

城市隧道内衬砌裂缝成因分析与日常巡查维护策略优化探讨

宋宏强

湖北益通建设股份有限公司 湖北 宜昌 443000

【摘要】：城市隧道衬砌裂缝的发生直接影响城市隧道的安全性与使用寿命，常见的成因包括施工质量缺陷、地质条件复杂性以及外部环境变化等。为有效防治衬砌裂缝，需要采用科学的监测技术与数据分析方法，如激光扫描、传感器等，实时监测裂缝变化。通过优化巡查管理制度，采用新型技术修复手段，并进行成本与效益分析，可显著提高维护效率。综合防治措施的设计、经验总结及长效管理机制的构建，将为城市隧道衬砌裂缝防治提供可靠保障，确保城市隧道结构的长期稳定。

【关键词】：城市隧道衬砌；裂缝成因；巡查维护；策略优化；结构安全

DOI:10.12417/2705-0998.26.06.053

引言

城市隧道衬砌裂缝的发生是城市隧道工程中常见且不可忽视的问题，裂缝不仅影响城市隧道的使用功能，还可能对交通安全造成威胁。裂缝成因多样，既包括施工质量问题，也有来自地质环境、使用条件等外部因素的影响。为了有效避免或延缓裂缝的扩展，需要制定科学合理的巡查维护策略，这不仅有助于提升城市隧道的长期稳定性，还能减少维修成本。通过对城市隧道衬砌裂缝成因的深入分析，提出优化的巡查维护方法，将为城市隧道运营提供更为可靠的保障。

1 城市隧道衬砌裂缝的常见成因

1.1 施工质量缺陷

城市隧道衬砌裂缝的发生往往与施工过程中的质量问题密切相关。衬砌混凝土的配比不当，可能导致强度不够，进而无法承受地层压力或外部荷载。施工过程中的养护不及时、施工工艺不规范，也会影响混凝土的耐久性，容易出现裂缝。施工时如果未能严格控制衬砌的浇筑厚度，或者未按照标准操作进行接缝处理，都会导致衬砌结构存在薄弱环节。在城市隧道的施工过程中，若没有严格监控材料质量，使用劣质原材料，亦可能加速衬砌的老化及裂缝的形成。长期的结构受力不均匀也容易导致衬砌材料的开裂。

1.2 地质因素影响

地质条件是影响城市隧道衬砌稳定性的一个重要因素。岩石的硬度、湿度、膨胀性等特性直接影响衬砌的承载能力^[1]。在软弱地质或复杂地层条件下，城市隧道结构会受到不同方向和不同大小的压力作用，这会导致衬砌出现不同程度的裂缝。特别是在岩土层变形较大或地质水文条件较差的情况下，衬砌可能无法有效抵抗地层变动引起的应力集中，出现裂缝。地下水位的变化、渗水等因素，也容易对衬砌的耐久性产生负面影响，水土的侵蚀作用会加剧裂缝的扩展和衬砌结构的劣化。

1.3 运营条件与外部环境

城市隧道在长期使用过程中，由于交通荷载的反复作用，衬砌可能会承受巨大的变形应力，特别是对于高负荷的铁路或

公路城市隧道，车辆的通过频繁、车流密度大，使得衬砌不断受到动态应力的作用。这种应力作用会导致材料疲劳和微裂纹的积累，从而引发较大的裂缝。外部环境的变化，如温度的剧烈波动，也会导致城市隧道衬砌材料的热胀冷缩现象。特别是在极端气候条件下，温差变化会加剧衬砌的开裂。城市隧道周围的交通振动、建筑施工等外部扰动，也可能对城市隧道衬砌造成一定的影响，促使裂缝的产生与扩展。

2 裂缝监测技术与数据分析

2.1 监测手段的选择

裂缝监测是确保城市隧道衬砌结构安全的关键环节。不同类型的裂缝及其发生环境需要采用不同的监测技术。常用的监测手段包括视觉检测、激光扫描、传感器布设以及遥感技术。视觉检测适用于初步观察，通常结合无人机航拍技术进行大范围巡视。激光扫描通过高精度的三维激光测量，能够快速捕捉到微小的裂缝变动，适用于城市隧道内部复杂形态的检测。传感器，如应变片、位移计和光纤传感器，能够实时获取裂缝的动态数据，为裂缝发展提供连续的监控。这些传感器能够在高风险区域进行长期安装，监测数据实时传输，确保了信息的及时性和准确性。通过合理选择监测手段，可以最大限度地发现并预测城市隧道衬砌裂缝的潜在危害。

2.2 数据采集与处理

裂缝监测数据的采集与处理直接关系到后续分析的精度与效果。采集过程中，不同监测设备生成的数据必须进行标准化处理，以便统一分析。实时数据通过传感器上传至监控系统，形成数据集^[2]。对于裂缝宽度、深度、位移等数据，需通过数据采集软件进行过滤和去噪处理，去除环境因素和外部干扰对监测结果的影响。采集的数据不仅要考虑裂缝的当前位置，还要记录裂缝发生的历史数据，这样才能反映裂缝发展的动态过程。数据存储后，可进行多维度分析，使用统计学方法来识别裂缝的变化趋势以及其潜在的风险。处理后的数据为制定后续的维护方案提供可靠依据，帮助实现早期预警与有效干预。

2.3 裂缝发展趋势分析

裂缝发展趋势的分析能够揭示城市隧道衬砌结构的潜在安全风险。分析方法通常包括数据趋势分析、应力分析和有限元分析等。通过对历史监测数据进行时序分析,能够发现裂缝扩展的规律,识别裂缝在不同时间段的变化特征。基于现场数据和地质力学模型,运用有限元分析法可以模拟裂缝在不同加载条件下的扩展情况,评估衬砌的安全性和耐久性。结合城市隧道所处的环境条件,如水文气候变化、交通负荷等,进行多因素的联合分析,能够全面评估裂缝发展的潜在风险。通过这些分析方法,管理人员能够及早预警裂缝的可能扩展区域,并采取相应的加固措施,有效避免突发性结构破坏。

3 现有巡查与维护方法的不足

3.1 巡查周期与频次

现有的城市隧道巡查体系大多依赖于固定周期和频次进行检查,但这一模式无法有效应对衬砌裂缝的快速发展。由于城市隧道环境复杂,裂缝的扩展具有突发性,传统的定期巡查往往无法及时发现新产生或隐蔽的裂缝,导致遗漏问题。过长的巡查间隔可能导致裂缝在初期未能得到及时处理,进一步扩展至严重程度,增加后期维修难度与成本。部分城市隧道巡查频次低,尤其是对于较为偏远或交通较少的城市隧道,巡查人员有限,巡查效果难以保证。传统巡查方法依赖人工检查,存在主观误差和效率低下的问题,且人工巡查只能在一定范围内发现裂缝,无法全面捕捉到所有隐性问题。巡查周期和频次的设置往往未能充分考虑裂缝的实际发展情况。

3.2 维护手段的局限

现有的城市隧道维护手段存在一定局限性,尤其在裂缝发生后,传统的修复方法难以有效解决所有问题。许多城市隧道的维修仍依赖于传统的填充与加固技术,这些手段多适用于较小的裂缝修复,无法应对裂缝快速扩展带来的挑战。当裂缝达到一定程度时,传统的加固方法往往难以恢复城市隧道的原始结构强度^[3]。维护过程中使用的材料和技术手段也常常限制了修复效果,一些材料可能无法与城市隧道衬砌材料充分融合,导致修复后裂缝仍有扩展风险。技术手段的落后或不当使用会造成反复维修,浪费了大量的资源和时间。尽管现有技术不断进步,但部分城市隧道维护仍处于技术更新滞后的状况,未能及时采用新型、长效的修复方法。

3.3 资源投入与管理效率

现行的城市隧道巡查和维护管理模式中,资源投入不均、管理效率低下问题较为突出。许多城市隧道项目在初期建设时缺乏长期维护的充分考虑,后期的维护资金和人员配备往往不能满足实际需求,导致巡查和维护的资金投入不足。特别是在一些运营年限较长的城市隧道,维护预算有限,导致巡查和维护工作的开展受限,无法保证工作的全面性和深度。同时,现

有管理体系中,巡查人员的专业素质参差不齐,管理流程不够优化,信息传递滞后,无法实现实时反馈和快速响应。维护人员往往在发现问题后的反应较为迟缓,且没有形成系统的长效管理机制,导致裂缝问题未能得到及时有效的解决。资源投入不足和管理效率低下直接影响了城市隧道的长期安全运行,增加了后期维护成本。

4 优化巡查与维护策略

4.1 巡查管理制度优化

现有的巡查管理制度亟需进行优化,以适应城市隧道衬砌裂缝的复杂性和不可预测性。通过加强智能化和数字化管理手段,可以更好地提升巡查的效率和精准度。智能巡查系统能够根据实时数据自动分析裂缝的变化趋势,自动生成巡查任务和报告,减少人工操作的偏差和遗漏。同时,结合大数据分析,可以对不同类型城市隧道的巡查需求进行精确预测,优化巡查频次和周期。在巡查任务的分配上,采用分层次、分区域的管理模式,将高风险区域与常规区域区分开来,对重点部位实施更加频繁和详细的巡查。通过建立动态化的巡查数据库,实现多层次、多维度的信息管理,为日常巡查提供全面的依据。优化后的巡查制度不仅能够提高工作效率,还能降低漏检率,确保对裂缝问题的早期发现和及时处理,极大提升城市隧道的整体安全性。

4.2 新型技术在维护中的应用

随着技术的不断发展,新型技术的引入为城市隧道的维护提供了更为高效的手段。在裂缝修复中,现代化的裂缝监测与修复技术,如自愈合材料、3D打印技术、无损检测技术等,逐步得到应用。自愈合材料具有自动修复微裂缝的功能,这为城市隧道的长期运行提供了更加经济和有效的维护方式。3D打印技术能够在现场快速打印修复材料,适应各种复杂的裂缝修复需求,减少了施工时间和成本。无损检测技术则能够在不破坏衬砌结构的前提下,实时监测裂缝的发展情况,并通过数据传输系统实现远程诊断。这些新技术的应用不仅能提高修复效果,还能大幅度降低维护的频率和成本^[4]。借助大数据和人工智能,维护决策可以更加科学化,能够针对不同城市隧道的实际情况制定个性化的维护方案,进一步提高城市隧道运行安全性和经济性。

4.3 成本与效益分析

在优化城市隧道巡查与维护策略的过程中,成本与效益的平衡是至关重要的。虽然引入新技术和优化管理制度需要一定的初期投资,但从长期来看,这些措施能够显著提高城市隧道的使用寿命和运行安全性,减少突发性故障带来的巨额修复费用。通过智能巡查系统的应用,能够大幅度降低人工巡查的成本,同时提升裂缝发现的及时性,避免了由于迟缓反应导致的维修成本激增。新型修复技术,如自愈合材料和3D打印技术,

虽然初期投入较高,但其高效修复和持久效果可以大大降低后续的维护频次和材料费用,从长远来看是节省资金的有效手段。通过全面的效益评估,结合城市隧道的使用年限、技术更新周期和资金回收期,可以科学确定各项优化措施的投入产出比,从而确保巡查与维护工作的持续投入和健康发展。

5 城市隧道衬砌裂缝防治的综合对策

5.1 综合防治措施设计

城市隧道衬砌裂缝防治需要综合考虑多个方面的因素,包括设计、施工、维护和管理等环节。在设计阶段,充分考虑城市隧道所处的地质环境、交通负荷、温湿度变化等因素,合理选用材料并进行结构加固,确保其在长期运行中的稳定性。在施工过程中,严格控制施工质量,确保混凝土的配比与浇筑工艺符合标准,减少因施工缺陷引起的裂缝。衬砌的接缝处理应考虑到应力集中问题,避免不均匀沉降导致裂缝的形成。在日常运营和维护阶段,必须建立常态化的巡查和检测机制,利用现代技术手段如传感器、激光扫描等对衬砌裂缝进行实时监测。对已形成的裂缝应及时采取加固和修复措施,防止裂缝扩展影响整体结构安全。

5.2 案例分析与经验总结

在多个城市隧道项目中,已实施的裂缝防治措施提供了宝贵的经验。以某高风险城市隧道为例,结合周围复杂的地质条件,采用了定期智能巡查与局部加固的策略。通过建立详细的裂缝监控数据平台,实时跟踪裂缝变化,确保能够在裂缝初期发现并进行处理^[5]。经验表明,定期评估城市隧道的应力状态

与结构健康是裂缝防治的关键。在另一个山区城市隧道项目中,结合自愈合材料的应用,在裂缝发生时能够在短时间内恢复衬砌的完整性,从而延长了城市隧道的使用寿命。这些实际案例的总结为进一步改进和优化裂缝防治措施提供了重要依据,证明了综合管理与技术手段的有效结合,显著提高了城市隧道结构的安全性和稳定性。

5.3 长效管理机制的构建

为了确保城市隧道衬砌裂缝防治措施能够长期有效,必须构建长效管理机制。建立一个全面的城市隧道健康监测系统,定期进行结构健康评估,并根据实际情况调整巡查与维护频次,避免遗漏潜在裂缝。制定标准化的应急响应流程,当发现裂缝扩展或新裂缝产生时,能够迅速启动修复程序,避免因反应迟缓导致更大范围的破坏。加强城市隧道管理人员的专业培训,提高其对裂缝发生和扩展的敏感度,并推动技术创新,采用更高效的修复技术和材料,确保城市隧道衬砌的长期稳定性。长效管理机制的建立需要政府、企业和科研机构的共同参与,确保资金投入、技术支持与管理水平的持续提升,以应对不断变化的运营和环境条件,保障城市隧道的安全与畅通。

6 结语

城市隧道衬砌裂缝防治是城市隧道工程维护中的关键问题。通过科学的巡查与维护策略、先进的技术应用和合理的资源管理,可以有效预防和修复裂缝,确保城市隧道的安全与耐久性。未来,随着技术的不断发展,城市隧道衬砌裂缝防治的手段将更加精准与高效,为城市隧道的长期稳定运营提供保障。

参考文献:

- [1] 周昌国.城市隧道衬砌混凝土裂缝成因及施工质量控制方法分析[J].运输经理世界,2025,(27):94-96.
- [2] 余科宏.城市隧道衬砌混凝土裂缝成因及修补技术应用研究[J].交通科技与管理,2025,6(06):131-133.
- [3] 李亚方.城市隧道衬砌裂缝成因及安全分级方法研究[J].工程技术研究,2025,10(03):152-154.
- [4] 段军军.城市隧道衬砌后期裂缝成因及处理施工技术分析[J].运输经理世界,2024,(29):125-127.
- [5] 方坚涛.城市隧道衬砌后期裂缝成因及处理施工技术研究[J].散装水泥,2024,(04):26-28.