

复杂地层环境下岩溶坍塌分析与处置

李军涛

昆明理工大学公共安全与应急管理学院，云南 昆明

收稿日期：2024年12月24日；录用日期：2025年1月15日；发布日期：2025年1月26日

摘要

岩溶塌陷是隧道施工中常见的地质灾害，尤其在岩溶地貌发达的西南地区，常受到自然因素与人为活动的交互作用影响，给隧道开挖及周边环境带来严重影响。因此，研究复杂地层环境下的岩溶塌陷机理具有重要意义。本文结合某地铁隧道施工案例，分析了岩溶塌陷的主要诱发因素，并针对已发生的典型岩溶塌陷问题进行探讨，提出了相应的防治措施及现场处置方案，以期为类似工程提供参考。

关键词

隧道，岩溶，坍塌，处理措施

Analysis and Disposal of Karst Collapse in Complex Geological Environments

Juntao Li

Faculty of Public Security and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan

Received: Dec. 24th, 2024; accepted: Jan. 15th, 2025; published: Jan. 26th, 2025

Abstract

During tunnel construction, karst collapse is a common geological hazard, especially in the southwestern region with developed karst landforms. The interaction of natural factors and human activities has a huge impact on tunnel excavation and the surrounding environment. Therefore, it is necessary to study the mechanism of karst collapse in complex geological environments. This article combines a construction case of a subway tunnel to analyze various triggering factors that cause karst collapse, and analyzes and deals with typical karst collapse problems that have already occurred. Corresponding prevention and control measures and on-site disposal measures are proposed.

Keywords

Tunnel, Karst Cave, Collapse, Treatment Measures

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 绪论

随着我国城市化进程的加速与区域协调发展的推进，隧道交通建设不断完善，区域间的联系日益紧密。然而，在一些特殊地质条件下，隧道结构的失稳或坍塌风险依然难以避免[1]。岩溶现象是由水的溶蚀作用导致可溶性岩石(如石灰岩、白云岩)发生破坏、物质带出、转移和再沉积，进而形成空腔。这些空腔的存在和扩展最终可能引发隧道塌陷，给隧道施工带来严峻挑战[2]。尤其在岩溶地貌发育的西南地区，地质条件复杂且多变，溶洞等空腔往往无法在前期勘探中全面探测，严重影响隧道施工的安全性[3]。已有多个工程案例[4]-[6]表明，地质结构的多样性、溶洞的规模差异、溶蚀程度的不均衡等因素，加上隧道工程对原状地层的干扰，均导致岩溶坍塌等地质灾害频发。因此，研究岩溶坍塌的发生机理，探索有效的预测与防治措施，对于我国岩溶地区的地质灾害防治具有重要的理论意义和实际应用价值。

文献综述

陈秀雯等[7]基于云南曼勒一号隧道的研究，采用力学计算模型和有限元分析，探讨了西南地区岩溶富水隧道的坍塌问题。研究表明，地下水渗漏对砂泥岩地层围岩稳定性产生了显著影响，导致大范围围岩失稳坍塌和初支破坏。吴峰等[8]通过分析岩溶滑坡体的实例，研究了溶洞在边坡坍塌中对基岩完整性的破坏作用，进一步降低了边坡的整体稳定性。基于此，提出了一种适用于此类边坡稳定性分析的突变评判方法，并给出了合理的应急加固设计方案。针对岩溶地区隧道地下水涌水预测的复杂性，林传年[9]划分了不同的岩溶蓄水形式特征，揭示了岩溶区易发生涌水的构造机制，并提出了一种较为合理的隧道涌水量预测方法，结合工程实例验证了其可行性。吴治生[10]在现有岩溶隧道涌水量计算方法的基础上，考虑不同水文地质参数，结合实际项目中隧道涌水量及地表泉长期观测资料，提出了大泉流量预测法和新均衡法，对岩溶隧道的修建过程进行了全面评估。

本文以西南地区某地铁隧道项目为研究对象，从理论角度分析了岩溶塌陷的主要诱发因素，并结合该项目中已发生的典型岩溶塌陷案例，深入探讨了坍塌段围岩和初期支护的受力特性及其坍塌机理。在此基础上，提出了针对岩溶塌陷的防治措施和现场处置方案。研究结果为类似地层环境中的岩溶治理提供了宝贵的经验和实践依据。

2. 工程概况

本文所研究的地铁隧道项目位于云贵高原，地质背景属扬子准地台(一级构造单元)、黔北台隆(二级构造单元)、遵义断拱(三级构造单元)及贵阳复杂构造变形区(四级构造单元)。该地区的构造特征以南北向为主，广泛分布的碳酸盐岩和发育成熟的喀斯特地貌景观是其显著特征。隧道区段岩溶发育强烈，溶洞、溶槽、溶沟、溶隙等岩溶现象普遍存在，且岩溶管道具有良好的连通性。地下水位较浅，地下水资源丰富。该地区的岩石主要为灰岩，地貌类型主要由中山溶丘和溶蚀洼地交替分布构成。

3. 坍塌原因及机理分析

岩溶坍塌引发的地质灾害主要源于岩溶地层的不稳定性，通常表现为地下溶洞或空腔的突然塌陷。岩溶坍塌的原因和机理复杂，涉及地质、水文及人为因素的相互作用。以下从地质因素角度分析岩溶坍塌的成因及其机理。

3.1. 地质因素

岩溶地层本身具有较高的溶解性，长期的地下水活动作用下，岩石中的孔隙和裂隙不断增多，易形成溶洞和空腔。地下水的溶蚀作用不仅促使溶洞的发育和扩大，还会导致岩层整体强度的下降。当空腔达到一定规模且承载力不足时，局部的应力分布不均匀，周围岩层逐渐失去支撑，最终导致地表发生塌陷。此外，溶洞的形态、发育深度及其分布特征也是影响岩溶坍塌的重要因素[11]。深层岩溶溶洞可能在长期静水压力作用下发生坍塌，而浅层溶洞则易受到地表荷载的影响，导致坍塌[1]。

该地铁隧道所在区域主要为喀斯特地貌，基础部位的覆盖层界面起伏较大，属于强溶蚀风化带，溶沟、溶槽及陡倾构造的溶蚀裂隙较为发育。由于岩性、节理发育及断裂构造等地质条件复杂，现有的地勘钻孔技术难以精确探测该地区的地质情况。同时，隧道埋深较浅，地下溶洞与地表的连通性较好，地表的粘土物质大量涌入地下溶洞，与溶洞内碎石及红黏土混杂，形成半充填或全充填的溶洞状态。随着隧道的逐步开挖，充填物中软流塑状的红黏土可能涌入隧道，引发隧道坍塌(见图 1)。

事故发生后，通过对 K10+300 至 K10+500 区段补充的详细钻孔勘探结果显示，该区域岩溶现象普遍发育，溶洞和溶槽密集，且多数被软塑至流塑状的黏土夹碎石充填。在隧道施工过程中，这些充填物在外部扰动作用下容易被扰动并涌入隧道，极易引发坍塌事故(见图 2)。



Figure 1. Tunnel mud inrush and collapse
图 1. 隧道涌泥坍塌



Figure 2. Tunnel karst cave mud inrush and collapse
图 2. 隧道溶洞涌泥坍塌

3.2. 水文因素

地下水位的升降变化对溶洞的稳定性具有重要影响。降水量的季节性波动，特别是在暴雨后，地表水迅速渗入地下，导致地下水位的急剧变化。这种快速变化会引起岩溶空腔内部压力的剧烈波动，从而诱发隧道坍塌[12]。此外，工程建设过程中地下水的排放或抽取也会导致岩层空洞内的承压水流失，进一步降低空腔的稳定性。尤其在喀斯特地貌环境下，隧道施工中突泥涌水现象较为常见(见图 3) [13]。



Figure 3. Tunnel karst cave water inrush and collapse

图 3. 隧道溶洞涌水坍塌

根据该地铁隧道施工期间的地下水位监测数据，随着隧道开挖的推进，地下水位线逐渐下降。特别是在雨季过后，地下水位的快速下降导致溶洞及拱顶上方的原硬塑红黏土逐渐遇水软化，转变为软塑至流塑状，失去原有的承载力。以 K10 + 420 处为例，地下水位下降后，软化的红黏土沿陡倾发育的溶沟和溶槽以突泥涌水的形式大量涌入隧道，瞬间破坏了隧道上方的土体平衡，最终导致掌子面发生严重坍塌。

3.3. 人文因素

在岩溶发育区的工程建设过程中，大规模地基开挖和重荷载施加会改变地层的应力分布，破坏岩溶地层的力学平衡，进而导致局部掉块甚至坍塌。特别是地铁、隧道等地下工程及高层建筑基础的开挖施工，对地层结构的扰动会破坏原有的土体受力平衡，进而加速坍塌的发生。此外，在地质勘查和施工过程中，若未能及时识别岩溶地质结构并采取有效的防护措施，也容易引发地表沉降或塌陷。

结合该地铁隧道的设计阶段，工程初期存在地质勘查钻孔不足的问题，未能明确掌握隧道穿越区域溶洞和溶槽的分布情况。隧道进口段的溶洞群呈串珠状分布，这一特征未能充分考虑，导致初期支护设计参数偏小，未能有效抵抗溶洞坍塌产生的冲击力，致使掌子面频繁发生坍塌事故。

在施工和管理方面，由于未获得全面的地质勘探信息，施工措施未能精准实施，且施工人员对地质变化的敏感性不足，未能在事故发生初期及时调整施工方案，导致事故进一步加剧。例如，在 K10 + 200 至 K10 + 300 区段，原设计方案采用三台阶法开挖，但在遇到溶洞群时未及时采取加固措施，继续施工导致溶洞上方土体失去支撑，最终引发局部坍塌。加之超前小导管注浆不饱满、锚杆安装不到位以及工序衔接时间过长等施工质量问题，进一步削弱了初期支护的整体稳定性。

3.4. 隧道岩溶坍塌受力数值模拟分析

采用 MIDAS/GTS NX 有限元分析软件进行内力计算，隧道的施工开挖模拟采用地层 - 结构模型，初期支护采用梁单元模拟；二衬与初支围岩的相互作用采用荷载 - 结构模型，二衬采用弹性梁单元模拟，二衬与初期支护和围岩的相互作用采用只能受压的径向弹簧单元模拟。

采用大管棚超前支护的数值模拟受力分析

采用大管棚超前支护的衬砌结构设计图(见图4)和初期支护承受荷载分布(见图5)。

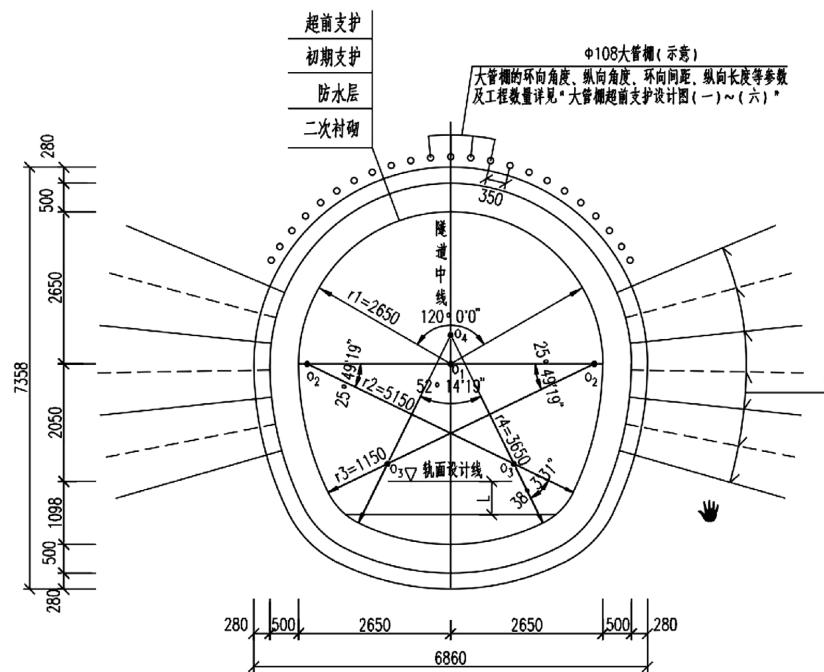


Figure 4. Design drawing of lining structure

图4. 衬砌结构设计图

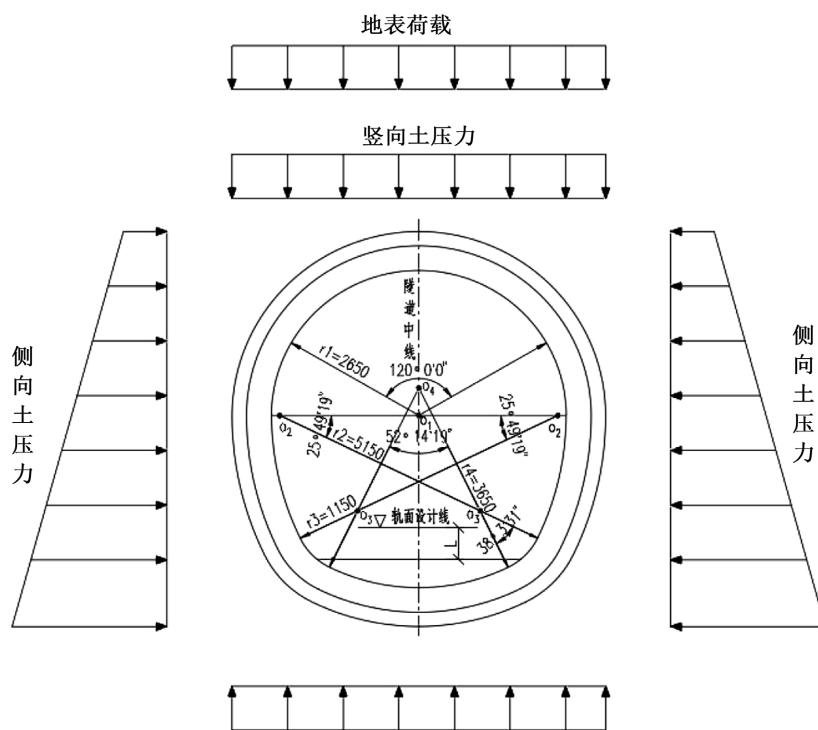


Figure 5. Load distribution diagram of primary support

图5. 初期支护承受荷载分布图

初期支护结构单元采用梁单元模拟，初期支护与围岩相互作用采用受压地基弹簧单元模拟，计算模型见图 6。

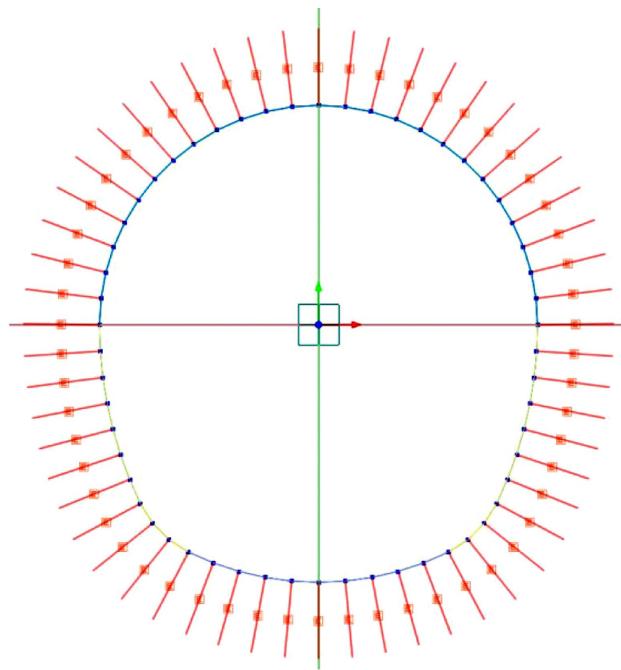


Figure 6. Stress calculation model
图 6. 计算模型

模拟计算结果见图 7~10。

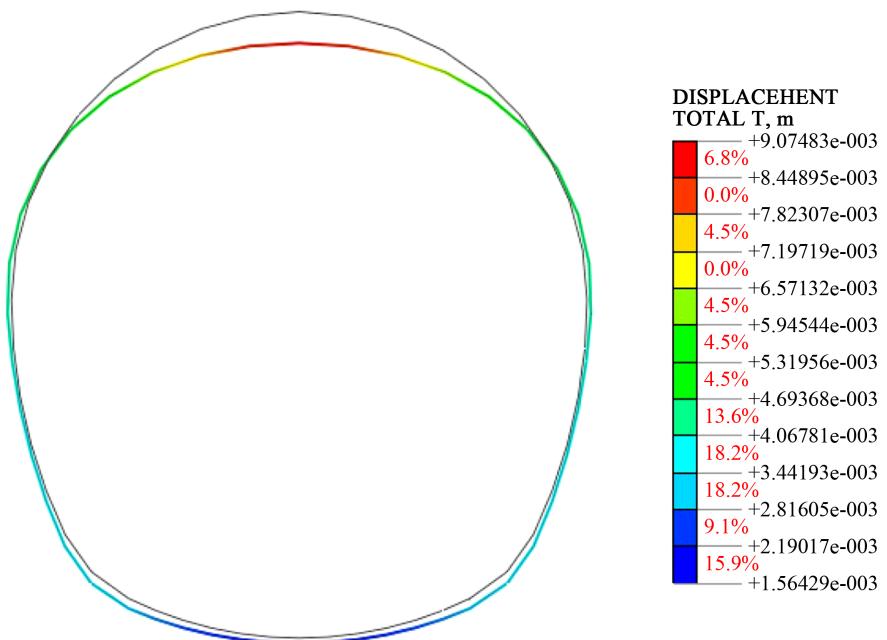


Figure 7. Vertical lining deformation diagram
图 7. 坚向衬砌变形图

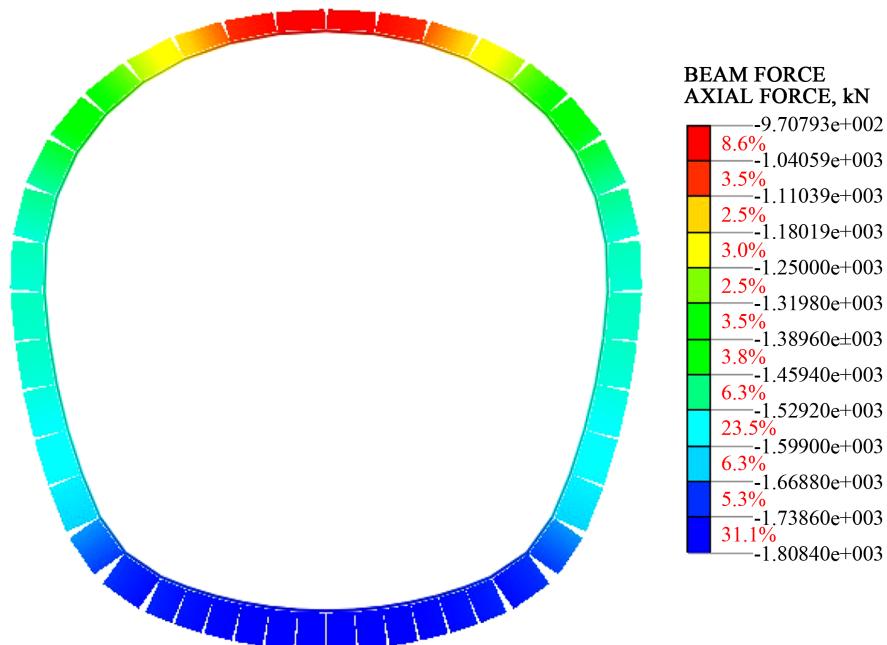
**Figure 8.** Lining axial force diagram

图 8. 衬砌轴力图

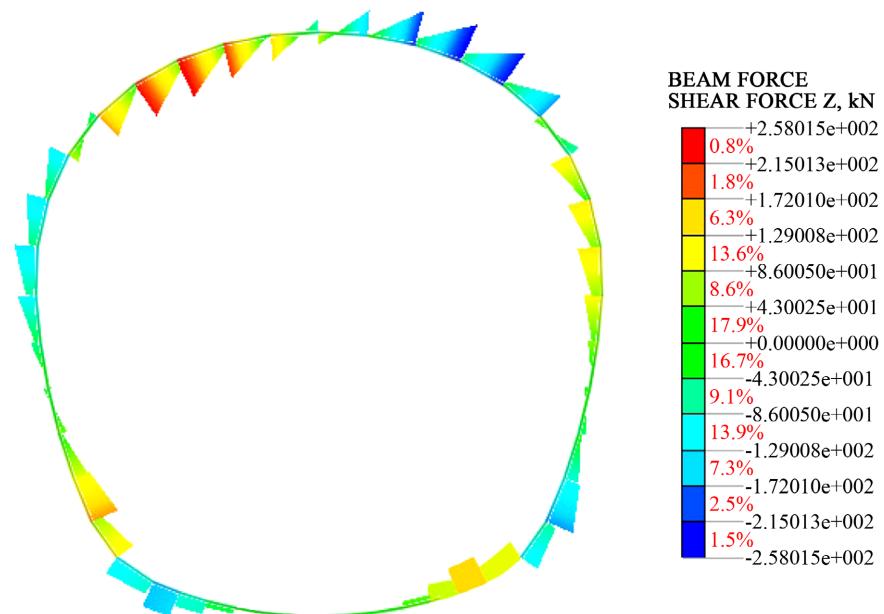
**Figure 9.** Lining shear force diagram

图 9. 衬砌剪力图

配筋检算, 见表 1。

计算结论分析:

- 1) 从数值模拟分析可知, 设计初隧道衬砌结构强度安全系数、抗剪强度、裂缝宽度检算满足规范要求。
- 2) 但由于地质情况突变, 未能提前预判地质填充及涌水情况, 超前支护失效, 导致支护失稳;

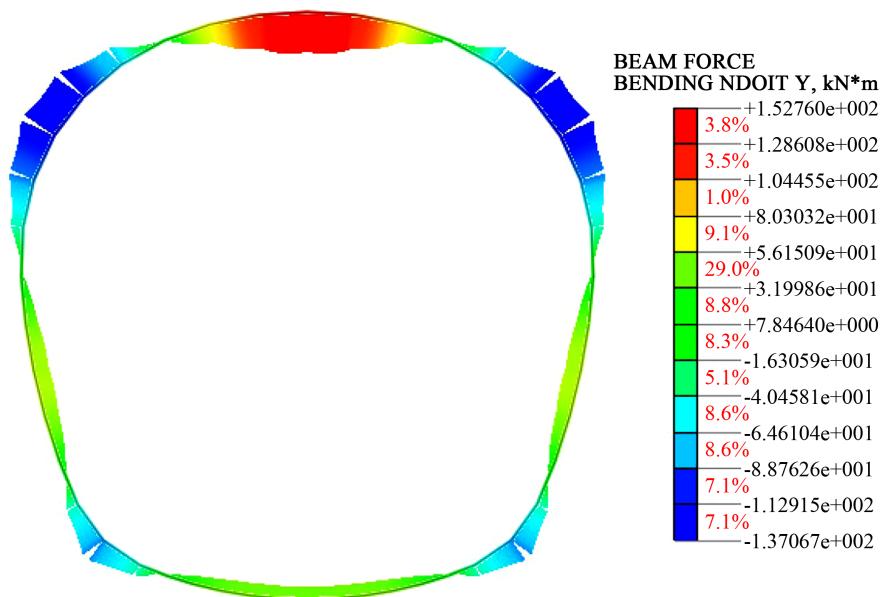


Figure 10. Lining bending moment diagram
图 10. 衬砌弯矩图

Table 1. Reinforcement checking and calculation sheet
表 1. 配筋检算表

计算输入参数					抗剪计算	抗裂计算	安全系数
截面号	H (m)	M (KN·m)	N (KN)	Q (KN)			
单元号	截面厚度	弯矩	轴力	剪力			
1	0.28	-13.47	-1544	108.2	构造箍筋	不检算裂缝	符合要求
2	0.28	-110	-1490	81.22	构造箍筋	不检算裂缝	符合要求
3	0.28	-94.66	-1321	-105.6	构造箍筋	不检算裂缝	符合要求
4	0.28	48.66	-1104	-149.5	配箍合适	不检算裂缝	符合要求
5	0.28	151.8	-978.8	-38.98	构造箍筋	0.042	符合要求
6	0.28	-94.66	-1321	105.6	构造箍筋	不检算裂缝	符合要求
7	0.28	-110	-1490	-81.22	构造箍筋	不检算裂缝	符合要求
8	0.28	59.89	1566	10.21	构造箍筋	不检算裂缝	符合要求
9	0.28	43.46	-1595	-57.01	构造箍筋	不检算裂缝	符合要求
10	0.28	-66.97	-1705	-101.6	构造箍筋	不检算裂缝	符合要求
11	0.28	47.28	-1802	0.1275	构造箍筋	不检算裂缝	符合要求
12	0.28	-19	-1757	168.5	配箍合适	不检算裂缝	符合要求

4. 岩溶坍塌的处置方法

岩溶坍塌作为一种常见的地质灾害，其成因具有一定的复杂性。地下溶洞的发育情况、地下水位的动态变化以及周边荷载的影响等因素，都会成为隧道施工中引发坍塌风险的潜在诱因。因此，单一的技术手段难以有效应对岩溶坍塌的复杂性，必须结合精确的超前预报与智能化监测技术，实现多源信息的

融合预警，从而更早期、更精确地预测岩溶坍塌的发生。通过提前掌握相关信息，可以及时采取有效的防护措施，降低事故发生的风险。此外，完善的应急处置体系在岩溶坍塌风险发生时也显得尤为重要，以确保事故发生后能够迅速进行有效应对，减少损失。

4.1. 预防措施与监管

4.1.1. 超前预报

岩溶坍塌具有隐蔽性强、突发性高的特点，通常在风险发生前缺乏明显征兆，这为灾害防控带来了极大的不确定性。因此，超前预报在岩溶坍塌的防治中至关重要。岩溶坍塌的预防首先依赖于精确的地质勘察，通过采用先进的勘察技术，如钻探、电磁波探测、地质模型构建等，全面了解区域内岩溶的发育情况及潜在的坍塌风险，识别可能存在的溶洞、裂隙、空腔等隐患。

在隧道开挖施工前，可使用地质雷达扫描，结合地质勘探报告，全面掌握隧道区域的岩溶地质发育状况与分布情况，为隧道开挖提供真实可靠的资料。在实际施工中，可以采用掌子面超前地质预报、超前水平钻探、TSP(透射波法)等手段，对掌子面前方的地质情况进行实时分析和判断，及时调整隧道开挖方案和支护参数，并对溶洞的位置、形态和发育特征进行补充勘察，以确保后续施工的准确性和安全性。

4.1.2. 施工监测

建立科学、系统的岩溶坍塌监测预警体系是岩溶风险防控的有效措施之一。尽管岩溶坍塌通常具有较长的孕育过程，微小的岩层裂隙扩展和破裂往往难以被感知，但现代微震监测技术可以捕捉到微弱的地震波信号，通过分析这些信号实现对坍塌风险的预警。同时，使用高精度地表沉降监测设备也能有效反映周围环境的异常变化，为岩溶坍塌的超前预报提供重要依据。

在施工前，根据已有的地质勘探图纸，对已知的岩溶区域加密地表监测点，并增加监测频率，实时跟踪地表变化。发生岩溶坍塌时，应及时监测相应区域的地表沉降变化，并在发生异常时采取围蔽措施。同时，对于已经施作完成支护的隧道岩溶段，应结合洞内与地表的监控量测手段，进行加密监测，预防二次灾害的发生。

4.1.3. 岩溶坍塌处置

隧道内岩溶坍塌的处理原则是对事故现场进行精准评估，并制定合适的处置方案。处理工作应遵循“先加固、防扩散，后解决”的原则，确保尽早采取措施，避免事态进一步恶化，并采取足够强度的防护措施，防止事故蔓延。

当隧道发生坍塌时，应立即撤离人员和机械设备，并封闭掌子面。对坍塌区域的土体进行C20混凝土喷锚封闭，确保坍塌区域得到有效隔离(见图11)。为了防止二次坍塌，需及时对原坍塌位置进行喷锚封闭处理，并在坍塌区5米范围内设置横撑或竖撑，加固初期支护结构，避免初支拱架受力变形导致进一步坍塌(见图12)。

对于溶洞和溶腔的处理，针对较小的溶腔，可以采用预留上料管喷射混凝土填充以及小导管注浆加固的方式。在填充完坍塌土体后，应在紧邻掌子面的位置架设格栅拱架进行支护，并预留上料管和注浆管至溶腔内。在拱架喷射混凝土并达到设计强度后，进一步对上料管进行喷锚填充，并进行注浆加固处理。

对于较大的溶腔，在完成注浆加固后，可采用地表钻孔探测的方式，探明地表下的空腔位置，并进行混凝土回填，同时进行地表加固注浆。对于大型溶洞和溶腔，则应采用大管棚施工方法，对塌体及周边岩体进行预注浆加固，并通过打设大管棚进一步加固周围岩体。

在复杂岩溶地带的开挖过程中，必须严格遵循“十八字”原则，即：管超前、严注浆、短进尺、强支



Figure 11. Shotcrete and anchor bolt sealing of collapsed soil mass

图 11. 坍塌土体喷锚封闭



Figure 12. Reinforcement of collapsed area with transverse supports

图 12. 坍塌区域横撑加固

护、早封闭、勤量测。这些原则应作为不良地质段暗挖的基本方法。当隧道通过复杂岩溶区时，应适当缩短上台阶的高度和长度，采用三台阶法进行开挖，并预留核心土。施工过程中，主要以人工机械开挖为主，辅以弱爆破。在每个上台阶的循环进尺过程中，都需打设超前小导管，确保不扰动围岩的情况下，安全顺利地通过岩溶区。

当隧道初期支护通过岩溶区后，对于因岩溶坍塌造成的拱架变形，若其侵入隧道轮廓大于 5 cm，应进行拱架更换。根据测量结果，确定更换部位和数量。更换时，采用人工凿除初支混凝土，凿除的厚度应与原开挖轮廓一致，凿除顺序从上至下逐步进行。凿除后，应对凿出面进行速喷，以保证围岩和土体的稳定。对于已变形的拱架，进行切割更换，并在拱架安装完毕后，依次施作钢筋网、锁脚锚杆、系统锚杆等工序。拱架的更换应逐榀进行，直至全部完成。

5. 结论

地铁隧道坍塌事故的发生受到地质、水文条件和施工管理等多重因素的影响。以西南某地铁隧道施工案例为基础，本文分析了复杂地层环境下岩溶坍塌的诱发因素和机理，提出了优化地质超前预报与监测技术的策略，并制定了应急处理方案，以降低岩溶坍塌事故的发生概率，确保施工安全与质量。隧道

岩溶坍塌受力分析采用 MIDAS/GTS NX 有限元软件，模拟结果显示，隧道衬砌的强度安全系数、抗剪强度和裂缝宽度均符合规范要求，研究为类似项目提供了有价值的借鉴和技术支持。

参考文献

- [1] 李术才, 王康, 李利平, 等. 岩溶隧道突水灾害形成机理及发展趋势[J]. 力学学报, 2017, 49(1): 22-30.
- [2] 刘招伟, 何满潮, 王树仁. 圆梁山隧道岩溶突水机理及防治对策研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 228-232, 246.
- [3] 姚艺玮. 深埋黄土隧道围岩压力分布规律、形成机理及计算方法研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [4] 郭明. 隐伏溶洞对隧道围岩稳定性的影响规律及鄂西山区岩溶处治技术研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2014.
- [5] 宋战平. 隐伏溶洞对隧道围岩-支护结构稳定性的影响研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- [6] 黄光明. 福建永安大湖盆地地下隐伏岩溶发育特征及影响因素[J]. 中国煤炭地质, 2020, 32(11): 55-60, 64.
- [7] 陈秀雯, 刘家奇, 张浩, 等. 西南地区岩溶富水隧道坍塌力学机理及处治措施[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(36): 15639-15645.
- [8] 吴峰, 冯晓, 黄伟. 渝东南岩溶地区公路边坡坍塌机理分析与应急加固措施[J]. 中外公路, 2013, 33(1): 29-33.
- [9] 林传年, 李利平, 韩行瑞. 复杂岩溶地区隧道涌水预测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(7): 1469-1476.
- [10] 吴治生. 不同地质边界条件岩溶隧道涌水量预测及展望[J]. 铁道工程学报, 2007(11): 48-55, 64.
- [11] 韩行瑞. 岩溶隧道涌水及其专家评判系统[J]. 中国岩溶, 2004, 23(3): 213-218.
- [12] Gutiérrez, F., Calaforra, J.M., Cardona, F., Ortí, F., Durán, J.J. and Garay, P. (2007) Geological and Environmental Implications of the Evaporite Karst in Spain. *Environmental Geology*, **53**, 951-965.
<https://doi.org/10.1007/s00254-007-0721-y>
- [13] Li, L.P., et al. (2024) Analysis of Factors Influencing Tunnel Block Collapse in Blocky Rock Masses: Insights from Large-Scale Model Experiments and DDA Simulations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **57**, 9847-9864.
<https://doi.org/10.1007/s00603-024-04065-4>