

# 隧道围岩塌方灾变机理研究进展与发展趋势

梁炼兵

中铁十六局集团第三工程有限公司, 浙江 湖州

收稿日期: 2025年3月18日; 录用日期: 2025年4月9日; 发布日期: 2025年4月22日

## 摘要

随着我国铁路、公路隧道建设规模和数量的不断增加, 隧道塌方事故频发, 给国家的工程建设造成了严重的不良影响。本文系统地梳理了隧道围岩塌方的主要诱因和塌方类型, 揭示了隧道围岩塌方的灾变机理。同时, 探讨了模型试验、数值模拟和理论研究等方法在揭示隧道围岩塌方灾变机理中的应用和局限性, 并据此提出了未来可能的发展趋势。通过对现有研究成果的总结和分析, 旨在为隧道工程的安全建设提供理论支持和实践指导。

## 关键词

塌方诱因, 塌方类型, 灾变机理

# Advancements and Development Trend of Disaster Mechanism of Tunnel Surrounding Rock Collapse

Lianbing Liang

China Railway 16th Bureau Group Third Engineering Co. Ltd., Huzhou Zhejiang

Received: Mar. 18<sup>th</sup>, 2025; accepted: Apr. 9<sup>th</sup>, 2025; published: Apr. 22<sup>nd</sup>, 2025

## Abstract

The increasing scale and quantity of railway and highway tunnel construction in China has unfortunately been accompanied by frequent tunnel collapse accidents, resulting in serious adverse effects on national engineering construction. To address this critical issue, this paper systematically reviews the research progress concerning the disaster mechanism of tunnel surrounding rock collapse. Specifically, the review elucidates the main causes and various types of tunnel collapse. Furthermore, the application and limitations of different research methodologies-including model

tests, numerical simulations, and theoretical analyses in revealing the disaster mechanism of tunnel surrounding rock collapse are critically discussed. Based on this analysis, potential future development trends in the field are proposed. Ultimately, by summarizing and analyzing existing research findings, this paper aims to provide both theoretical support and practical guidance for ensuring the safety of tunnel engineering construction.

## Keywords

### Causes of Collapse, Types of Collapse, Disaster Mechanism

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. 引言

为了满足社会与经济发展日益增长的需求,我国铁路、公路隧道建设规模和数量与日俱增。根据《2022年交通运输业发展统计公报》[1],截止2022年底,我国已建成公路隧道24,850处,合计2678.43万延米。随着建造理念、勘查技术、设计水平及施工设备等条件的变化,隧道建造的长度、难度及危险性也在逐渐加大[2]。对于线路长、断面大、地质条件复杂的隧道工程,在建设过程中极易产生工程灾害事故,包括塌方、突水突泥、岩爆、大变形等,其中隧道塌方是最为常见的工程灾害[3],约占各类重大地质灾害发生几率的60%以上。隧道塌方灾害已给国家的工程建设造成了很多不良影响,如表1所示。隧道塌方事故一旦发生,将会对施工设备、施工人员生命安全构成巨大威胁。因此,深入研究隧道围岩塌方灾变机理,对于提高隧道工程的安全性和可靠性具有重要的现实意义。

**Table 1.** Major tunnel collapse accidents in China

**表 1.** 国内重大隧道塌方事故

时间	隧道名称	塌方事故及造成的损失
2010.01	南宁至广州高速铁路广东云安隧道	5人死亡、4人受伤
2014.09	广通至大理铁路扩能改造工程桃园一号隧道	仰拱处发生坍塌,坍塌量400余方,造成6人被困
2016.06	襄渝铁路改扩建工程沙坪坝杨家沟段隧道	造成多人被困,1人死亡
2019.12	山西晋城市太行一号国家风景道阳城段第三分部析城山隧道	塌方量约200 m <sup>3</sup> ,造成6人死亡
2020.09	广西百色市乐业县乐业隧道	隧道围岩突发坍塌,9名工人死亡,直接经济损失1414万元

隧道塌方事故频发引起了国内外学者的广泛关注。对隧道施工过程进行全方位立体监测是安全施工的有力保障。传统的隧道安全监测是通过全站仪等设备按照一定频率对固定测点进行重复监测,然而,全站仪监测方法自动化水平低,且测量结果的准确性受仪器精度、人员经验等因素影响严重[4][5]。随着电子信息技术的发展,以传感器为基础的自动化监测系统逐渐被广泛应用于隧道塌方预测预警,如三维激光扫描仪、视频图像监测技术等。然而,这些方法受光照、粉尘、温度影响较大,无法保证精度的要求[6]。为实现对隧道施工过程的智能化、自动化、信息化监测预警,Hase等[7]开发了一套深度学习图像分析系统,通过识别隧道开挖掌子面混凝土表面出现的裂缝实现对隧道施工过程的持续监测,通过实际工

程验证该系统可以及时地发现裂缝,从而进行预警。随着人工智能、物联网、大数据等技术的发展,学者们通过整合无线通信、机器学习等相关技术,更加高效精确地对隧道施工过程进行监测与预警, Li 等[8]建立了基于 PSO-BPNN 神经网络的全断面开挖隧道围岩变形预测模型,结合监测数据提高了预警的准确性。Fei 等[9]基于 BPNN 和 MARS 机器学习回归算法,建立了隧道工程监测预警模型,并通过隧道周边收敛和拱顶沉降变形数据进行验证,结果表明该方法能够有效地预测隧道变形情况。尽管人工智能、机器学习等新技术为隧道塌方预测预警提供了有力的工具,但要充分理解和运用这些技术,还需深入探究隧道塌方背后的本质机理。基于此,本文通过整理归纳相关文献,系统地梳理了隧道围岩塌方的主要诱因和类型,揭示了隧道塌方的灾变机理,并据此提出未来可能的发展趋势。

## 2. 隧道塌方诱因及类型研究现状

隧道围岩发生塌方后,通过现场调查可以获得第一手资料,不少学者通过现场调查和统计分析相结合的方法,分析塌方诱因,总结塌方类型,从而进一步阐释隧道围岩塌方的灾变机理,本节主要从隧道塌方的诱因与类型两个角度进行综述。

### 2.1. 塌方的诱因

隧道塌方事故防控难度高、致灾后果强,已成为制约国内外隧道工程安全发展的重要理论障碍和技术瓶颈。探明隧道塌方诱因,并深入分析各因素之间的相互作用关系,可以为阐释隧道塌方灾变机理和开展预防控制提供科学依据和理论支撑。目前,不少学者通过实地调查塌方现场,并结合统计分析已发生案例,讨论隧道塌方的影响因素,具体情况如表 2 所示。

Table 2. Influencing factors of tunnel collapse

表 2. 隧道塌方影响因素

序号	作者	案例数	隧道塌方诱因
1	郑玉欣[10]	1050	① 不良地质体; ② 地下水; ③ 施工设计不当
2	何晓东[11]	70	① 地质条件差; ② 地下水; ③ 不规范施工
3	汪成兵[12]	108	① 工程地质条件; ② 地下水; ③ 支护措施; ④ 爆破扰动
4	曾云峰[13]	60	① 等效开挖截面积; ② 高深比; ③ 地下水; ④ 不良地质; ⑤ 地质调查; ⑥ 施工技术
5	Shin [14]	5	① 不充分的地质调查; ② 新奥法的不恰当应用; ③ 地下水; ④ 爆破; ⑤ 稳定性分析不足

由表 2 可知,隧道塌方诱因众多,总体而言,未知的不良工程地质条件、设计及施工方法不当及其他自然因素通常被认为是影响隧道塌方的主要因素。此外,在统计分析的基础上,一些学者引入新的方法和理论对塌方主要影响因素和多因素耦合致灾作用进行了研究,安亚雄等[15]基于 142 个软岩隧道塌方事故案例,对塌方原因进行了分析,并利用系统动力学和 N-K 耦合模型分别对多个致灾因素的耦合致灾作用进行了定性与定量的分析计算,确定了最主要的耦合致灾关联组合和主要影响因素。文艳芳等[16]基于 PSP-IAHP 模型分析了地铁隧道施工坍塌事故发生的致因因子、风险主体状态、风险管理效应三者间的动态变化和作用机理,构建了地铁隧道施工坍塌风险耦合体系并进行了权重分析和计算。李钊[17]通过已有隧道塌方实例的原因进行统计分析,并进一步应用范例推理评估浏阳河隧道某地段的塌方风险,范例推理法的流程如图 1 所示。胡法涛[18]对隧道塌方事故的过程进行综合考虑,通过构建塌方事故树图(图 2),寻找造成塌方事故的主要因素。这些方法对隧道塌方影响因素的研究对控制隧道塌方具有重要意

义,但仍存在一些不足,如事故致因识别主观性较强,同时缺乏对塌方影响因素的敏感性层次分析。

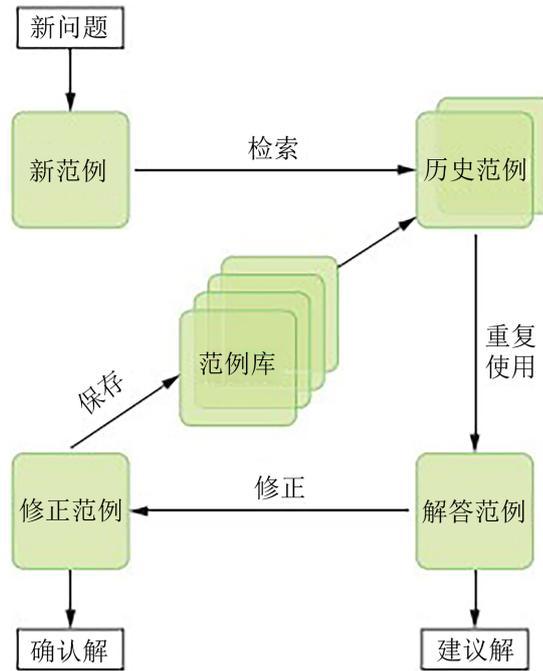


Figure 1. Case reasoning flow chart [19]  
图 1. 范例推理流程图[19]

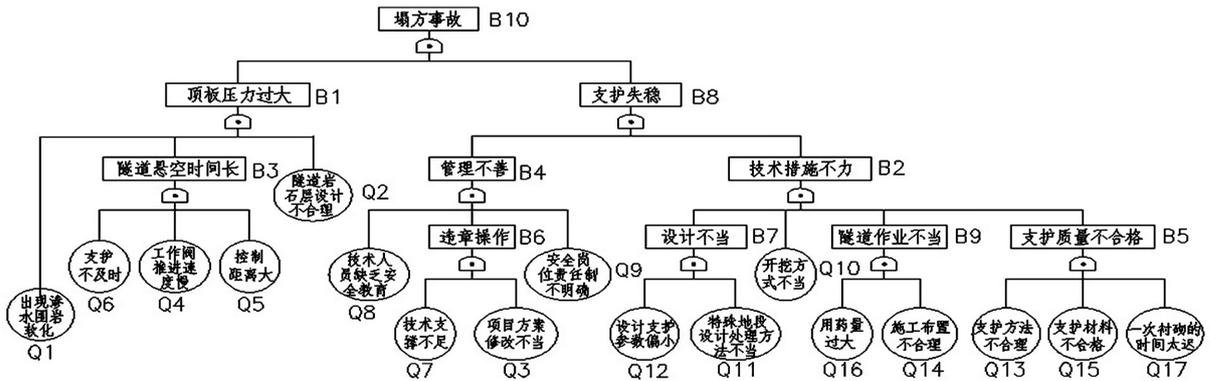


Figure 2. Map of tunnel collapse accidents [18]  
图 2. 隧道塌方事故树图[18]

## 2.2. 塌方的类型

塌方类型的划分依据多种,一般根据塌方诱因、形式、规模、机理、塌方部位等要素对塌方类型进行划分[20]-[22]。从塌方规模上看[23],隧道塌方可分为小塌方(塌方高度 < 3 m,塌方体积 < 30 m<sup>3</sup>)、中塌方(塌方高度 3~6 m,塌方体积 30~100 m<sup>3</sup>)和大塌方(塌方高度 > 6 m,塌方体积 > 100 m<sup>3</sup>)。根据塌方形态,郑玉欣[10]将塌方归纳为拱形塌方、局部塌方、大变形隧道塌方、异形塌方和膨胀塌方等。汪成兵[12]将其分为局部塌方、拱形塌方、塌穿型塌方 3 类。何晓东[11]通过对 70 座隧道塌方案例进行分析,提出软岩塌方主要形式有拱形塌方、塌穿型塌方和 V 型塌方,占比分别为 44%、36%和 20%。根据塌方部位,邓朝辉等[24]将 TBM 施工隧道围岩塌方分为刀盘前方塌方、顶护盾上方塌方、刀盘两侧护盾外部

塌方、护盾后方顶拱塌方、撑靴位置塌方。向龙等[25]将隧道塌方类型分为洞口浅埋塌方、洞身脆性破碎围岩塌方、洞身软弱围岩塌方及洞身断层富水塌方 4 类。王毅才[26]根据塌方形态将隧道塌方分为局部塌方、拱形塌方、异形塌方、膨胀岩塌方和岩爆 5 类, 并进一步根据塌方部位将其划分为拱形塌方、掌子面塌方及侧壁塌方 3 类。此外, 高浩雄[27]根据塌方的控制要素, 将塌方类型分为结构面控制塌方、岩体特性控制塌方、混合型塌方 3 类。Health [28]总结了伦敦黏土地层中采用新奥法技术修建的隧道开挖面失稳的 4 种典型模式: 台阶失稳、拱顶塌陷、开挖面整体失稳及开挖面局部失稳, 如图 3 所示。

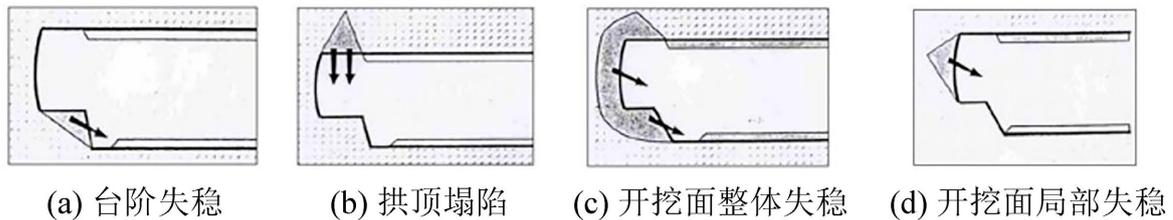


Figure 3. Failure model of clay tunnel excavation in London [28]

图 3. 伦敦黏土隧道开挖面失稳模式[28]

综合目前研究成果, 通过现场调查和统计分析方法可直观获取塌方特征, 并结合多要素可对塌方类型进行划分。然而, 现场调查仅限于对塌方问题表面的认识, 对于深层次的机理研究, 还应结合其他研究手段进行深入分析。

### 3. 隧道围岩塌方灾变机理研究现状

隧道开挖后, 由于应力集中打破了围岩的初始应力平衡状态, 引起围岩应力重分布, 导致围岩产生变形和松弛。当围岩或支护条件薄弱时, 容易产生局部破坏, 且随着应力状态的进一步调整, 可能会造成局部破坏的扩大, 从而造成围岩突然性坍塌、崩塌、堆塌。目前, 针对隧道围岩塌方灾变机理的研究主要有模型试验、数值模拟和理论研究三种手段, 通过掌握隧道塌方机理和演化规律, 制定科学有效的控制对策, 对改善隧道工程安全现状具有重要的理论和现实意义。

#### 3.1. 模型试验

模型试验的理论基础为相似理论, 其可以比较全面地、真实地模拟复杂地层和隧道结构形式, 在力学机理尚不明朗的情况下避开“描述机理”的尴尬[29], 直接根据相似理论所确定的相似判据, 制作物理模型和研制相似材料, 并将测试结果按照相似判据反推到原型, 从而揭示其致灾机制。目前研究隧道围岩稳定性的模型试验主要可以分为离心模型试验和物理模型试验两类。离心模型试验可以实现对隧道围岩塌落过程和形态的模拟, 但很难对隧道开挖过程和开挖方法进行模拟, 且试验成本较高。相比而言, 物理模型试验具备独特的优势, 其能够对比分析不同工况塌方结果, 试验成本相对较低, 同时试验具有很强的重复性。鉴于此, 近年来物理模型试验已然发展成为探究隧道围岩塌方灾变机理的有力手段。徐海岩等[30]通过开展第四系土砂互层隧道塌方的相似模型试验(图 4), 并结合数字图像处理技术, 发现围岩塌方呈渐进性破坏, 拱顶上方围岩破坏表现为“层内围岩剪切破坏, 层间围岩离层弯曲破坏”的塌方特征。同时, 砂土比越大, 塌方破坏越显著。朱合华等[31]以软弱破碎围岩隧道为研究对象构建物理模型, 探究不同埋深下围岩的应力场特征, 研究发现在埋深一定范围内, 围岩破坏区的范围与埋深呈正相关, 且破坏区的高度与埋深近似呈线性关系。李英杰等[32]对大断面、软弱破碎、深埋隧道围岩开展模型试验, 探究其渐进性破坏特征, 研究发现深埋隧道围岩受力分区特征主要为松动区 - 压力拱 - 原岩应力状态。张成平等[33]通过对均质软弱围岩深埋隧道和浅埋隧道开展模型试验, 分别研究其塌方特征和演化规律,

发现两种埋深条件下的塌方均呈现出围岩破坏的渐进性和隧道塌方的突发性等特征，且塌落拱的形状均表现出典型的二次抛物线特征。李奥等[34]基于上限变分法建立深埋隧道拱顶塌方模型，推导出隧道拱顶塌方范围预测曲线，并与模型试验结果进行对比，研究成果揭示了预控制、过程控制两类措施下拱顶塌方控制机理和承载特性。汪成兵等[35]通过开展室内模型试验探究公路隧道围岩在不同埋深条件全断面开挖时的围岩破坏情况，发现隧道埋深影响围岩破坏形式，埋深越小，隧道越易发生塌穿型塌方。

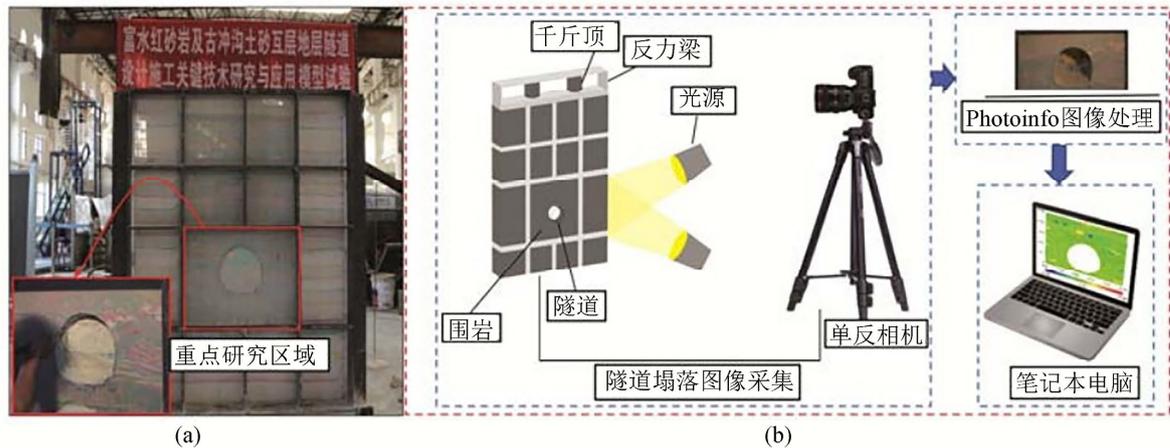


Figure 4. Design of model test system [30]  
图 4. 模型试验系统设计图[30]

综合目前研究现状，可以发现隧道塌方物理模型试验方面的研究主要集中在四个方面：(1) 不同围岩条件与不同工法对隧道围岩的影响；(2) 围岩特性及加固的模型试验；(3) 构造应力与地质构造对围岩稳定性的影响；(4) 隧道围岩的破坏试验。其中，隧道整体破坏试验对于揭示塌方机理具有重要作用。尽管相似材料模型试验为研究隧道围岩塌方机制做出了重大贡献，但该方法仍存在一些不可避免的缺点，如存在边界效应等。

### 3.2. 数值模拟

岩体是一种复杂的地球介质，模型试验方法只能解决部分工况下的隧道稳定性问题，而数值模拟方法能够考虑其各向异性、边界条件复杂性、不连续性及随时间变化特性，因此被广泛地应用于岩体工程分析的各个方面[36]。随着计算机技术的发展，有限单元法(FEM)和有限差分法(FDM)逐渐被应用于隧道塌方问题分析中。李文韬等[37]通过 MIDAS/GTS 有限元软件对某小净距山岭隧道浅埋偏压段塌方进行数值分析，发现隧道围岩性质较差、超挖及不合理的施工工法是造成该隧道冒顶塌方事故的主要原因。付廷波[38]利用 FLAC3D 分析了不同开挖进尺条件下的台阶法施工所产生的塑性区和主应力场分布，阐释了隧道开挖面的塌方机理——主应力差决定了岩体是否破坏，主应力差越大，围岩破碎程度越高。毕志刚[39]通过采用 MIDAS/GTS 有限元软件对浅埋偏压大断面隧道洞口进行建模，分析强降雨情况下隧道开挖洞口处塌方的机理，结果表明在强降水情况下，围岩更容易软化导致围岩失去稳定性，从而会导致洞口处出现滑坡和塌方现象。罗治国等[40]通过 MIDAS/GTS 有限元软件探究了富水软弱围岩隧道的塌方机理，通过塑性区分布发现塌方主要是开挖产生的应力重分布、地下水流动以及人为爆破扰动的一系列作用下所致，数值模拟结果与现场塌方表现一致，如图 5 所示。

在采用有限单元法与有限差分法两种方法进行数值模拟时，二者均难以模拟不连续介质，如节理岩体、破碎带围岩，导致模拟结果与实际情况区别较大，同时也难以观察到破碎围岩坍塌后的状态以及塌

方体积。因此,离散单元法(DEM)被逐渐发展起来,该方法中,块状单元运动可以相互接触也可以相互分离,其受结构面等不连续面的控制。杨忠民等[41]利用 3DEC 离散元软件对节理岩体隧道开挖后围岩应力变形状态进行研究,发现法向刚度较小时造成的塌方范围更大。刘春原等[42]利用 3DEC 离散元软件对岳家沟隧道开挖进行数值模拟,分析隧道塌方的机理,通过分析位移发现在穿越软弱破碎带围岩时隧道沉降变形量较大,且支护强度不够,从而导致坍塌。黄锋等[43]利用 PEC2D 离散元软件建立二维分析模型探究断层破碎带对隧道围岩稳定性的影响规律,研究发现当断层距离隧道轮廓面 0.3 倍洞径范围内时,隧道围岩变形受断层影响最为显著。

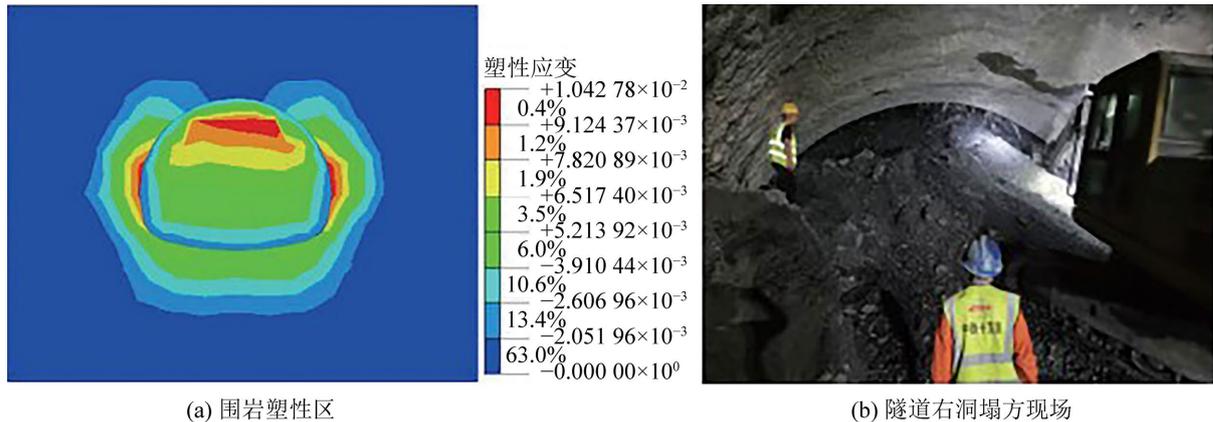


Figure 5. Numerical simulation and field comparison [40]

图 5. 数值模拟与现场对比[40]

数值模拟的使用为研究隧道塌方机理提供了极大的便利,但目前对于塌方的数值分析更多基于宏观角度,对于塌方的微观研究相对较少。同时,在数值分析时,为了方便建模计算,很多学者对于地层地质以及隧道开挖进行了很大的简化,这使得与实际工程有较大不符。

### 3.3. 理论研究

国内外对隧道围岩塌方的理论研究从古典土压力理论和散体压力理论开始,但该理论具有很大的盲目性和不确定性。随着不断研究,逐步发展了许多理论和模型,如普氏理论、损伤力学等。谢和平等[44]采用损伤演化方程对损伤变量及其损伤能量释放率的变化规律进行描述。李术才[45]利用损伤演化方程和损伤力学方法评判围岩体的稳定性和变形特征。此外,结合模型试验和数值模拟手段构建隧道塌方破坏模型,逐步发展了刚性体上限法和上线变分法两种可用于研究隧道塌方机理的理论[29]。Fraldi 等[46][47]通过结合上限法和变分法,将塌方曲线求解问题转化为泛函极值问题,通过欧拉方程获得满足边界条件下的定解问题,系统分析了围岩参数、隧道尺寸等对隧道拱顶塌方的影响规律。基于不断丰富的研究成果,国内外学者针对复杂地层条件下隧道塌方机理进行了深入研究,如穿越不良地质地段断层破碎带引发的塌方[48]、软弱围岩段隧道施工塌方[49][50]、半硬半软岩隧道塌方[51]、复杂层状岩层隧道塌方[52]、浅埋山岭隧道软岩塌方[53][54]。

## 4. 结论与展望

本文通过系统梳理隧道围岩塌方的主要诱因、塌方类型和灾变机理的研究进展,得出以下主要结论:

(1) 隧道塌方诱因众多,主要包括不良地质体、地下水、施工设计不当等因素,且各因素之间存在复杂的相互作用关系。

(2) 隧道塌方类型多样, 可根据塌方规模、形态、部位等进行划分, 不同类型的塌方具有不同的特征和机理。

(3) 模型试验、数值模拟和理论研究是目前研究隧道围岩塌方灾变机理的主要手段, 各有优缺点, 需要综合运用多种方法进行研究。

隧道围岩塌方是一个复杂的系统工程问题, 未来的研究应加强多学科深度融合, 例如, 发展地球物理-岩土工程协同分析方法, 并开发多源信息融合的综合探测技术, 更全面地分析隧道塌方的地质力学机理。同时, 应更加重视复杂地层条件下隧道塌方的多因素致灾机理, 如探究考虑岩体节理、裂隙、断层与地下水多因素耦合作用的灾变机理。此外, 随着科技的不断进步, 智能化监测技术在隧道工程中的应用将越来越广泛, 未来的研究应注重开发和应用智能化监测系统, 实时监测隧道围岩的应力、变形、位移等参数, 通过大数据分析和人工智能算法, 实现对隧道塌方的预警和风险评估, 例如通过融合高级算法和人工智能技术优化数据处理, 并引入更多自动化元素提高隧道施工智能化监测水平。

## 基金项目

中铁十六局集团有限公司科技计划项目(K2023-6B), 中国铁路上海局集团有限公司科研项目(2024141, 2024140)。

## 参考文献

- [1] 交通运输部. 2022年交通运输行业发展统计公报[N]. 中国交通报, 2023-06-16(02).
- [2] 赵勇, 田四明, 孙毅. 中国高速铁路隧道的发展及规划[J]. 隧道建设, 2017, 37(1): 11-17.
- [3] 于洪泽. 隧道施工中塌方监测技术[J]. 公路, 2002(9): 157-160.
- [4] 张可能, 胡达, 何杰, 等. 基于 Kriging 时空统一模型的隧道动态施工位移预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(12): 3328-3334.
- [5] Chen, C. and Huang, S. (2013) The Necessary and Sufficient Condition for GM(1,1) Grey Prediction Model. *Applied Mathematics and Computation*, **219**, 6152-6162. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2012.12.015>
- [6] 安哲立, 王彦平, 马伟斌, 等. 基于激光雷达的施工隧道安全监测技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(12): 2393.
- [7] Hase, R., Mihara, Y., Awaji, D., Hojo, R. and Shimizu, S. (2024) Development and Applicability Assessment of a Tunnel Face Monitoring System against Tunnel Face Collapse. In: *International Symposium on Construction Resources for Environmentally Sustainable Technologies*, Springer, 23-33. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-9219-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-99-9219-5_3)
- [8] Li, X., Jia, C., Zhu, X., Zhao, H. and Gao, J. (2023) Investigation on the Deformation Mechanism of the Full-Section Tunnel Excavation in the Complex Geological Environment Based on the PSO-BP Neural Network. *Environmental Earth Sciences*, **82**, Article No. 326. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10963-7>
- [9] Fei, J., Wu, Z., Sun, X., Su, D. and Bao, X. (2020) Research on Tunnel Engineering Monitoring Technology Based on BPNN Neural Network and MARS Machine Learning Regression Algorithm. *Neural Computing and Applications*, **33**, 239-255. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-04988-3>
- [10] 郑玉欣. 隧道施工塌方机理分析及处治技术[J]. 铁道工程学报, 1999(2): 69-72.
- [11] 何晓东. 软岩隧道围岩稳定性与塌方处置措施分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2009.
- [12] 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(3): 450-456.
- [13] 曾云峰. 基于钻爆法施工的山岭隧道塌方发生的原因及处理措施-以永靖隧道为例[J]. 工程技术研究, 2022, 7(13): 78-80.
- [14] Shin, J.H., Lee, I.K., Lee, Y.H. and Shin, H.S. (2006) Lessons from Serial Tunnel Collapses during Construction of the Seoul Subway Line 5. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **21**, 296-297. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.154>
- [15] 安亚雄, 郑君长, 张翹. 软岩隧道塌方事故致灾因素耦合分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(1): 122-128.
- [16] 文艳芳, 陈敬配. 地铁隧道施工坍塌风险耦合机理研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(3): 943-952.

- [17] 李钊. 隧道塌方突发事件风险原因统计及范例推理[J]. 铁道科学与工程学报, 2009, 6(4): 54-58.
- [18] 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.
- [19] 李亮亮, 吴张中, 费雪松, 等. 基于范例推理的管道地质灾害防护决策方法[J]. 油气储运, 2022, 41(3): 272-280.
- [20] 关宝树. 隧道工程设计要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [21] 周建民, 金丰年, 王斌, 等. 洞室交叉部位塌方的处理技术[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(2): 278-282.
- [22] 高玮, 杨明成, 郑颖人. 隧道围岩破坏模式的进化神经网络识别[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 691-694.
- [23] GB/T 50218-2014 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [24] 邓朝辉, 姚捷, 方星桦, 等. 敞开式 TBM 施工隧道围岩塌方研究进展[J]. 人民黄河, 2021, 43(S1): 247-250+254.
- [25] 向龙, 王俊, 唐锐, 等. 隧道塌方分类及施工处治技术[C]//《施工技术》杂志社, 亚太建设科技信息研究院有限公司. 2020 年全国土木工程施工技术交流会论文集(上册). 北京: 《施工技术》杂志社, 2020: 5.
- [26] 王毅才. 隧道工程[M]. 北京: 人民交通出版社. 2000.
- [27] 高浩雄. 公路隧道塌方成因分析和处治措施研究[J]. 交通世界, 2021(16): 90-92.
- [28] Health and Safety Executive (1996) Safety of New Austrian Tunnelling Method (NATM) Tunnels: A Review of Sprayed Concrete Lined Tunnels with Particular Reference to London Clay.
- [29] 李奥. 大断面隧道塌方机理与安全性控制研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [30] 徐海岩, 王志杰, 陈昌健, 等. 土砂互层隧道塌方及演变规律的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(6): 1050-1058.
- [31] 朱合华, 黄锋, 徐前卫. 变埋深下软弱破碎隧道围岩渐进性破坏试验与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1113-1122.
- [32] 李英杰, 张顶立, 宋义敏, 等. 软弱破碎深埋隧道围岩渐进性破坏试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1138-1147.
- [33] 张成平, 韩凯航, 张顶立, 等. 城市软弱围岩隧道塌方特征及演化规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2433-2442.
- [34] 李奥, 张顶立, 黄俊, 等. 软弱破碎围岩深埋隧道拱顶渐进性塌方机理及控制[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(6): 85-96.
- [35] 汪成兵, 朱合华. 埋深对软弱隧道围岩破坏影响机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2442-2448.
- [36] 刘军, 李仲奎, 萧岩. 非连续变形分析方法及其在地下工程中的应用[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- [37] 李文韬, 张拥军, 刘思佳, 等. 山岭隧道浅埋偏压段塌方冒顶分析及工法优化[J]. 公路, 2020, 65(1): 309-314.
- [38] 付廷波. 山岭隧道过破碎岩层开挖面塌方机制与位置预测研究[J]. 铁道建筑技术, 2020(12): 81-85+90.
- [39] 毕志刚. 闽南山区浅埋偏压大断面隧道洞口塌方机理与处治措施[J]. 中原工学院学报, 2022, 33(3): 33-40.
- [40] 罗治国, 张智健, 李勇森, 等. 富水软弱围岩隧道塌方机理及治理措施[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2021, 42(2): 59-64+7-8.
- [41] 杨忠民, 张玉芳, 李健, 等. 软弱围岩节理性质对隧道塌方范围影响研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(12): 143-149.
- [42] 刘春原, 徐良玉. 岳家沟隧道塌方机制与数值模拟[J]. 河北工业大学学报, 2019, 48(1): 73-78.
- [43] 黄锋, 董广法, 李天勇, 等. 断层破碎带隧道围岩稳定性的离散元模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(18): 7429-7440.
- [44] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(21): 3565-3570.
- [45] 李术才, 李树忱, 朱维申, 等. 三峡右岸地下电站厂房围岩稳定性断裂损伤分析[J]. 岩土力学, 2000(3): 193-197.
- [46] Fraldi, M. and Guarracino, F. (2011) Evaluation of Impending Collapse in Circular Tunnels by Analytical and Numerical Approaches. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **26**, 507-516. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.03.003>
- [47] Fraldi, M. and Guarracino, F. (2009) Limit Analysis of Collapse Mechanisms in Cavities and Tunnels According to the Hoek-Brown Failure Criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **46**, 665-673. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.09.014>
- [48] 邓杨健, 李乐友. 公路特殊地质隧道塌方原因分析及处治措施[J]. 西部交通科技, 2021(8): 147-149.

- 
- [49] 高东鹏. 铁路隧道软弱围岩段施工塌方的处治技术[J]. 中国新技术新产品, 2022(6): 103-105.
- [50] 刘洋. 软岩隧道塌方处理技术[J]. 交通世界, 2022(17): 49-52.
- [51] 喻军, 刘松玉, 童立元. 半硬半软岩隧道塌方的力学特性及处理方法分析[J]. 工程地质学报, 2009, 17(2): 263-267.
- [52] 陈秋南, 赵明华, 周国华, 等. 复杂层状岩层隧道塌方原因分析与加固后信息化施工技术[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 650-653.
- [53] 陈文龙. 浅埋山岭隧道软岩段塌方原因分析及处理技术[J]. 四川水泥, 2021(10): 335-336.
- [54] 张晓今, 钟毫忠, 张超. 浅埋山岭隧道软岩段塌方原因分析及处理技术[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(2): 201-207.