

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230622001

# 考虑施工时序的隧道工作面坍塌风险分析 方法与验证\*

周鸣亮<sup>1</sup>, 李泽豫<sup>1</sup>, 黄宏伟<sup>1</sup>, 仝跃<sup>2</sup>, 张伟<sup>2</sup>

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 云南省交通规划设计研究院有限公司, 云南 昆明 650041)

**摘要:** 岩石隧道钻爆法开挖过程中存在多工序交叉作业, 且频繁遭遇复杂的地质环境, 导致工作面坍塌事故时有发生。为分析隧道施工中工作面坍塌风险, 结合 T-S (Takagi-Sugeno) 模糊事故树与贝叶斯网络, 提出了一种考虑岩石隧道施工基本事件时序性的工作面坍塌风险分析方法。广泛调研了 46 起钻爆法岩石隧道工作面坍塌事故, 筛选辨识出影响工作面稳定性的 30 项致险因子与孕险环境作为基本事件, 基于统计数据量化计算各基本事件的发生概率模糊子集与各节点间条件概率, 构建了隧道工作面坍塌 T-S 模糊事故树并映射为贝叶斯网络, 运用贝叶斯网络的双向推理功能, 计算得到各基本事件的后验概率与重要度, 筛选出部分对隧道工作面坍塌影响较大的关键基本事件。随后结合隧道施工过程中各基本事件发生的时序性, 通过在贝叶斯网络中逐次更新对应事件的风险状态, 得到工作面坍塌风险发生概率的时序性变化。以油坊坪隧道坍塌事故为工程实例, 讨论了隧道建设中考考虑施工时序的工作面坍塌风险分析的可行性与挑战, 给出了岩石隧道不同施工阶段的风险管控方案与重点, 为岩石隧道施工安全风险分析与管控提供了新的理论基础与技术手段。

**关键词:** 岩石隧道; 工作面坍塌; T-S 事故树; 贝叶斯网络; 风险分析; 时序性

**中图分类号:** U452 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)03-0579-17

## Method and Validation for Tunnel Face Collapse Risk Analysis Considering Construction Sequence

ZHOU Mingliang<sup>1</sup>, LI Zeyu<sup>1</sup>, HUANG Hongwei<sup>1</sup>, TONG Yue<sup>2</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Broadvision Engineering Consultants, Kunming 650041, China)

**Abstract:** Rock tunnel excavation using the drill-and-blast method often involves multiple concurrent operations and encounters complex geological conditions, leading to the occurrence of tunnel face collapse accidents. To analyze the risk of tunnel face collapse during tunnel construction, a risk analysis method considering the temporality sequence of basic events during rock tunnel construction was proposed, utilizing T-S (Takagi-Sugeno) fuzzy fault trees and Bayesian network. Extensive research was

\* 收稿日期: 2023-06-22; 修回日期: 2023-10-16

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52279107)、云南省黄宏伟专家工作站(202205AF150015)、云南交投科技创新计划项目(YCIC-YF-2022-15)资助

**作者简介:** 周鸣亮(1988—), 男, 副教授, 博士。主要从事多场多相岩土及地下工程安全风险研究。

E-mail: zhoum@tongji.edu.cn

**通信作者:** 黄宏伟(1966—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事岩土及地下工程风险管控、工程结构新型健康监测检测等研究。E-mail: huanghw@tongji.edu.cn

conducted on 46 tunnel face collapse accidents in rock tunnels excavated using the drill-and-blast method. Thirty hazardous factors and risk-prone environments were identified as basic events. The occurrence probabilities and conditional probabilities between nodes were quantitatively calculated based on statistical data, generating fuzzy subsets for the occurrence probabilities of each basic event. A T-S fuzzy fault tree for tunnel face collapse was constructed and mapped to a Bayesian network. By employing the bidirectional inference capability of Bayesian networks, the posterior probabilities and importance of each basic event were calculated, and the key basic events that had a significant impact on tunnel face collapse were identified and selected. Furthermore, considering the temporal occurrence of basic events during the tunnel construction process, the risk status of corresponding events was sequentially updated in the Bayesian network, enabling the assessment of the temporal variations in the probability of tunnel face collapse risk. Using the collapse accident in the Youfangping Tunnel as an engineering example, the feasibility and challenges of considering construction sequencing in the risk analysis of tunnel collapses during tunnel construction were discussed, Risk management strategies and focal points for different construction phases of rock tunnels were provided. This research offers a novel theoretical framework and technical means for the analysis and management of safety risks in rock tunnel construction.

**Keywords:** rock tunnel; tunnel face collapse; T-S fault tree; bayesian network; risk analysis; time sequence

## 0 引言

岩石隧道建设是复杂的高风险性系统工程,其所处的地质环境复杂,具有高度不确定性和多变性<sup>[1]</sup>,隧道开挖过程中的多工序交叉作业,也带来了许多潜在的安全风险隐患<sup>[2]</sup>。在钻爆法开挖过程中,因不良地质条件、不当设计施工引发的隧道工作面坍塌事故时有发生,往往导致严重的人员伤亡和经济损失。如国内山岭隧道的典型代表宜万铁路,在施工期间其马鹿箐隧道<sup>[3]</sup>、野三关隧道<sup>[4]</sup>、齐岳山隧道<sup>[5]</sup>等均发生坍塌事故。因此,在钻爆法隧道施工中,基于施工时序,及时对工作面坍塌进行风险分析显得尤为重要。

国内外学者已采用多种常见的风险分析方法对钻爆法隧道坍塌风险开展了研究,包括事故树法<sup>[6]</sup>、风险矩阵法<sup>[7-8]</sup>、层次分析法<sup>[2,9]</sup>、模糊综合评价法<sup>[10-11]</sup>、贝叶斯网络方法<sup>[12-13]</sup>、专家调查法<sup>[14-15]</sup>等。以上方法为施工前工程风险的静态辨识分析及管理控制提供了有效手段。其中,事故树方法结合专家调查法是工程实践中较为常用的方法。经典事故树法,即 Bell 故障树,于 1961 年由贝尔公司的 Watson 和 Hassl 提出,随后逐渐发展<sup>[16]</sup>。该方法通过构建从系统失败至单元故障的逻辑树进行分析,

从顶上事件(系统失败)开始,结合专家经验,逐层分析其失败原因,直至基本事件(单元故障),给出各事件间的逻辑关系,通过逻辑树进行表达,可用于分析复杂系统的安全性与可靠性<sup>[17]</sup>。但事故树基于基本事件概率计算顶事件概率时,存在布尔代数计算量过大,无法进行反向推理等缺点。与事故树相比,基于图论与概率论的贝叶斯网络方法<sup>[18]</sup>,在基本事件的不确定性表达,以及推理计算效率方面存在明显优势,并具有独特的双向推理功能,但其网络结构构建较为复杂,传统贝叶斯网络构建需基于大量数据统计分析,以确定不同节点的逻辑关系。因此,将事故树与贝叶斯网络相结合是目前较为常用的风险分析方法<sup>[19]</sup>。将事故树中各事件及逻辑门映射为贝叶斯节点以及条件概率表,不仅降低了原本事故树布尔计算的复杂性,解决了贝叶斯网络逻辑结构构建的难点,更提供了双向推理功能,可直观反映基本事件对顶上事件的影响<sup>[20]</sup>。

但在现场工程风险分析中,受限于传统事故树中对基本事件的二态假设,以及与、或门的简单条件概率等不足,传统事故树及其转化的贝叶斯网络在深入分析复杂多态系统风险时仍存在较多问题。在隧道工程中,从隧道围岩<sup>[21-22]</sup>到地下水,再到支护结构与现场监测,存在各种不确定性<sup>[23]</sup>,传统事故树中基本事件发生概率的取值使得这种不确定性

无法被考虑。而 T-S 模糊事故树采用 T-S 门代替传统的与、或等逻辑门,在基本事件先验概率中引入模糊集合理论,同时考虑了各事件的多态性,较好地解决了传统事故树对基本事件描述的不足。该事故树源自 T.Takagi 等<sup>[24]</sup>于 1985 年在模糊控制理论领域所提出的 Takagi-Sugeno 模型,并由宋华等<sup>[25]</sup>将 T-S 模型与传统事故树相结合而提出,随后由姚成玉等<sup>[26]</sup>、陈东宁等<sup>[27]</sup>、陈舞等<sup>[6]</sup>拓展应用,但 T-S 事故树依然存在计算效率低与无法反向推理的缺陷。因此,本文拟结合 T-S 事故树映射贝叶斯网络进行风险分析,在兼具计算便捷,双向推理等优点的同时,还在构建多态节点与复杂条件概率表上具有优势<sup>[28-29]</sup>。

在实际岩石隧道的钻爆法施工过程中,随着开挖循环中各种致险因子、孕险环境等风险基本事件的暴露,隧道工作面的坍塌风险便会逐渐累积<sup>[30-31]</sup>,若不能及时研判施工中工作面坍塌风险并采取针对性措施,极易导致隧道在多种风险事件的共同作用下发生坍塌<sup>[32-33]</sup>。因此,在施工前开展隧道整体工作面坍塌风险分析的基础上,还需对施工过程中各风险事件的发展给予足够的重视,并根据施工中不同区段处基本事件发生的时序性变化进行分区段风险分析。针对隧道施工期时序性动态风险分析,目前常用的方法包括专家调查法、模糊评价法与层次分析法等,周宗青等<sup>[30]</sup>结合模糊评价法与层次分析法,构建了隧道塌方风险模糊层次评估模型,基于动态信息实时修正进行评估。刘靖等<sup>[34]</sup>采用层次分析法结合隶属度函数理论,计算新奥法隧道施工中动态风险指数。许振浩等<sup>[35]</sup>结合专家评分法与综合赋权法,建立了岩溶隧道突水突泥动态评估施工许可机制。此外,李宜城等<sup>[36]</sup>结合动态权重与指标体系法、卢鑫月等<sup>[37]</sup>结合模糊评价法与动态贝叶斯方法,均对隧道施工风险动态评估进行了尝试。但现有风险时序性动态分析方法在进行指标评判打分时,大多依赖专家主观经验,较少有结合实际统计数据展开风险分析。

为此,本文广泛调研了文献中钻爆法岩石隧道工作面坍塌事故的统计数据,筛选辨识坍塌致险因子与孕险环境作为基本事件,量化出各基本事件的发生概率,结合 T-S 模糊事故树和贝叶斯网络的双向推理功能,量化得到各基本事件的后验概率与重要度。基于岩石隧道施工中风险基本事件发生的时序性,逐次更新贝叶斯网络,计算其风险概率变

化,实现工作面坍塌风险的时序分析。以油坊坪隧道坍塌事故为工程实例,讨论了隧道建设中工作面坍塌风险时序性分析的可行性与挑战,进而给出了针对隧道实际工程的风险管控方案。在依托地勘资料对隧道全线实行风险区段划分后,基于坍塌风险时序性分析方法,随施工进度分析工作面坍塌风险期望,并提出:“预开挖段关注超前地质预报与加固,开挖中区段注重施工质量与风险预警,已开挖区段监控量测支护结构,全施工段严格管理”的风险管控思想,可及时预警高风险区段,有助于工程中管控措施的及时准确实施,有效避免坍塌事故的发生。为岩石隧道施工安全风险分析提供了新的理论手段。

## 1 基于 T-S 模糊故障树与贝叶斯网络的时序性风险分析方法

### 1.1 隧道工作面坍塌风险时序性分析方法

为了量化分析隧道施工中工作面坍塌风险时序性变化过程,本文采用 T-S 模糊事故树映射贝叶斯网络,并提出考虑施工中基本事件发生时序的风险分析方法。首先,基于统计案例构建 T-S 模糊事故树,以统计得到的基本事件发生概率作为其风险发生概率,以不同事件的重要度作为权重指标加权计算其条件概率表,并映射为贝叶斯网络构建风险分析量化算法。随后,根据勘察-设计-施工的时序性,对工程事故中所发生的基本事件进行排序并评估其风险状态,继而按时序计算各基本事件对应风险状态的发生概率模糊子集。基于构建的贝叶斯网络计算各基本事件时序性发生后,隧道工作面坍塌风险发生概率  $P(T)$  的变化过程及最终值。在实际隧道工程中,可在施工过程中对各区段进行时序性风险分析。在具体区段的风险分析过程中,对施工中发现的不良地质环境、质量与安全隐患,应及时调整对应基本事件的风险状态,计算工作面坍塌风险的发生概率,在风险概率超过设定阈值时应立即采取相应控制措施,直至风险达到工程可接受程度。

### 1.2 T-S 模糊事故树基本理论

T-S 模糊事故树在经典的 Bell 故障树基础上,通过引入一系列基于 IF-THEN 规则的 T-S 门替换原本的二态与、或等逻辑门而构成<sup>[25]</sup>,其 IF-THEN

规则形如式(1)所示:

$$R^{(l)}: \text{IF } x_1 \text{ is } F_1^{(l)} \text{ and } x_2 \text{ is } F_2^{(l)} \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } F_n^{(l)} \\ \text{THEN } y^{(l)} = f^{(l)}(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

除了T-S门外,一个完整的T-S模糊事故树还包括多个基本事件 $x_i$ ,中间事件 $y_i$ ,顶上事件T等。与传统事故树一样,T-S模糊事故树拓扑结构的构建,需要基于大量实际案例逐层分析,确定不同事件间的逻辑关系,并通过T-S门对逻辑关系进行定量描述。考虑到基本事件风险状态的模糊性,T-S事故树采用模糊数描述基本事件的状态。一个简单的T-S模糊事故树如图1所示。

T-S模糊门是T-S模糊事故树的核心,当某个T-S模糊门存在 $n$ 个输入事件 $x_i(i=1,2,\dots,n)$ ,其风险状态分别为模糊数 $x_i^{a_i}(a_i=1,2,\dots,k_i)$ ,其中 $k_i$ 为输入事件 $x_i$ 的风险状态总数,并满足 $0 \leq x_i^1 < x_i^2 < \dots < x_i^{k_i} \leq 1$ 。该T-S门可对应 $r$ 个不同规则 $l(l=1,2,\dots,r)$ ,其中 $r = k_1 * k_2 * \dots * k_n = \prod_{i=1}^n k_i$ ,代表了不同基本事件风险状态的发生组合总数。输出事件 $y$ 的风险状态可表征为模糊数 $y^{b_j}(b_j=1,2,\dots,\eta_j)$ ,其中 $\eta_j$ 为输出事件 $y$ 的风险状态总数,并满足 $0 \leq y^1 < y^2 < \dots < y^{\eta_j} \leq 1$ 。对于某个特定的T-S门规则 $l$ ,当 $n$ 个输入事件的风险状态分别为 $x_1^{a_1}, x_2^{a_2}, \dots, x_n^{a_n}$ 时,输出事件 $y$ 的风险状态为 $y^{b_j}$ 的可能性为 $P^l(y^{b_j})$ 。

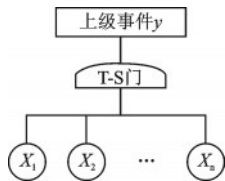


图1 T-S模糊事故树示意  
Fig.1 T-S fuzzy fault tree

### 1.3 基本事件发生概率

在构建T-S模糊事故树的拓扑结构,并确定了T-S门逻辑规则后,还需确定各基本事件的风险状态以及发生概率。传统事故树通常采用二态假设,即考虑基本事件处于“正常”或“失效”两种状态,分别采用0、1表示。但在实际工程中,各节点的失效情况更加复杂,T-S模糊事故树可采用多态节点分析。从平衡准确性与实际可操作性行的基础上,本文采用模糊数0、0.5、1来表征各节点低风险、中风险、高风险这三种风险状态;以三种状态进行描述,能相对简洁地捕捉主要风险变化趋势,在实际工程中也能更方便进行划分,清晰评估结果并方便施工

人员理解。为考虑不同风险状态下各节点所代表的基本事件发生概率的不确定性,本文采用三角隶属函数的模糊子集 $\tilde{P}(x_i^{a_i})$ 来描述各节点在低、中、高这三种风险状态下的发生概率(图2)。

$$\tilde{P}(x_i^{a_i}) = \{p^m - \Delta p^l, p^m, p^m + \Delta p^r\} \quad (2)$$

以案例统计结果作为模糊子集的中心值 $p^m$ ,可反映其平均发生概率,即该事件的期望概率; $\Delta p^l$ 与 $\Delta p^r$ 为左右模糊区,反映隧道工程的不确定性以及统计结果的模糊性。当 $\Delta p^l = \Delta p^r = 0$ 时,基本事件的模糊子集退化为确定的风险发生概率值。

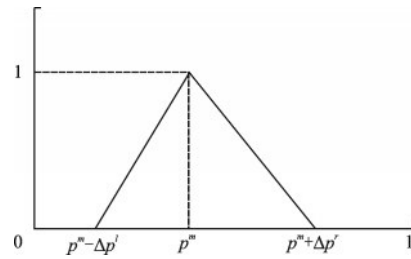


图2 三角隶属函数

Fig.2 Triangular membership function

### 1.4 基本事件的后验概率与重要度计算

根据T-S模糊事故树,可以映射构建对应的贝叶斯网络。图3为图1中T-S模糊事故树转化后的贝叶斯网络示意图。其中,T-S模糊事故树的底事件、中间事件、顶上事件需逐一映射为贝叶斯网络中的根节点、中间节点与叶节点。继而根据T-S模糊事故树中不同事件的关系连接贝叶斯网络的节点,连接节点的有向边方向与T-S门的输入输出关系对应。根据各T-S门的规则,可量化计算贝叶斯网络中对应节点的条件概率。T-S模糊事故树中各基本事件的发生概率则赋值于贝叶斯中对应根节点作为先验概率。

当已知基本事件不同风险状态的发生概率模糊子集 $\tilde{P}(x_i^{a_i})$ 时,基于贝叶斯网络计算顶事件 $T$ 的风险状态为 $T_q$ 时的发生概率模糊子集公式如式(3)所示:

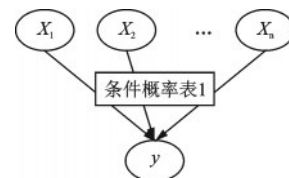


图3 T-S模糊事故树映射的贝叶斯网络

Fig.3 Bayesian network mapped from T-S fuzzy fault tree

$$\begin{aligned} \tilde{P}(T=T_q) &= \sum_{x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_m} \tilde{P}(x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_m; \\ T=T_q) &= \sum_{\lambda(T)} \tilde{P}(T=T_q|\lambda(T)) \times \\ &\sum_{\lambda(y_1)} \tilde{P}(y_1|\lambda(y_1)) \times \sum_{\lambda(y_2)} \tilde{P}(y_2|\lambda(y_2)) \times \dots \times \\ &\sum_{\lambda(y_m)} \tilde{P}(y_m|\lambda(y_m)) \times \tilde{P}(x_1^{a_1}) \times \tilde{P}(x_2^{a_2}) \times \\ &\tilde{P}(x_n^{a_n}) \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $\lambda(T)$  为叶节点  $T$  的父节点集合;  $\lambda(y_j)$  为中间节点  $y_j$  的父节点集合;  $\tilde{P}(x_i^{a_i})$  为根节点  $x_i$  风险状态为  $x_i^{a_i}$  时的发生概率模糊子集。

此外, 贝叶斯网络的后向推理功能可计算叶节点风险状态为  $T_q$  时, 所有根节点  $x_i$  风险状态为  $x_i^{a_i}$  的后验概率  $P(x_i=x_i^{a_i}|T=T_q)$ 。其计算公式如式(4)所示:

$$P(x_i=x_i^{a_i}|T=T_q) = E \left[ \frac{\tilde{P}(x_i=x_i^{a_i}, T=T_q)}{\tilde{P}(T=T_q)} \right] \quad (4)$$

式中,  $\tilde{P}(x_i=x_i^{a_i}, T=T_q)$  为当根节点  $x_i$  风险状态为  $x_i^{a_i}$  时, 叶节点  $T$  风险状态为  $T_q$  的后验概率模糊子集;  $E \left[ \frac{\tilde{P}(x_i=x_i^{a_i}, T=T_q)}{\tilde{P}(T=T_q)} \right]$  为模糊子集的重心值,

以精确值反映模糊子集的数学期望值。

最后, 贝叶斯网络可计算所有根节点的模糊重要度、关键重要度等参数, 可有效反映不同根节点变化对叶节点(隧道工作面坍塌)的影响。其中, 根节点  $x_i$  对叶节点  $T$  风险状态为  $T_q$  的模糊重要度  $I_{T_q}^{Fu}(x_i)$  反映了根节点  $x_i$  风险状态从 0 到 1 的演变过程中对叶节点风险状态的平均影响程度, 由于根节点的发生, 导致叶节点的模糊概率上升, 因此模糊重要度可反映根节点对整个系统可靠性的影响。其计算公式如式(5)所示:

$$I_{T_q}^{Fu}(x_i) = \frac{1}{k_i - 1} E \left\{ \tilde{P} \left[ T=T_q, \tilde{P}(x_i=x_i^{a_i})=1 \right] - \tilde{P} \left[ T=T_q, \tilde{P}(x_i=x_i^{a_i})=0 \right] \right\} \quad (5)$$

式中,  $\tilde{P} \left[ T=T_q, \tilde{P}(x_i=x_i^{a_i})=1 \right]$  为根节点  $x_i$  风险状态为  $x_i^{a_i}$  时, 叶节点  $T$  风险状态为  $T_q$  的模糊子集;  $\tilde{P} \left[ T=T_q, \tilde{P}(x_i=x_i^{a_i})=0 \right]$  为根节点  $x_i$  风险状态为 0 时, 叶节点  $T$  风险状态为  $T_q$  的模糊子集; 两者相减后取其重心值, 即为根节点  $x_i$  风险状态为  $x_i^{a_i}$  时, 叶节点  $T$  风险状态为  $T_q$  的模糊重要度。

然而模糊重要度中, 没有考虑各根节点原本发生概率的不同, 以及各根节点发生改变的难易程度

不同等因素。关键重要度  $I_{T_q}^{Cr}(x_i)$  是在模糊重要度  $I_{T_q}^{Fu}(x_i)$  的基础上, 对各根节点原本发生概率加以考虑, 更加客观地反映叶节点对根节点的影响, 其计算公式如式(6)所示:

$$I_{T_q}^{Cr}(x_i) = \frac{1}{k_i - 1} \sum_{a_i=1}^{k_i} E \left[ \frac{\tilde{P}(x_i=x_i^{a_i}) I_{T_q}^{Fu}(x_i)}{\tilde{P}(T=T_q)} \right] \quad (6)$$

因此, 基于 T-S 事故树转化的贝叶斯网络, 可计算不同基本事件风险状态下, 顶事件(隧道工作面坍塌)的发生概率, 以及基本事件的后验概率与重要度, 并对各基本事件进行定性和定量分析。通过考虑各基本事件发生的时序性, 可分析隧道工作面坍塌风险发生概率的时序变化过程, 实现工作面坍塌风险的及时预警。

## 2 基本事件概率量化的工作面坍塌风险时序性分析

### 2.1 基于案例分析的 T-S 模糊事故树构建

现有岩石隧道工作面坍塌的案例研究, 主要对坍塌成因进行简单总结, 定性描述事故的发生时间, 损失程度, 时空间分布等, 但缺少对工作面坍塌致险因子和孕险环境等基本风险事件的量化分析<sup>[13, 38-41]</sup>。本文选取了国内外 46 个典型岩石隧道工作面坍塌案例进行分析(包括北岭山隧道<sup>[42]</sup>、飞仙关隧道<sup>[43]</sup>、日本日暮山隧道<sup>[44]</sup>等, 案例及其引文见附录 1), 基于数理统计分析对工作面坍塌基本事件进行筛选、确定和量化, 确定基本事件与中间事件的逻辑关系, 构建隧道工作面坍塌的 T-S 模糊事故树拓扑结构。

案例分析中, 针对每个案例, 列举其施工全过程中的所有风险基本事件并分类, 总结出明确的孕险环境(如断层破碎带, 高渗透富水岩体等)以及典型的致险因子(超前地质预报不准确/认识不充分, 初衬施作不当等)。基于 46 个案例中所有出现的孕险环境和致险因子的数理统计, 总结出顶上事件(钻爆法岩石隧道工作面坍塌)相关的 30 个不同风险基本事件( $X_1$  至  $X_{30}$ ), 将其归类为不良地质(A1)与人为失误(A2)两大类中间事件, 并将不良地质(A1)细分为围岩稳定性差(B1)与地下水作用(B2), 人为失误(A2)细分为设计不合理(B3)与施工质量不达标(B4)。逐步细分后共得到 12 个中间事件, 结合 30 个基本事件构建的岩石隧道工作面坍塌 T-S 模糊事故树如图 4 所示。

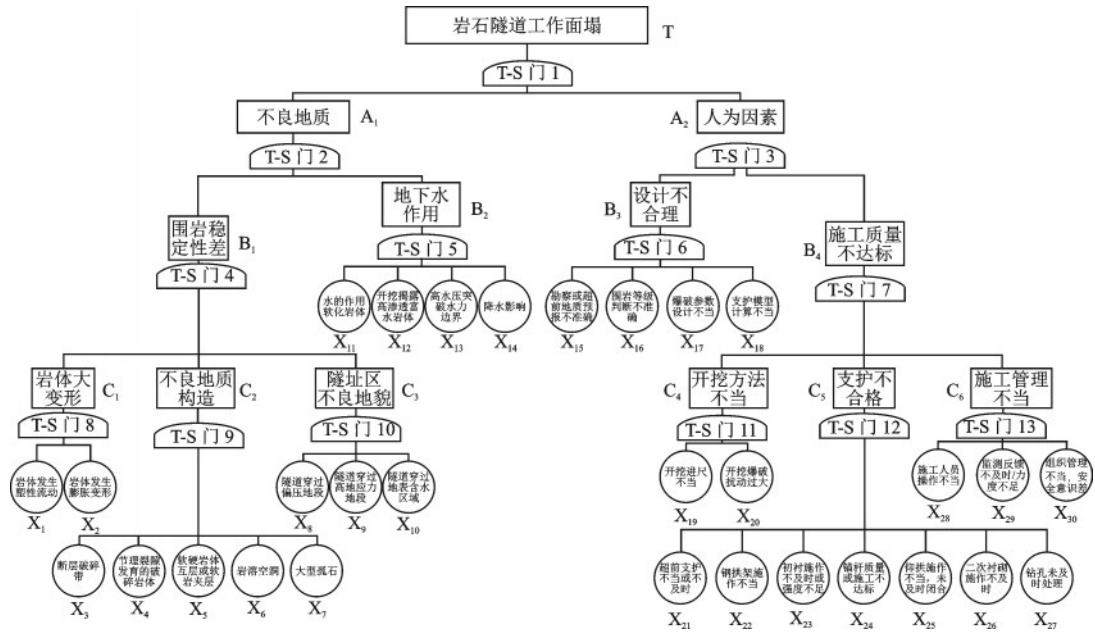


图4 岩石隧道工作面坍塌 T-S 模糊事故树

Fig.4 T-S fuzzy fault tree of rock tunnel face collapse

## 2.2 基本事件概率计算方法

本文采用三角隶属函数的模糊子集来描述各基本事件在不同风险状态下的发生概率。基本事件的风险状态采用低风险、中风险、高风险进行划分,其中低风险状态(模糊数 $x_i=0$ )代表该基本事件未发生,中风险状态(模糊数 $x_i=0.5$ )与高风险状态(模糊数 $x_i=1$ )均代表该事件发生但造成的风险损失程度不同。通过对单个案例中所有基本事件进行重要程度排序以及归一化处理,量化基本事件的重要度指标。以“ $k$ ”代表某基本事件的重要度排序,反映其在事件中的重要程度,这是一个相对主观的参数,主要根据事故统计报告中对不同风险因素的描述进行判定排序得到。

以龙潭公路隧道<sup>[45]</sup>为例,根据工作面坍塌事故分析报告提取出5个发生的基本事件,分别为:节理裂隙发育的破碎岩体( $X_4$ )、软硬岩体互层( $X_5$ )、开挖揭露高渗透富水岩体( $X_{12}$ )、高水压突破水力边界( $X_{13}$ )、初期支护破坏( $X_{23}$ ),其余25个基本事件均未发生,可用低风险状态来描述。依照案例报告,将5个基本事件对诱发工作面坍塌事故的影响进行重要度排序。事故报告中强调,水是工作面坍塌的主要诱因,因此高渗透富水岩体最为重要( $X_{12}$ ),高水压突破水力边界次之( $X_{13}$ )。除了水的作用外,隧址区围岩破碎导致岩体稳定性差,因此裂隙发育的破

碎岩体( $X_4$ )排第三。另外初期支护破坏( $X_{23}$ ),导致工作面无法承担高水压力,排第四位。最后软硬岩体互层( $X_5$ )在本案例中对隧道坍塌影响最小。五个基本事件可根据不同权值来赋予重要度: $X_{12}=5$ ,  $X_{13}=4$ ,  $X_4=3$ ,  $X_{23}=2$ ,  $X_5=1$ 。进而,对该事故所有基本事件的重要度进行归一化处理,如式(7)所示:

$$I_k = \frac{n+1-k}{\sum_{i=1}^n i} \quad (7)$$

式中, $I_k$ 为归一化重要度; $n$ 为该案例中基本事件的总数; $k$ 为某个基本事件的重要度排序。

基于以上量化分析方法,计算得到46个案例对应基本事件的重要度统计表(附录2),每个基本事件在46个案例中的归一化重要度均值可用于描述该基本事件的发生概率 $p_i$ ( $i=1, 2, \dots, 30$ )。由于46个案例文献的描述中缺乏与各基本事件风险状态相关细节,可假设中、高风险状态的发生概率相同,因此每个基本事件的中、高风险状态所对应的风险发生概率模糊子集中心值( $p_i^m$ )均为 $0.5p_i$ 。考虑统计的模糊性与隧道工程的不确定性,参照已有文献,假设15%的左右模糊区间 $\Delta p_i^l = \Delta p_i^r = 0.15p_i^m$ ,构建出各基本事件的发生概率模糊子集(表1)。基于发生概率,可知节理裂隙发育的破碎岩体( $X_4$ )、水软化岩体( $X_{11}$ )以及断层破碎带( $X_{03}$ )是工作面坍塌事故中多发的高频次风险基本事件。

表 1 基本事件发生概率,后验概率,重要度等参数整合表

Table 1 Integration table of basic event failure probability, posterior probability, importance and other parameters

代号	基本事件	归一化重要度	经典事故树			T-S 模糊事故树					
			发生概率 $p_i$	后验概率	发生概率模糊子集 $\tilde{P}(x_i=1)$	后验概率		模糊重要度		关键重要度	
						$P(x_i=1 T=1)$	$I_{T_q}^{F_u}(x_i)$	$I_{T_q}^{F_u}(x_i)$	$I_{T_q}^{C_r}(x_i)$	$I_{T_q}^{C_r}(x_i)$	
						$x_i=0.5$	$x_i=1$	$T_q=0.5$	$T_q=1$	$T_q=0.5$	$T_q=1$
X01	岩体发生塑性流动	0.540 1	0.011 7	0.026 2	{0.005 0,0.005 9,0.006 7}	0.006 1	0.006 9	0.162 8	0.065 0	0.005 9	0.006 5
X02	岩体发生膨胀变形	0.461 3	0.010 0	0.023 4	{0.004 3,0.005 0,0.005 8}	0.005 5	0.006 1	0.162 6	0.064 4	0.005 3	0.005 8
X03	断层破碎带	3.869 7	0.084 1	0.187 6	{0.035 7,0.042 1,0.048 4}	0.053 9	0.088 0	0.173 2	0.098 6	0.045 3	0.070 9
X04	节理裂隙发育的破碎岩体	6.598 1	0.143 4	0.319 9	{0.060 9,0.071 7,0.082 5}	0.100 7	0.199 9	0.180 7	0.122 4	0.080 6	0.150 3
X05	软硬岩体互层或软岩夹层	2.411 4	0.052 4	0.116 9	{0.022 3,0.026 2,0.030 1}	0.031 2	0.044 4	0.168 8	0.084 3	0.027 5	0.037 8
X06	岩溶空洞	0.228 6	0.005 0	0.011 2	{0.002 1,0.002 5,0.002 9}	0.002 6	0.002 7	0.161 6	0.061 0	0.002 5	0.002 6
X07	大块孤石	0.404 8	0.008 8	0.019 6	{0.003 7,0.004 4,0.005 1}	0.004 6	0.004 9	0.162 2	0.063 0	0.004 4	0.004 7
X08	隧道穿过偏压地段	0.391 1	0.008 5	0.019 0	{0.003 6,0.004 3,0.004 9}	0.004 4	0.004 8	0.162 3	0.063 2	0.004 3	0.004 6
X09	隧道穿过高地应力地段	0.315 2	0.006 9	0.015 4	{0.002 9,0.003 5,0.004 0}	0.003 6	0.003 8	0.162 0	0.062 3	0.003 5	0.003 7
X10	隧道穿过地表含水区域	0.264 3	0.005 7	0.012 7	{0.002 4,0.002 9,0.003 3}	0.002 9	0.003 1	0.161 8	0.061 6	0.002 9	0.003 0
X11	水的作用软化岩体	5.565 8	0.121 0	0.269 8	{0.051 4,0.060 5,0.069 6}	0.078 3	0.161 4	0.185 0	0.115 7	0.069 6	0.119 9
X12	开挖揭露高渗透富水岩体	2.679 7	0.058 3	0.130 0	{0.024 8,0.029 2,0.033 5}	0.034 3	0.053 6	0.173 3	0.088 0	0.031 4	0.043 9
X13	高水压突破水力边界	0.902 2	0.019 6	0.043 7	{0.008 3,0.009 8,0.011 3}	0.010 4	0.012 6	0.165 1	0.068 8	0.010 1	0.011 5
X14	降雨影响	1.460 4	0.031 7	0.070 7	{0.013 5,0.015 9,0.018 2}	0.017 5	0.023 2	0.167 8	0.075 0	0.016 5	0.020 3
X15	超前地质预报不准确/认识不充分	2.821 3	0.061 3	0.171 9	{0.026 1,0.030 7,0.035 2}	0.038 2	0.066 8	0.178 4	0.100 0	0.034 0	0.052 5
X16	围岩等级判断不准确	1.353 0	0.029 4	0.082 5	{0.012 5,0.014 7,0.016 9}	0.016 6	0.023 2	0.169 5	0.079 0	0.015 5	0.019 9
X17	爆破参数设计不当	0.558 4	0.012 1	0.033 9	{0.005 1,0.006 1,0.007 0}	0.006 4	0.007 5	0.164 4	0.067 1	0.006 2	0.006 9
X18	支护形式选取不当	1.866 5	0.040 6	0.113 8	{0.017 3,0.020 3,0.023 3}	0.023 8	0.036 4	0.172 7	0.086 6	0.021 8	0.030 1
X19	开挖进尺不当,循环进尺过大	0.950 4	0.020 7	0.058 0	{0.008 8,0.010 4,0.011 9}	0.011 5	0.014 3	0.165 2	0.072 7	0.010 6	0.012 9
X20	开挖爆破扰动过大	2.139 9	0.046 5	0.130 4	{0.019 8,0.023 3,0.026 7}	0.028 6	0.042 7	0.170 5	0.089 6	0.024 7	0.035 7
X21	超前支护不当或不及时	2.100 4	0.045 7	0.128 1	{0.019 4,0.022 9,0.026 3}	0.027 9	0.040 9	0.169 9	0.087 9	0.024 2	0.034 4
X22	钢拱架变形过大	0.571 1	0.012 4	0.034 8	{0.005 3,0.006 2,0.007 1}	0.006 6	0.007 6	0.163 3	0.066 7	0.006 3	0.007 1
X23	初期支护强度不足	2.818 5	0.061 3	0.171 8	{0.026 1,0.030 7,0.035 2}	0.039 3	0.062 9	0.172 9	0.097 4	0.033 0	0.051 1
X24	锚杆质量或施工不达标	0.318 8	0.006 9	0.019 3	{0.002 9,0.003 5,0.004 0}	0.003 6	0.003 9	0.162 2	0.063 1	0.003 5	0.003 7
X25	仰拱施作不当/未及时闭合	0.324 7	0.007 1	0.019 9	{0.003 0,0.003 6,0.004 1}	0.003 7	0.004 0	0.162 3	0.063 2	0.003 6	0.003 8
X26	二次衬砌施作不当/不及时	0.444 6	0.009 7	0.027 2	{0.004 1,0.004 9,0.005 6}	0.005 1	0.005 7	0.162 8	0.064 9	0.004 9	0.005 4
X27	钻孔未及时处理	0.214 3	0.004 7	0.013 2	{0.002 0,0.002 4,0.002 7}	0.002 4	0.002 5	0.161 8	0.061 6	0.002 4	0.002 5
X28	施工人员操作失误	1.019 3	0.022 2	0.062 2	{0.009 4,0.011 1,0.012 8}	0.012 4	0.015 6	0.165 5	0.073 5	0.011 4	0.014 0
X29	监测反馈不及时/力度不足	0.943 6	0.020 5	0.056 1	{0.008 7,0.010 2,0.011 7}	0.011 0	0.013 6	0.165 0	0.072 1	0.010 3	0.012 3
X30	组织管理不当,安全意识淡薄	1.462 6	0.031 8	0.089 1	{0.013 5,0.015 9,0.018 3}	0.018 5	0.025 0	0.167 4	0.079 9	0.016 6	0.021 7

### 2.3 T-S 门条件概率及映射贝叶斯网络

本文基于隧道事故统计结果以及专家经验权重,对图4的T-S模糊事故树中13个T-S门规则进行计算。首先将已构建的T-S模糊事故树收敛为传统事故树,树中所有事件均转为两态,图4中T-S门1设为与门,代表顶上事件隧道工作面坍塌一定同时由于地质因素与人为因素共同造成,其他12个T-S门均设为或门,代表某基本事件发生后其路径上的各中间事件均会发生。再将传统事故树映射为贝叶斯网络,表1中各基本事件的发生概率作为先验概率,计算得到各基本事件的后验概率以及中间事件与顶上事件的联合概率分布(表1)。

由于后验概率/联合概率分布可反映出单个节点对叶节点的贡献,也可反映出该节点对其子节点的贡献<sup>[18,46]</sup>,因此使用后验概率/联合概率分布进行归一化,来计算某个父节点对其子节点的影响权重。以子节点B<sub>1</sub>—围岩稳定性差为例,其有3个父节点,分别为C<sub>1</sub>—岩体大变形,C<sub>2</sub>—不良地质构造,C<sub>3</sub>—不良地形地貌。三个父节点的联合概率分布分别为: $P(C_1)=0.0493$ , $P(C_2)=0.5950$ , $P(C_3)=0.0467$ ,则父节点C<sub>1</sub>的权重 $w_{C_1}$ ,计算公式如式(7)所示,同理,父节点C<sub>2</sub>与C<sub>3</sub>点的权重分别为 $w_{C_2}=0.8610$ 、 $w_{C_3}=0.0676$ 。

$$w_{C_1} = \frac{P(C_1)}{P(C_1) + P(C_2) + P(C_3)} = 0.0714 \quad (7)$$

基于专家评价,考虑当父节点 $x_i$ 的风险状态为0(低)、0.5(中)、1(高)时,其子节点 $y_j$ 的风险状态可能性,对应给出父节点与子节点的转移概率矩阵(表2)。

表2 T-S模糊事故树父-子节点转移概率矩阵

Table 2 Transition probability matrix of parent-child node in T-S fuzzy fault tree

	$y_j=0$	$y_j=0.5$	$y_j=1$
$x_i=0$	0.95	0.05	0
$x_i=0.5$	0.01	0.9	0.09
$x_i=1$	0	0.01	0.99

结合各父节点权重及父-子节点转移概率矩阵,可计算本T-S事故树中各T-S门的规则。当已知某子节点 $y_j$ 的所有父节点 $x_i(i=1,2,\dots,n)$ 的风险状态为 $x_i^{a_i}(x_i^{a_i}=0,0.5,1)$ 时,则子节点 $y_j$ 的风险状态 $y_j^{b_j}$

( $y_j^{b_j}=0,0.5,1$ )的条件概率计算公式如式(8)所示:

$$P(y_j=y_j^{b_j}) = \sum_{i=1}^n w_{x_i} * P(x_i=x_i^{a_i}, y_j=y_j^{b_j}) \quad (8)$$

同样以子节点B<sub>1</sub>为例,当其父节点C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>的风险状态值分别为0、0.5、1时,其子节点B<sub>1</sub>的风险状态为0.5的概率计算如式(9)所示:

$$P(B_1=0.5) = w_{C_1} * P(C_1=0, B_1=0.5) + w_{C_2} * P(C_2=0.5, B_1=0.5) + w_{C_3} * P(C_3=1, B_1=0.5) = 0.0714 * 0.05 + 0.8610 * 0.9 + 0.0676 * 0.01 = 0.7790 \quad (9)$$

由此,考虑三个子节点分别在三种不同风险状态下的组合,得到中间事件B<sub>1</sub>的T-S门规则见表3,本规则共有 $3 \times 3 \times 3 = 27$ 条。T-S事故树中其他中

表3 中间事件B<sub>1</sub>的T-S门规则/条件概率

Table 3 Rules of T-S gate / Conditional probability table of intermediate node B<sub>1</sub>

规则	C1	C2	C3	B1		
				0	0.5	1
1	0	0	0	0.9500	0.0500	0.0000
2	0	0	0.5	0.8865	0.1075	0.0061
3	0	0	1	0.8858	0.0473	0.0669
4	0	0.5	0	0.1407	0.7819	0.0775
5	0	0.5	0.5	0.0771	0.8393	0.0836
6	0	0.5	1	0.0764	0.7791	0.1444
7	0	1	0	0.1321	0.0156	0.8524
8	0	1	0.5	0.0685	0.0730	0.8585
9	0	1	1	0.0678	0.0129	0.9193
10	0.5	0	0	0.8829	0.1107	0.0064
11	0.5	0	0.5	0.8193	0.1682	0.0125
12	0.5	0	1	0.8187	0.1080	0.0734
13	0.5	0.5	0	0.0735	0.8425	0.0839
14	0.5	0.5	0.5	0.0100	0.9000	0.0900
15	0.5	0.5	1	0.0093	0.8398	0.1508
16	0.5	1	0	0.0649	0.0763	0.8588
17	0.5	1	0.5	0.0014	0.1337	0.8649
18	0.5	1	1	0.0007	0.0735	0.9257
19	1	0	0	0.8822	0.0471	0.0707
20	1	0	0.5	0.8186	0.1046	0.0768
21	1	0	1	0.8180	0.0444	0.1376
22	1	0.5	0	0.0728	0.7790	0.1482
23	1	0.5	0.5	0.0093	0.8365	0.1543
24	1	0.5	1	0.0086	0.7763	0.2151
25	1	1	0	0.0642	0.0127	0.9231
26	1	1	0.5	0.0007	0.0702	0.9292
27	1	1	1	0.0000	0.0100	0.9900

间事件的门规则概率计算与该门类似,不再重复赘述。

根据1.4节中T-S模糊事故树映射贝叶斯网络的映射规则,将图4所示的岩石隧道工作面坍塌T-S模糊事故树映射为贝叶斯网络,如图5所示。基于公式(2),可计算得到顶事件(岩石隧道工作

面坍塌)处于高风险状态的发生概率模糊子集 $\tilde{P}(T=1)=[0.052\ 6, 0.058\ 4, 0.064\ 2]$ ,代表了46个事故案例在各基本事件风险状态未知时的潜在工作面坍塌概率。基于公式(3)~(5),可分别计算各基本事件的后验概率,模糊重要度,关键重要度(表1)。

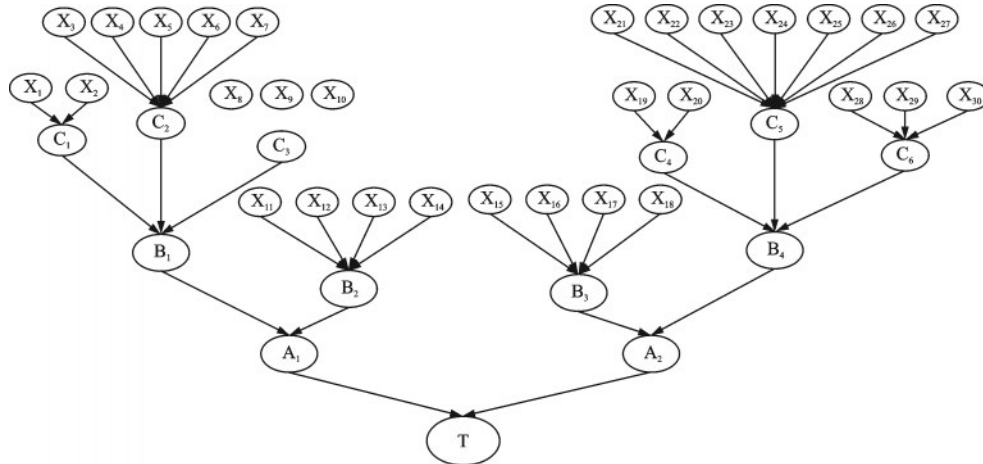


图5 岩石隧道工作面坍塌贝叶斯网络

Fig.5 Bayesian network of rock tunnel face collapse

通过对表1中基本事件后验概率与重要度的对比,X4节理裂隙发育的破碎岩体、X11水的作用软化岩体、X03揭露断层破碎带、X23初期支护破坏等基本事件的重要度较高,在施工中需采取合理的控制措施。

#### 2.4 考虑施工时序的工作面坍塌风险分析

为检验所建立的工作面坍塌风险时序分析方法,本文以油坊坪隧道坍塌事故<sup>[47]</sup>为例进行风险分析。该隧道位于沪昆客运专线长昆湖南段,采用三台阶七步开挖法进行施工,设计采用常规V级围岩支护方案(钢拱架+锚杆+挂网+喷射混凝土)。隧址区地层为强风化~弱风化砂质/凝灰质板岩,泥质结构,板状构造,节理裂隙发育,岩体破碎。勘察报告表明,隧道DK388+055附近通过正断层F<sub>510</sub>,断层两盘出露岩体为砂质板岩与凝灰质板岩,断层延伸长度为20 m,宽度约1 m,断距约5 m。断层核心位置断层泥及碎裂岩体极为破碎,质软,抗剪强度低。且断层层间富水,断层泥易膨胀、崩解、泥化。此外,该区域降雨量丰富,断层F<sub>510</sub>成为良好的地下水富集带,层间富含裂隙水。2012年7月15日,隧道在开挖至DK388+035处时,工作面突发冒

顶塌方,塌方规模约100 m<sup>3</sup>,塌方位置位于断层F<sub>510</sub>附近,岩体节理裂隙发育,硬度极低,层间富水,泥质充填,泥化现象严重。

分析隧道工作面坍塌原因,断层F<sub>510</sub>对隧道围岩稳定性影响较大。断层中富集的地下水软化了围岩及断层泥岩体;在未开挖前,断层处于相对稳定状态。当隧道穿越断层时,断层内断层泥与碎屑岩体产生应力重分布,隧道工作面拱顶处于临空状态,导致剪切应力集中<sup>[48]</sup>。此外,由于地质资料认识不充分,跨越断层时仍采用之前的V级围岩支护,导致支护强度不足;诱发初期支护发生变形,逐渐内鼓破裂;而过大的变形监测值没有及时反馈处理,最终导致工作面坍塌。

依托项目资料,汇总施工各阶段识别出的风险基本事件,基于各基本事件的风险状态和时序性进行排列:隧道穿越断层破碎带(X<sub>3</sub>—严重破碎,高风险状态)、降雨影响(X<sub>14</sub>—强降雨,高风险状态)、开挖揭露高渗透富水岩体(X<sub>12</sub>—高渗透性,高风险状态)、水软化岩体(X<sub>11</sub>—严重软化,高风险状态)、节理裂隙发育的破碎岩体(X<sub>4</sub>—严重破碎,高风险状态)、勘察或超前地质预报认识不充分(X<sub>15</sub>—严重失准,高风险状态)、支护模型计算不当(X<sub>18</sub>—中等不

当,中风险状态)、初期支护强度不足( $X_{23}$ —中等不足,中风险状态)、监测反馈不及时( $X_{29}$ —严重延误,高风险状态)。

基于所构建的时序性风险分析方法,可计算以上基本事件按时序依次发生时,岩石隧道工作面坍塌风险发生概率的变化过程。当第一个基本事件 $X_3$ —揭露断层破碎带发生且判定为高风险状态后,其发生概率模糊子集 $\tilde{P}(x_3=1)$ 收敛为精确值1,经由条件概率表传递至叶节点T,该区段发生坍塌的期望概率 $E[\tilde{P}(T=1)]$ 增大至0.122(图6)。进而,当第二个基本事件 $X_{14}$ —降雨影响发生后, $\tilde{P}(x_{14}=1)$ 收敛为1,传递至 $E[\tilde{P}(T=1)]$ 增大至0.149,依此计算得到油坊坪隧道工作面坍塌风险期望概率随着基本事件发生的时序性变化(图6)。

为判断新案例的风险临界状态,在计算了所有已统计的46个案例的工作面坍塌风险期望概率分布后,本文选取所有案例中最低的工作面坍塌风险期望概率值0.172作为预警阈值,由于所有案例实际上均已发生坍塌,因此当一个新案例的风险期望达到或超过所有案例中最低的风险期望概率时,证明该新案例也已进入潜在坍塌状态,应当采取超前地质预报、围岩注浆加固、结构变形监控量测等控制性措施,以降低坍塌概率。

由图6可知,在油坊坪隧道施工过程中,当前三个基本事件发生后,工作面坍塌风险期望概率达到了0.198,已超过风险预警阈值0.172,但此时施工人员未能有效采取控制,并陆续出现了人为失误引发的风险基本事件,如超前地质预报不准确/认识不充分、支护方案未进行调整复核、初期支护强度不足等,使得工作面坍塌风险期望概率不断增加。最后由于现场监测数据没有及时反馈,支护变

形超限未能进行预警处置,当所有基本事件全部发生后,工作面发生严重坍塌的风险期望概率增大至0.517,使隧道支护结构破坏,最终导致工作面坍塌。

### 3 考虑施工时序的隧道风险管控

基于油坊坪隧道的例子可以看出,隧道施工中,结合时序性贝叶斯网络与施工组织管理,是预警防治工作面坍塌行之有效的手段。在实际工程中,可在施工开始前,依照地勘资料将隧道全线初步划分为数个风险区段,根据已知地质信息,采用本研究提出的T-S模糊事故树转化贝叶斯网络,对各区段进行初步风险评估,确定潜在高风险施工区段。可根据隧道施工进度划分为预开挖区段、开挖中区段和已开挖区段,随施工进度分析各区段的坍塌风险期望概率。不同区段的风险分析重点如下:

(1)预开挖区段:即工作面前方数个进尺上将要被开挖的区段,风险分析的重点在于超前地质预报,不良地质体的发现、确认与预警,以及超前加固处理。

首先对预开挖段做好超前地质预报工作,及时探明工作面前方的不良地质体情况,并与已有地质资料相互验证。如果是地勘阶段已知的不良地质体,在初步分析其风险状态后带入时序性风险评估网络,调整该区段的风险期望概率值。如果超前地质预报探明了未知的不良地质体,除了调整其风险状态外,还需对设计的开挖方案与支护方案进行评估审查,上报业主及时讨论调整。

在对不良地质体进行风险评估的同时,还需针对性采取超前加固处理,诸如预注浆、超前小导管、超前锚杆、预排水等。超前加固处理后,可根据处理结果在风险网络中适当下调对应基本事件的风险状态。

(2)开挖中区段:该区段风险分析的重点在于施工质量与失稳预兆处理。

在爆破开挖时,严格按照施工方案控制开挖进尺,避免超挖欠挖,同时监测爆破扰动。爆破出渣后,及时进行支护施工,关注各部分支护结构的施工质量,确保支护结构发挥其承载性能。

开挖时,需结合现场人员的人工预警以及监测

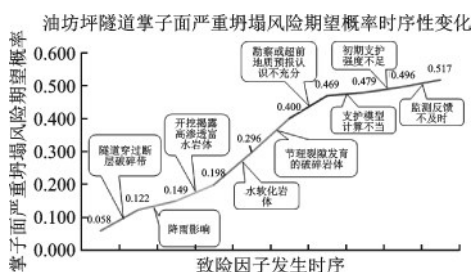


图6 油坊坪隧道工作面坍塌风险期望概率时序性变化  
Fig.6 Time series variation of expected probability of severe tunnel face collapse risk in Youfangping Tunnel

体系的智能预警,避免支护结构失稳诱发坍塌。在施工过程中,应及时将不良施工造成的风险基本事件在风险分析中进行时序性反馈,确保风险发生概率的及时更新。

(3)已开挖区段,即初期支护完成,二次衬砌闭合的区段,风险分析的重点在于支护结构监控量测。

当支护结构闭合并完全发挥其承载能力后,做好异常风险的监控量测工作,关注支护裂缝、渗水、变形等风险基本事件,及时反馈并在时序性风险分析中更新,快速维护处理,避免损伤的进一步发展诱发支护结构失效。由于本研究主要关注工作面坍塌,暂未将以上提到的已开挖区段风险基本事件纳入时序性风险分析中。

(4)全区段施工管理:对所有区段,施工全过程都要做好施工管理,避免施工不当与违规操作,重视监测数据及时处理,遵守组织管理避免混乱施工,确保施工的有序进行。

基于以上时序性风险分析方法,依托隧道施工人员对隧道开挖进程的监控,以及对已发生和可能发生的孕险环境与致险因子(诸如各种不良地质条件与施工操作过程中的失误等)的反馈,可及时更新隧道沿线各区段的风险期望概率,对高风险区段及时预警,采取针对性控制措施,避免工作面坍塌事故的发生。

## 4 结 论

基于钻爆法隧道工作面坍塌事故统计,结合T-S模糊事故树法与贝叶斯方法,提出了一种隧道工作面坍塌时序性风险分析方法,可计算隧道工程施工过程中工作面坍塌风险发生概率的时序性变化过程。主要得到以下结论:

(1)构建了T-S模糊事故树映射的工作面坍塌风险贝叶斯网络,结合勘察-设计-施工中各基本事件发生的时序性,提出了工作面坍塌风险时序性分析方法,为隧道工程的工作面坍塌风险分析、风险预警与控制措施提供参考。

(2)基于国内外46起隧道工作面坍塌事故的统计分析,选取30个致险因子与孕险环境作为钻爆法隧道工作面坍塌的基本事件,根据统计数据量化得到各基本事件的发生概率模糊子集与节点间条件

概率规则。

(3)对比基本事件的后验概率,模糊重要度,关键重要度等参数,筛选出节理裂隙发育的破碎岩体、水的作用软化岩体、断层破碎带、初期支护破坏等对隧道坍塌影响较大的关键基本事件。

(4)将提出的时序性风险分析方法应用于油坊坪隧道坍塌事故中,基于隧道实际事故演化过程验证了考虑施工时序的工作面坍塌风险分析结果,给出了岩石隧道不同施工阶段的风险管控方案和管控重点。

值得注意的是,本文基于46起隧道工作面坍塌案例统计结果用以计算各基本事件的发生概率。但相较于国内数以万计的竣工隧道与在建隧道,以及大量的工作面坍塌事故,本文的统计样本还是相对偏少,数据具有部分代表性但并不精确。此外,隧道工程建设过程中具有高度的不确定性,岩体参数,支护细节等都在随着施工进展而不断改变,各节点的发生概率具有模糊性,本文采用了三角模糊函数尝试进行描述,但也存在部分局限性,可在未来研究中进一步深化。

## 参 考 文 献:

- [1] 李术才,周宗青,李利平,等.岩溶隧道突水风险评估理论与方法及工程应用[J].岩石力学与工程学报,2013,32(9):1858-1867.  
Li S C, Zhou Z Q, Li L P, et al. Risk evaluation theory and method of water inrush in karst tunnels and its applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1858-1867. (in Chinese)
- [2] 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):2365-2370.  
Chen J J, Zhou F, Yang J S, et al. Fuzzy analytic hierarchy process for risk evaluation of collapse during construction of mountain tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2365-2370. (in Chinese)
- [3] 张民庆,黄鸿健,张生学,等.宜万铁路马鹿箐隧道1·21突水突泥抢险治理技术[J].铁道工程学报,2008(11):49-56,61.  
Zhang M Q, Huang H J, Zhang S X, et al. Treatment technology for water and mud bursting on 1·21 in Maluqing tunnel of Yichang-Wanzhou railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008(11): 49-56,

61. (in Chinese)
- [4] Wu L, Wan J W, Chen G, et al. Cause of the "8·5" water burst incident at Yesanguan tunnel along the Yi-Wan railway[J]. *Carsologica Sinica*, 2009, 28(2): 212-218.
- [5] 王伟, 苗德海. 宜万铁路齐岳山隧道F11高压富水断层特征及工程对策[J]. *铁道标准设计*, 2010(8): 81-86.  
Wang W, Miao D H. Characteristics of high pressure watery fault F11 in Qiyueshan tunnel on Yichang-Wanzhou railway as well as engineering countermeasures[J]. *Railway Standard Design*, 2010(8): 81-86. (in Chinese)
- [6] 陈舞, 张国华, 王浩, 等. 基于T-S模糊故障树的钻爆法施工隧道坍塌可能性评价[J]. *岩土力学*, 2019, 40(增1): 319-328.  
Chen W, Zhang G H, Wang H, et al. Evaluation of possibility of tunnel collapse by drilling and blasting method based on T-S fuzzy fault tree[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(Sup1): 319-328. (in Chinese)
- [7] 路美丽, 刘维宁, 罗富荣, 等. 隧道与地下工程风险评估方法研究进展[J]. *工程地质学报*, 2006, 14(4): 462-469.  
Lu M L, Liu W N, Luo F R, et al. Review on risk assessment methods for tunnelling and underground projects[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2006, 14(4): 462-469. (in Chinese)
- [8] 张晨曦, 吴顺川, 吴金. 山岭隧道施工中塌方风险评估模型研究及应用[J]. *中国安全生产科学技术*, 2019, 15(9): 128-134.  
Zhang C X, Wu S C, Wu J. Study on risk assessment model of collapse during construction of mountain tunnel and its application[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2019, 15(9): 128-134. (in Chinese)
- [9] 许振浩, 李术才, 李利平, 等. 基于层次分析法的岩溶隧道突水突泥风险评估[J]. *岩土力学*, 2011, 32(6): 1757-1766.  
Xu Z H, Li S C, Li L P, et al. Risk assessment of water or mud inrush of karst tunnels based on analytic hierarchy process[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(6): 1757-1766. (in Chinese)
- [10] 曹文贵, 翟友成, 张永杰. 新奥法隧道施工风险非线性模糊评判方法[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(7): 105-112.  
Cao W G, Zhai Y C, Zhang Y J. Nonlinear fuzzy judgment method of construction risk for NATM tunneling[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(7): 105-112. (in Chinese)
- [11] 陈舞, 张国华, 王浩, 等. 基于粗糙集条件信息熵的山岭隧道坍塌风险评价[J]. *岩土力学*, 2019, 40(9): 3549-3558.  
Chen W, Zhang G H, Wang H, et al. Risk assessment of mountain tunnel collapse based on rough set and conditional information entropy[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(9): 3549-3558. (in Chinese)
- [12] 孙景来. 山岭隧道钻爆法施工坍塌风险及围岩稳定性评价研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.  
Sun J L. Study on collapse risk and stability evaluation in mining construction of mountain tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [13] 谢洪涛, 丁祖德. 基于贝叶斯网络的隧道施工坍塌事故诊断方法[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 38(1): 37-44.  
Xie H T, Ding Z D. Bayesian network based method for accident diagnosis of tunnel collapse[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology)*, 2013, 38(1): 37-44. (in Chinese)
- [14] 赵茗年, 王永刚, 庞小冲, 等. 高寒地区公路特长隧道风险评估优化应用[J]. *地下空间与工程学报*, 2020, 16(增1): 426-430.  
Zhao M N, Wang Y G, Pang X C, et al. Optimization application of risk assessment for super long highway tunnel in alpine region[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2020, 16(Sup1): 426-430. (in Chinese)
- [15] 闫玉茹, 黄宏伟, 胡群芳, 等. 大连湾海底隧道钻爆法施工风险评估研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(增2): 3616-3624.  
Yan Y R, Huang H W, Hu Q F, et al. Risk assessment on drill and blasting method of Dalian bay subsea tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(Sup2): 3616-3624. (in Chinese)
- [16] Fussell J B, Powers G J, Bennetts R G. Fault trees-a state of the art discussion[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 1974, 23(1): 51-55.
- [17] 卜全民, 王涌涛, 汪德耀. 事故树分析法的应用研究[J]. *西南石油大学学报*, 2007, 29(4): 141-144, 200.  
Bu Q M, Wang Y T, Wang D G. The application of fault tree analysis[J]. *Journal of Southwest Petroleum*

- University, 2007,29(4): 141-144,200. (in Chinese)
- [18] Langseth H, Portinale L. Bayesian networks in reliability[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2005, 92(1): 92-108.
- [19] 李泽荃, 孙景来, 陈磊. 基于事故树和贝叶斯网络的隧道塌陷风险概率估计方法研究[J]. 煤炭工程, 2020, 52(4): 130-136.  
Li Z Q, Sun J L, Chen L. Risk assessment for tunnel collapse based on fault tree analysis and Bayesian Network[J]. Coal Engineering, 2020, 52(4): 130-136. (in Chinese)
- [20] 章龙管, 刘绥美, 李开富, 等. 基于故障树与贝叶斯网络的地铁盾构施工风险预测[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(5): 21-29,55.  
Zhang L G, Liu S M, Li K F, et al. Prediction of shield construction risks in subway tunnelling based on fault tree and bayesian network [J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(5): 21-29, 55. (in Chinese)
- [21] Zhou M, Chen J, Huang H, et al. Multi-source data driven method for assessing the rock mass quality of a NATM tunnel face via hybrid ensemble learning models [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 147: 104914.
- [22] Xue Y, Cao Y, Zhou M, et al. Rock mass fracture maps prediction based on spatiotemporal image sequence modeling[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2023, 38(4): 470-488.
- [23] 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.  
Chen L, Huang H W. Risk analysis of rock tunnel engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 110-115. (in Chinese)
- [24] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control [J]. Ieee Transactions on Systems Man and Cybernetics, 1985, 15(1): 116-132.
- [25] 宋华, 张洪钺, 王行仁. T-S模糊故障树分析方法[J]. 控制与决策, 2005, 20(8): 854-859.  
Song H, Zhang H Y, Wang X R. Fuzzy fault tree analysis based on T-S model [J]. Control and Decision, 2005, 20(8): 854-859. (in Chinese)
- [26] 姚成玉, 张荧驿, 王旭峰, 等. T-S模糊故障树重要度分析方法[J]. 中国机械工程, 2011, 22(11): 1261-1268.  
Yao C Y, Zhang Y Y, Wang X F, et al. Importance analysis method of fuzzy fault tree based on T-S model[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(11): 1261-1268. (in Chinese)
- [27] 陈东宁, 姚成玉, 党振. 基于T-S模糊故障树和贝叶斯网络的多态液压系统可靠性分析[J]. 中国机械工程, 2013, 24(7): 899-905.  
Chen D N, Yao C Y, Dang Z. Reliability analysis of multi-state hydraulic system based on T-S fuzzy fault tree and bayesian network[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(7): 899-905. (in Chinese)
- [28] 陈舞, 王浩, 张国华, 等. 基于T-S模糊故障树和贝叶斯网络的隧道坍塌易发性评价[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(8): 820-830.  
Chen W, Wang H, Zhang G H, et al. Evaluation of tunnel collapse susceptibility based on T-S fuzzy fault tree and bayesian network[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2020, 54(8): 820-830. (in Chinese)
- [29] 郑来, 顾鹏, 卢健. 基于T-S模糊故障树和贝叶斯网络的重特大交通事故成因分析[J]. 交通信息与安全, 2021, 39(4): 43-51,59.  
Zheng L, Gu P, Lu J. A cause analysis of extraordinarily severe traffic crashes based on T-S fuzzy fault tree and bayesian network[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2021, 39(4): 43-51, 59. (in Chinese)
- [30] 周宗青, 李术才, 李利平, 等. 浅埋隧道塌方地质灾害成因及风险控制[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1375-1382.  
Zhou Z Q, Li S C, Li L P, et al. Causes of geological hazards and risk control of collapse in shallow tunnels [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1375-1382. (in Chinese)
- [31] Man J, Zhou M, Zhang D, et al. Face stability analysis of circular tunnels in layered rock masses using the upper bound theorem [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(6): 1836-1848.
- [32] Li Z, Huang H, Zhou M, et al. Failure responses of rock tunnel faces during excavation through the fault-fracture zone [J]. Underground Space, 2023, 10: 166-181.
- [33] Zhou M, Xing Z, Nie C, et al. Accurate prediction of tunnel face deformations in the rock tunnel construction process via high-granularity monitoring data and attention-based deep learning model[J]. Applied Scienc-

- es, 2022, 12(19): 9523.
- [34] 刘靖, 艾智勇, 苏辉. 山岭隧道新奥法施工过程动态风险评估[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(8): 1142-1146.
- Liu J, Ai Z Y, Su H. Dynamic risk assessment of mountain tunnel during NATM construction[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(8): 1142-1146. (in Chinese)
- [35] 许振浩, 李术才, 李利平, 等. 基于风险动态评估与控制的岩溶隧道施工许可机制[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1714-1725.
- Xu Z H, Li S C, Li L P, et al. Construction permit mechanism of karst tunnels based on dynamic assessment and management of risk[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(11): 1714-1725. (in Chinese)
- [36] 李宜城, 薛亚东, 李彦杰. 一种基于动态权重的施工安全风险评估新方法[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(增1): 209-215.
- Li Y C, Xue Y D, Li Y J. A new construction risk assessment method based on dynamic weight[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(Sup1): 209-215. (in Chinese)
- [37] 卢鑫月, 许成顺, 侯本伟, 等. 基于动态贝叶斯网络的地铁隧道施工风险评估[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(3): 492-501.
- Lu X Y, Xu C S, Hou B W, et al. Risk assessment of metro construction based on dynamic Bayesian network[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(3): 492-501. (in Chinese)
- [38] 蒋涛. 隧道塌方特征分析和预报预警监测系统的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- Jiang T. Analysis of the characteristics of tunnel collapse and research on forecasting and early warning-monitoring system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [39] 张军伟, 陈云尧, 陈拓, 等. 2006—2016年我国隧道施工事故发生规律与特征分析[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(3): 10-17.
- Zhang J W, Chen Y Y, Chen T, et al. Law and characteristics analysis of domestic tunnel construction accidents from 2006 to 2016[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(3): 10-17. (in Chinese)
- [40] HSE. Safety of new Austrian tunnelling method (NATM) tunnels[R]. London: [s.n.], 1996.
- [41] CEDD. Catalogue of notable tunnel failure case histories[R]. HongKong: [s.n.], 2009.
- [42] Chen J, Liu W, Chen L, et al. Failure mechanisms and modes of tunnels in monoclinic and soft-hard interbedded rocks: a case study[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(4): 1357-1373.
- [43] 陈其学, 江勇顺, 唐浩. 飞仙关特长隧道高压涌突水形成机制及处治技术研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(4): 143-147.
- Chen Q X, Jiang Y S, Tang H. Formation and treatment of the high-pressure water inflow in the extra-long Feixianguan tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(4): 143-147. (in Chinese)
- [44] Tani K, Hirota M, Kikuchi Y, et al. Design and construction of countermeasure for record-breaking land collapse[J]. Proceedings of Tunnel Engineering Jsce, 2002, 12: 297-302.
- [45] 李学东, 董健, 任亚, 等. 龙潭特长公路隧道突水涌泥坍塌治理措施探讨[J]. 中外公路, 2008, 28(6): 179-183.
- Li X D, Dong J, Ren Y, et al. Discussion on treatment measures of water and mud inrush collapse of Longtan Long Highway tunnel[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2008, 28(6): 179-183. (in Chinese)
- [46] Pearl J. Fusion, propagation, and structuring in belief networks[J]. Artificial Intelligence, 1986, 29(3): 241-288.
- [47] 左清军, 吴立, 林存友, 等. 富水软岩隧道跨越断层段塌方机制分析及处治措施[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 369-377.
- Zuo Q J, Wu L, Lin C Y, et al. Collapse mechanism and treatment measures for tunnel in water-rich soft rock crossing fault[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2): 369-377. (in Chinese)
- [48] Zhou M, Shadabfar M, Xue Y, et al. Probabilistic analysis of tunnel roof deflection under sequential excavation using ANN-based Monte Carlo simulation and simplified reliability approach[J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 2021, 7(4): 04021043.

(本文编辑: 池营营)

## 附录1 46个岩石隧道坍塌案例及引文

序号	隧道	参考文献	序号	隧道	参考文献
1	东皇庙隧道	[1]	2	荔枝沟隧道	[2]
3	某大断面隧道	[3]	4	北岭山隧道	[4]
5	宝塔山隧道 3#斜井	[5]	6	荆西隧道	[6]
7	小中甸隧道	[7]	8	樟溪岭隧道	[8]
9	龙潭公路隧道	[9]	10	尖山 I 号隧道	[10]
11	耿家庄隧道	[11]	12	青云山隧道	[12]
13	引洮济合工程 3#隧洞	[13]	14	金窝水电站引水隧洞	[14]
15	青坑隧道	[15]	16	阿尔及利亚高速公路 T1 隧道	[16]
17	飞仙关隧道	[17]	18	土耳其 T3 铁路隧道	[18]
19	野猪坪隧道	[19]	20	天恒山隧道	[20]
21	海德隧道	[20]	22	油坊坪隧道	[21]
23	乌干达卡鲁玛水电站	[22]	24	日本日暮山隧道	[23]
25	南广线白云隧道	[24]	26	九龙峡隧道	[25]
27	迎风垭隧道	[26]	28	乌坑坝隧道	[27]
29	庙岭隧道	[28]	30	石门山隧道	[29]
31	四方山隧道	[30]	32	潭峪沟隧道	[31]
33	杨坞口隧道	[32]	34	岳家岭隧道	[33]
35	雷公山隧道	[34]	36	大塘隧道	[35]
37	狮山隧道	[36]	38	黄金隧道	[37]
39	范家咀隧道	[38]	40	巴怀隧道	[39]
41	斑竹林隧道	[40]	42	任家沟 1#隧道	[41]
43	蕾帽山隧道	[42]	44	东湾隧道	[43]
45	百花滩 3 号隧道	[44]	46	后山坪隧道	[45]

### 参考文献:

- [1] 王常金. 东皇庙隧道冒顶坍塌事故分析及处理方案探讨[J]. 交通科技, 2015(1): 126-128.
- [2] 王忠兴, 陈洪霞. 荔枝沟隧道坍塌处理分析[J]. 公路隧道, 2010(1): 30-32.
- [3] 王铁华, 杨立峰. 破碎板岩中大断面隧道坍塌处治及通过方案研究[J]. 水利水电施工, 2015(1): 22-24.
- [4] 胡清林. 北岭山隧道突水突泥病害处治技术[J]. 公路交通技术, 2017, 33(5): 118-121.
- [5] 刘金慧. 某高速公路宝塔山隧道 3#斜井 XK0+275 断面坍塌及突水涌泥分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015, 11(6): 297-298.
- [6] 赵长威. 复杂隧道灾害性涌水突泥的原因及对策研究[J]. 建筑安全, 2018, 33(11): 27-29.
- [7] 王攀, 王志斌, 罗谢鑫, 等. 云南香丽高速小中甸隧道局部突泥涌水处理方案[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2018, 27(5): 23-28.
- [8] 方勇刚, 舒亚明, 马哲, 曹海涛. 樟溪岭隧道塌方冒顶处治方案研究[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(3): 199-200, 235.
- [9] 李学东, 董健, 任亚, 等. 龙潭特长公路隧道突水涌泥坍塌治理措施探讨[J]. 中外公路, 2008, 28(6): 179-183.

- [10] 苟德明. 高速公路隧道充填块石土大型岩溶坍塌处治[J]. 中国科技信息, 2018(19): 56-58.
- [11] 何信. 大跨分离式隧道施工坍塌原因浅析及处治研究[J]. 山西建筑, 2018, 44(24): 161-162.
- [12] 方仁应. 青山山隧道出口左线局部涌水突泥处理方案研究[J]. 价值工程, 2018, 37(5): 145-146.
- [13] 侯永恒. 引洮济合工程 3#隧洞掌子面塌方问题浅析[J]. 陕西水利, 2016(4): 62-63.
- [14] 孙近福. 金窝水电站引水隧洞涌水塌方段处理技术[J]. 黑龙江水利科技, 2017, 45(12): 186-188,191.
- [15] 廖祥元, 肖启航. 青坑隧道地质复杂段坍塌机理分析与治理[J]. 现代隧道技术, 2008, 45(增1): 482-484.
- [16] 史彦文, 寇宝文, 韩常领, 等. 国外某高速公路隧道大塌方原因分析与反思[J]. 公路隧道, 2015(2): 13-18.
- [17] 陈其学, 江勇顺, 唐浩. 飞仙关特长隧道高压涌水突水形成机制及处治技术研究[J]. 现代隧道技术, 2016(4): 143-147.
- [18] Aygar E B, Gokceoglu C. Problems encountered during a railway tunnel excavation in squeezing and swelling materials and possible engineering measures: a case study from Turkey[J]. Sustainability, 2020, 12(3): 27.
- [19] Wang Y Q, Chang H T, Wang J Y, et al. Countermeasures to treat collapse during the construction of road tunnel in fault zone: a case study from the Yezhuping Tunnel in south Qinling, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(15): 16.
- [20] Xiao H J, Zhou S H, Sun Y Y. Stability analysis and case study of shallow tunnel using pipe roof support[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(3): 1249-1260.
- [21] 左清军, 吴立, 林存友, 等. 富水软岩隧道跨越断层段塌方机制分析及处治措施[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 369-377.
- [22] 陈长贵, 杨玉银, 黄浩, 等. 隧洞典型塌方案例分析及经验教训[J]. 山西水利科技, 2015(3): 1-4.
- [23] Tani K, Hirota M, Kikuchi Y, et al. Design and construction of countermeasure for record-breaking land collapse[J]. Journal of Tunnel Engineering Jscce, 2011, doi:10.11532/journalte 1991.12.297.
- [24] 张民庆, 汪纲领, 孙国庆. 南广铁路白云隧道断层突泥灾害治理技术[J]. 铁道工程学报, 2012, 29(3): 69-73.
- [25] 梅华, 时常悦. 九龙峡公路隧道施工塌方分析[J]. 河南科技, 2013(16): 131.
- [26] 吴晓云. 迎风垭隧道左线出口段塌方处理措施研究[J]. 中国水运(下半月), 2008(7): 205-206.
- [27] 王忠勋, 李彪, 吴俊强. 京珠高速公路粤境北段乌坑坝隧道右线出口塌方处理[J]. 广东公路交通, 2001(4): 39-40,47.
- [28] 徐文松. 庙岭隧道突发性断层塌方的处理[J]. 辽宁省交通高等专科学校学报, 2009, 11(2): 15-17.
- [29] 王春凯. 石门山隧道塌方处治技术[J]. 中国西部科技, 2011, 10(5): 23-24.
- [30] 谢恩连. 四方山隧道特大塌方成因分析及处治措施[J]. 中外公路, 2011, 31(6): 217-220.
- [31] 李连虎. 潭峪沟隧道塌方原因分析与防治措施[J]. 岩土工程技术, 1998(3): 36-39.
- [32] 汪彦, 曾东洋, 吴鸣明, 等. 杨坞口隧道塌方综合处理措施[J]. 公路隧道, 2010(1): 33-36.
- [33] 徐海. 岳家岭隧道出口塌方处理技术[J]. 铁道建筑技术, 2010(9): 37-39.
- [34] 王岚, 张勇. 雷公山隧道塌方处理措施[J]. 公路与汽运, 2004(2): 98-100.
- [35] 陈鲤辉. 大塘隧道右线坍塌原因及处理方案[J]. 交通世界(建养机械), 2014(5): 112-113.
- [36] 林致禄. 狮山隧道塌方治理技术及预防措施初探[J]. 中国水运(下半月), 2014, 14(2): 356-357.
- [37] 张晓东. 黄金隧道塌方冒顶结构计算及特殊设计[J]. 铁道标准设计, 2013(4): 77-80,86.
- [38] 江海燕, 杨永海. 西成客运专线范家咀隧道塌方采用的综合治理措施[J]. 四川水力发电, 2014, 33(3): 13-16,172.
- [39] 许国平. 巴怀隧道特大塌方成因机制及处治措施探讨[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2012, 8(6): 361-364.
- [40] 高攀科, 毛红梅, 宋秀清. 斑竹林隧道软弱围岩段塌方治理技术研究[J]. 河南科技, 2012(7): 87-88.
- [41] 蔡鹏宏, 李长林, 赵志华. 任家沟 1#大跨度千枚岩隧道塌方处理技术[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2012, 8(11): 62-64.
- [42] 张辉. 蕾帽山隧道特大塌方治理措施及监测数值分析[J]. 公路, 2012(7): 302-306.
- [43] 安枫垒. 东湾隧道洞内浅埋段塌方处治方案[J]. 科技资讯, 2013(32): 42-43.
- [44] 秦昌贤. 百花滩 3号隧道塌方处理[J]. 企业科技与发展, 2009(12): 113-114,117.
- [45] 董勤银, 曹乾桂, 董洋. 后山坪隧道塌方原因及处理方案分析[J]. 兰州交通大学学报, 2014, 33(1): 10-14.

