

泥岩隧道塌方风险事故树分析

迟德超¹, 周长新¹, 孙健²

(1. 山东高速工程建设集团有限公司, 山东 济南 250098; 2. 山东胶东航空城投资有限公司, 山东 青岛 266300)

摘要: 在泥岩地层的隧道施工中, 因泥岩地质条件复杂, 存在较多的节理、裂隙和含水层, 强度较低, 性质软弱, 所以施工时易发生坍塌。针对泥岩隧道施工时的塌方问题, 分析导致隧道塌方的几大因素以及发生机理, 利用事故树分析法, 编制了隧道塌方事故树。并结合云南古城大跨度泥岩隧道工程实例, 对隧道中潜在的塌方因素进行定性定量分析, 计算得出隧道坍塌的发生概率、各基本事件的重要度。基于时间概率和重要度分析制定了安全风险因子控制措施。

关键词: 泥岩隧道; 坍塌; 事故树; 基本事件

中图分类号: U451; U455

文献标识码: A

Accident Tree Analysis of Mudstone Tunnel Collapse Risk

CHI Dechao¹, ZHOU Changxin¹, SUN Jian

(1. Shandong Expressway Engineering Construction Group Co., Ltd., Jinan 250098, Shandong, China;
2. Shandong Jiaodong Aviation City Investment Co., Ltd., Qingdao 266300, Shandong, China)

Abstract: In tunnel construction through mudstone formations, the complex geological conditions of mudstone, including the presence of numerous joints, fissures, and aquifers, as well as its relatively low strength and soft nature, make it prone to collapse during construction. This paper focuses on the collapse problem in mudstone tunnel construction, analyzing the major factors and mechanisms leading to tunnel collapse, and developing a collapse fault tree using fault tree analysis. Combining the example of the Yunnan Ancient City large-span mudstone tunnel project, a qualitative and quantitative analysis of potential collapse factors in tunnels is performed, calculating the probability of tunnel collapse and the importance of basic events. Based on the time probability and importance analysis, safety risk factor control measures are proposed.

Key words: mudstone tunnel; collapse; fault tree analysis; basic events

1 引言

泥岩是一种强度较低、遇水易软化、流变特征明显的软弱围岩, 其分布范围广泛, 在工程建设中经常出现。泥岩主要由黏土矿物和颗粒间胶结物构成, 在水的作用下易出现膨胀性、软化性、崩解性等不良工程特性, 不利于隧道支护结构稳定。隧道施工时会发生掌子面坍塌、围岩大变形、喷射混凝土开裂等工程问题。如何有效地

控制隧道变形, 安全、快速通过泥岩地层是隧道工程面临的主要技术难题。

事故树分析法(fault tree analysis, FTA)是一种图形演绎的事故分析法, 其通过逻辑推理描述事故的因果关系, 揭示系统事故背后的隐藏因素。该方法能够有效识别潜在危险, 通过分析事故的直接原因和潜在原因, 帮助人们做出正确的应对决策。目前, 有诸多学者以事故树分析法研究隧道塌方现象。周鸣亮等^[1]结合 T-S 模糊事故

收稿日期: 2024-09-16

作者简介: 迟德超, 高级工程师, 本科, 研究方向为土木工程建设

基金项目: 山东省工业和信息化厅创新项目(编号: 202060103144; 202060101409)

树对钻爆法岩石隧道发生坍塌进行研究；李泽荃等^[2]基于事故树和贝叶斯网络对甬台高速渔寮隧道的进口段坍塌进行研究分析；陈舞等^[3-4]基于T-S模糊事故树和贝叶斯网络对建厦沙高速三明段秀村隧道塌方进行分析；胡法涛^[5]、郝银^[6]、韩守信等^[7]、周建昆等^[8]利用事故树分析法对岩石公路隧道新奥法施工发生的坍塌进行研究评估。以上学者均基于具体事故案例采用事故树分析法对隧道坍塌问题进行研究分析，但是并未对泥岩塌方进行针对性分析，缺乏对塌方原因的归纳与整理、对塌方潜在因素的挖掘，以及对塌方处治措施的系统整理。因此，本文旨在利用事故树法深入挖掘泥岩隧道塌方的各种因素，将隧道坍塌问题的复杂性拆解为一系列逐级分析的步骤，并结合事件概率和重要度提出相应的预防措施。

2 塌方事故原因分析

隧道开挖过程中，由不良地质条件、施工方法的不当引发的隧道工作面坍塌事故时有发生。开挖改变了岩体的初始应力状态，在岩体内形成了自由变形的临空面，进而引发岩体应力释放和变形。若变形量超出了岩体结构面的最大张开度，且岩体自重应力超出了围岩的自承能力，则隧道易发生失稳破坏。隧道的失稳破坏通常源于围岩压力与支护结构承载力之间的失衡。在围岩自承能力较弱、初期支护施作不及时或支护强度不足等情况下，失稳破坏的风险显著增加。本文对这些因素进行归纳，主要分为自然因素、人为因素、施工质量管理因素三类。

2.1 自然因素

(1) 岩石岩性因素。围岩岩石的低强度和结构中的裂隙、节理是导致破裂和坍塌的直接原因。此外，岩石的高渗透性和较差的变形适应性同样会加剧隧道坍塌的风险。

(2) 地下水因素。水压力和流动不仅削弱了岩体的力学强度，还可能通过溶解和侵蚀作用进一步破坏岩体结构。当地下水含量丰富且岩体渗透性较高时，水分的渗透会导致岩石饱和和软化，从而降低其强度和稳定性。这种条件下，岩体破裂和坍塌的风险显著增加，对隧道工程的安全构成严重威胁。

(3) 风化程度因素。风化会破坏岩石的内部结构，减弱颗粒之间的黏结力，这将导致岩石强度减弱；风化作用会增加岩石中的黏土矿物和含

水量，导致岩层变脆；风化作用也会导致土壤中的颗粒破碎和流失。最终岩体的稳定性受到影响，从而导致隧道的坍塌。

(4) 结构面因素。结构面的分布及其发育程度显著影响岩体的力学行为与整体性。当隧道与岩体的结构面相交时，结构面的强度差异可能导致局部应力集中，将会导致隧道结构破坏；结构面倾斜或存在滑移时，隧道结构可能受到不稳定力的作用，导致隧道坍塌。

(5) 地质构造因素。地质构造活动包括断层、褶皱等现象，构成了地壳构造体系。若隧道穿越断层带、褶皱带，地质构造活动可能破坏隧道结构，导致隧道坍塌。

(6) 地应力因素。地应力的分布和大小可以通过现场钻探得知，当地应力超过岩石强度的阈值时，岩石会产生破裂和滑移，隧道的结构会被破坏。

2.2 人为因素

(1) 隧道断面参数。隧道的几何形状、尺寸是决定隧道结构的稳定性的关键因素，隧道的开挖高度和宽度共同决定了隧道的扁平率，隧道断面的不合理设计，直接增加后续施工的安全风险。

(2) 位置参数。隧道的稳定性和岩体的承载能力受所处地区的地质条件、地形条件的直接影响，不合理的选线以及隧道埋深会增加隧道坍塌的概率。

(3) 施工工法。不同的开挖方法会对隧道周围的岩土体施加不同的应力和变形，会导致隧道结构的不稳定性增加，增加隧道坍塌的风险。不合理的支护措施可能导致支护结构的失效，进而引发隧道的坍塌。

(4) 钻爆扰动。隧道开挖的过程中，钻爆扰动会引发岩体破坏和变形，进而引起应力的集中和传递。如果扰动程度过大，岩体将超出极限强度，诱导隧道的过度变形或坍塌。

(5) 施工工序。在隧道施工过程中，综合考量施工工期、进度和复杂的地质条件等因素，对施工工序进行合理科学的规划，有助于控制隧道的稳定性。反之，不当的施工工序可削弱隧道的稳定性，增加隧道坍塌的风险。

(6) 支护时机。隧道开挖后及时进行初期支护，开挖后及时对围岩提供有效的支撑，有助于有效控制隧道围岩的变形以及稳定性，对隧道结构的安全稳定具有重要影响。错过合适的支护时

机,隧道开挖后未能及时地进行支护,则会导致隧道围岩发生过大的变形,导致隧道坍塌。

(7) 进尺距离。适宜的进尺距离有助于维持围岩的应力平衡,保障施工过程的稳定性。反之,过大的进尺距离可能会导致围岩应力重分布和变形范围扩大,增加隧道的坍塌风险。

(8) 安全步距。安全步距的设定需要考虑围岩的过度变形。过大的安全步距可能导致围岩的稳定性降低,支护结构不能及时部署。不同岩层具有不同的物理和力学性质,安全步距不合理会增加隧道失稳的风险。

(9) 背部空洞。在施工过程中,钻爆法施工可能导致超挖现象,喷射混凝土不均匀密实在初期支护结构的背部形成空洞或空隙,大型的背部空洞对隧道的稳定性具有显著的威胁,甚至会引起崩塌的现象。

(10) 支护参数。在隧道的设计过程中,支护参数的选择直接影响隧道的支护效果。若支护参数的选择不当,围岩会出现应力集中现象,发生不平衡变形,增加隧道坍塌的风险。

(11) 超前支护。超前支护可提前支撑和稳固地层,减少围岩的变形,以及开挖过程中对围岩的扰动。若开挖过程中围岩受到的扰动较大,会增加隧道坍塌的风险。

(12) 混凝土配合比。精确的混凝土配合比可以让混凝土的抗渗性和防水性得到保证。若混凝土的配合比不合理,混凝土的力学参数达不到规范要求,混凝土的质量得不到保证,则会降低隧道的稳定性,增加坍塌的风险。

2.3 施工质量管理因素

(1) 变形监测。安装传感器和监测设备对于监控隧道和周围土体以及围岩的变形尤为重要。检测设备可以提供关键的数据,以便及时调整施工方法和支护手段,有效控制围岩的变形。不及时的隧道检测和干预措施可能导致隧道结构的完整性受损,从而导致隧道坍塌。

(2) 超前预报。隧道开挖前,综合运用地质勘查、数据检测以及软件模拟等方式,对围岩的变形和潜在的风险进行预测评估,若施工过程中,对隧道的监测不全面,未能及时发现潜在的风险,未能及时处理面对突发的风险,可能导致隧道发生坍塌。

(3) 安全管理。在隧道工程中,首要的关注点以及最重要的任务便是人员的安全,若是安全管理执行不当,人员的安全意识和行为规范得不

到提升,可能引发事故,造成人员受伤,甚至诱发隧道坍塌。

(4) 施工质量控制。隧道工程中,要对围岩的开挖与支护过程实施严格的监督与管理。如果设计和施工不合理,材料的质量不过关,施工人员的操作不正确,施工质量就得不到保证,进而引发隧道坍塌。

3 隧道塌方事故树分析步骤

3.1 准备阶段

(1) 确定分析目标(顶事件)、分析范围(中间事件)和影响因素(基本事件)。

(2) 收集和汇总相关影响因素、中间时间、运作规律等信息。

3.2 事故树绘制步骤

(1) 确定灾害类型(顶事件)。

(2) 确定导致风险发生的基本事件和中间事件。

(3) 根据中间事件,将各个可能引发中间事件的影响因素绘制出来,并确定它们之间的逻辑关系,完成事故树的绘制。

(4) 确定各影响因素的发生概率,并据此计算导致灾害类型(顶事件)发生的概率以及影响因素的重要度。

3.3 定性与定量分析

绘制事故树、确定基本事件发生概率之后,计算出最小割集、最小径集、概率重要度和临界重要度。最小割集表示系统的危险性,最小径集表示系统的安全性。在这两个集合的基础上,对各基本事件的重要度进行分析^[9]。

概率重要度可评估基本事件发生概率变化对顶事件发生概率的影响,具体可通过求偏导数的方式求解。临界重要度考虑了基本事件发生概率的相对变化率与隧道塌方发生概率的相对变化率之比,在敏感度和自身发生概率方面,其比概率重要度更为准确。

4 绘制事故树

4.1 绘制事故树

根据上述隧道塌方影响因素,将风险源分为自然因素 M1、人为因素 M2 和施工质量管理因素 M3 三大类,并根据现场实际情况对其详细分类,具体见表1所列。

将已经确定的顶事件、中间事件和基本事件

表 1 隧道塌方事故树符号表

自然因素 M1		岩性因素 M11	X1	岩石岩性
			X3	地下水发育
		岩体因素 M12	X2	结构面特征
			X4	风化程度
		构造应力 M13	X6	地质构造
X5	地应力			
人为因素 M2	设计因素 M21		X7	隧道断面参数
			X8	位置参数
	施工因素 M22	开挖方法 M221	X9	施工工法
			X13	钻爆扰动
			X15	施工工序
			X10	支护时机
		结构承载状态 M222	X14	进尺距离
			X12	安全步距
			X16	背部空洞
			支护强度 M223	X11
		X20		超前支护
		X17		混凝土配合比
施工质量管理因素 M3		监控量测 M31	X18	变形量测
			X19	超前预报
		质量安全 M32	X21	安全管理
			X22	施工质量控制

列出，根据它们之间的逻辑关系绘制事故树，以人工编制为主，辅以软件计算。如图 1 所示，图中， $\square$ 表示“与门”，指下层事件一起发生后，上层事件才会发生； $\triangle$ 表示“或门”，指下层事件任一发生后，上层事件才会发生

4.2 定性定量分析

(1) 求最小割集。导致隧道塌方发生事故的基本事件的集合是割集，最小割集是最小的一个可以导致隧道塌方发生的基本事件集合。经统计，共有 22 个基本事件，根据布尔代数规则，顶事件 A 用最小割集的并集形式表示。最终计算可知该事故树共有 240 个最小割集，每个最小割集含有 3 个或 4 个最小事件。

(2) 求最小径集。最小割集与最小径集具有对偶性，将原事故树中的逻辑与门和逻辑或门互换位置，同时将全部事件改变成事件补的形式，即可得到对偶的事故树。经统计，共有 4 个最小径集，分别为： $\{X_1, X_2, X_4, X_5, X_6\}$ 、 $\{X_2, X_3, X_4, X_5, X_6\}$ 、 $\{X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{16}, X_{17}, X_{20}\}$ 、 $\{X_{18}, X_{19}, X_{21}, X_{22}\}$

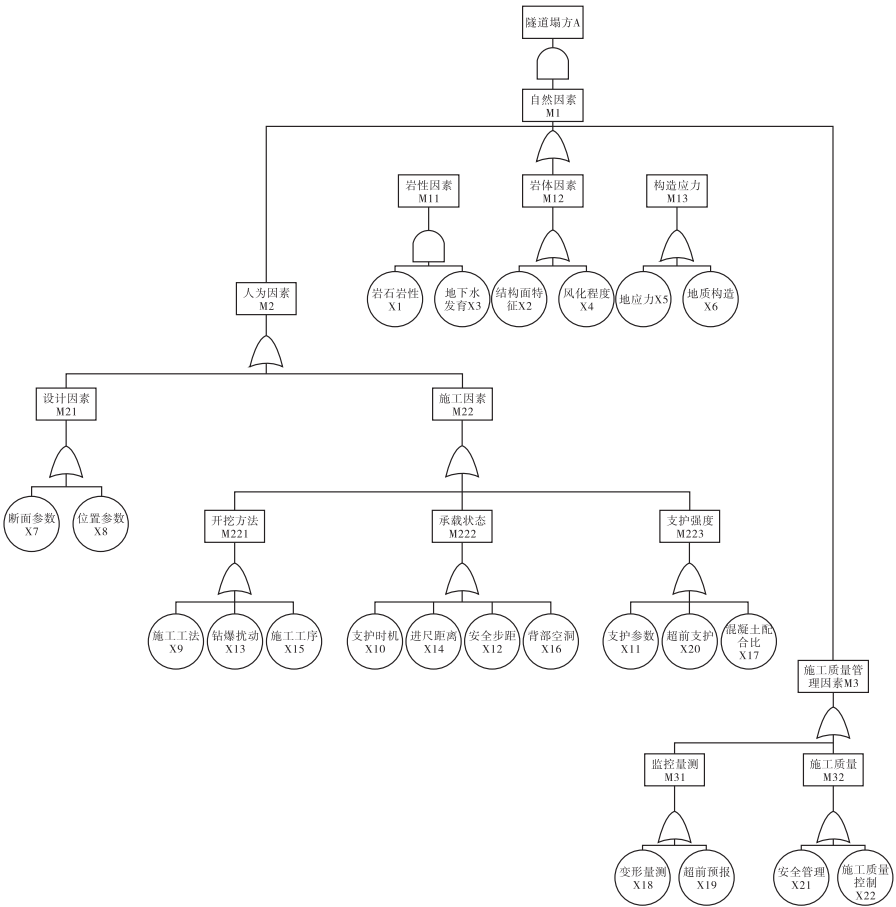


图 1 隧道塌方事故树

4.3 基本事件发生概率

本研究基于实际工程案例, 量化分析了关键风险事件的可能性, 通过拟定各基本事件的风险因子评级表, 分析实际工程的施工环境以及地质情况, 对风险因子进行评级, 进而得到各种基本事件的发生概率。

4.4 塌方概率计算和重要度

通过“与门”将自然因素、人为因素和施工安全质量管理因素组合起来, 求得该途径的塌方概率, 将隧道坍塌基本事件的概率变化对整体坍塌概率的影响定义为概率重要度。通过计算隧道塌方发生概率, 得出相应的概率重要度和临界重要度。

实际工程中, 割集可认为是独立事件, 则顶事件(分析目标)的发生概率可按以下公式^[10]计算:

$$P_T = 1 - \prod_{r=1}^n [1 - P(K_r)]$$

$$= 1 - \prod_{r=1}^n [1 - \prod_{x_i \in K_r} q_i] \quad (1)$$

式中: i 为基本事件的序号; r 为最小割集的序号; K_r 为第 r 个最小割集; k 为最小割集的个数; $x_i \in K_r$ 为第 i 个基本事件属于第 r 个最小割集。

概率重要度系数可由下式计算得出:

$$I_g(i) = \frac{\partial P_T}{\partial q_i} \quad (2)$$

式中: $I_g(i)$ 为基本事件的概率重要度系数; P_T 为顶事件发生概率; q_i 为基本事件的发生概率。

利用公式(2)可计算出所有基本事件的概率重要度, 将计算结果按大小排序, 可得导致顶事件发生的基本事件的影响度。

临界重要度系数计算:

$$C_g(i) = \frac{q_i}{P_T} \cdot I_g(i) \quad (3)$$

式中: $C_g(i)$ 为基本事件的临界重要度系数。

根据公式(3)可计算出所有基本事件的临界重要度系数。

5 依托工程实例分析

本文依托云南古城大跨度泥岩隧道进行分析, 基于上述事故树分析法及上述隧道塌方事故原因, 分析云南古城大跨度泥岩隧道的基本事件的概率, 对泥岩隧道进行塌方风险评估。

5.1 工程概况

云南古城大跨度泥岩隧道位于姚安县栋川镇, 分离式双洞隧道, 最大埋深 71 m, 主洞内轮廓净宽 14.50 m, 净高 5 m。明洞的衬砌形式为钢筋混凝土整体式衬砌结构, 以注浆小导管的方式作为洞身的超前支护形式, 采用复合式衬砌结构。古城隧道围岩均为 V 级。

隧址区处于构造侵蚀低中山地貌区, 沟谷斜坡地形, 冲沟较发育, 表层为第四系残坡积层(Q), 由粉质黏土组成, 外表红褐色, 可塑状态。隧道范围无地表水, 主要表现为山体四周塘水的形式, 地下水分布为松散岩类孔隙水和基岩裂隙水。隧道内涌水量预测, 正常涌水量为 $Q = 406.0 \text{ m}^3/\text{d}$, 最大涌水量按照正常涌水量的 1.8 倍计。

隧址区域地质构造稳定, 区域近代以来地壳无明显的断裂活动, 隧道穿越的山体结构稳定, 无滑坡、采空区等不良地质现象。深部围岩主要为中风化泥岩, 节理裂隙较发育, 未发现高地应力区域, 未发现有毒有害气体的现状。

隧道进洞区域, 基岩裸露, 强—中风化泥岩, 强风化岩体破碎—较破碎, 中风化岩体较破碎—较完整, 围岩等级为 V 级。洞口边坡开挖后容易发生沿着层面的滑塌。岩体边坡类型为 III 类。隧道洞身区域, 围岩主要为中风化泥岩, 岩体较为完整, 稳定性较好。隧道出口段, 地表覆盖层薄, 主要为粉质黏土, 下层为强—中风化泥岩, 围岩稳定性差。

5.2 FTA 分析

根据对隧道塌方事故的分析经验以及对云南古城大跨度泥岩隧道工程概况的总体认识, 对图 1 隧道塌方事故树的风险因子的发生类别进行了评级。评级是为了明确什么程度的塌方风险因子才能成为基本事件。比如钻爆扰动和进尺距离, 钻爆扰动有多强、进尺距离有多大才能够威胁到围岩的稳定性和结构的安全。

依托工程实际地质水文情况和施工情况, 统计各风险因子在隧道内发生的概率, 对隧道风险因子评级表进行赋值, 进而获取各基本事件的发生概率。评级内容如下:

(1) 岩石岩性 X1: 无软化、流变、崩解岩石的发生概率为 16.9%; 低软化、流变、崩解岩石的发生概率为 23.7%; 中软化、流变、崩解岩石的发生概率为 29.3%。

(2) 结构面特征 X2: 岩体完整性好—

37.4%；岩体完整性一般—50.9%；岩体完整性差—86.4%。

(3) 地下水发育 X3：干燥—59.6%；潮湿—23.0%；滴水—17.6%；涌水—11.7%。

(4) 风化程度 X4：中风化—12.4%；强风化—1.2%；黏土层—39.3%。

(5) 地应力 X5：低—59.3%；中—40.7%。

(6) 地质构造 X6：正常—35.0%；节理发育—17.2%；软弱破碎带—8.5%。

(7) 隧道断面参数 X7：扁平率合理—100%。

(8) 位置参数 X8：埋深大—88.8%；埋深小—11.2%。

(9) 施工工法 X9：未遇到围岩条件差的概率—99.4%；遇到围岩条件差的概率—0.6%。

(10) 支护时机 X10：合理—95.5%；不合理—1.5%。

(11) 支护参数 X11：达到设计要求—94.2%；达到设计要求的80%—5.3%；低于设计要求的80%—0.5%。

(12) 安全步距 X12：与设计相符—83.5%；超设计50%—15.9%；超设计一倍以上—0.6%。

(13) 钻爆扰动 X13：控制合理—93.2%；扰动较大—6.2%；扰动大—0.6%。

(14) 进尺距离 X14：安全—49.1%；一般安全—49.7%；具有风险—1.2%。

(15) 施工工序 X15：合理—99.5%；不合理—0.5%。

(16) 背部空洞 X16：密实—96.5%；局部空洞—3.3%；大面积空洞—0.2%。

(17) 混凝土配合比 X17：达到设计要求—96.8%；达到设计要求的80%—3.0%；低于设计要求的80%—0.2%。

(18) 变形量测 X18：施作—93.5%；未施作但施工段安全—5.4%；未施作，施工段不安全—1.1%。

(19) 超前预报 X19：施作—93.5%；未施作但施工段安全—6.1%；未施作，施工段不安全—0.4%。

(20) 超前支护 X20：达到设计要求—96.5%；达到设计要求的80%—3.3%；低于设计要求的80%—0.2%。

(21) 安全管理 X21：管理严格—69.6%；管理一般—24.6%；管理较差—5.8%。

(22) 施工质量控制 X22：管理严格—78.5%；

管理一般—21.1%；管理较差—0.4%。

5.3 塌方基本事件概率及重要度

根据已统计的塌方基本事件的概率，利用公式(1)进行计算，通过事故树计算得出最终隧道塌方（顶事件）的发生概率为0.91%，根据公式(2)、(3)，各个基本事件的重要度见表2。

表2 塌方基本事件重要度表

序号	基本事件	重要度	序号	基本事件	重要度
1	X2 结构面特征	0.511 5	12	X15 施工工序	0.067 0
2	X22 施工质量控制	0.491 2	13	X4 风化程度	0.049 3
3	X21 安全管理	0.373 0	14	X16 背部空洞	0.026 7
4	X10 支护时机	0.203 0	15	X17 混凝土配合比	0.026 7
5	X14 进尺距离	0.161 9	16	X20 超前支护	0.026 7
6	X8 位置参数	0.148 3	17	X19 超前预报	0.024 3
7	X9 施工工法	0.080 5	18	X6 地质构造	0.007 5
8	X12 安全步距	0.080 5	19	X3 地下水发育	0.002 9
9	X13 钻爆扰动	0.080 5	20	X1 岩石岩性	0.002 9
10	X18 变形量测	0.067 4	21	X5 地应力	0.000 0
11	X11 支护参数	0.067 0	22	X7 隧道断面参数	0.000 0

由表2可知：

(1) 因素 X2 结构面特征引起顶事件发生的概率最大，结构面的特征和发育程度对隧道坍塌的影响最大，不稳定岩体可能因松弛产生坍塌，因此在施工前要勘察即将开挖的岩体的结构面特征，在施工过程中时刻监测围岩结构面的变化，为施工提供实时反馈，帮助施工团队及时调整施工方案和支护结构，以应对围岩变形和破坏的风险。但高精度的监测设备成本较高，且在复杂的地质条件下可能难以部署，此外，监测数据的解析和应用需要专业的地质工程知识，对于数据的误读可能导致错误的工程决策。因此，监测技术的选择应根据工程的具体需求和条件进行，以确保监测的有效性和经济性。

(2) 其次是施工质量控制因素以及安全管理因素，二者都对顶事件的发生有着重要的影响。必须确保支护设计的合理性、施工工艺的适宜性。此外，风险评估和控制措施的实施，以及施工方案的及时优化和监测预警系统的建立，可以显著提高施工安全性和效率，有助于科学决策，对紧急突发事件做出快速反应，以最快速度预警、以最大程度控制，对于预防和降低隧道施工风险至关重要。但是在实际应用中可能存在一系列问题，如不同系统间的差异性较大，预警系统整体构架、数据库及编程语言有所差别等问题，因此，需要让预警系统保持适当的时效性、敏感

性和准确性。

(3) 尽管支护时机、进尺距离在风险因素中排序靠后,但也对顶事件的发生构成影响。合理的支护时机可以确保围岩的稳定性,防止围岩塌落和变形,从而保障施工人员的安全。及时的支护可以减少因围岩不稳定导致的施工中断,提高施工效率,但是地质条件的不确定性和复杂性可能导致支护时机的判断出现偏差,特别是在节理裂隙发育的岩体中,支护时机的确定更加困难。因此,在施工过程中,必须要做好监控量测工作,有效控制围岩的变形,将围岩的损伤程度降到最低。采用合理的支护结构,既要让支护结构发挥作用也要让围岩发挥出其自承能力。

6 隧道施工风险控制

保证隧道施工的安全,要将隧道发生灾害的概率降到最低,控制利用事故树评估的各基本事件的发生概率,对基本事件的风险因素进行分析,制定出减小隧道塌方风险的措施。

6.1 安全风险因子控制过程

风险因素的多样性要求采取针对性的控制策略。因此,必须依托实际的工程概况来计划和实施相应的控制措施,控制过程如图2所示。

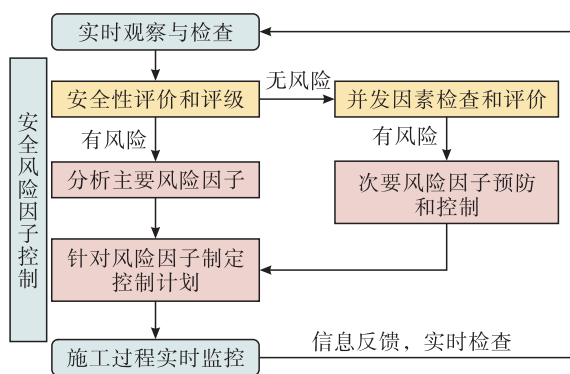


图2 隧道塌方风险因子控制过程

首先,先对隧道工程内的围岩因素、施工因素和管理因素进行综合检查,确定其安全性并识别潜在风险。对识别出的风险因子进行深入分析,并据此制定出合理的风险控制策略。与此同时,还要检查可能导致并发的风险因素,根据其风险程度制定相应的预防措施。最后,对经过控制及修正的风险因子进行实时监控,确保在发现问题时能够迅速采取修正措施。

6.2 安全风险因子预防和控制措施

(1) 围岩因素控制。通过事故树的分析,发现围岩结构面这一因素对隧道发生塌方的影响程

度最大。因此,在施工前应进行详尽的地质勘探,了解围岩的类型、结构和力学性能,为设计提供必要的基础数据。基于围岩的基础条件,施工时密切关注施工面的围岩是否破碎,结构面数量、组数等特征是否劣化,若情况恶劣,应加强施工质量管理,适当地变动施工方案,同时做到少开挖、早支护、勤量测,保证隧道施工的安全性。

(2) 管理因素控制。安全管理方案的制定与实施对隧道工程的稳定性至关重要。首先要制定适应性强的安全管理制度,明确各级管理人员的安全责任,确保在施工各环节中都有责任主体,建立安全风险组织,由管理层、实施层和监督层组成。项目第一负责人、总工程师和各部门负责人等组成管理层;现场成员、施工技术人员和测量员等组成实施层,对施工的具体情况和施工人员进行管理;施工监理部门负责人和现场监理员组成监督层,二次检测施工质量,保证风险管理小组的监督质量。此外,对现场管理人员以及施工人员进行安全培训,加强各部门之间的沟通与协调,确保信息畅通,确保问题能够及时反馈和处理。

(3) 施工因素控制。根据地质勘察结果和工程要求,制定合理的施工方案,加强施工过程中的监控量测,监测隧道周围地应力、位移等参数的变化,提前预警并采取相应的应对措施。严格控制爆破参数,减少或避免超挖;地质条件差、围岩性质不足时,要加强支护参数,缩短进尺距离;控制好混凝土的配合比;完善排水系统的设计;加强施工时的检查,及时制止和纠正违反操作规章的行为。

7 结论

研究采用事故树分析法对云南古城大跨度泥岩隧道塌方事件进行了分析,得到以下结论:

(1) 隧道塌方主要由三大因素引起,分别是自然因素、人为因素以及施工质量管理因素。其中,自然因素包括岩石岩性以及结构面等5个方面;人为因素包括钻爆扰动、支护时机、进尺距离等11个方面;施工质量管理因素包括变形监测、施工质量控制等4个方面。

(2) 研究确定了导致云南古城大跨度泥岩隧道坍塌的主要原因及机理,发现结构面特征对隧道坍塌的影响最为显著,施工质量以及安全管理次之。

(下转第58页)

5 结语

结合万花楼文旅综合城项目实践,探讨了商业综合体建筑压力型预应力岩石抗浮锚杆施工技术。为防止地下水位上升对结构造成不利影响,在实际施工中采用了压力型预应力岩石抗浮锚杆作为永久性的抗浮构件。将锚杆深埋于地下岩石层中,通过施加预应力来抵抗地下水对建筑物的浮力作用。抗浮锚杆采用PSB1200级的 $\varnothing 42$ mm预应力混凝土用精轧螺纹钢,其抗拉强度 f_{py} 达到了1 000 MPa,可承受巨大的拉力,从而确保锚杆在长期使用过程中保持稳定性和可靠性。同时严控预应力抗浮锚杆的放线定位、抗拔承载力试验及钻孔、锚杆制作、注浆、锚杆施加预应力等关键工序,最后做好预应力抗浮锚杆的防水及成品保护,按顺序完成施工任务。通过采用抗浮锚杆施工工艺,可以显著提升大型商业综合体建筑基础筏板的抗浮稳定能力,并且在建筑物交付使用后有效预防和减少因地下水压力引起的渗漏隐患,不仅确保了建筑结构的安全性,还为建筑物的长期稳定运行提供了良好的安全质量保障。

本项目施工成功的经验,可为类似工程施工提供参考。

参考文献:

- [1]周驰晴. 新型全长压力型预应力抗浮锚杆施工技术研究:以长沙机场改扩建工程综合交通枢纽工程项目为例[J]. 工程技术研究,2023,8(13):44-46,53.
- [2]杨家玺. 地下室施工中无粘结预应力抗浮锚杆的应用[J]. 中国建筑金属结构,2023,22(4):74-76.
- [3]刘毅. 抗浮锚杆于筏板后施工技术分析及研究[J]. 建筑技术,2024,55(15):1825-1828.
- [4]裴怀文. 预应力抗浮锚杆施工技术应用[J]. 建筑机械化,2024,45(7):87-90.
- [5]辛德平. 杭州某工程压力型预应力抗浮锚杆设计及施工研究[J]. 福建建筑,2024(4):106-109.
- [6]朱忠钱. 岩土工程中抗浮锚杆施工技术的研究与分析[J]. 居舍,2023(36):67-70.
- [7]闫志峰. 预应力抗浮锚杆施工技术探析[J]. 建设科技,2023(22):71-73.
- [8]沈锴,刘鑫. BIM+测量机器人在抗浮锚杆施工中的应用[J]. 建筑施工,2020,42(10):1974-1976.

(上接第51页)

(3) 根据对风险因子的分析,提出了预防和管控措施。包括施工前进行详尽的地质勘探,密切关注施工面以及结构面特征的变化;建立安全管理风险组织,对管理、施工人员进行安全培训;加强监控量测,控制爆破参数、缩短进尺距离等。

参考文献:

- [1]周鸣亮,李泽豫,黄宏伟,等. 考虑施工时序的隧道工作面坍塌风险分析方法与验证[J]. 防灾减灾工程学报,2024,44(3):579-595.
- [2]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.
- [3]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.

- [4]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(S1):319-328.
- [5]胡法涛. 新奥法隧道施工塌方原因事故树分析[J]. 工程技术研究,2019,4(13):34,62.
- [6]郝银. 基于事故树分析的新奥法施工动态风险评估[J]. 交通世界,2018(Z2):198-199.
- [7]韩守信,张青松. 新奥法隧道施工塌方原因事故树分析[J]. 能源与环境,2009(5):104-105,108.
- [8]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,2008,4(6):991-998.
- [9]柳献,孙齐昊. 盾构隧道连续性倒塌特征分析[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(6):913-922.
- [10]南宇宏,赵颂,羊正茂. 基于事故树的隧道塌方风险评估[J]. 筑路机械与施工机械化,2017,34(7):106-110.