价	等级差别风险段数
I	II	5
III	II	11
IV	II	7
IV	III	17
II	IV	5
II	I	1

3 结论

(1) 本文将致灾地质构造划分为裂隙构造、岩溶构造和不良地质构造三大类,与此同时,基于地下水和致灾地质构造,引入了致灾因子“乘”的形式和致灾因子影响系数(如地层岩溶发育影响系数),建立了一种深长隧道涌突水灾害危险性评价模型。

(2) 基于对致灾因子主观评价和客观评价相结合确定的权重并非固定不变,随着更多工程案例的应用和统计分析,权重可以通过不断迭代求得,因此模型对工程的适用性较强。

(3) 将危险性评价模型应用到某隧道的危险性评价中,可以大致反映专家评判认识,但风险的非线性变化趋势更明显,通过超前预报对地质信息进行更新,危险性评价模型可用于施工阶段中,对隧道施工具有一定指导意义。

参考文献:

[1] 沈详明,刘坡拉,汪继锋. 基于层次分析法的铁路岩溶隧道突水风险评价[J]. 铁道工程学报,2010(12):56-63.
SHEN Xiangming, LIU Pola, WANG Jifeng. Evaluation of water - intrush risks of karst tunnel with

analytic hierarchy process [J]. Journal of Railway Engineering Science,2010(12):56-63.
[2] 黄小城,陈秋南,阳跃朋,等. 可拓理论对复杂条件下岩溶隧道的风险评估[J]. 地下空间与工程学报,2013,9(5):1179-1185.
HUANG Xiaocheng, CHEN Qiunan, YANG Yuepeng, et al. Risk evaluation of karst tunnel under complex geological condition with extension theory [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2013,9(5):1179-1185.
[3] 匡星,白明洲,王成亮,等. 基于模糊评价方法的隧道岩溶突水地质灾害综合预警方法[J]. 公路交通科技,2010,27(11):100-103.
KUANG Xing, BAI Mingzhou, WANG Chengliang, et al. Research of comprehensive warning of water intrush hazards in karst tunnel based on fuzzy evaluation method[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2010,27(11):100-103.
[4] 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.
DU Yuchao, HAN Xingrui, LI Zhaolin. Professional evaluating system for karst tunnel gusing based on AHP and its application [J]. Carsologica Sinica, 2009,28(3):281-287.
[5] 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工程应用[J]. 岩土力学学报,2013,34(3):818-826.
ZHOU Zongqing, LI Shucai, LI Liping, et al. Attribute recognition model of fatalness assessment of water intrush in karst tunnels and its application[J]. Rock and Soil Mechanics,2013,34(3):818-826.
[6] 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]. 岩土力学学报,2011,32(6):1757-1766.
XU Zhenhao, LI Shucai, LI Liping, et al. Risk assessment of water or mud intrush of karst tunnels based on analytic hierarchy process [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(6):1757-1766.
[7] 张隆,赵海陆,田蕾. 基于 GIS 的煤层底板突水脆弱性评价——以山西曹村井田为例[J]. 中国地质灾害与防治学报,2012,23(3):86-90.
ZAHNG Long, ZHAO Hailu, TIAN Lei. The risk evaluation of coal floor intrush water based on GIS:

- example for Cao Village Ida [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23 (3): 86 – 90.
- [8] Aalianvari A, Katibeh H, Sharifzadeh M. Application of fuzzy Delphi AHP method for the estimation and classification of Ghomrud tunnel from groundwater flow hazard [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2010 (5): 275 – 284.
- [9] Jurado A, De Gaspari F, Vilarrasa V, et al. Probabilistic analysis of groundwater-related risks at subsurface excavation sites [J]. Engineering Geology, 2011 (125): 35 – 44.
- [10] Aliahmadi A, Sadjadi S J, Jafari-Eskandari M. Design a new intelligence expert decision making using game theory and fuzzy A HP to risk management in design, construction, and operation of tunnel projects (case studies: Resalat tunnel) [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010: 1 – 10.
- [11] 李利平, 李术才, 张庆松. 岩溶地区隧道裂隙水突出力学机制研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31 (2): 524 – 528.
- LI Liping, LI Shucai, ZHANG Qingsong. Study of mechanism of water inrush induced by hydraulic fracturing in karst tunnels [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (2): 524 – 528 .
- [12] 赵红梅. 滇东高原岩溶隧道涌突水灾害风险评价研究 [D]. 四川: 成都理工大学, 2013.
- ZHAO Hongmei. Study on risk evaluation of karst tunnel water bursting disaster in the plateau of eastern Yunnan [D]. Sichuan: Chendu University of Science and Technology, 2013 .
- [13] 马士伟, 梅志荣, 张军伟. 长大隧道突水突泥灾害的地质构造量化评价与监测预警 [J]. 现代隧道技术, 2009, 46 (2): 99 – 104.
- MA Shiwei, MEI Zhirong, ZHANG Junwei. Geologic structural quantitative evaluation of about geologic hazards for long and large tunnels [J]. Modern Tunneling Technology, 2009, 46 (2): 99 – 104.
- [14] 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.
- LI Liping, LI Shucai, CHENG Jun, et al. Construction license mechanism and its application based on karst water inrush risk evaluation [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (7): 1345 – 1355 .
- [15] 中华人民共和国地质矿产部. 岩溶地区工程地质调查规程 (DZ/T006 – 93) [S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- Department of Geological Mine in China. Geological survey project in karst area [S]. Beijing: China Standard Publishing House, 1993.
- [16] 李术才, 周宗青, 李利平, 等. 岩溶隧道突水风险评估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.
- LI Shucai, ZHOU Zongqing, LI Liping, et al. Risk evaluation theory and method of water inrush in karst tunnels and its applications [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (9): 1858 – 1867.
- [17] 铁建设 (2007) 200 号, 铁路隧道风险评估与管理暂行规定 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
- Railway Construction [2007] NO. 200, Provisional regulation on risk evaluation and management of railway tunnel [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2008.
- [18] 郭佳奇, 李宏飞, 徐子龙. 岩溶区隧道突水灾害防治原则及治理对策 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25 (3): 56 – 61 + 78.
- GUO Jiaqi, LI Hongfei, XU Zilong. Prevention principles and treating techniques of water inrush in karst tunnel [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25 (3): 56 – 61 + 78.
- [19] 范威, 王川, 金晓文, 等. 吉莲高速公路钟家山隧道涌突水条件分析 [J]. 水文地质工程地质, 2015, 42 (2): 38 – 43 + 51.
- FAN Wei, WANG Chuan, JIN Xiaowen, et al. Water inrush condition analysis of the Zhongjiashan tunnel in the Jilian Highway [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42 (2): 38 – 43 + 51.