

隧道洞口危岩体高精度监测技术研究分析

赵亚伟

陕西高速公路工程试验检测有限公司 陕西 西安 710086

摘要：隧道洞口危岩体的稳定性直接威胁道路行车安全。本文分析了危岩体的形成机理、分类及隧道洞口危岩体对道路行车安全的影响，且系统分析了现有监测技术的特点与局限性，探讨了多源数据融合、实时性优化及环境适应性等关键技术问题，并提出智能化、协同化及低成本化的发展方向。通过技术融合创新，可为隧道洞口危岩体高精度监测预警机制建立提供理论支撑与实践参考。

关键词：隧道洞口；危岩体；高精度监测技术；技术融合创新

引言：随着我国公路事业的快速发展，隧道的数量也在不断增加，截至2023年，我国公路隧道总数已超过2.4万座，总长度超过2500万延米，而隧道洞口常因地质构造复杂、风化作用及施工扰动等因素形成危岩体，其失稳可能引发崩塌、滑坡等灾害，直接关系到隧道的安全运营，威胁人员与设备安全^[1]。传统监测手段存在精度不足、效率低下等问题，难以满足复杂环境下的动态监测需求。近年来，随着测绘技术、传感器技术及人工智能的快速发展，高精度监测技术逐渐成为研究热点。本文旨在梳理现有技术体系，分析其应用瓶颈，并提出未来发展的优化路径。

1 危岩体的形成机理、分类

1.1 危岩体的定义与特征

危岩体，是指那些虽然尚未发生崩塌，但已具备崩塌的主要条件，并出现崩塌前兆现象的岩体。这些岩体在地质结构、岩石性质、外部环境等多种因素的共同作用下，处于不稳定状态，随时有崩塌的可能。危岩体的主要特征包括：结构不完整、裂隙发育、风化作用明显，以及存在明显的崩塌前兆，如岩体蠕变、裂缝扩展等。

1.2 危岩体的形成机理

危岩体的形成是一个复杂的地质过程，涉及多种因素的共同作用。（1）地质构造作用：地质构造活动是危岩体形成的重要原因之一。在漫长的地质历史中，地壳运动、断裂、褶皱等地质构造活动，使得岩石结构遭到破坏，形成大量的裂隙和断层。这些裂隙和断层为外部因素（如风化、水侵蚀等）的侵入提供了通道，加速了岩石的破坏过程。（2）气候条件影响：气候条件对危岩体的形成也有着显著的影响。长期的降雨、干旱、冻融等气候作用，会导致岩石的风化、剥蚀和强度降低。特别是在陡峭的边坡上，降雨会导致岩石中的水分增加，产生膨胀压力，加速岩石的破坏和崩塌。（3）人类活

动干扰：人类活动也是危岩体形成的一个重要因素。在山区进行道路、隧道等工程建设时，爆破、开挖等施工活动会对岩石结构造成破坏，产生新的裂隙和断层。同时，不合理的土地利用、植被破坏等也会降低岩石的稳定性，增加崩塌的风险^[2]。

1.3 危岩体的分类

危岩体可以根据其形成条件、形态特征以及危害程度等进行分类。（1）陡坡危岩：主要发育在陡峭的边坡上，由于重力作用，岩石易于沿裂隙发生崩塌。（2）陡坎危岩：通常位于河谷或沟谷的岸坡上，由于河水的侵蚀和冲刷作用，形成陡峭的坎壁，易发生崩塌。（3）斜坡活石堆：由大小不一的岩石块组成，堆积在斜坡上，易发生滚动和崩塌。（4）顺倾危岩：岩石沿某一倾向发生明显位移和倾斜，稳定性极差，易于发生崩塌。（5）坡面孤石群：在斜坡上独立存在的岩石块群，由于周围缺乏支撑，易于发生崩塌。

2 隧道洞口危岩体对道路行车安全的影响分析

2.1 直接威胁

（1）崩塌或落石

危岩体在重力、风化或地震作用下可能发生崩塌，落石直接砸中行驶中的车辆，造成车毁人亡。具有突发性强，难以预测，破坏力大等特点。某山区高速公路隧道洞口上方存在一处危岩体，因长期风化和降雨侵蚀，岩体逐渐松动。某日夜间，危岩体突然崩塌，大量石块滚落至路面，导致多辆车辆受损，交通中断，多辆车辆被砸中，造成人员伤亡和财产损失，道路封闭长达48小时，导致交通拥堵，物流运输受阻。某旅游公路沿线存在多处危岩体，因冻融作用，岩体节理发育，发生小规模落石，砸中一辆旅游大巴，造成乘客受伤。这两个事故发生的根本原因在于未及时对危岩体进行加固和监测，缺乏预警机制。

（2）滑坡或泥石流

危岩体失稳后可能引发滑坡或泥石流，掩埋道路，阻断交通。具有规模较大时，可能造成长时间交通中断等特点。某山区国道隧道洞口边坡存在危岩体，因连续强降雨，岩体失稳发生滑坡，大量土石掩埋道路，导致交通中断。

2.2 间接影响

（1）交通中断

危岩体崩塌或滑坡可能导致道路被掩埋或损坏，交通被迫中断，影响车辆通行，修复时间长，经济损失大。2018年陕西省某高速公路隧道洞口仰坡发生危岩体崩塌，大块落石冲击洞口附近桥面，造成桥面凹陷，且落石造成严重交通拥堵。2021年10月18日下午18时50分，G247景泰线K1764+160处（撒渔沱二号隧道）发生山体崩塌，造成道路双向阻断，盐津公路分局共投入挖掘机12台班、装载机12台班、运输车辆30台班、人员90人次，交警部门出动30人次、路政部门出动14人次参与保通，并劝返分流受阻车辆10000余辆。

（2）驾驶员心理压力

危岩体的存在可能使驾驶员产生紧张情绪，尤其是在夜间或恶劣天气条件下，增加驾驶失误的风险。隧道洞口落石对驾驶员心理压力的来源如下：

1）突发性与不可预测性

落石通常具有突发性，驾驶员难以提前预判，这种不确定性会引发紧张和焦虑情绪。

心理表现：驾驶员在通过隧道洞口时可能产生“未知恐惧”，担心落石突然发生。

2）视觉冲击与威胁感知

隧道洞口附近的危岩体或落石痕迹（如散落的石块）会给驾驶员带来强烈的视觉冲击，增强其对危险的感知。

心理表现：驾驶员可能会产生“危险预期”，在通过隧道时保持高度警惕，导致精神疲劳。

3）过往事故的心理阴影

如果驾驶员曾经经历过或听说过隧道洞口落石事故，可能会形成心理阴影，导致对类似路段产生恐惧。

心理表现：驾驶员可能会刻意减速、频繁观察周围环境，甚至选择绕行。

4）环境因素的叠加影响

夜间、雨雪天气或能见度较低时，隧道洞口的环境会显得更加危险，加剧驾驶员的不安情绪，增加驾驶失误的风险。

（3）次生灾害

隧道洞口落石堆积在隧道洞口或附近路面上，可能堵塞排水沟、涵洞或雨水井，导致排水系统失效。雨水无法及时排出，在路面形成积水，积水淹没路面，降低车辆通行能力，增加打滑和失控的风险。积水可能渗入隧道内部，影响隧道结构和设备运行。

3 现有高精度监测技术方法

隧道洞口危岩体严重威胁道路行车安全，危岩体崩塌前若没有有效的监测预警机制，将可能造成严重的安全事故。现有高精度监测技术涵盖传统大地测量、传感器网络、遥感与三维扫描等多类方法，各技术手段在精度、适用场景及成本效益上存在显著差异。本节从技术原理、工程适用性及典型案例三方面，系统阐述现有技术核心特征。

3.1 传统大地测量法

传统检测方法主要通过全站仪、GNSS（全球导航卫星系统）和水准仪等设备，基于三角测量或卫星定位原理，获取危岩体表面位移的绝对坐标数据^[3]。其中全站仪是利用光学测距与角度测量，精度可达 $\pm 0.5\text{mm}$ （短距离），需通视条件支持；GNSS是接收多卫星信号解算三维坐标，静态测量精度为 $\pm 2\text{mm}$ （水平）、 $\pm 5\text{mm}$ （垂直），但受地形遮挡和电离层干扰；水准仪是通过高差测量反映垂直位移，精度达 $\pm 0.3\text{mm/km}$ ，适用于沉降监测。

传统监测方法具有技术成熟，数据可靠性高，适用于大范围粗位移监测等优点，但是具有更多的局限性，主要表现为人工依赖性强，难以连续监测；GNSS信号易受干扰，全站仪需通视条件。

3.2 传感器监测技术

传感器监测手段主要采用倾角传感器、裂缝计、微震监测系统以及分布式光纤传感等。倾角传感器是基于MEMS（微机电系统）或电解液原理，测量岩体倾斜角度变化，分辨率达 0.001° 。裂缝计是采用振弦式或光纤光栅原理，监测裂缝宽度变化，精度 $\pm 0.01\text{mm}$ 。微震监测系统是通过布置加速度计阵列，捕捉岩体破裂产生的弹性波信号，定位破裂源位置。分布式光纤传感（BOTDR/DAS）是基于布里渊散射光频移效应，实现长距离应变与温度同步监测，空间分辨率 1m 。传感器具有高灵敏度（微米级）、可密集布设，适应复杂地形等优势，但传感器易受温湿度漂移影响（如振弦式裂缝计温度补偿误差 $\pm 0.1\text{mm}/10^\circ\text{C}$ ），另外，光纤布设成本高（约200元/米）。

3.3 遥感与三维扫描技术

遥感与三维扫描技术主要包括InSAR（合成孔径雷达干涉测量）、三维激光扫描（LiDAR）^[4]、无人机多光谱

遥感等。InSAR（合成孔径雷达干涉测量）是利用卫星或无人机雷达影像相位差反演地表形变，精度 $\pm 3\text{mm}$ （星载）、 $\pm 1\text{mm}$ （无人机载），Sentinel-1卫星数据时间分辨率6天，适用于长期缓慢变形监测。三维激光扫描是通过发射激光脉冲获取高密度点云（密度 $> 100\text{点}/\text{m}^2$ ），构建危岩体表面三维模型，位移检测精度 $\pm 1\text{mm}$ 。无人机多光谱遥感是搭载热红外与可见光相机，结合深度学习算法（如U-Net）自动识别裂缝与渗水区域。遥感与三维扫描技术具有非接触式测量，空间分辨率高（LiDAR点云密度 $> 100\text{点}/\text{m}^2$ ），适合高危区域等优势，但InSAR受植被覆盖影响（相干性 < 0.3 时数据失效）；LiDAR设备成本 > 50 万元，数据处理耗时^{[4][5]}。

4 危岩体监测技术的融合创新方向

4.1 多源数据融合

多源数据融合是提升危岩体监测精度的重要手段。通过将卫星遥感、无人机航拍、地面传感器等多种数据源进行整合，可以实现对大范围区域的全面监测。

（1）卫星遥感与地面监测结合：卫星遥感能够提供大范围的监测数据，而地面传感器则可以提供局部的高精度数据，二者结合可以实现从宏观到微观的全方位监测。

（2）无人机与地面监测结合：无人机能够快速获取高分辨率影像和三维模型，结合地面传感器的实时数据，可以显著提升监测效率。

4.2 智能化监测

智能化监测是危岩体监测技术的重要发展方向。通过引入人工智能（AI）和机器学习技术，可以实现对监测数据的自动分析和异常识别。

（1）AI与机器学习：利用AI算法对监测数据进行分析，自动识别危岩体的变形趋势，并预测其稳定性。

（2）自动化预警系统：通过实时分析监测数据，自动发布预警信息，提升应急响应速度。

4.3 高精度传感器

高精度传感器是危岩体监测的核心设备。近年来，光纤传感技术和微机电系统（MEMS）传感器的应用，显著提升了监测精度。

（1）光纤传感技术：光纤传感器能够监测微小的岩体变形，适用于复杂地质环境。

（2）MEMS传感器：MEMS传感器具有体积小、成本低的特点，适合大规模部署。

4.4 物联网（IoT）技术

物联网技术的应用使得危岩体监测系统更加智能化和高效化。

（1）无线传感器网络：通过无线网络实现监测数据的实时传输，减少布线成本。

（2）云平台与大数据：利用云计算和大数据技术对监测数据进行存储和分析，支持远程监控和决策。

4.5 三维建模与可视化

三维建模技术为危岩体监测提供了直观的可视化工具。

（1）三维激光扫描：通过激光扫描获取危岩体的高精度三维模型，用于变形分析和稳定性评估。

（2）虚拟现实（VR）与增强现实（AR）：利用VR和AR技术进行三维可视化，辅助决策和应急演练。

4.6 实时监测与预警

实时监测与预警系统是危岩体监测的重要组成部分。

（1）实时数据传输：通过4G/5G网络实现监测数据的实时传输，确保预警信息的及时发布。

（2）多级预警机制：根据危岩体的风险等级，发布不同级别的预警信息，提升应急响应效率。

结束语

综上所述，危岩体监测技术的融合创新是提升隧道洞口危岩体预警和防治能力的关键。通过多源数据融合、智能化监测、高精度传感器、物联网技术等手段，可以实现对危岩体的实时、精准监测，提升数据处理的智能化水平，为隧道工程领域的安全管理和应急处置提供更加精准、高效的技术支持。

参考文献

- [1]陈浩,刘维正.铁路隧道洞口高陡危岩稳定性分析及加固防护技术[J].路基工程,2024,(06):226-232..
- [2]郭霜天,张旭,靳小花.崩塌地质灾害的形成机理及防治研究[J].中国金属通报,2023,(12):113-115.
- [3]宋国鹏.GNSS技术在辽宁省普通国省干线公路高边坡监测中的应用研究[J].北方交通,2024,(12):39-41.
- [4]段昭义.数字测绘技术在矿山工程测量中的应用研究[J].中国金属通报,2024,(09):160-162.
- [5]庞宇.基于SBAS-InSAR技术的采矿区地表沉降监测分析[J].经纬天地,2025,(01):6-9.