

文章编号:1005-0523(2012)03-0067-07

基于AHP-模糊综合法的浅埋隧道施工风险评估

李得昌,杨新安,王树杰

(同济大学城市轨道交通与铁道工程系,上海 200092)

摘要:浅埋隧道受地质、地形、环境的影响,在施工中容易发生边坡坍塌、塌方(冒顶)、山体开裂、变形失稳等风险,结合宁安城际铁路隧道分析了浅埋隧道施工安全、工期、环境风险。介绍了基于AHP(层次分析法)的改进模糊综合法进行浅埋隧道施工风险评估的基本原理和步骤,建立了浅埋隧道施工风险层次分析模型,采用改进的模糊数构建风险发生可能性判断矩阵。最后通过风险系数确定了宁安城际铁路钟鸣一号浅埋隧道施工风险等级,结合隧道施工特点及风险评估结果,提出典型风险控制措施。

关键词:浅埋隧道;层次分析;模糊综合法;风险评估

中图分类号:U215.4

文献标志码:A

浅埋隧道较为常见,通常在隧道两端、冲沟段常为浅埋。浅埋隧道覆盖层薄、土质松散、围岩结构承载能力差,工程风险高。偏压、不良地质条件及外界环境的影响,会导致风险发生的概率增大,处理不当极易发生塌方、冒顶、山体开裂等风险。这些风险给工程带来了巨大的损失,造成很坏的社会影响,因此有必要对浅埋隧道施工风险进行研究,做到防患于未然^[1]。由于地下空间的复杂性,隧道施工风险具有随机性和模糊性的特点^[2],难以用准确的量化数据表达,以概率、统计资料、专家评判为基础的单一确定性分析方法难以准确评估风险对施工造成的影响。基于AHP的改进模糊综合法通过引入量化的计算方式,能准确分析风险发生的概率与后果等级,对浅埋隧道安全施工意义重大。本文以宁安城际铁路钟鸣一号隧道为例,分析了浅埋隧道施工期存在的风险,采用了基于AHP的改进模糊综合法对钟鸣一号隧道施工期风险进行评估,提出典型风险控制措施,为浅埋隧道施工风险管理提供参考依据。

1 工程概况

宁安城际铁路是连接南京与安庆的重要客运通道,全长257 km,设计速度 $300\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,途径平原与丘陵地带,地势起伏较大,全线有钟鸣一号、钟鸣二号、大金山、红旗一号等8座新建隧道,各隧道都有不同长度的浅埋段。钟鸣一号隧道是宁安城际铁路的重点工程,起讫里程为DK139+970~DK140+716,设计全长746 m,单洞双线隧道,全线浅埋。隧道位于长江冲积平原丘陵地段,地貌主要为剥蚀丘陵、岗地及冲积平原区。丘陵地区地形起伏大,沟谷较发育,沟谷区隧道最大埋深仅3 m。隧道全线穿越V级围岩,地表主要覆盖粉质粘土夹碎石,下伏第四系强风化沉积岩,基岩出露少,地表植被较发育。地下水主要为基岩裂隙水,不发育,隧道洞身位于地下水位以下,降雨后有渗透现象。

2 浅埋隧道施工风险

1) 洞口明挖段。全线隧道进、出口明挖段边坡最高处达20 m,边坡坡度大(1:0.75),且地表覆盖全风化粉质黏土风化层,地质条件差,易发生边坡垮塌。钟鸣一号隧道进口明暗交界处仰坡坡度大,地表覆盖

收稿日期:2012-03-09

作者简介:李得昌(1987—),男,硕士研究生,研究方向为隧道及地下工程。

为中更新统冰水沉积层粉质粘土及含圆砾粉质粘土,土质松软,遇水易软化,不稳定,易发生坍塌。

2) 洞口浅埋暗挖段。全线隧道进、出口浅埋暗挖段地质条件差,多数隧道洞身上覆粘土、粗圆砾土、石英长斑岩,深约3~12.5 m,稳定性差。钟鸣一号隧道出口偏压段围岩受力不对称,隧道成拱效果差,初期支护完成前,在围岩侧向压力下,覆盖层薄的一侧洞身易出现坍塌,形成“神仙洞”^[3]。

钟鸣一号隧道洞身上覆地层软弱,裂隙多,围岩级别低,隧道顶部掉块严重;隧道洞身位于地下水位以下,受地下水的影响,粉质黏土和全风化层易变形,向洞室临空面挤出;雨天施工时地下水丰富,土体易渗漏,容易造成围岩内细颗粒的大量流失,极易发生塌方,引起洞壁失稳和地表沉降。

3) 洞身暗挖段。由洞室开挖后上覆岩(土)体形成自然平衡拱(坍落拱)高度计算公式^[4](见式(1))可知,宁安城际铁路钟鸣一号隧道的最大塌落拱高度为15.3 m,大于隧道埋深。

$$H = \frac{B/2 + h \tan(45^\circ - \varphi/2)}{f} \quad (1)$$

式中: H 为隧道塌落拱高度; B 为隧道宽度; h 为隧道高度; φ 为土体内摩擦角; f 为岩石坚固系数。

塌落拱高大于隧道埋深,使得上覆土(岩)层受到较大的扰动,隧道变形不易控制,土(岩)层变形影响地表,容易造成山体开裂变形,造成地表塌陷;上覆层围岩级别低,无有效的承拱作用,易造成拱顶塌方^[5],坍塌严重时,极易发生冒顶;洞身围岩裂隙较发育,雨季地表水易渗入,围岩强度降低,易造成围岩变形、失稳。

3 基于AHP的改进模糊综合法的隧道风险评估

施工风险是一个由相互关联的、众多的水文地质因素构成的复杂系统,风险评估是对风险因素的系统分析。浅埋隧道施工期风险因素复杂、众多且重要程度不一,常采用概率法并以试验、统计资料和专家评判为基础,依靠宏观定性的地质分析方法进行评估,会出现较大的主观偏差,不能客观、全面、系统地评价浅埋隧道的风险^[6]。

基于AHP^[7](层次分析法)的改进模糊综合法按照一定规律将施工风险因素之间的相互关系层次化,结合模糊理论^[8-9]引入改进的模糊数,对风险因素重要度进行量化分析,最后综合风险等级评判标准,对目标风险进行等级评定。主要有以下几个步骤:①建立风险评估指标体系;②建立风险评价指标的层次模型;③构建风险发生可能性模糊判断矩阵;④风险因素权重计算;⑤综合风险等级评定。

本节结合钟鸣一号隧道施工期风险评估介绍该方法在浅埋隧道风险评估中的应用。

3.1 建立风险评估指标体系

钟鸣一号隧道施工存在的主要风险有安全风险、工期风险与环境风险,造成这些风险的因素有塌方、山体开裂变形、边坡坍塌、施工机械故障、山体塌陷、植被破坏、天气变化等,以此建立钟鸣一号隧道风险评估指标体系,见表1。其项目阶段为施工阶段,目标风险为安全、工期、环境。

表1 钟鸣一号隧道风险评估指标体系

Tab.1 Risk assessment index system of Zhongming No.1 tunnel

项目阶段	目标风险	施工方法	风险因素或风险事件
施工阶段	安全、工期、环境	矿山法	塌方,山体开裂变形,施工机械故障,山体塌陷,植被破坏
		明挖法	边坡坍塌,山体开裂变形,天气变化,其他

3.2 建立风险评价指标的层次模型

浅埋隧道施工风险为目标风险 D , 包括安全风险 B_1 、工期风险 B_2 、环境风险 B_3 、第三方风险 B_4 、投资风险 B_5 等, 这些风险在层次模型中用准则层风险表示。引起准则层风险的因素用指标层风险表示, 记为 C_{ij} , 其

中 $i,j=1,2,\cdots,n$ 。指标风险包括塌方、山体开裂变形、边坡垮塌等。目标风险、准则层风险、指标层风险之间存在复杂的耦合关系,用风险层次模型简化表示,如图1。

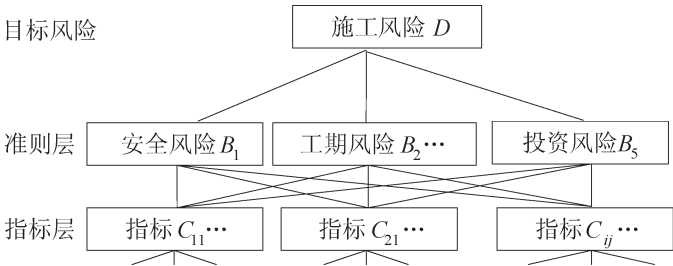


图1 风险分析层次模型
Fig.1 Hierarchical model of risk analysis

以此原理,根据表1建立钟鸣一号隧道施工风险层次模型,如下图2。

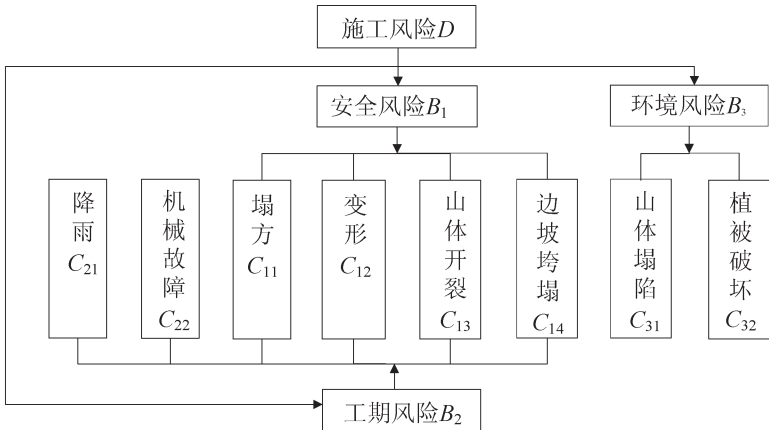


图2 钟鸣一号隧道施工风险层次模型
Fig.2 Construction risk hierarchy model of Zhongming No.1 tunnel

3.3 构建风险可能性模糊判断矩阵

利用工程地质、水文地质资料结合专家法对同一准则层下的各个指标进行两两比较判断,判断标准如表2。利用模糊数 (l_{ij},s_{ij}) 定量表示比较的结果,记为 $a_{ij}=(l_{ij},s_{ij})$,表示专家评定的风险因素 B_i 对 B_j 的相对可能性。其中: l_{ij},s_{ij} 分别表示两者可能性相比较的最小值与最大值,且 $l_{ij},s_{ij}>0$; $a_{ji}=\frac{1}{a_{ij}}=(1/s_{ij},1/l_{ij})$ 。按照这种思想,构造模糊判断矩阵如表3所示(以钟鸣一号隧道安全风险 B_1 为例,其他风险的判断矩阵按照相同方法得出)。

表2 判断矩阵标度及其含义	
Tab.2 Scale and meaning of judgment matrix	
相对可能性标度	标度含义
1,3,5,7,9	表示两个风险因与发生可能性的大小比较,前者比后者发生的可能性相同,稍大,大,明显大,非常大
2,4,6,8	表示上述比较的中间值

表3 安全风险可能性模糊判断矩阵

Tab.3 Fuzzy judgment matrix of security risk possibility

B_1	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}
C_{11}	(1,1)	(2,3)	(3.5,5.2)	(2.5,4.5)
C_{12}	(0.33,0.5)	(1,1)	(2,3.8)	(1.5,2)
C_{13}	(0.19,0.29)	(0.26,0.5)	(1,1)	(0.71,0.87)
C_{14}	(0.22,0.4)	(0.5,0.67)	(1.16,1.4)	(1,1)

3.4 风险发生可能性权重计算

- 1) 单一准则下元素的指标权重计算。权重的计算步骤如下。
步骤一:采用简单加权法来汇总可能性信息,计算公式:

$$a_{ij} = \frac{1}{q} (a_{ij}^{(1)} + a_{ij}^{(2)} + \cdots + a_{ij}^{(q)}) = \left(\frac{\sum_{i=1}^q l_{ij}}{q}, \frac{\sum_{i=1}^q s_{ij}}{q} \right) \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中: $i, j = 1, 2, \dots, n$; q 为风险因素的数量。

步骤二: 计算模糊程度值 u_i :

$$u_i = \left(\sum_{j=1}^n l_{ij}, \sum_{j=1}^n s_{ij} \right) \otimes \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{ij}, \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n s_{ij} \right)^{-1} \approx \left(\frac{\sum_{j=1}^n l_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n s_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^n s_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{ij}} \right) \quad (3)$$

2) 权重向量计算。为了精简权重计算过程减小计算量, 采用一种简便的处理方法^[10], 令 $u_i = (l_i, s_i)$ 。

$$w'_i = \frac{1}{2} (l_i + s_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中: w'_i 为风险因素的权重值; l_i, s_i 分别表示某一风险因素计算模糊值的最大值与最小值。

由上式即可得到权重向量 $w' = (w'_1, w'_2, \dots, w'_n)^T$, 归一化后即得到权重向量 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 。

3) 各层次风险发生可能性权重计算结果。

按照上述步骤计算钟鸣一号隧道各层风险发生可能性权重值, 见表4。

表 4 各层风险发生可能性权重表

Tab.4 Possibility weight table of various risks

准则层 风险因素	准则层风险 可能性权重	指标层 风险因素	指标层风险 可能性权重	综合权重
安全风险 B_1	0.61	塌方 C_{11}	0.50	0.305
		变形 C_{12}	0.25	0.153
		山体开裂 C_{13}	0.11	0.067
		边坡垮塌 C_{14}	0.14	0.085
工期风险 B_2	0.27	降雨 C_{21}	0.23	0.062
		机械故障 C_{22}	0.15	0.041
		塌方 C_{11}	0.25	0.068
		变形 C_{12}	0.09	0.024
		山体开裂 C_{13}	0.08	0.022
		边坡垮塌 C_{14}	0.20	0.054
环境风险 B_3	0.12	山体塌陷	0.64	0.077
		植被破坏 C_{32}	0.36	0.043

表4可看出, 钟鸣一号隧道施工发生安全风险的可能性最大, 引起隧道安全风险最主要的因素是塌方。工期风险除了受降雨和机械故障比较大的影响外, 塌方、边坡垮塌、变形、山体开裂对其影响也不能忽视。

3.5 综合风险等级评定

采用风险系数法进行隧道综合风险等级的评定。风险系数 R [11] 定义为 $R = P + V - P \times V$, 其中风险发生概率 $P \in [0, 1]$, 风险后果损失值 $V \in [0, 1]$, 两者的评定标准参照表5、表6。

1) 风险发生概率级别与后果损失级别判定。根据风险发生的可能性的发生和发生后可能造成的损失和影响程度, 将 P 、 V 在 0~1 之间分成 5 个级别, 具体等级标准以及相应范围内的分值解释见表5、表6。

表5 风险可能性P打分标准
Tab.5 Scoring criteria of risk possibility P

P值	等级	定性解释	P值	等级	定性解释
0.0~0.2	1	发生可能性极小	0.6~0.8	4	很可能发生
0.2~0.4	2	不太可能发生	0.8~1.0	5	几乎肯定会发生
0.4~0.6	3	可能发生			

表6 风险后果损失值V打分标准
Tab.6 Scoring criteria of risk loss value V

V值	级别	定性解释
0~0.2	1	损失极小或无损失
0.2~0.4	2	有一定损失,有少量财产损失,无人员伤亡
0.4~0.6	3	损失较大,有较大财产损失,少数人员伤亡
0.6~0.8	4	损失很大,有重大财产损失,有较多人员伤亡
0.8~1.0	5	损失极大,不能接受

风险发生后果损失值打分时,风险造成财产损失、人员伤亡等参考《铁路隧道风险评估暂行规定铁建设(2007)200号》^[12]所述风险后果等级划分标准评定。

2) 风险等级评定。风险系数计算时,指标层风险系数按打分结果直接算出。准则层、目标层风险用各层次风险权重值加权平均计算其发生概率,再计算风险系数。最终计算结果按表7确定各层风险等级,宁安铁路钟鸣一号浅埋隧道风险评估结果见表8。

表7 风险等级评定标准
Tab.7 Standard of risk grade evaluation

风险系数	风险级别	定性描述
0.0~0.25	低度	风险较小,可以忽略,对工程本身、人员、设备等造成的损失小
0.25~0.50	中度	风险轻微,对工程造成的破坏范围较小,一般不需采取风险处理措施
0.50~0.75	高度	风险较大,对工程造成较大范围危害,并会造成人员伤亡,必须采取处理措施降低风险并加强监测
0.75~1.00	极高	风险是很严重,对工程造成的危害是灾难性的,必须高度重视并规避,或采取一切措施降低到可接受级别

表8 钟鸣一号浅埋隧道风险评估结果
Tab.8 Risk assessment results of the Zhongming No.1 shallow tunnel

施工区段	风险事件	B ₁ (安全)			B ₂ (工期)			B ₃ (环境)			综合风险等级
		概率等级	后果等级	风险等级	概率等级	后果等级	风险等级	概率等级	后果等级	风险等级	
进、出口明挖段	边坡坍塌	4	3	高度	4	3	高度	4	1	中度	高度
	山体开裂变形	3	3	高度	3	2	中度	3	1	中度	高度
	降雨	3	3	高度	3	3	高度	3	1	中度	高度
进、出口端浅埋、偏压段	塌方	4	2	高度	4	2	高度	4	2	高度	高度
	山体开裂	3	3	高度	3	2	中度	3	1	中度	高度
	变形	3	3	高度	3	2	中度	2	1	低度	高度

续表8

施工区段	风险事件	B_1 (安全)			B_2 (工期)			B_3 (环境)			综合风险等级
		概率等级	后果等级	风险等级	概率等级	后果等级	风险等级	概率等级	后果等级	风险等级	
	塌方冒顶	4	3	高度	4	3	高度	4	3	高度	高度
沟谷浅埋段	山体开裂	4	3	高度	4	2	中度	4	1	中度	高度
	变形	4	2	高度	4	1	中度	4	1	中度	高度
其他浅埋	塌方	4	2	高度	4	2	高度	4	1	中度	高度
暗挖段	山体开裂变形	3	3	高度	3	2	中度	3	1	中度	高度

4 浅埋隧道施工典型风险控制措施

从评估结果看,钟鸣一号浅埋隧道属高风险隧道,施工中必须采取控制措施降低风险,减少损失。施工总体按照“短进尺、弱爆破、台阶开挖、超前支护、早闭合、二衬紧跟、监控量测”的总体原则进行,典型风险控制措施如下所述:

1) 边坡坍塌控制措施。避开雨季施工,加强边坡防排水,将边坡坡度调整为1:1.5,并对边坡上部卸载;采用长锚索喷网防护,加深锚杆打入深度;在高边坡上部采用地表注浆对土体进行加固。

2) 洞身塌方(冒顶)风险控制措施。围岩较差的浅埋暗挖段加强超前支护,采用40 m长管棚,并进行注浆,同时配合施作超前小导管,对管棚至开挖轮廓线内围岩进行支护。开挖过程中严格控制爆破及开挖进尺,仰拱及时闭合,二衬紧跟,控制预留变形量,同时加强监控量测。在浅埋偏压段,优化施工工法,优先采用CD法进行施工,施工从偏压较大的一侧开始。

3) 山体开裂变形风险控制措施。暗挖段采用地表注浆加固,洞顶用钢管打入加固,双层小导管超前支护;对明挖段顶面卸载,坡面采用长锚索喷网防护。

4) 沟谷浅埋段风险控制措施。沟谷浅埋段采用明挖法施工,控制边坡高度在10 m以内,边坡坡度放缓。条件不允许时采用长大管棚(80~100 m)与全地表加固方式穿越冲沟。长大管棚施工采用平管棚形式,设管棚工作室,施工应避免管棚离开挖面太远降低防护能力,同时防止打穿至地表。采用地表注浆、旋喷桩、搅拌桩等形式对地表进行加固,加固范围应至隧道起拱线位置。

5 结论

结合宁安城际铁路钟鸣一号隧道分析了浅埋隧道施工风险因素,采用了基于AHP的改进模糊综合法对其施工风险进行了评估,主要得出以下结论:

1) 浅埋隧道施工中安全风险大,隧道塌方(冒顶)、变形、降雨、边坡坍塌、山体开裂等是引起施工安全风险的重要因素,在施工中应采取相应的措施进行风险管理,典型风险控制措施能有针对性地控制浅埋隧道施工风险。

2) 基于AHP的改进模糊法综合法集成了层次分析法计算“风险发生可能性权重”和专家打分法确定风险发生概率等级与风险损失等级,引用风险系数确定风险等级,提高了风险评估的可信度。在宁安城际铁路钟鸣一号隧道中的应用表明,该方法有可操作性,有助于隧道工程施工风险管理。

参考文献:

- [1] 姚浩,周红波,蔡来炳,等. 软土地区土压盾构隧道掘进施工风险模糊评估[J]. 岩土力学,2007,28(8):1753-1756.
- [2] 苏燕. 软土地层地下建筑物地震风险管理和保险研究[D]. 上海:同济大学,2004:47-48.

- [3] 王海明. 吉青岭隧道浅埋偏压进口段施工风险分析及综合防治措施[J]. 探矿工程:岩土钻掘工程, 2010, 37(1): 79-81.
- [4] 郭海满, 刘成禹, 杨建成, 等. 浅埋隧道上覆建筑的稳定性研究[J]. 铁道工程学报, 2009, 130(7): 85-88.
- [5] 李锋. 翔安隧道强风化层施工的风险管理[D]. 上海: 同济大学, 2007: 62-63.
- [6] 沈祥明, 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(12): 88-89.
- [7] 王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1990: 25-27.
- [8] 李剑. 基于模糊综合评价的水中悬浮隧道风险分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(2), 383-386.
- [9] 刘姗姗. 基于三角模糊数的价值工程评标方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2008: 35-38.
- [10] 曹纯. 模糊AHP中权重向量的一种新算法[J]. 西北民族学院学报: 自然科学版, 1999, 20(1): 5-10.
- [11] 黄慨, 杨林德. 崇明越江盾构隧道工程耐久性失效风险研究[J]. 现代隧道技术, 2004, 4(2): 10-12.
- [12] 中华人民共和国铁道部. 铁建设(2007)200号铁路隧道风险评估暂行规定[S]. 北京: 人民铁道出版社.

Risk Assessment of Shallow Buried Tunnel Based on AHP and Fuzzy Synthesis Method

Li Dechang, Yang Xinan, Wang Shujie

(Department of Urban Mass Rail Transportation and Railway Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The construction risks occur easily in shallow buried tunnel, such as side collapse, tunnel roof fall, hill aspect cracks, deformation instability which are caused by geological, terrain and influence of the environment. The security, duration and environmental risk of Ning-An inter-city railway shallow tunnels are analyzed. Then, the risk assessment principles and steps of the improved fuzzy synthesis method based on AHP are introduced. An analytic hierarchy model of shallow tunnel construction and the possibility judgment matrix depending on improved fuzzy number are established. Finally, the Zhongming No.1 Tunnel risk grade is determined through risk coefficient and the typical risk reduction measures are put forward, combining with tunnel characteristics and risk assessment results.

Key words: shallow tunnel; analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive method; risk assessment