

文章编号:1000-582X(2012)08-011-06

## 山岭隧道初期支护安全性综合评判方法

张永兴<sup>1a,1b</sup>, 杨超<sup>1a</sup>, 黄达<sup>1a,1b</sup>, 高世军<sup>2</sup>, 刘小军<sup>1a</sup>, 娄勇<sup>1a</sup>

(1. 重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;

2. 贵州省交通规划勘察设计研究院, 贵州 贵阳 550001)

**摘要:**通过对 62 座初期支护发生破坏的隧道资料的收集和整理, 总结出隧道初期支护破坏的等级, 将造成初期支护破坏的原因分为客观因素和主观因素 2 种, 统计表明, 隧道初期支护破坏的全部影响因素中, 人为可控的主观因素的比重占到了 25%。然后运用层次分析法和模糊综合评判法相集成的方法, 建立了隧道初期支护安全性综合评判模型, 对风险应对措施提出了科学合理的要求, 最后通过实际工程验证了该模型评判方法合理性。

**关键词:**山岭隧道; 初期支护; 安全性; 层次分析; 模糊评判

**中图分类号:** U459.4

**文献标志码:** A

### Analysis of comprehensive evaluation method on safety of mountain tunnel initial support

ZHANG Yongxing<sup>1a,1b</sup>, YANG Chao<sup>1a</sup>, HUANG Da<sup>1a,1b</sup>,  
Gao Shijun<sup>2</sup>, LIU Xiaojun<sup>1a</sup>, Lou Yong<sup>1a</sup>

(1. a. College of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of China in Mountainous Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. Guizhou Provincial Institute of planning, Prospecting and Designing of Communication Infrastructures, Guiyang 550001, Guizhou, P. R. China)

**Abstract:** Through collecting and collating information of 62 tunnels with initial support fracture, the risk grade is summed up, the factors causing initial support fracture are divided into two types: objective factors and subjective factors. The statistical results show that the proportion of controlled subjective factors' reached as large as 25%. The comprehensive evaluation model on safety of mountain tunnel initial support by analytic hierarchy process (AHP) and fuzzy comprehensive evaluation is established. On this basis, the science rational risk response method is required. Then the evaluation model is proved credible by field measurements.

**Key words:** mountain tunnel; initial support; security; analytic hierarchy process; fuzzy judgment

在隧道工程施工中, 由于开挖活动造成应力重分布, 围岩压应力使支护体系发生变形, 一旦支护抗力难以满足围岩压力时, 初期支护就会出现不同程

度的变形和破坏, 轻则出现喷射混凝土裂缝、剥落, 重则出现钢支撑扭曲变形, 侵入二衬净空界限, 甚至引起隧道塌方等严重的事故。隧道初期支护的变形

收稿日期: 2012-02-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40902078); 贵州省科委重大科技项目(黔科合重大专项字[2008]6013); 中国博士后科学基金资助项目(20080440703)

作者简介: 张永兴(1961-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程研究, (E-mail) cqyxzhang@163.com。

和破坏不仅严重影响施工工期,提高工程费用,增加安全隐患,同时,若处理措施不当会遗留重大的质量后患。据资料记载,奥地利陶恩(Tauren)、阿尔贝格(Arlberg)及日本惠那山(Enasan)等隧道,中国的宝中铁路大寨岭隧道、青藏铁路关角隧道、南昆铁路家竹箐隧道及宝兰复线乌鞘岭隧道等都曾不同程度的出现过初期支护大变形的的问题,每次都造成了巨大的损失<sup>[1]</sup>。因此,对隧道初期支护进行风险评判和控制非常重要。

近年来,隧道与地下工程领域风险管理理论与研究越来越受到重视,许多国家已编写出隧道工程风险管理的规范和法规<sup>[2-4]</sup>,在实际地下工程中也有了应用<sup>[5]</sup>。中国中铁西南科学研究院对宜万铁路野山关隧道进行了全面的施工工期风险评估<sup>[6]</sup>,陈洁金、周峰等人对山岭隧道塌方风险进行了模糊层次分析<sup>[7]</sup>,但专门针对山岭隧道初期支护安全性进行评估的研究较少。由于致使隧道初期支护破坏的因素众多,机制复杂<sup>[1]</sup>,安全事故的发生多是由于地形地质条件复杂、设计方案不合理或关键施工环节的控制不当等多种因素综合作用的结果。笔者收集和整理了 62 座初期支护出现病害的实例资料,总结了隧道初期支护病害等级和影响隧道初期支护破坏的因素,再遴选出主要的因素作为模糊层次综合评判法<sup>[8]</sup>的影响因子,从而建立初期支护安全风险模糊层次评判模型。

## 1 初期支护破坏实例统计分析

笔者共搜集了 62 座隧道初期支护破坏的情况,包括有隧道初支病害等级、围岩级别、不良地质构造、开挖跨度、埋深、偏压、地下水、降雨、超欠挖量以及设计、施工和监控量测等资料。分析总结了隧道初期支护破坏等级,导致初期支护破坏的主要影响因素以及这些因素间的比重关系,并依据这些资料建立了初期支护安全风险模糊层次评判模型。

### 1.1 初期支护病害等级划分

隧道初期支护病害主要有喷射混凝土开裂、剥落和掉块,钢拱架的扭曲变形和支护整体移动以及隧道变形过大等几种表现形式。根据搜集资料的整理和分析,并结合相关文献和规范<sup>[9-13]</sup>,将隧道初期支护的破坏等级分为 5 类,如表 1 所示。

表 1 隧道初期支护安全性等级分类

安全等级	隧道内部特征
稳定 I	拱顶下沉量和周边收敛很小,支护无整体偏移,喷射混凝土无明显裂缝和掉块现象。
较小破坏 II	拱顶下沉量和周边收敛在规范允许范围,喷射混凝土裂缝少许,宽度小于 5 mm;喷射混凝土局部出现轻度剥离。
中等破坏 III	拱顶位移或周边收敛略超允许值;喷射混凝土层多处出现较少裂缝,轻微剥落或掉块现象,钢拱架无明显变形。
较大破坏 IV	拱顶下沉或周边收敛较大的超过允许值且持续增加;洞内多处出现裂缝、剥落和掉块现象;拱架轻微变形;整个初支有轻微下沉或偏移。
严重破坏 V	拱顶下沉和周边收敛大大的超过允许值且加速增加;洞内喷射混凝土普遍开裂、大量剥落、掉块;拱架扭曲变形或压弯,侵入二衬界限;整个初支下沉和偏移,严重侵占二衬空间。

### 1.2 初期支护安全性影响因素辨识

根据资料分析,影响隧道初期支护安全的主要因素有地形、工程地质、水文地质、天气、勘察设计、施工和监控量测等因素。且初期支护的破坏基本都是在这些因素的共同影响下产生的,如都汶高速公路龙溪隧道就是由于处在断裂带、围岩破碎、地下水丰富、勘察不准确、施工水平差以及监控量测不及时等多个因素共同作用下致使初期支护出现了大变形<sup>[14]</sup>。表 2 是对资料整理后的统计结果。

表 2 62 座隧道初期支护破坏影响因素统计

影响因素	频数	占隧道	占总次数
		总数比例/ %	比例/ %
浅埋	29	46.8	14.6
偏压	23	37.1	11.6
地下水或降雨	41	66.1	20.6
围岩级别低	49	79.0	24.6
勘察设计不准确	17	27.4	8.5
施工质量差	38	61.3	19.1
监控量测不及时	2	3.2	1.0

从表 2 可以看出,62 座发生初期支护破坏的隧道中,围岩级别、地下水或降雨、施工质量、埋深和偏压是主要的影响因素,其中尤以围岩级别低所占比重最大,占总次数的 24.6%。

### 1.3 影响因素权重值统计

由于收集的文献中都没有对各个影响因素所占比重做出定量描述,为了便于统计,文中采用 1~9 标度方法<sup>[15]</sup>先将判断定量化,计算出单个事例中各因素的比重,然后采用频数统计法进行频数统计。由此得出的各影响因素的权重如下:

$A_1 = (\text{浅埋, 偏压, 地下水或降雨, 围岩级别, 勘察} \\ \text{设计管理, 施工管理, 监控管理}) = (0.10, 0.10, \\ 0.24, 0.31, 0.08, 0.16, 0.01)$

可以看出,在统计的 62 座出现初期支护破坏的隧道中,勘察设计不准确、施工质量差和监控量测不及时等人为可控因素也是隧道初期支护发生破坏的重要影响因素,比重占到了 1/4。

## 2 综合评判模型的建立

根据上述统计分析,文中采用层次分析法和模糊综合评判法集成<sup>[15]</sup>的方法,先运用层次分析法建立了初期支护安全性评判指标体系,然后再利用模糊数学建立了初期支护安全性综合评判模型。

### 2.1 层次分析结构的构造

找出影响隧道初支安全的主要因素,目的是为了在设计、施工中对这些因素进行相应的控制,从而保证隧道的安全。这些控制措施可以分为两类,一类是针对浅埋、偏压、围岩差和地下水等因素而采取的诸如大管棚、抗滑桩和挡土墙等加固措施,它体现的是设计施工中现有的技术水平,文中将其看成客观因素;另一类措施则是针对实施隧道工程的人这个主体,比如提醒施工方一定不能盲目施工抢进度、监控人员一定要及时监控等措施,它是从管理的角度对影响因素进行控制,将其看成是主观因素。

由于第一类措施相对于第二类措施的花费要多得多,文中建立起了如图 1 所示的层次分析结构,这样划分的优点在于:在隧道地形地质等客观条件一定的情况下,可通过建立评判模型先对勘察、施工以及监控等主观可控因素提出相应的要求,从而获得一定的经济效益。

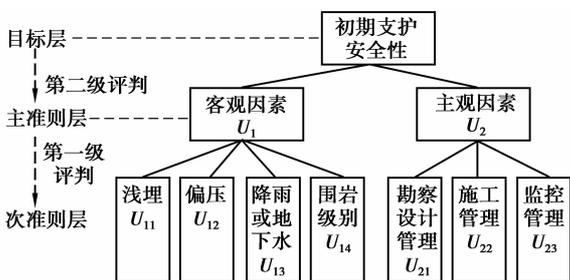


图 1 初期支护安全性综合评判指标体系

### 2.2 模糊风险因素等级的划分

为了更有利于隶属度的确定,把因素按一定的风险度划分为若干个区间<sup>[16]</sup>。文中通过对资料和相关研究的总结,对各个因素等级进行了划分,如表 3 所示。

表 3 模糊风险因素等级划分表

等级划分	I	II	III	IV	V
埋深/m	>60	40~60	20~40	10~20	<10
偏压角度/(°)	<10	10~20	20~30	30~40	>40
降雨或地下水影响	小	一般	大	很大	极大
围岩级别	I、II	III	IV	V	VI
勘察管理	很好	好	一般	差	很差
施工管理	很好	好	一般	差	很差
监控量测管理	很好	好	一般	差	很差

表 3 中,隧道埋深、偏压、围岩级别和施工管理的划分都采用和文献[16]相同的划分方法。而勘察设计和监控量测 2 个因素,采取了和施工水平一样的等级划分方法。

降雨对隧道初期支护的影响,与降雨历时和降雨强度都有关系<sup>[17-18]</sup>,目前降雨对隧道的影响无法用一个定量的指标来判别,而且降雨对隧道初期支护的影响主要集中在隧道洞口段,故对降雨影响因素也采用了模糊语言划分等级,通过专家经验对降雨的影响做出评级。

### 2.3 风险评判

对上述层次结构进行一级评判,对每一个子评估因素集分别做出综合评判。

#### 2.3.1 建立评价集

对文中评估模型建立评价集:

$$V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\} = \{I, II, III, IV, V\},$$

式中 I, II, III, IV, V 表示的级别见表 1。

#### 2.3.2 建立权重指标集

权重指标集的建立有多种方法<sup>[15]</sup>,文中采用综合集成赋权法,这样既充分利用了统计数据,又结合了专家的理论知识和经验。具体赋值过程如下:

$$A = \alpha A_1 + \beta A_2, \quad (1)$$

其中:  $A_1$ 、 $A_2$  分别为由客观赋权法和主观赋权法得出的权重向量;  $\alpha$ 、 $\beta$  分别表示  $A_1$ 、 $A_2$  的重要程度。

针对文中的评价模型,根据统计资料,归一化后有:

$$A_{11} = (0.13, 0.13, 0.32, 0.42),$$

$$A_{12} = (0.32, 0.64, 0.04), A_1 = (0.75, 0.25)$$

通过对相关专家和施工设计人员的调查和咨询,统计出各个影响因素的两两比较判断矩阵并进

行了一致性检验,见表 4~表 5。

表 4 洞口段初期支护安全性评价因素指标值

$u_i$	$u_{11}$	$u_{12}$	$u_{13}$	$u_{14}$	$\omega_i$	$\lambda_{\max}$	CR
$u_{11}$	1	1/2	1/4	1/6	0.07	4.031 0	0.010 3< 0.10
$u_{12}$	2	1	1/3	1/4	0.12		
$u_{13}$	4	3	1	1/2	0.30		
$u_{14}$	6	4	2	1	0.51		

表 5 洞口段初期支护安全性评价因素指标值

$u_2$	$u_{21}$	$u_{22}$	$u_{23}$	$\omega_i$	$\lambda_{\max}$	CR
$u_{21}$	1	1/4	1/2	0.14	3.018 3	0.016<0.10
$u_{22}$	4	1	3	0.62		
$u_{23}$	2	1/3	1	0.24		

$$A_{21} = (0.07, 0.12, 0.30, 0.51),$$

$$A_{22} = (0.20, 0.63, 0.17), A_2 = (0.67, 0.33)$$

由于统计数据的局限,取  $\alpha=0.3$ 、 $\beta=0.7$ ,代入式(1),从而确定山岭隧道初期支护安全评判模型因素的权重为

$$A'_1 = (0.09, 0.12, 0.31, 0.48),$$

$$A'_2 = (0.14, 0.62, 0.24), A = (0.70, 0.30)$$

### 2.3.3 建立模糊评估矩阵

把初期支护安全性综合评估子因素集  $U_i$  到评价集  $V$  看成是一个模糊映射,可以确定模糊矩阵  $R_i$ 。

### 2.3.4 计算综合评判向量

运用模糊矩阵的合成运算,得  $U_i$  的综合评判向量  $B_i$ 。

$$B_i = A_i \circ R_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{i5})$$

进行二级评判。将每个子因素集  $U_i$  看为一个因素,用  $B_i$  作为它的单因素评判,即得初期支护安全性评估因素集  $U$  到评语集  $V$  是一个模糊映射。

$$U = \{U_1, U_2, \dots, U_s\}$$

将每个  $U_i$  作为  $U$  的一部分,可以按它们的重要性给出权重分配  $A = (a_1, a_2, \dots, a_s)$ ,得二级综合评价为

$$B = A \circ R = (b_1, b_2, \dots, b_m)$$

根据最大隶属度原则<sup>[10]</sup>得

$$B_k = \max(b_1, b_2, \dots, b_m)$$

从而得出综合评判等级为  $V_k$ 。

如果评判结果不可接受,那么就必须采取相应的风险应对措施。文中提出如下风险应对程序:首

先对勘察、施工和监控等人为可控因素提出更高要求,比如在原有的基础上提高勘察强度,提高施工质量和增加监控量测频度等,然后运用上述模型进行检验;如果结果还是不可接受,再针对具体情况按由易至难、由简至繁的策略采取相应的辅助预加固措施,并逐次通过模型进行检验,直至达到风险可接受的程度。这样的风险应对措施优点在于可以最大程度的降低经济成本。

## 3 应用实例

### 3.1 工程概况

老寨隧道位于厦蓉高速公路贵州境水口桂黔界至榕江格龙段第 AT8 合同段,为上下行分幅隧道,左幅起讫桩号 ZK38+425.00~ZK38+870.00 段,全长 445 m;右幅起讫桩号 YK38+440.00~YK38+815.00 段,全长 375 m。隧道净宽 10.75 m,净高 5 m。隧道施工选择从出口端进洞,其中左幅隧道 ZK38+840~ZK38+870 段,山体自然坡度为  $45^\circ \sim 50^\circ$ ,埋深为 0~16 m,且发育有最不利节理( $338^\circ \angle 25^\circ$ )面,洞身穿越强~弱风化变余砂岩。岩体节理裂隙极发育,岩体破碎~较破碎,呈松散碎裂结构, $[BQ]=168$ ,按 V 级围岩进行衬砌支护。由于隧道左幅洞口段浅埋偏压现象严重,围岩极为破碎,且洞口施工时正处于雨季,降雨频繁且强度很大,因此很有必要对该洞口段的初期支护安全性进行评估。

### 3.2 评估验算

通过查阅地质勘察资料和现场调查结果,得出评估所需要的因素见表 6。

表 6 洞口段初期支护安全性评价因素等级

因素	$U_{11}$	$U_{12}$	$U_{13}$	$U_{14}$	$U_{15}$	$U_{16}$	$U_{21}$	$U_{22}$	$U_{23}$
指标值	6 m	$48^\circ$	很大	一般	V	一般	好	差	差
等级	V	V	IV	II	IV	III	II	IV	IV

按上述评价集对中各个指标进行评判,并按文献[14]推荐的隶属度计算方法建立如下模糊评判矩阵,并作归一化,进行第一级综合评判。

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.02 & 0.30 & 0.25 & 0.25 & 0.18 \\ 0.02 & 0.30 & 0.25 & 0.25 & 0.18 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.82 & 0 & 0.18 & 0 & 0 \\ 0.02 & 0.30 & 0.25 & 0.25 & 0.18 \\ 0.02 & 0.30 & 0.25 & 0.25 & 0.18 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = A'_1 \circ R_1 = (0.01, 0.24, 0.20, 0.20, 0.35)$$

$B_2 = A'_2 \circ R_2 = (0.13, 0.26, 0.24, 0.21, 0.16)$   
进行二级综合评判,得出结论。

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.01 & 0.24 & 0.20 & 0.20 & 0.35 \\ 0.13 & 0.26 & 0.24 & 0.21 & 0.16 \end{bmatrix}$$

$$B = A \circ R = (0.05, 0.24, 0.21, 0.20, 0.30)$$

根据最大隶属度原则,可知洞口段初期支护的安全级别为 V,可能发生严重的破坏变形。现场施工情况与评判结果基本吻合。2009 年 6 月 26 日,隧道前方掌子面施工达 ZK38+850 断面时,右侧 ZK38+860 附近拱间工字钢变形严重,在 2 h 内向洞里突出 0.6 cm,拱顶附近及其他地方开裂较大。调查表明整个 ZK38+862~ZK38+855.7 断面的初期支护发生严重变形,喷射混凝土崩裂掉块,反压挡墙下侧出现明显裂缝,整个型钢拱架向左侧挤压变形明显,左右侧拱腰处变形最大达到了 67 cm。其变形破坏如图 2~图 3 所示。

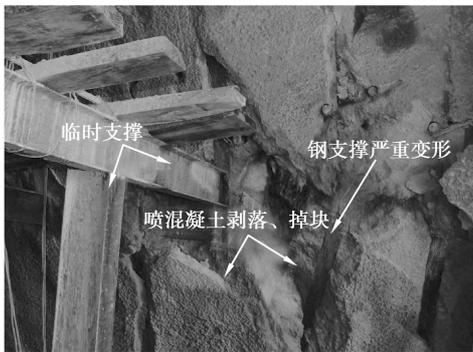


图 2 老寨隧道洞口段初期支护破坏图

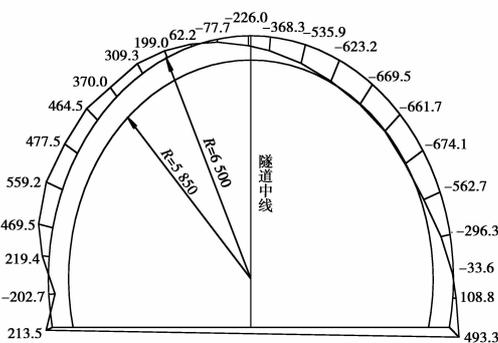


图 3 初期支护变形图(单位:mm)

### 3.3 风险应对

造成老寨隧道初期支护严重破坏的原因除了浅埋偏压、围岩差和强降雨等客观因素的影响外,施工中未严格按照设计施工也是造成大变形的主要原因。2009 年 5 月 31 日,隧道所在地出现强降雨天气后,隧道边仰坡出现了裂缝,左侧挡土墙下部出现

了宽约 1 cm 的裂缝,但未及时采取补救措施,隧道继续向前掘进,导致初期支护破坏。

为了避免洞口其他段出现类似病害,采用文中提出的风险应对策略。首先将施工和监控量测提高至 II 级,再通过上述模型进行评判,则有

$$B = A \circ R = (0.25, 0.17, 0.19, 0.14, 0.25)$$

显然,评判结果还是不能被接受,在此基础上,提出了减载反压和做好地表排水等易操作措施,即改善了偏压和降雨的等级。文中简单将上述两等级提高至 II 级,实际具体中还有待进一步研究。按上述模型评判,有

$$B = A \circ R = (0.50, 0.10, 0.20, 0.08, 0.12)$$

根据最大隶属度原则,隧道是安全的。

根据模型计算可知,虽然该隧道洞口段地形地质复杂,且受降雨影响大,但在原有基础上做好减载反压和地表排水措施,施工严格遵守设计和规范,监控量测及时且与施工配合协调的情况下,该段隧道的初期支护是可以保证安全的。隧道在出现初支破坏的事故后,采用了文中模型对施工进行了指导,保证了后续施工中隧道初期支护的安全。

## 4 结 论

1)通过对 62 座出现初期支护变形破坏隧道的统计和整理,将隧道初期支护破坏等级划分为 5 级。统计表明,隧道初期支护破坏的原因中,人为可控的主观因素影响的比例占 25%。

2)采用层次分析法和模糊综合评判法,建立了隧道初期支护综合评判模型,并运用此模型对老寨隧道出口端进行了综合评估,与施工现场实际情况基本符合,验证了此套隧道初期支护安全性综合评判模型的可靠性和适用性。

3)该评判模型将主准则层分为客观因素和主观因素 2 个方面的内容,对风险应对措施提出了相应的更加科学合理的要求。

### 参考文献:

[1] 曾蔚,张民庆. 宜万铁路隧道变形侵限原因分析与治理[J]. 铁道工程学报,2008,25(3):42-49.  
ZENG Wei, ZHANG Mingqing. Analyses of causes for the deformation intrusion structure ambit of tunnel on Yichang-Wanzhou railway and its treatment [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008, 25(3): 42-49.

[2] Eskesen S D, Tengborg P, Kampmann J, et al. Guidelines for tunneling risk management; international tunneling association working group No. 2 [J].

- Tunneling and Underground Space Technology, 2004, 19(3):217-237.
- [3] The Association of British Insurers, The British Tunnelling Society. The association of British insurers: joint code of practice for risk assessment of tunnel works in the UK-09 [M]. London: The British Tunnelling Society, 2003.
- [4] The International Tunnelling Insurance Group. A code of practice for risk management of tunnel works [M]. London: The British Tunnelling Society, 2006.
- [5] Geodata master system. An information system for managing geoenvironment projects [EB/OL]. (2006-12-10)[2007-10-10]. <http://www.geodata.it>.
- [6] 铁道部工程管理中心, 中铁西南科学研究院. 宜万线野三关隧道工程风险评估和控制的研究[R]. 北京: 铁道部工程管理中心, 2004.
- [7] 陈洁金, 周峰, 阳军生, 等. 山岭隧道塌方风险模糊层次分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(8):42-49.  
CHEN Jiejun, ZHOU Feng, YANG Junsheng, et al. Fuzzy analytic hierarchy process for risk evaluation of collapse during construction of mountain tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8):42-49.
- [8] Shao R Q. A multi-level fuzzy synthetic evaluation on investment programs in shipping [J]. Transportation Engineering, 2004, 144(93):497-502.
- [9] 罗鑫, 夏才初. 隧道病害分级的现状和发展[J]. 西部探矿工程, 2006, 18(12):180-182.  
LUO Xin, XIA Caichu. The current situation and development on the classification of tunnel diseases [J]. West-China Exploration Engineering, 2006, 18(12):180-182.
- [10] 铁道部第二勘察设计院. 铁路隧道设计规范[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
- [11] 杨小礼, 李亮, 刘宝琛. 偏压隧道结构稳定性评价的信息优化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4):484-488.  
YANG Xiaoli, LI Liang, LIU Baochen. Evaluation on structure stability of unsymmetrically loaded tunnels using the theory of information optimization analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4):484-488.
- [12] Russell H A, Gilmore J. Inspection policy and procedures for transit tunnels and underground structures [M]. Washington, D. C.: National Academy Press, 1997.
- [13] 杨新安, 黄宏伟. 隧道病害与防治[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003.
- [14] 李菊兵. 龙溪隧道初期支护变形机理及处治对策研究[J]. 路基工程, 2009, 145(4):200-201.  
LI Jubing. Research on preliminary support deformation mechanism and treatment measure of Longxi tunnel [J]. Subgrade Engineering, 2009, 145(4):200-201.
- [15] 杜栋, 庞庆华, 吴炎. 现代综合评价方法与案例精选[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [16] 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.
- [17] 林鸿州, 于玉贞, 李广信, 等. 降雨特性对土质边坡失稳的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1):198-204.  
LIN Hongzhou, YU Yuzhen, LI Guangxin, et al. Influence of rainfall characteristics on soil slope failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1):198-204.
- [18] 陈伟, 阮怀宁, 张辉. 降雨入渗对浅埋偏压隧道及其支护系统的影响[J]. 现代隧道技术, 2008, 45(1):30-34.  
CHEN Wei, RUAN Huaining, ZHANG Hui. Influence of rainfall seepage on the behavior of an unevenly-pressured shallow tunnel and its support system [J]. Modern Tunnelling Technology, 2008, 45(1):30-34.

(编辑 陈移峰)