

文章编号:1671-1556(2017)06-0134-05

基于解释结构模型的公路隧道口部滑塌 影响因素分析

廖伟逸,袁 辉,王凤山

(解放军理工大学野战工程学院,江苏 南京 210007)

摘要: 找寻公路隧道口部滑塌影响因素的潜在结构和关键特征是解决口部滑塌的根本性问题。利用系统工程的解释结构模型方法梳理得到隧道口部滑塌风险的 11 个影响因素,确定各个影响因素之间的关联特性,推理计算口部滑塌风险影响因素的可达特性,并通过构建层次结构模型来解释影响因素之间的支持依赖关系,最终归纳出地下(表)水、地质灾害、爆破扰动和地质勘测为引发公路隧道口部滑塌的关键特征,可为滑塌分析、评价和预防提供科学依据。

关键词: 公路隧道;口部滑塌;解释结构模型;影响因素

中图分类号: X93;U458 **文献标识码:** A **DOI:** 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2017.06.022

Analysis on Influencing Factors of Landslide at the Highway Tunnel Entrance Based on ISM

LIAO Weiyi, YUAN Hui, WANG Fengshan

(Field Engineering College, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: The fundamental part of dealing with the landslide at the entrance is to find the potential structure and key factors affecting the landslide at the highway tunnel entrance. This paper applies Interpretation Structure Model (ISM) in System Engineering to obtain 11 main influencing factors of the landslide risk. First, the paper determines the correlation and reasons the accessibility between the influencing factors. Then, the paper constructs the hierarchical model to explain the support dependency between the influencing factors. Finally, the paper concludes that groundwater and surface water, geological hazards, blasting disturbances and geological survey are the key influencing factors of landslide at the highway tunnel entrance. The results provide the scientific basis for the analysis, evaluation and prevention of the landslide.

Key words: highway tunnel; landslide at the entrance; Interpretative Structural Model (ISM); influencing factor

公路隧道口部滑塌是隧道施工和运营过程中常见的事故之一,在国内外隧道特重大事故中,滑塌事故导致的伤亡人数居于前列,给经济发展和社会稳定造成了巨大的负面影响^[1]。国内外诸多学者从多个方面研究了公路隧道口部滑塌的影响因素。如汪成兵等^[2]认为地质条件、隧道埋深、隧道断面形式及大小、地下(表)水、爆破扰动、施工措施不当和设计原因是导致滑塌的主要因素,并通过离散元模拟定量分析了影响因素的重要性;周建昆等^[3]利用事故树

理论来计算滑塌发生的概率和各个影响因素的重要性;Aldorf 等^[4]采用数值分析方法对 Jablunkov 滑坡进行了研究;Shou 等^[5]基于大气循环模型和多尺度敏感性分析对台湾南投公路滑坡进行了研究,并得到了滑坡敏感性因素的排序。

但上述研究忽略了隧道口部滑塌影响因素之间的支持依赖等相互作用,没有考虑到影响因素间的相关性及反馈作用。而目前设计隧道口部滑塌风险结构模型已经成为隧道安全问题科学研究的一个重

收稿日期:2017-05-25 修回日期:2017-10-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51308541)

作者简介:廖伟逸(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向为工程防护系统分析与集成。E-mail:lgdxxlwy@163.com

要方向,如袁永才等^[6]通过对我国300多例隧道塌方资料的分析,选取围岩级别、地下水等因素建立山岭隧道塌方评价指标体系,并对红岩寺隧道塌方进行了风险评价,其效果显著。

解释结构模型(Interpretative Structural Model, ISM)作为系统工程建模中的一种概念模型,是一种分析复杂问题内部关联特征的结构化模型技术,特别适用于变量众多、关系复杂而结构不清晰的系统分析问题,已在国防工程^[7]、安全科学^[8-9]等领域取得了重要成果。而采用ISM方法研究影响公路隧道口部滑塌因素间的关系,建立滑塌因素层次结构模型,探究各个影响因素之间的支持依赖关系,可为隧道口部滑塌的研究和预防提供决策依据。为此,本文采用系统工程的ISM方法建立公路隧道口部滑塌风险解释结构模型,科学地界定影响因素之间的支持依赖关系,不再局限于某个特定的滑塌事例,具有重要的现实意义和应用价值。

1 公路隧道口部滑塌影响因素梳理

影响公路隧道口部滑塌的因素较多,但在不同条件下引发口部滑塌的因素也存在一定的差异,而地质条件、设计、施工技术及管理等因素通常认为是造成公路隧道口部滑塌的主要原因,本文结合汪成兵^[2]等的研究,归纳总结出11个公路隧道口部滑塌的影响因素。

1.1 隧道围岩

隧道围岩是导致隧道口部滑塌的重要因素之一。围岩是指在隧道施工过程中,受到外界影响应力状态发生改变的口部周围岩体。焦斌权等^[10]通过研究认为隧道围岩-支护体系不合理是引发口部滑塌的主要因素,必须选择合理的施工方法,建立切实可行的支护方案。滑塌一般发生在围岩级别比较低的软弱破碎岩性地段,围岩级别越低,滑塌灾害越严重。对于围岩级别较高的隧道口部,在地质条件良好的情况下,一般不会发生大规模的滑塌。

1.2 地下水

地下水是引发隧道口部滑塌的重要因素之一。地下水主要通过物理、化学和力学作用,导致隧道口部围岩松软、强度降低,引发塌方。根据我国隧道口部滑塌的历史记载,相当一部分滑塌是因雨季地下水水位上涨所引发。李军^[11]通过研究万源隧道口部滑塌,指出地下水通过破坏岩体节理、软弱结构面和围岩结构,从而引发隧道口部滑塌。

1.3 隧道口部边坡失稳

隧道口部边坡是指在口部两侧所做的具有一定坡度的坡面,目的是维持路基的稳定性。但是在隧道运行过程中,由于地质条件、降雨等因素的影响,边坡往往容易失去稳定性。这是由于在隧道运行后,由于隧道口部的土壤成分不同,尤其是黄土层特殊的地质条件和较差的物理力学性质,往往会导致边坡稳定性下降,引发隧道口部滑塌^[12]。

1.4 隧道口部断面形式

隧道口部断面形式决定了口部的应力结构和稳定性以及在不同侧压力系数下围岩的应力分布,是决定口部在遭受严重外力干扰下是否能维持稳定的重要因素。赵兴冬等^[13]采用RFPA2D系统对不同围压下不同口部断面形式的隧道破坏进行了数值模拟,结果显示口部围岩应力变化与破坏模式存在一定的关联,因此在隧道施工建设时应当注意口部的断面形式。

1.5 隧道施工技术风险

隧道施工技术风险是影响隧道口部滑塌的因素之一。隧道施工技术风险包括开挖风险、支护风险和环境保护风险等。在隧道施工过程中,不当的施工措施极易引发各种事故,带来巨大的经济和人员损失。王亚琼等^[14]运用层次分析法和模糊综合评价法建立了隧道施工技术风险评价的层次结构,对西钟岭隧道施工过程中面临的问题进行分析,并提出了合理的风险控制措施。

1.6 隧道养护技术

隧道养护技术对于隧道保持正常运行状态具有非常重要的作用。隧道养护技术包括检测技术、决策技术、维修技术等。王国欣等^[15]从地质因素、水文因素和人为因素对公路隧道洞口边坡进行分析,并结合监控量测数据,分析了口部滑塌的发展过程,结果认为在隧道后期养护中需要时刻关注隧道口部边坡的变化情况。

1.7 地质灾害

地质灾害是引发隧道口部滑塌的重要因素之一。苏生瑞等^[16]通过对大风垭口隧道施工地质灾害的分析,认为容易引发滑塌的地质灾害主要有涌水、崩塌、地震等。地质灾害易导致隧道口部围岩稳定性和安全性下降,而且地质灾害发生后,往往也是口部滑塌发生的高峰期。

1.8 爆破扰动

爆破扰动是引发隧道口部滑塌的外部因素之一,受爆破扰动引发的滑塌其破坏程度相对更为严重。爆破对隧道口部结构和围岩造成破坏,导致口

部开裂,引发滑塌。吴亮等^[17]基于弹性力学和结构力学建立了隧道的简化力学模型以及应力计算表达式,分析了爆破扰动对隧道口部围岩稳定性的影响规律,结果认为在实施爆破时,必须要严格控制爆破的当量和范围,以防对隧道口部结构和围岩造成破坏。

1.9 设计原因

由于隧道的地质条件、自然环境等存在差异,所以在进行隧道设计时必须考虑到隧道的差异性,合理进行隧道设计。隧道口部设计对于边坡稳定性和断面形式等都具有重要的影响,同时对于隧道口部应力结构和稳定性也具有重要作用。

1.10 偏压效应

隧道偏压是指口部支护结构受到的围岩压力呈不对称的状态,在这种状态下,围岩结构不稳定,极易发生变形,引发滑塌。偏压效应是隧道建设中常见的问题,同时也是口部支护结构的重要影响因素之一。晏鄂川等^[18]通过离散元方法对多因素偏压效应下围岩的应力分布情况进行了数值分析,结果表明多因素偏压效应下围岩压力分布不均匀,对围岩的安全与稳定造成极大的影响,在这种状态下,支护结构不稳定,口部极易发生变形,引发滑塌。

1.11 地质勘测

隧道地质勘测是隧道建设的一个重要准备过程,可为隧道设计、建设和维护提供重要的基础,也可为口部滑塌预防提供依据。隧道地质勘测包括工程地质勘测和水文地质勘测等,地质勘测不仅仅是在隧道建设前进行,也要在隧道建设不同时期对不同地段进行地质勘测,并进行实时地质监控。

2 公路隧道口部滑塌风险解释结构模型的建立

ISM 方法是美国华菲尔特教授在 1973 年为分析复杂社会经济系统有关问题而开发的一种方法^[19]。ISM 方法将复杂的系统分解为若干子系统要素,并探究子系统要素之间支持依赖等相关作用。本文利用 ISM 方法分析影响隧道口部滑塌因素之间的支持依赖关系,并找出滑塌因素之间的支持依赖作用,为预防滑塌提供科学的依据和指导。ISM 方法建模的主要步骤为:建立关联矩阵、建立可达矩阵、要素级别分配和生成层次结构图。

2.1 建立隧道口部滑塌风险的关联矩阵

将影响隧道口部滑塌的 11 个因素,即隧道围岩、地下水、隧道口部边坡失稳、隧道口部断面形式、

隧道施工技术风险、隧道养护技术、地质灾害、爆破扰动、设计原因、偏压效应和地质勘测,分别命名为 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 、 T_7 、 T_8 、 T_9 、 T_{10} 、 T_{11} ,以口部滑塌风险度量 T_0 为目标参量,根据影响因素之间的关系,建立关联矩阵。

定义如下:通过 ISM 工作小组和 DELPHI 法^[20]等方式,结合文献资料^[21-22],调查、咨询影响口部滑塌因素之间的关系,判别因素是否存在直接作用。如果因素 T_i 对 T_j 有直接作用,则关联矩阵元素 $a_{ij} = 1$;如果因素 T_i 对 T_j 没有直接作用,则关联矩阵元素 a_{ij} 为 0,且 $a_{ii} = 1$ 。 a_{ij} 与 a_{ji} 表示不同的含义, a_{ij} 表示因素 T_i 对 T_j 的直接作用, a_{ji} 表示因素 T_j 对 T_i 的直接作用。建立表达隧道口部滑塌风险主体 11 个因素关联特性的矩阵,得到关联矩阵 A :

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} T_0 & T_1 & T_2 & T_3 & T_4 & T_5 & T_6 & T_7 & T_8 & T_9 & T_{10} & T_{11} \end{matrix} \\ \begin{matrix} T_0 \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ T_7 \\ T_8 \\ T_9 \\ T_{10} \\ T_{11} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

2.2 建立隧道口部滑塌风险的可达矩阵

将得到的关联矩阵 A 与单位矩阵 $E = \text{dig}(1, 1, \dots, 1)$ 进行求和,应用 ISM 模型的可达性推理,对 $(A+E)$ 进行幂推理运算,有

$$\begin{cases} (A+E)^{n+1} = (A+E)^n \\ (A+E)^1 \neq (A+E)^2 \neq \dots \neq (A+E)^{n-1} \end{cases} \quad (2)$$

公式(2)幂推理运算本质是基于布尔代数的数学运算。令 M 表示可达矩阵,即 $M = (A+E)^n$,此时满足稳态性。

可达矩阵 M 是用矩阵形式来描述影响隧道口部滑塌因素之间经过一定长度的通路后可以到达的程度。其中,矩阵元素 M_{ij} 为 1 代表 T_i 到 T_j 存在可到达的路径,也就是说 T_i 对 T_j 存在直接作用。因此可达矩阵表达了影响隧道口部滑塌因素之间是否存在直接作用。对 $(A+E)$ 进行幂运算,得到可达矩阵 M :

$$M = \begin{bmatrix} & T_0 & T_1 & T_2 & T_3 & T_4 & T_5 & T_6 & T_7 & T_8 & T_9 & T_{10} & T_{11} \\ T_0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ T_2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ T_3 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ T_4 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ T_5 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_6 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_7 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ T_8 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ T_9 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ T_{10} & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ T_{11} & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

(3)

2.3 隧道口部滑塌风险要素级别分配和生成层次结构模型

在可达矩阵 M 中可以看到 T_1 、 T_3 、 T_4 、 T_9 和 T_{10} 行和列对应的元素完全一样,所以可以把其看作一个因素,保留 T_1 消去 T_3 、 T_4 、 T_9 和 T_{10} ,接着对可达矩阵进行层次化处理,建立反映滑塌因素支持依赖关系的递阶结构模型。

设 $M(S_i)$ 为可达集,表示从 S_i 出发可以达到的因素集合;设 $A(S_i)$ 为前因集,表示可以达到 S_i 的因素集合。其关系表达式如下:

$$\begin{cases} M(S_i) = \{S_j | M_{ij} = 1\} \\ A(S_i) = \{S_j | M_{ji} = 1\} \end{cases} \quad (4)$$

从 $M(S_i)$ 和 $A(S_i)$ 中求交集 $M(S_i) \cap A(S_i)$,当满足 $M(S_i) \cap A(S_i) = M(S_i)$ 时,表明其他因素可以到达该因素,而从该因素不能反向到达别的因素。

按照此方法可依次求得每一级的可达集、前因集和交集。对新的可达矩阵进行要素级别分配,得到新的可达矩阵 M^* :

$$M^* = \begin{bmatrix} & T_0 & T_5 & T_6 & T_1 & T_2 & T_7 & T_8 & T_{11} \\ T_0 & \boxed{1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_5 & 1 & \boxed{1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_6 & 1 & \boxed{0} & \boxed{1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_1 & 1 & 1 & 0 & \boxed{1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_2 & 1 & 1 & 0 & 1 & \boxed{1} & 0 & 0 & 0 \\ T_7 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & \boxed{1} & 0 & 0 \\ T_8 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & \boxed{1} & 0 \\ T_{11} & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \boxed{1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

对角线上每一个单位矩阵对应一个递阶结构层次,即影响隧道口部滑塌的因素可以分为 4 个层次:第一层为 T_0 ,第二层为 T_5 和 T_6 ,第三层为 T_1 、 T_3 、

T_4 、 T_9 和 T_{10} ,第四层为 T_2 、 T_7 、 T_8 、 T_{11} 。将各因素按层次关系划分依次排列,根据可达矩阵的相互影响关系和递阶结构层次,可以得到隧道口部滑塌风险影响因素 ISM 模型的递阶有向图,见图 1。

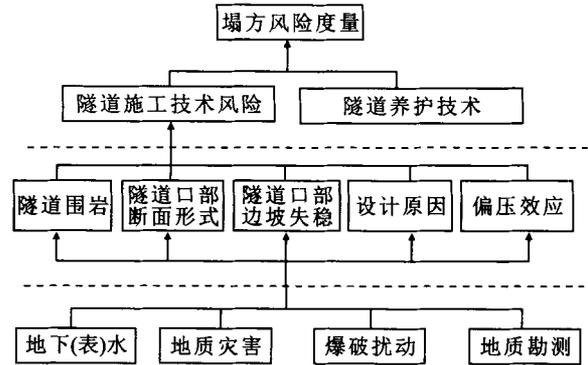


图 1 隧道口部滑塌风险影响因素 ISM 模型的递阶有向图

Fig. 1 Hierarchical diagram of ISM model of risk influencing factors of the landslide at the tunnel entrance

由图 1 可见,隧道口部滑塌风险 ISM 模型是一个具有 4 层的递阶结构,利用该模型进行隧道口部滑塌风险影响因素分析,可以将隧道口部滑塌风险影响因素的关系层次化和条理化。

3 隧道口部滑塌风险 ISM 分析

本文构建了隧道口部滑塌风险 ISM 模型,找出了引发滑塌的主要因素及其因素之间的支持依赖关系,解释了隧道口部滑塌风险结构模型的整体性和影响因素的相关性,并得到以下分析结果:

(1) 隧道施工技术风险和隧道养护技术是引发隧道口部滑塌的直接因素,是隧道口部滑塌的内因,受到下一级因素的影响,其他因素主要通过影响这两个因素引发隧道口部滑塌,表明隧道施工技术水平和养护技术水平从根本上决定隧道口部滑塌发生的可能性,因此在隧道建设和后期养护时,尤其要注重隧道的施工和养护。

(2) 中间影响因素为隧道围岩、隧道口部断面形式、隧道口部边坡失稳、设计原因和偏压效应,这些因素通过影响隧道施工技术风险和隧道养护技术引发隧道口部滑塌。

(3) 地下(表)水、地质灾害、爆破扰动和地质勘测是引发隧道口部滑塌的深层次外部因素,这些因素通过影响隧道口部滑塌的内部因素引发滑塌,是引发滑塌的关键特征,需要高度重视。尤其是在地质灾害、爆破扰动发生后应当提高警惕,加强隧道管

理,并采取应急措施,这样将会大大降低隧道口部滑塌发生的可能性,减小滑塌引发的严重后果。

4 结 语

面对隧道口部滑塌事故的频繁发生,需要建立合理可靠的系统结构模型,分析引发隧道口部滑塌因素的层次关系,构建科学的系统评价体系,以为量化评价建立坚实的基础。

隧道口部滑塌解释结构模型(ISM)以影响因素间的支持依赖关系为基础,以量化的方式建立系统结构模型,找出影响要素间的层次关系,为科学地判定各个影响要素对隧道口部滑塌的影响程度提供了理论依据,为隧道口部滑塌风险影响要素评价体系的构建提供了一种有效的方法。

隧道口部滑塌ISM模型只是定性地分析了影响要素的支持依赖关系,没有建立要素关系间影响程度的量化标准,还需要结合模糊数学、标度集等方法建立量化的二次评价模型,以进一步研究要素间的影响关系,这将是今后的研究方向。

参考文献:

- [1] 陈龙,黄宏伟. 岩石隧道工程风险浅析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(1):110-115.
- [2] 汪成兵,朱合华. 隧道塌方机制及其影响因素离散元模拟[J]. 岩土工程学报,2008,6(3):450-456.
- [3] 周建昆,吴坚. 岩石公路隧道塌方风险事故树分析[J]. 地下空间与工程学报,2008,30(3):991-998.
- [4] Aldorf J, Ďuriš L. Numerical analysis of Jablunkov tunnel collapse[J]. *Transactions of the VŠB Technical University of Ostrava. Construction Series*,2010,10(1):1-8.
- [5] Shou K J, Lin J F. Multi-scale landslide susceptibility analysis along a mountain highway in Central Taiwan[J]. *Engineering Geology*,2016,212:120-135.
- [6] 袁永才,李术才,李利平,等. 山岭隧道塌方风险评价理论与方法及工程应用[J]. 中南大学学报(自然科学版),2016,47(7):2406-2414.
- [7] 王凤山,戎全兵,张宏军. 国防工程震害风险分析体系的ISM研究[J]. 计算机工程与应用,2015,51(12):10-15.
- [8] 陈娇,雷娟. ISM-联系熵安全培训效果评价体系及应用[J]. 安全与环境工程,2017,24(3):126-131.
- [9] 冯明洋,肖国清,张华兵. 基于ISM与优序对比法的油气管道第三方破坏致因分析[J]. 安全与环境工程,2015,22(6):90-94.
- [10] 焦斌权,靳晓光,李晓红,等. 岩溶区隧道围岩支护体系稳定性研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2004,15(3):8-82.
- [11] 李军. 地下水作用下近水平岩层隧道塌方机理分析[J]. 湖南交通科技,2015,42(4):125-127.
- [12] 张颢,汪成兵,周宁,等. 某黄土隧道洞口段边坡坍塌机理分析[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(S1):307-311.
- [13] 赵兴东,段进超,唐春安,等. 不同断面形式隧道破坏模式研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(S2):4921-4925.
- [14] 王亚琼,李杰,王金宝,等. 隧道施工技术风险评估及风险控制措施研究[J]. 公路,2015(6):259-263.
- [15] 王国欣,谢雄耀,黄宏伟. 公路隧道洞口滑坡的机制分析及监控预报[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(2):268-274.
- [16] 苏生瑞,朱合华,陈建峰. 云南省元磨公路大风垭口隧道施工地质灾害分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2003,14(2):44-49.
- [17] 吴亮,李凤,卢文波,等. 爆破扰动下邻近层状围岩隧道的稳定性与振速阈值[J]. 爆炸与冲击,2017,37(2):208-214.
- [18] 晏鄂川,周瑜,毛伟,等. 多因素引发的公路隧道偏压效应分析[J]. 地下空间与工程学报,2012,8(5):1041-1047.
- [19] Warfield J N. Toward interpretation of complex structural models[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*,1974,SMC-4(5):405-417.
- [20] 田军,张朋柱,王刊良,等. 基于德尔菲法的专家意见集成模型研究[J]. 系统工程理论与实践,2004,24(1):57-62,69.
- [21] 王迎超. 山岭隧道塌方机制及防灾方法[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(11):2376.
- [22] 李术才,石少帅,李利平,等. 山岭隧道塌方风险评价的属性识别模型与应用[J]. 应用基础与工程科学学报,2013,21(1):147-158.

(上接第122页)

参考文献:

- [1] 王厂亮. 石化生产装置安全评价的模式与方法[J]. 化工劳动保护,1998,19(5):6-8.
 - [2] 吴大鹏. 石油化工行业安全生产分析[J]. 当代化工,2007,36(2):35-37.
 - [3] 张乃禄. 安全评价技术[M]. 西安:电子科技大学出版社,2011.
 - [4] 樊运晓,罗云. 系统安全工程[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
 - [5] 李青,陆延金,李宁萍,等. 三角模糊数的模糊故障树分析及其应用[J]. 中国矿业大学学报,2000,29(1):56-59.
 - [6] 侯福均,肖贵平,杨世平. 模糊事故树分析及其应用研究[J]. 河北师范大学学报(自然科学版),2001,25(4):464-467.
 - [7] 贾智伟,景国勋,张强,等. 基于三角模糊数的矿井火灾事故树分析[J]. 安全与环境学报,2004,4(6):62-65.
 - [8] 张悦,景国勋,张凯. 聚合釜爆炸事故树模糊数学分析法研究[J]. 安全与环境学报,2010,10(2):171-174.
 - [9] 邵辉. 安全系统工程[M]. 南京:南京大学出版社,2009.
 - [10] 徐志胜. 安全系统工程[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
 - [11] 吴铭. 模糊事故树分析及其在施工安全管理中的应用[D]. 天津:天津大学,2014.
 - [12] Rothschild M. Fault tree and layer of protection hybrid risk analysis[J]. *Process Safety Progress*,2004,23(3):185-190.
 - [13] 袁巧,谢正文,曲方. 饮食业油烟道火灾事故概率的模糊事故树分析[J]. 工业安全与环保,2009,35(6):49-51.
 - [14] Yamashiro M. The median for a L-R fuzzy number[J]. *Microelectronics Reliability*,1995,35(2):269-271.
- 通讯作者:张巨伟(1962—),男,教授,主要从事安全工程与工程力学等方面的研究。E-mail:z6682201@126.com