

文章编号: 1007-2993(2012)06-0292-05

# 某隧道施工塌方风险模糊综合评价

翁其能<sup>1</sup> 李彪<sup>2</sup> 曾龙全<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学岩土工程研究所, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074)

**【摘要】** 公路隧道施工塌方是隧道建设中最常见的风险之一。近年来,隧道工程施工塌方事故呈增长趋势,给隧道施工安全和质量带来了巨大的影响,因此对隧道作风险评价尤其重要。通过收集公路隧道施工塌方案例历史资料,找出七个影响施工塌方的最主要的风险因素为围岩等级、地下水情况、埋深、跨度、偏压、爆破扰动、施工管理水平。分析比较各个因素相对公路隧道塌方的影响程度,再基于模糊综合评价法和频数分析法确定风险因素的评价矩阵和相应权重,得到模糊综合评价模型,该模型根据隧道具体情况以及模糊数学的概念得出隧道风险评价结果,在实例中得到验证,具有较高的客观性和实用性。

**【关键词】** 公路隧道;塌方;风险评价;模糊综合评价法

**【中图分类号】** U 458

**【文献标识码】** A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2012.06.005

## Fuzzy Comprehensive Evaluation of Highway Tunnel Collapse Risk

Weng Qineng<sup>1</sup> Li Biao<sup>2</sup> Zeng Longquan<sup>2</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**【Abstract】** The highway tunnel collapse in tunnel construction is the most common disaster accidents, so the tunnel for the risk assessment is particularly important, through the collection of highway tunnel landslide case history information; and comparing various factors relative to the important degree of highway tunnel collapse, find out the seven effects in the main risk factor for the class of surrounding rock, groundwater conditions, buried deep, large span, bias, blasting disturbance, construction management level, and then based on the fuzzy comprehensive evaluation method and frequency analysis method to determine the risk factor evaluation matrix and the corresponding weight, get the fuzzy comprehensive evaluation model, the model according to the specific situation of tunnel and the concept of fuzzy mathematics the tunnel risk assessment results, in the example verified, with the higher the objectivity and practicability.

**【Key words】** highway tunnel; collapse; risk evaluation; fuzzy comprehensive evaluation methods

### 0 引言

随着我国目前交通的发展和土地利用的需要,隧道工程数量越来越多,发展的规模也越来越大,隧道施工过程中的围岩稳定性问题也更加突出。隧道施工塌方是指在隧道施工过程中因突发的、不可控的应力释放导致的重力应力大于围岩自稳能力时,围岩或掌子面塌落,是隧道建设中很常见的风险之一,隧道塌方不仅造成重大经济损失,甚至危及施工人员的生命安全,因此有必要对隧道施工的塌方进行风险评估,以遏制隧道塌方事故的发生。

国内外学者已经对隧道塌方的原因和机理做了很多的研究,王燕、黄宏伟等认为塌方事故发生的主

要因素有地质原因和人为因素影响<sup>[1]</sup>。郭明亮认为隧道塌方是由不良地质因素、施工设计不当、地压、地下水影响四个因素造成的。冯卫星等通过对隧道塌方案例的大量调查,阐述了隧道塌方的原因、处理措施及效果评价,并认为大量不确定因素是隧道工程中塌方事故频发的根源<sup>[2]</sup>,如何对这些不确定因素进行合理评价是解决隧道塌方问题的关键。风险分析作为处理不确定因素及其所带来的问题的有效方法为隧道塌方问题的解决提供了可能途径。

隧道塌方事故发生具有不确定性因素多,很难建立统一的风险评估模型,而模糊综合分析将影响隧道塌方的那些不易量化的因素定量化,使多因素

导致的复杂问题清晰、具体化,因此本文采用模糊层次综合评估法对塌方进行评估。通过对收集的大量隧道塌方案例的分析,总结隧道塌方的因素,选择其中的主要因素作为模糊综合分析法的影响因素,从而建立塌方风险模糊综合评价模型<sup>[3]</sup>。

根据收集到 124 座的隧道施工塌方案例,比较分析其塌方的主要原因和所占的比例,统计见表 1。

表 1 塌方诱发因素统计

导致塌方主要原因	塌方发生次数	所占的比例/%
降水量过大	34	27
处在断层破碎带	33	27
设计勘察不准确	22	18
存在偏压	20	16
施工进度不合理	9	7
爆破震动过大	6	5

## 1 隧道施工塌方风险因素分析

### 1.1 自然因素

#### 1) 降水

地表水较丰富或者降雨量较大的情况下,若地表的排水措施不当,水容易由地表经裂隙、溶洞等结构面渗入地层,带走层间结合物、软化结构面加大水对围岩稳定性的影响,据统计大约有 25% 的隧道塌方发生在降雨期间,且降雨量越大,隧道塌方发生的规模越大。

#### 2) 地震

虽然地震对深埋隧道的影响不明显,隧道因地震发生塌方的案例在所有案例中比例很小,但对于浅埋隧道的影响较大,尤其是当隧道处在地质情况较差的地段,很容易发生隧道塌方、衬砌结构变形和滑坡等,因此地震因素是必须考虑且事实存在的一个影响因素。

### 1.2 地质因素

#### 1) 地下水

毫无疑问地下水是诱发塌方的因素之中影响最明显的因素,地下水主要有三方面的影响,带走细小颗粒、软化结构面、产生孔隙水压力,这些作用可很大程度降低结构面自稳能力,另外一些地下水通过构造和裂隙之间流动,对围岩造成侵蚀,也是影响围岩自稳性的重要因素。

#### 2) 围岩等级

岩质较差,如软弱围岩、层状围岩等,围岩等级越高,则认为围岩稳定性越差,失稳可能性越大,塌方风险越高,在我们的塌方案例调查中,V 级围岩所

占比例超过 50%,因此,当围岩情况不好时,一般情况下会采取加固措施,提高围岩自稳能力,降低塌方发生可能性。

#### 3) 地层结构

如存在断层破碎带、岩层破碎、裂隙发育等,会明显导致围岩自稳能力降低,严重影响隧道施工安全,特别是断层破碎带,因为断层破碎带是作为一个低强度、易变形、透水性大,抗水性差的软弱带存在的,容易导致两侧岩体在物理特性上有显著的差异,并且断层破碎带导致的灾害往往具有突发性,如成渝高速公路缙云山隧道发生大规模塌方的主要原因就是断层破碎带影响及地下水发育。

#### 4) 偏压

由于地形不对称或者地质岩层因素,造成隧道结构两面荷载不对称,形成了偏压,根据资料统计,约有 16% 的隧道存在偏压,偏压对隧道的影响很大,一般根据山体的倾角表示,倾角越大情况下,越容易发生塌方。

### 1.3 勘察设计因素

一些特殊的地质情况没勘察到位,如断层,岩溶等,导致设计时候采用的支护强度较小,如本来是 V 级围岩,结果设计成 III 级围岩的支护参数,施工后支护不能够维持围岩的稳定,导致塌方。虽然隧道是动态施工,但勘察设计不当对隧道塌方影响也是不能忽略的,另外开挖方法的选择不准确也会诱发塌方,比如施工时采用台阶法比侧壁导坑法的塌方风险大。

### 1.4 施工因素

#### 1) 爆破扰动

施工过程中爆破产生的应力波对隧道围岩产生扰动,影响围岩稳定性,在所收集的隧道塌方案例中,约 5% 的隧道的塌方存在爆破扰动的的影响,如湖南金钟皂隧道正是由于开挖段的地质情况不好,再加上爆破扰动起到了促进作用导致塌方。施工过程中支护不到位、开挖进尺大、防排水措施不当等因素都会诱发隧道塌方。

#### 2) 大跨度开挖

根据统计资料,因开挖跨度过大造成隧道塌方的案例约占 5%,通常情况下当隧道跨度超过 15m 时则采取分步开挖,因此统计资料中收集的大跨度案例不多,但是根据发生的几起大跨度开挖失稳的案例的经验可知开挖跨度越大,隧道发生失稳几率越大。

#### 3) 施工管理不当

管理不当,进度安排不合理等一些施工因素增加了塌方的可能性,从表 1 可以看出,施工管理不当

和爆破扰动导致隧道塌方的约占12%，还有一些其他的施工因素也起到了诱发作用。

根据统计的隧道塌方案例，得到上述几个塌方风险的影响因素，虽然不同隧道的塌方原因不同，但是通过资料我们可以得出哪些因素是影响最大的，对风险干扰最严重的，因此我们根据资料选取几个最在隧道塌方中发生概率最高的几个塌方因素作为因素集<sup>[4-5]</sup>。

根据以上分析，将选取的几个最重要塌方风险因素整理成如下(见图1)。

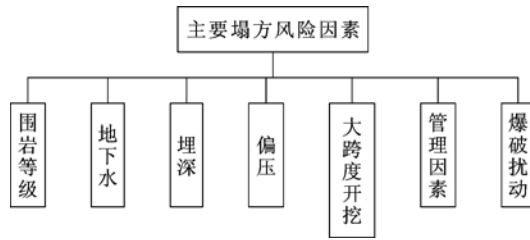


图1 塌方风险因素分析图

### 2 模糊风险评价模型及权重确定

#### 2.1 模糊风险评价模型

模糊综合评价是借助模糊数学的一种具体应用方法，以模糊数学为基础，应用模糊关系合成的原理，从多个因素对被评价事物隶属等级状况进行综合性评价的一种方法。分为两步，第一步对每个因素单独评判，第二步按所有因素进行综合评判<sup>[6]</sup>。

表2 模糊风险因素等级划分表

围岩等级	埋深/m	地下水状况	偏压/(°)	爆破扰动	开挖跨度/m	施工管理水平
I、II	>60	贫乏	<10	很小	<7	很好
III	40~60	较发育	10~20	小	7~10	好
IV	20~40	发育	20~30	一般	10~12	一般
V	10~20	丰富	30~40	大	12~15	差
VI	<10	大量涌水	>40	很大	>15	

很差对围岩等级  $u_1$  作单因素评价，从因素  $u_i$  的五个等级分别判断各等级对评价等级  $v_j$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ) 的隶属度  $r_{ijk}$ ，这样可得出第  $i$  个因素  $u_i$  的第  $k$  个等级的单因素评价集：

$$r_{ik} = (r_{i1k}, r_{i2k}, \dots, r_{imk}) \quad (2)$$

根据模糊综合评价方法的原理，首先需要建立评价集，采用模糊语言对隧道塌方情况进行分类描述，评价集为：

$$V = (V_1, V_2, V_3, V_4) \quad (1)$$

应用模糊综合评价方法，设  $v_1$  到  $v_4$  分别代表几乎不发生、很少发生、偶尔发生、频繁发生，我们通过对所有因素进行分析后，得出准确的评价结果即模糊综合评价的目的。

在建立评价因素集，设因素集为  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ ，其中的  $u_i$  为第  $i$  个因素，由图1将围岩等级、埋深、地下水情况、偏压情况、爆破扰动、开挖跨度以及施工管理水平7个影响最大的因素作为评价因素集，则  $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7\}$ ，其中  $u_1$  代表围岩等级， $u_2$  代表隧道埋深， $u_3$  代表地下水情况， $u_4$  代表偏压情况， $u_5$  代表爆破扰动情况， $u_6$  代表开挖跨度， $u_7$  代表施工管理水平。为了更好的确定各因素的隶属度，根据统计资料，在大量的隧道塌方案例中，和主观经验将因素按照风险程度划分为几个等级，等级越高，风险越大。

各个因素不同情况对隧道塌方影响不同，通过所调查的案例把地下水和施工管理水平分成5个模糊等级<sup>[7]</sup>，由于部分因素的由于缺乏资料以及量化、分级困难，我们采用了模糊语言描述来进行分级，把地下水和施工管理水平分成5个模糊等级<sup>[7]</sup>(见表2)。

根据不同的因素等级对隧道塌方的影响不同导致的隶属度有区别，再结合案例调查和专家讨论给出当围岩等级为I、II级时，对  $v_1$  几乎不发生评价等级的隶属度为0.45，对  $v_2$  评价等级很少发生的隶属度为0.3，同样得到不同等级对不同评价等级的隶属度见表3。

表3 围岩等级评价集

围岩等级发生概率/围岩等级	I、II	III	IV	V	VI
几乎不发生	0.45	0.3	0.15	0.1	0
很少发生	0.3	0.35	0.25	0.15	0
偶尔发生	0	0.1	0.2	0.4	0.3
频繁发生	0	0	0.2	0.3	0.5

同上可得其他风险因素评价集:

埋深情况评价集为:

$$\begin{bmatrix} 0.35 & 0.25 & 0.05 & 0.1 & 0.3 \\ 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0.3 \\ 0.1 & 0.15 & 0.35 & 0.35 & 0.1 \\ 0.05 & 0.2 & 0.25 & 0.45 & 0.05 \end{bmatrix}$$

地下水情况评价集为:

$$\begin{bmatrix} 0.55 & 0.2 & 0.15 & 0.1 & 0 \\ 0.35 & 0.25 & 0.2 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.15 & 0.25 & 0.2 & 0.3 \\ 0 & 0.15 & 0.2 & 0.25 & 0.4 \end{bmatrix}$$

偏压情况评价集为:

$$\begin{bmatrix} 0.65 & 0.2 & 0.1 & 0.05 & 0 \\ 0.45 & 0.25 & 0.15 & 0.1 & 0.05 \\ 0.05 & 0.15 & 0.25 & 0.3 & 0.25 \\ 0 & 0.1 & 0.15 & 0.2 & 0.55 \end{bmatrix}$$

爆破扰动评价集为:

$$\begin{bmatrix} 0.8 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.55 & 0.3 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.1 & 0.35 & 0.35 & 0.2 \\ 0 & 0.1 & 0.15 & 0.3 & 0.45 \end{bmatrix}$$

开挖跨度评价集为:

$$\begin{bmatrix} 0.6 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.4 & 0.25 & 0.25 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.25 & 0.15 \\ 0 & 0.15 & 0.2 & 0.2 & 0.45 \end{bmatrix}$$

施工管理情况评价集为:

$$\begin{bmatrix} 0.65 & 0.2 & 0.15 & 0 & 0 \\ 0.45 & 0.2 & 0.3 & 0.1 & 0.05 \\ 0.1 & 0.15 & 0.25 & 0.35 & 0.15 \\ 0 & 0.1 & 0.25 & 0.3 & 0.35 \end{bmatrix}$$

根据对隧道的各因素进行分析判断其分别为哪一等级,这样对每个因素进行评价可以构造出一个总的评价矩阵  $\mathbf{R}$ :

$$\mathbf{R} = (r_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

其中  $r_{ij}$  ( $i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$ ) 表示从单因素  $u_i$  着眼,该评判对象能被评为  $v_j$  的隶属度,即  $r_{ij}$  表示第  $i$  个因素  $u_i$  在第  $j$  个评价等级  $v_j$  上的频率分步<sup>[8]</sup>,且进行归一化处理  $\sum r_{ij} = 1$ 。

## 2.2 塌方风险因素权重确定

上面列出了对塌方风险产生影响的几个主要因

素,但是每个因素对评价目标的影响程度是不同的,对每个因素赋予相应的权重值来反映单因素对评价目标的影响程度。一般将权重记为:

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (3)$$

其中:  $a_i$  为第  $i$  个因素被赋予的权重

权重是表征因素相对重要性大小的量度值,所以在评价过程中,赋权数非常重要,常见的评价问题中的赋权数,一般是凭经验主观臆测,富有浓厚的主观色彩。主观赋权数有时候严重扭曲了客观实际,是评价结果严重失真,从而导致决策者的错误判断<sup>[9]</sup>。因此本文根据收集到的大量塌方案例和资料,采取频数统计法得到围岩等级、埋深、地下水情况、偏压情况、爆破扰动、开挖跨度以及施工管理水平的相关权重:

$$A = (0.30, 0.14, 0.06, 0.16, 0.05, 0.25, 0.04)$$

## 2.3 综合评价

根据所评价隧道现场的情况,得到主要风险因素的具体情况,根据等级划分的情况得出风险因素的评价矩阵  $\mathbf{R}$ ,再进行综合评价得到相应的评价集:

$$S = A \cdot \mathbf{R} = (s_1, s_2, s_3, s_4, s_5) \quad (4)$$

根据最大隶属度原则得到评价等级。

## 3 工程实例

### 3.1 工程概况

某隧道为重庆奉节至云阳高速公路的一条特长隧道,左右线总长 11 311 m,其中 V 级、IV 级、III 级围岩长度分别为 547 m、7 860 m、1 710 m,进洞口位于一斜坡上,自然坡度角坡度为  $25^\circ \sim 35^\circ$ ,出洞口被冲沟切割,自然坡度角坡度  $40^\circ \sim 55^\circ$ ,设计线位通过短地形呈波状起伏,沟谷纵横,高程在 432.50 ~ 1 072.00 m 之间,相对高差 693.50 m,地形起伏较大。

以 K103+060-K103+340 段为例,该段隧道地质构造较为复杂,为新华夏系地三隆起带与第三沉降带之接部位,该段以褶皱变形为主,而断裂构造不发育,根据地表工程调绘及钻探揭露,该段以巴东组泥岩和须家河组砂岩、灰岩为主,产状  $16^\circ \angle 67^\circ$ ,完整性交叉,岩体呈碎石、块状,砂岩夹有薄层的煤层,产状  $10^\circ \angle 83^\circ$ ,围岩等级为 VI 级,埋深大于 60 m,受三条河沟影响,通过水文地质试验表明,该段地下水较发育,岩体的渗透系数为 0.03~0.055 m/d,在泥灰岩和灰岩中存在岩溶裂隙水。偏压角度为  $10^\circ \sim 20^\circ$ ,爆破扰动小,开挖跨度为 10~12 m,根据隧道现场施工情况,施工管理水平好。得到该段的风险因素的具体等级见表 4。

表4 某隧道风险因素等级表

围岩等级	埋深/m	地下水状况	偏压/(°)	爆破扰动	开挖跨度/m	施工管理水平
岩层较破碎,为Ⅳ级	深埋,埋深>60	地下水较发育	10~20	小	10~12	施工管理水平好

### 3.2 进行评价

得到某隧道的风险因素的具体等级,再通过模糊综合评价模型得到各因素等级所对应的隶属度,并综合七个风险因素得到评价矩阵  $R$ :

$$R = \begin{pmatrix} 0.15 & 0.25 & 0.2 & 0.2 \\ 0.35 & 0.3 & 0.1 & 0.05 \\ 0.2 & 0.25 & 0.15 & 0.15 \\ 0.2 & 0.25 & 0.15 & 0.1 \\ 0.1 & 0.3 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.25 & 0.3 & 0.2 \\ 0.2 & 0.2 & 0.15 & 0.1 \end{pmatrix}$$

将上面的评价矩阵归一化后得到  $R$  为:

$$R = \begin{pmatrix} 0.105 & 0.158 & 0.421 & 0.316 \\ 0.437 & 0.375 & 0.125 & 0.063 \\ 0.267 & 0.333 & 0.2 & 0.2 \\ 0.286 & 0.357 & 0.214 & 0.143 \\ 0.167 & 0.5 & 0.167 & 0.166 \\ 0.118 & 0.294 & 0.353 & 0.235 \\ 0.307 & 0.308 & 0.231 & 0.154 \end{pmatrix}$$

根据公式(4)得到评价集

$$S = A \cdot \begin{pmatrix} 0.105 & 0.158 & 0.421 & 0.316 \\ 0.437 & 0.375 & 0.125 & 0.063 \\ 0.267 & 0.333 & 0.2 & 0.2 \\ 0.286 & 0.357 & 0.214 & 0.143 \\ 0.167 & 0.5 & 0.167 & 0.166 \\ 0.118 & 0.294 & 0.353 & 0.235 \\ 0.307 & 0.308 & 0.231 & 0.154 \end{pmatrix}$$

$$S = (0.205, 0.278, 0.302, 0.215)$$

根据最大隶属度原则该段隧道发生塌方风险为三级,即该段在施工过程中可能发生塌方,需要在施工过程中采取治理防护措施,该评价结果与现场实际情况相符。

## 4 结论

1) 收集了大量公路山岭隧道施工塌方资料并

分析其发生事故塌方的原因,分析表明围岩等级、埋深、地下水、爆破扰动、偏压、开挖跨度施工管理水平七个因素是公路隧道塌方的最主要的影响因素。

2) 利用模糊数学知识的找出各因素的不同等级对塌方的隶属度,利用模糊综合评价方法建立了公路隧道评价的一般模型,该模型可以较好的应用于实际工程中,有较强的客观性,可为隧道施工和隧道风险评价提供科学的依据。

3) 运用该评价模型对某隧道 K103+060—K103+340 段进行实例验证,评价结果显示该段的施工塌方风险等级为三级,符合工程实际情况。

## 参考文献

- [1] 王燕,黄宏伟,薛亚东. 钻爆法施工隧道塌方风险分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2009(1): 23-27.
- [2] 冯卫星,况勇,陈建军. 隧道塌方案例分析[M]. 成都:西南交通大学,2005:163-165.
- [3] 翁其能,吴秉其,等. 隧道涌水突泥评价模型[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版). 2012,1674-1696.
- [4] 翁其能,田卫明,等. 公路隧道新奥法施工围岩位移时空效应分析[J]. 公路交通科技. 2010.
- [5] 宋宁强,田卫明,夏文军,等. 公路隧道施工坍塌致灾因子分析[J]. 公路交通科技. 2010.
- [6] 杜栋,庞庆华. 现代综合评价方法与案例精选[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [7] 周峰. 山岭隧道塌方风险模糊层次评估研究[D]. 长沙:中南大学,2008.
- [8] Eskesen S D, Tengborg P, Kampmann J, et al. Guideline for tunneling risk management [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2004, 19: 217-237.
- [9] 郭亚军. 综合评价理论方法及应用[M]. 北京:科学出版社 2007. 5.

收稿日期:2012-09-25