

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2014.08.033

# 基于地质雷达预报的隧道施工风险评估<sup>①</sup>

温世儒<sup>1</sup>, 吴霞<sup>2</sup>, 杨晓华<sup>1</sup>, 吴兴娇<sup>1</sup>

1. 长安大学公路学院, 西安 710064; 2. 江西应用技术职业学院, 江西 赣州 341000

**摘要:** 为了研究如何避免或者降低在隧道施工风险评估过程中的个体主观性影响, 以某公路隧道为依托, 分别采用传统的以地质资料和工程经验为主的评估法及基于地质雷达预报的评估法, 利用模糊综合评价模型建立风险的权重及隶属度, 对隧道施工风险进行对比性评估. 将两种不同评估法所得评估结论与工程实际进行比较, 结果表明: 基于地质雷达预报的隧道施工风险评估法所得评估结论与工程实际更加吻合, 评估结论能为施工作业提供有效的指导, 达到了满足施工需求的目的.

**关键词:** 隧道工程; 地质雷达预报; 模糊综合评价; 施工风险

**中图分类号:** U458.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9868(2014)8-0201-05

随着交通网的拓展, 公路隧道的数量逐渐增多. 隧道建设是复杂的、大型的地下隐蔽工程<sup>[1]</sup>, 由于地质条件、施工条件及施工控制等因素的影响<sup>[2]</sup>, 导致在施工期存在一定的施工风险. 施工中的风险具有随机性和模糊性特点<sup>[3-5]</sup>, 对隧道施工期的风险进行评估引起了人们的广泛关注, 且有效地开展施工风险评估已经成为一个重要环节.

当前大多数评估方法具有受人为主观影响强的特点, 如: 以地质资料和工程经验为主的专家调查法等. 这种主观性将直接导致相关指标的赋值因评估个体的不同而不同, 很容易造成评估结论的多解性甚至与实际情况相差很大.

以广西六河高速公路瑶寨隧道为依托, 将综合分析地质资料与雷达探测作为预报手段, 识别出前方围岩中所存在的风险源, 在此基础上, 采用模糊层次分析法对风险进行评估分析, 得出具体的施工风险及其等级. 同时, 采用单纯以地质资料和工程经验为主的评估法对同一段落进行评估. 将两种方法所得风险及其等级与工程实际进行对比, 获得对比性结论.

地质雷达预报与模糊综合评价的关系可以描述如图 1 所示.

## 1 瑶寨隧道概况

瑶寨隧道为上下(行)线分离式隧道, 位于广西盆地与黔中高原过渡地带. 隧道岩性主要为灰岩, 包括硅质灰岩、白云质灰岩和泥质灰岩, 有众多裂隙带及围岩破碎带, 溶洞发育, 施工处理不当, 易造成塌方等灾害.

上行线全长 2 717 m, 其中在 YK46+980~YK47+180 段存在一接触破碎带, 岩性为粘土夹碎石混合物, 呈软塑、松散状, 局部呈流塑状, 有突泥的可能性, 围岩深度风化, 节理、裂隙发育, 岩体破碎, 无自稳能力, 处理不当会产生大坍塌; 段落洞顶上部为一沟谷地形, 地表水常在该沟谷汇合成地表径流, 在施工期易遇到塌方、岩溶、突泥、涌水或断层破碎带等风险, 因而如何准确地对其进行评估是一项重要的内容.

① 收稿日期: 2013-11-22

基金项目: 广西壮族自治区科技攻关项目(桂科攻 10124006-10).

作者简介: 温世儒(1985-), 男, 江西赣州人, 博士研究生, 主要从事岩土与隧道工程方面的研究.

## 2 地质雷达预报

### 2.1 测试方法

地质雷达是一种高频宽带时间域脉冲电磁波勘探技术<sup>[6]</sup>,对目标地层中的填充型空洞、空腔型空洞、断层破碎带、软弱夹层具有良好的识别性。采用美国 GSSI 公司生产的 SIR-3000 型地质雷达配备中心频率为 100MHz 的双体天线对该段落进行测试。测试时采用连续测试与点测相结合的方法,测线按井格形布置。当掌子面凹凸不平或因为其它因素而无法进行连续线测时,则采用多点(大于 20 个点)测试的办法进行测试,多点测试间距为 20~50 cm,测点尽量覆盖掌子面。探测深度一般为 20~35 m。测线及测点的布置分别如图 2 所示。

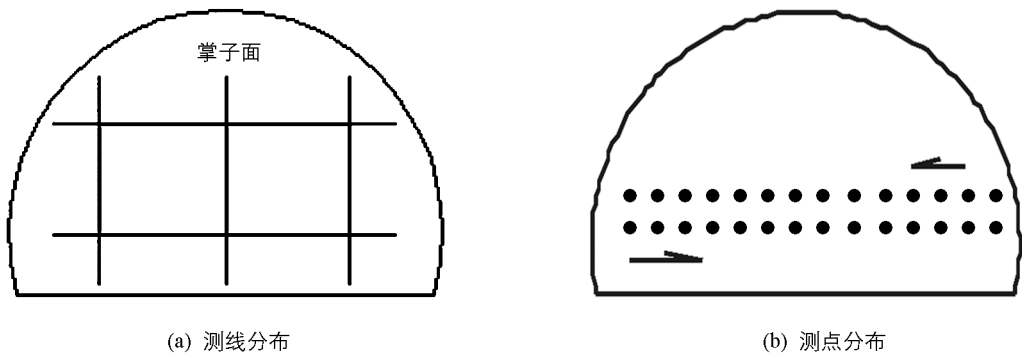


图 2 测线及测点布置

对该段落共进行 7 次预报测试,第 1 次、第 2 次探测距离为 25 m,其余五次探测距离均为 30 m。

### 2.2 预报结论

结合地质资料及当前掌子面开挖所揭露的围岩情况,详细分析连续线测、点测和雷达反射频谱等信息,认为在上行线 YK46+982~YK47+005 段落以及 YK47+30~YK47+42 段落发育有填充型的溶蚀性空洞,填充物含水量较低,施工时涌出的填充物易造成塌方,填充型溶洞及其产生的塌方是该段落的主要风险,发生的可能性最大。

## 3 模糊综合评价模型的建立<sup>[7-10]</sup>

### 3.1 建立风险集合 $U$ 和评价集合 $V$

针对本段落,将风险集合中的风险事件记为  $U_1, U_2, U_3, U_4, U_5$ , 即:

$$U = \{ U_1, U_2, U_3, U_4, U_5 \}$$

其中:  $U_1$  表示施工中可能产生的塌方,  $U_2$  表示施工中可能揭露的岩溶,  $U_3$  表示施工中可能产生的突泥,  $U_4$  表示施工中可能产生的涌水,  $U_5$  表示施工中可能遇到的断层破碎带。

评价集是由对评价客体可能作出的全体评判结果所组成的集合<sup>[11]</sup>, 记为:

$$V = \{ V_1, V_2, V_3, \dots \}$$

针对本段落,将施工风险的等级分为 5 个级别,即:依次为“极低风险”、“低风险”、“中度风险”、“高风险”、“极高风险”,则

$$V = \{ V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 \}$$

### 3.2 确定风险事件的权重

根据确定风险事件判断矩阵及风险事件权重的原则,分别对两种评估方法下的施工风险建立判断矩阵,并分别求出判断矩阵的权重向量,记为:

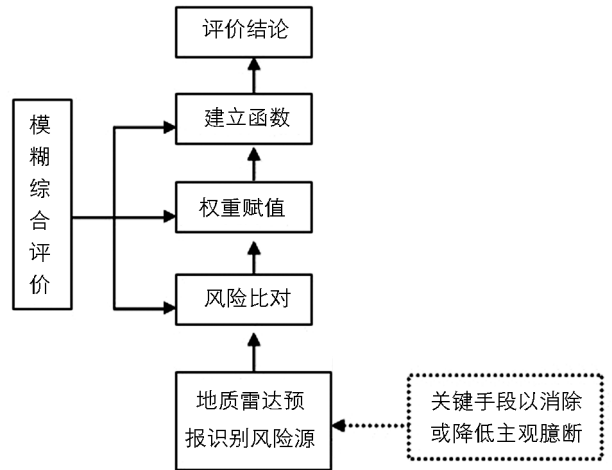


图 1 地质雷达预报与模糊评价的关系

$$W = \{W_1, W_2, W_3, W_4, W_5\}$$

### 3.2.1 传统评估法建立判断矩阵

结合工程经验及地质资料, 该段落施工时可能会遇到塌方、岩溶、突泥、涌水或断层破碎带风险. 当隧道掌子面地质素描、隧道勘探等资料准确时, 对于经验丰富的地质工程师来讲, 一般能较准确地判断出这几种风险发生的概率. 但是, 对于大部分地质经验缺乏或不成熟的人员而言, 这五种风险之间的重要性对比如何, 则存在多种可能, 因而使得风险之间的重要性分布及权重值的分布出现多解性. 这里取其中一种可能的情况, 即认为这五种风险的重要性按大小排列依次是涌水、突泥、塌方、岩溶、断层破碎带. 此时, 风险事件的判断矩阵如下表 1 所示.

表 1 风险事件第一判断矩阵

风险事件	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$
$U_1$	1	3	1/4	1/5	4
$U_2$	1/3	1	1/5	1/7	3
$U_3$	4	5	1	1/4	6
$U_4$	5	7	4	1	7
$U_5$	1/4	1/3	1/6	1/7	1

对表 1 中的判断矩阵进行运算, 求得: 权重向量  $W = \{0.118, 0.064, 0.259, 0.520, 0.039\}$ ; 最大特征根  $\lambda_{\max} = 5.416$ , 一致性指标

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{5.416 - 5}{5 - 1} = 0.104$$

查表得  $RI$  为 1.12, 求得一致性比例

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.104}{1.12} = 0.093 < 0.1$$

一致性检验通过.

### 3.2.2 基于预报结果建立判断矩阵

以地质资料为基础, 综合分析地质预报的结果可知, 填充型溶洞及由其产生的塌方是该段落的主要潜在风险, 该风险发生的可能性最大. 此时, 这五种风险的重要性按大小排列依次是塌方、岩溶、断层破碎带、突泥、涌水. 将风险事件的判断矩阵列出如表 2 所示.

表 2 风险事件第二判断矩阵

风险事件	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$
$U_1$	1	3	7	9	6
$U_2$	1/3	1	4	5	3
$U_3$	1/7	1/4	1	4	1/3
$U_4$	1/9	1/5	1/4	1	1/4
$U_5$	1/6	1/3	3	4	1

运算表 2 中的判断矩阵, 求得: 权重向量

$$W = \{0.535, 0.238, 0.071, 0.035, 0.121\}$$

最大特征根  $\lambda_{\max} = 5.321$ , 一致性指标

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{5.321 - 5}{5 - 1} = 0.08$$

查表得  $RI$  为 1.12, 求得一致性比例

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.08}{1.12} = 0.071 < 0.1$$

一致性检验通过.

### 3.3 确定风险事件的隶属度

综合地质资料和工程经验, 认为该段在进行施工时可能会遇到塌方、岩溶、突泥、涌水或断层破碎带风险. 但五种风险的发生概率及影响后果的取值, 则同样存在多解性. 同样, 这里取其中一种可能的情况, 此时, 各个风险事件的发生概率  $P$  和影响后果  $C$  的取值及由其产生的评判矩阵  $R$  如下表 3 所示.

表 3 各指标的第一隶属度

指 标	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$R$
$p$	3	2	3	3	2	$R = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
$c$	2	2	3	3	2	
$P \times C$	6	4	9	9	4	

由地质预报的结论可知,岩溶及塌方风险的发生概率是最大的.此时,风险事件的发生概率  $P$  和影响后果  $C$  的取值及由其产生的评判矩阵  $R$  如下表 4 所示.

表 4 各指标的第二隶属度

指 标	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$R$
$p$	4	4	2	2	3	$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
$c$	3	2	2	3	2	
$P \times C$	12	8	4	6	6	

### 3.4 模糊综合运算进行模糊综合运算,得到评价结果,记为 $B$ ,

$$B = W * R$$

将传统评估法和基于 GPR 地质预报评估法的评价结果分别记为  $B_1$  和  $B_2$ , 如下:

$$B_1 = W * R = \begin{bmatrix} 0.118 \\ 0.064 \\ 0.259 \\ 0.520 \\ 0.039 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [0.103, 0.897, 0, 0, 0]$$

根据最大隶属度原则,分析  $B_1$ , 结果如下表 5 所示.

表 5 传统评估法所得结论

	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$
风险等级	低	极低	低	低	极低
总体等级	低				

$$B_2 = W * R = \begin{bmatrix} 0.535 \\ 0.237 \\ 0.071 \\ 0.035 \\ 0.121 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [0.071, 0.394, 0.535, 0, 0]$$

根据  $B_2$ , 其风险等级如下表 6 所示.

表 6 基于地质预报法所得结论

指 标	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$
风险等级	中等	低	极低	低	低
总体等级	中等				

实际开挖结果表明,在 YK46+986 和 YK47+32 里程处揭露了大型填充型溶洞,由于事先基于地质雷达预报的风险评估结果而采取了相关的风险控制措施,未造成人员伤亡等重大损失,仅产生了小规模坍塌,挽回直接经济损失达 57 万余元.显然,若依据传统评估法所得“低风险”结论而未采取相关的风险控制措施,则在实际施工时极易产生大坍塌.

## 4 结 论

本文分别采用两种评估方法对隧道施工风险进行了对比性评估,结论如下:

1) 仅仅依靠地质资料及工程经验的判断,容易导致风险之间的重要性分布、权重值的分布及隶属度的确定出现多解性,个体主观影响大,容易造成评估结论与工程实际之间存在较大差异。

2) 基于地质雷达预报的施工风险评估法,在一定程度上降低了评估个体本身无法或难以避免的主观影响,能使指标的赋值及最终的评估结论与工程实际更加吻合,从而为隧道施工提供真实可靠的指导信息,提升了施工风险评估的可靠性和实际运用价值,是一种新思路。

3) 个体的主观性容易影响评估结论的可靠性,如何更好地避免个体主观影响是风险评估工作中不可忽视的一个重要问题。

#### 参考文献:

- [1] 王渝培. 地震反射波法在隧道施工超前预报中的应用研究 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2008, 30(9): 170-173.
- [2] 王华牢, 李 宁, 王 浩. 隧道施工塌方风险评估与控制措施 [J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(4): 34-38.
- [3] 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.
- [4] VCARR, TAH J H M. A Fuzzy Approach to Construction Project Risk Assessment and Analysis; Construction Project Risk Management System [J]. Advances in Engineering Software, 2001, 32: 847-857.
- [5] 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.
- [6] 王 通, 张虎元. 高频电磁波在媒质中的反射波特征分析 [J]. 工程勘察, 2011(2): 85-89.
- [7] SHAO R Q. A Multi-Level Fuzzy Synthetic Evaluation on Investment Programs in Shipping [J]. Transportation Engineering, 2004, 144(93): 497-502.
- [8] 汪培庄, 李洪兴. 模糊系统理论与模糊计算机 [M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [9] 方述诚, 汪定伟. 模糊数学与模糊优化 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [10] 毛 儒. 隧道工程风险评估 [J]. 隧道建设, 2003, 23(2): 1-3.
- [11] 张 鸿, 黎剑华, 黄红元, 等. 基于模糊层次分析法的隧道施工安全评价方法 [J]. 南昌工程学院学报, 2009, 28(3): 60-67.

## Risk Evaluation for Tunnel Construction Based on GPR Geological Forecast

WEN Shi-ru<sup>1</sup>, WU Xia<sup>2</sup>, YANG Xiao-hua<sup>1</sup>, WU Xing-jiao<sup>1</sup>

1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Jiangxi College of Applied Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China

**Abstract:** In order to study how to avoid or reduce the influence of individual subjectivity on risk evaluation of tunnel construction, on the basis of the data of a highway tunnel, a comparative evaluation was made for the risk of tunnel construction through two different ways, i. e. the traditional way that is mainly based on the geological data and the engineering experience and a new way that is based on the GPR (ground penetrating radar) geological forecast, and the risk's weight and the membership degree were established through the fuzzy comprehensive evaluation model. It is concluded from a comparison of the results from the above two different ways with the data of the real engineering of the tunnel that the evaluation conclusion produced based on GPR geological forecast is in better agreement with the engineering practical situation and can provide effective references for the construction work, and the construction needs can be met.

**Key words:** tunnel engineering; GPR geological forecast; fuzzy comprehensive evaluation; construction risk

