

市政工程中隧道施工塌方成因及预防研究

文 / 赵方恒 济南城建集团有限公司

王佐雷 济南城建集团有限公司

摘要：市政工程中隧道施工塌方事故的危害性较大，因此需要分析塌方问题的成因，采取合适的预防措施，做到有准备的开展隧道施工，保障整体工程质量和安全性，进一步完善我国的基础设施建设。本文旨在探讨隧道施工塌方的成因，并提出相应的预防措施，以期为市政工程隧道施工提供安全指导。

关键词：市政工程；隧道施工；塌方成因；预防措施

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.12.018

引言

隧道作为城市交通的重要组成部分，其施工质量和安全直接关系到城市的发展和居民的生活质量。然而，在隧道施工过程中，塌方作为一种常见的安全事故，给施工带来了极大的挑战。隧道施工塌方不仅会造成人员伤亡和财产损失，还会影响工程进度和成本，甚至对城市交通和居民生活造成长期影响。因此，深入分析隧道施工塌方的成因，并采取有效的预防措施，对于保障施工安全和工程质量具有重要意义。

一、隧道施工塌方成因

隧道施工塌方不仅会造成人员伤亡和财产损失，还会导致工程延期和成本增加，严重影响市政工程的进度和效益。市政工程隧道施工塌方的成因复杂多样，包括地质构造、地下水、施工工艺、设计缺陷及人为因素等多方面原因。这些因素的相互作用，使得隧道施工塌方的预防成为一项艰巨的任务。

（一）地质因素

在隧道施工过程中，地质因素是导致塌方事故的主要诱因之一。特别是当隧道穿越断层、破碎带、软弱夹层等不良地质条件区域时，围岩的稳定性会显著降低，使得塌方的风险大幅增加。这些不良地质条件往往导致围岩强度不足，难以承受施工过程中的各种荷载和压力，从而引发塌方事故。此外，地下水的影响也不容忽视。在隧道施工中，如果遇到丰富的地下水或大量涌水地段，地下水会渗透到围岩中，降低岩体的强度和稳定性，进一步加剧围岩的失稳现象。这种地下水的渗透作用不仅会导致围岩软化，还会增加塌方的风险^[1]。

（二）设计因素

设计因素在隧道施工中对于预防塌方至关重要，其影响主要体现在勘察报告的准确性和支护衬砌设计的合理性上。若地勘工作不详尽或存在不实之处，将直接导致施工方案制定时缺乏科学依据，进而增加施工过程中的不确定性和风险。此外，支护衬砌作为隧道施工中的关键结构，其设计必须充分考虑围岩的力学特性和施工条件。若支护结构设计不合理，承载力不足，将无法有效支撑围岩，抵御施工过程中的各种荷载和压力，从而极大地增加了塌方的风险。

（三）施工因素

当施工采用的方法未能与隧道所处地质条件相匹配时，可能会导致施工过程中的围岩发生不必要的松动和风化，进而削弱围岩的整体稳定性。此外，支护措施的实施时机和质量同样关键。若支护作业滞后或支护结构的质量未能达到设计要求，将无法及时且有效地为围岩提供必要的支撑，这无疑会加剧塌方的潜在威胁。更为严重的是，爆破作业中的不当操作，如用药量过大，会直接造成围岩的破裂和松动，进一步恶化地质条件，提高塌方的风险。

（四）自然因素

自然环境中，持续不断的降水是一个不容忽视的影响因素，它对隧道施工的安全构成了潜在威胁。当大量地表水因降雨而持续渗入地下时，这些水分会渗透到围岩的裂隙和空隙中，导致围岩的含水量增加，进而引发围岩的物理力学性质发生变化，如强度降低、塑性增强等。这种围岩稳定性的下降会直接增加隧道施工过程中的塌方风险，因为原本稳固的岩石结构在水的侵蚀下变得脆弱，难以承受施工带来的各种压力。因此，持续降水通过影响围岩的稳定性，成为隧道施工中一个需要特别关注和防范的自然因素。

二、隧道施工塌方预防措施

（一）加强地质勘测

地质勘测作为隧道施工前期的核心环节，扮演着至关重要的角色。为了全方位、深入地掌握施工区域的地质特性，必须调动专业地质团队开展详尽的地质勘查作业。这包括但不限于地质勘探的深入实施、地质测绘的精确开展，以及地质分析得细致入微。地质勘探能够揭示隧道穿越地层的岩石类型、地质构造等关键信息；地质测绘则有助于清晰地了解地形地貌、地质构造的空间分布；而地质分析则进一步帮助理解这些地质要素之间的相互关系及其对隧道施工可能产生的影响。通过这一系列的地质勘测工作，能够获取到关于隧道施工区域地质条件的全面而准确的数据，为施工方案的制定奠定坚实的科学基础。此外，在施工过程中，还应持续跟踪地质条件的变化，根据地质勘测结果的最新反馈，灵活调整施工方案，以确保施工活动的安全性和高效性^[2]。

（二）优化设计方案

隧道设计方案是隧道施工活动的基石，其优劣直接关系到施工的安全与效率。在设计阶段，必须全面考虑地质条件、施工条件、环境因素等多个维度，力求制定出既科学合理又切实可行的施工方案。对于地质条件复杂、施工难度大的隧道工程项目，更应高度重视，组织相关领域的专家进行深入论证，以确保设计方案的可行性和安全性。这一过程中，应充分借鉴国内外的先进经验和成功案例，结合项目的实际情况，进行有针对性的优化和改进。同时，在设计过程中，还应积极引入技术创新，充分利用现代科技手段来提高隧道施工的安全性和效率。例如，可以运用先进的计算机辅助设计软件进行三维建模和仿真分析，以更直观地展示隧道施工过程中的各种情况，为施工方案的优化提供有力支持。

（三）合理选择施工方法

在隧道施工的复杂环境中，施工方法的选择直接关系到工程的安全性与效率。因此，必须根据地质条件、隧道断面尺寸、施工工期以及技术可行性等多个维度，审慎而科学地选择施工方法。例如，在面对软弱地层时，应优先考虑采用预加固或超前支护等先进技术手段，以增强隧道的整体稳定性，防止因地层承载力不足而导致的塌方风险。而在坚硬地层中，可以高效利用钻爆法或掘进机法等成熟工艺，以加快施工进度，提高施工效率。值得注意的是，施工方法的选择并非一成不变，而是需要根据施工过程中的实际情况进行灵活调整。应密切关注地质条件的变化，以及施工过程中的各种反馈信息，确保所选施工方法始终能够适应当前施工环境的需求，从而确保隧道施工的安全与顺利进行。

（四）规范爆破作业

钻爆法施工隧道，爆破作业时通常采用光面爆破或预裂爆破等控制爆破技术。光面爆破是在掘进眼爆破后再进行周边眼爆破，其爆破时有两个临空面。而预裂爆破是在掏槽孔爆破前先对隧道周边区域进行爆破，并依靠较小的眼间距将孔与孔之间的岩石完全破碎，其爆破是只在一个临空面的情况下进行的。对于围岩较完整时，光面爆破和预裂爆破均可得到较好的爆破效果。但是对于较破碎的围岩来说，预裂爆破只会使得周边围岩更加破碎，对预防塌方事故时是更加得不偿失的。故面对软弱破碎围岩，一定要规范爆破作业，推荐采用光面爆破作业，不采用预裂爆破^[3]。

（五）加强支护措施

支护措施在隧道施工中扮演着至关重要的角色，它是防止围岩失稳和塌方事故发生的最后一道防线。因此，必须高度重视支护作业的实施，确保支护措施的有效性和可靠性。在选择支护措施时，应充分考虑地质条件、隧道断面尺寸、施工工期以及经济性等多个因素。对于不同类型的地层和断面尺寸，应选择相应的支护方式，如锚杆支护、钢架支护或喷射混凝土支护等。在节理裂隙发育的岩质围岩施工中，可以采用超前锚杆支护的方

式，对围岩加以稳定锚固，以减少未开挖围岩可能出现的预收敛变形现象；并利用锚杆的支护作用，提升拱效应的承载能力，减少在前期开挖过程中因围岩压力过大而引起的塌方现象。当前超前锚杆支护主要分为两种形式（钢支撑超前锚杆和悬吊式超前锚杆），具体如图1和图2所示，在施工开始前，可以采用在施工区域钻孔插入锚杆并固定的方式，使锚杆对掌子面位置的围岩进行锚固。在施工过程中，超前锚杆的应用可以避免围岩土体单元应力超过抗剪强度而出现的包线剪切破坏现象，提升围岩的稳定性。超前锚杆加固形成的拱效应，也可以减少隧道上覆土层产生的压力，并通过有效的应力传导，防止可能出现的剪切破坏现象。



超前锚杆从工字钢顶部穿出



短超前锚杆从工字钢腹部穿出

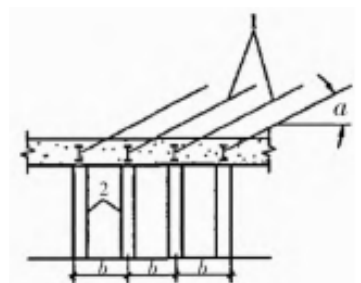


图1 钢支撑超前锚杆示意图

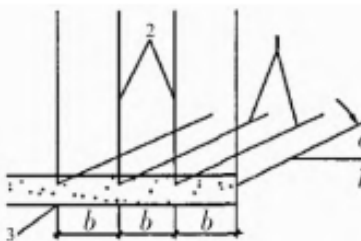
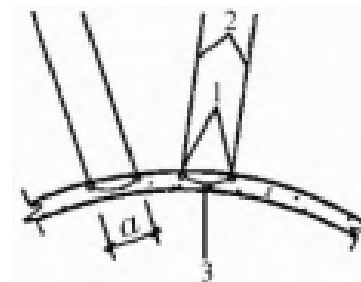


图2 悬吊式超前锚杆示意图

（六）完善防排水系统

水患是隧道施工中一个不可忽视的重大安全隐患，其潜在威胁不容忽视。为了有效防范塌方等安全事故的发生，必须致力于构建一个全面而高效的隧道防排水体系。在隧道施工的各个阶段，都应根据实际的地质条件和水文状况，精心设计并严格执行防排水方案。在隧道开挖初期，就应及时布设排水沟、集水井等关键排水设施，确保地下水能够被迅速、有效地排出隧道，避免积水对隧道结构和施工安全造成不利影响。而在隧道衬砌阶段，更应注重防水性能的提升。通过采用高性能的防水混凝土、铺设防水卷材等措施，可以有效增强隧道的防水屏障，降低水患对隧道安全的影响。此外，还应定期对防排水系统进行维护和检查，确保其始终处于良好的工作状态。通过不断完善和优化防排水体系，可以有效降低隧道塌方等安全事故的风险，为隧道施工的安全顺利进行提供有力保障^[4]。

（七）加强监控量测

监控量测在隧道施工中扮演着至关重要的角色，它是了解隧道施工状态、及时发现并处理安全隐患的重要手段。为了获取准确、可靠的监测数据，应在隧道施工中合理设置监控量测点位，并根据实际情况确定适当的监测频率。这些点位应涵盖隧道的各个关键部位，如拱顶、边墙等，以确保能够全面、准确地掌握隧道的变形情况和支护结构的受力状态。同时，还应建立一套科学、高效的监控量测数据分析和预警机制。通过对监测数据的深入分析，可以及时发现隧道施工中存在的潜在安全隐患，并采取相应的处理措施，防止安全事故的发生。这一机制应具备高度的灵敏性和准确性，以确保能够迅速响应任何异常情况，保障隧道施工的安全进行。

（八）建立应急预案

应急预案在隧道施工中扮演着至关重要的角色，它是面对突发事件时，确保人员安全、减少损失的最后一道坚固防线。不良地质段由于情况复杂，对隧道工程危害很大。其中对隧道工程可能产生或增加塌方事故危害的不良地质通常有：滑坡、崩塌体、岩溶、采空区、大变形、岩爆、断层、富水地段、软弱破碎带、流沙等。在这些地质情况下修建隧道，仅靠常规方案，是难以达到要求的。为了有效应对可能发生的塌方等严重事故，必须致力于构建一个全面、完善且针对性强的应急预案体系。在应急预案的制定过程中，应深入剖析隧道施工的特点和可能面临的各种风险因素，确保应急预案能够紧密贴合实际，具备高度的针对性和实用性。应急预案应详细阐述应急组织机构的构成与职责，明确各级应急指挥人员的职责分工，确保在紧急情况下能够迅速、有序地启动应急响应机制。同时，还应充分考虑应急资源的储备情况，包括救援设备、物资、人员等，确保在事故发生时能够迅速调集所需资源，为救援行动提供有力支持。此外，应急预案还应明确应急响应的具体流程，包括事故报告、初步处置、现场救援、后期恢复等各个环节，确保在紧急情况下能够迅速、准确地采取行动，最大限度地减少损失。为了确保应急预案的有效性，还

应定期组织应急演练和培训活动。通过模拟真实的事故场景，可以检验应急预案的可行性和实用性，发现其中存在的问题和不足，并及时进行修订和完善^[5]。

（九）采取合理的塌方处理措施

如果塌方范围较小，施工单位可以在塌方区域设置支撑，再根据由上到下的顺序将坍塌体清除，在这一阶段注意对围岩情况进行分析，避免出现二次塌方问题。在挖掘过程中要注意设置临时支撑。如果塌方面积较大，需要做好临时支护，确定施工安全之后再清除塌体。如果坍塌体体积比较大，施工单位通过长管棚注浆加固的方式，使坍塌体的稳定性提升。为了避免坍塌体长时间暴露，施工单位应采用混凝土对其封闭。当塌方部位出现了冒顶情况，施工需要及时开展支护措施，避免出现二次塌方的情况。对于贯穿式塌方（冒顶），应先对地表沉降处进行截水，必要时可搭设遮雨棚防止地表水灌入塌方体内造成次生灾害。待洞内处理完毕后，地表可采用土石夯实至高出原地面，等回填土体下沉稳定后，再用浆砌片石铺砌。

（十）完善安全管理体系

在隧道塌方事故的预防过程中，完善的安全管理体系可以确保工程的有序、规范开展。为此，需要结合施工设计方案，建立完善的现场安全管理体系，并结合施工工艺、作业环境、机械设备等具体的条件，实现安全管理的精细化。同时，采取风险管控措施，识别施工过程中可能出现的塌方风险，以减少塌方的发生概率，提升施工的可靠性。例如：对于施工过程中存在的高风险作业区域，可以采取加强监控、增设安全防护设施等措施，并定期对施工现场进行安全检查，评估安全管理措施的执行效果，及时发现并解决存在的问题，实现对施工现场安全的动态管理。

结语

隧道施工塌方事故成因复杂，涉及地质、设计、施工、自然和人为等多个方面。为了预防塌方事故的发生，应加强地质勘测、优化设计方案、合理选择施工方法、加强支护措施、完善防排水系统、加强监控量测以及建立应急预案等措施。通过这些措施的实施，可以有效降低隧道施工塌方风险，保障施工安全和工程质量。在未来的市政工程隧道施工中，应继续深化对塌方成因的研究，不断探索更为有效的预防措施。同时，加强施工人员的安全培训和教育，提高他们的安全意识和操作技能，也是预防隧道施工塌方的重要一环。

参考文献

- [1] 杨达. 公路工程中隧道施工塌方成因分析及预防措施[J]. 设备管理与维修, 2024(10): 174-177.
- [2] 高吓密. 公路隧道施工中不良地质引起的塌方问题及应对措施[J]. 运输经理世界, 2023(25): 122-124.
- [3] 马志镛. 复杂地质条件下隧道施工塌方风险评估[J]. 天津建设科技, 2023, 33(01): 4-6.
- [4] 王琴, 张光亮, 王学彦. 隧道施工塌方原因及处理措施探析[J]. 江西建材, 2022(03): 175-176.
- [5] 刘湘慧, 陈玉斌, 占庆林, 等. 隧道施工塌方安全风险状态判断研究[J]. 工程建设, 2021, 53(08): 1-7.