

# Study on Durability of Urban Tunnel Structure and Repair Technology

Lilong Yang

Beijing Jiutongqu Testing Technology Co., Ltd., Beijing, 100000, China

## Abstract

Urban tunnels are an important component of urban transportation systems, and their structural durability directly impacts the safety and stability of urban traffic. As the service life increases, tunnel structures face various types of damage, such as cracks, concrete carbonation, and steel reinforcement corrosion, all of which adversely affect the safety and service life of the tunnel. This paper analyzes the common types of damage in urban tunnels and explores their impact on tunnel operational safety. In combination with current technological developments, it proposes technical measures to enhance tunnel durability and looks forward to the future development direction of tunnel structural damage prevention and control.

## Keywords

Urban tunnels; Durability; Damage detection; Repair technology; Intelligent monitoring

## 城市隧道结构耐久性病害与修复技术研究

杨立龙

北京九通衢检测技术股份有限公司, 中国·北京 100000

## 摘要

城市隧道是城市交通系统的重要组成部分,其结构耐久性直接影响到城市交通的安全与稳定。随着使用年限的增加,隧道结构面临着不同类型的病害问题,如裂缝、混凝土碳化、钢筋锈蚀等,这些病害对隧道的安全性和使用寿命产生了不利影响。本文分析了城市隧道常见的病害类型,并探讨了其对隧道运营安全的影响,并结合当前技术发展趋势,提出了提升隧道耐久性的技术措施,并展望了隧道结构病害防控的未来发展方向。

## 关键词

城市隧道; 耐久性; 病害检测; 修复技术; 智能监测

## 1 引言

随着城市化进程的加快,城市隧道成为了交通网络中不可或缺的一部分。隧道作为承载大量交通流量的重要基础设施,其结构的耐久性直接影响着城市交通系统的安全性和通行效率。由于隧道长期暴露在潮湿、腐蚀性强的环境中,容易受到混凝土老化、钢筋锈蚀、外界环境侵蚀等多重因素的影响,导致隧道出现裂缝、渗漏等病害,进而影响隧道的使用寿命和安全性。为此,研究隧道结构的病害成因、检测技术以及修复手段,尤其是采用新技术手段来提升隧道耐久性,已经成为亟待解决的重要课题。本文旨在通过分析隧道结构病害及其检测技术,提出有效的修复与加固措施,探讨未来隧道病害防控技术的发展方向,以期为隧道的安全运营提供理论支持和实践指导。

【作者简介】杨立龙(1984-),男,中国北京人,本科,工程师,从事道路、桥梁、隧道检测工作及研究。

## 2 城市隧道结构耐久性病害概述

### 2.1 隧道结构耐久性概念及其重要性

隧道结构耐久性指的是隧道在预定使用年限内,能够有效承受外部荷载及环境因素影响,并保持其功能和安全性的能力。隧道结构的耐久性直接影响隧道的长期稳定性和使用安全。随着城市化进程加速,城市隧道逐渐成为交通网络的关键组成部分,其耐久性问题逐渐显现,主要表现在混凝土老化、钢筋锈蚀以及外界环境侵蚀等方面。隧道结构耐久性的良好保持不仅有助于延长隧道使用寿命,降低维护成本,还能保障公共安全。因此,提升隧道结构的耐久性、进行有效的病害检测与修复,成为隧道管理中的重要课题<sup>[1]</sup>。

### 2.2 城市隧道常见病害类型

城市隧道的常见病害主要包括裂缝、渗漏、钢筋锈蚀、混凝土碳化等。裂缝是隧道结构中最常见的病害之一,通常是由于荷载、温度变化或不均匀沉降等因素引起。渗漏问题通常伴随裂缝出现,水分渗透会加速混凝土的腐蚀。钢筋锈蚀是隧道病害的又一重要表现,其发生是由于钢筋暴露在潮

湿的环境中,导致氧化生锈,进而降低钢筋的强度与韧性。混凝土碳化则是由于二氧化碳与水反应,使混凝土中的氢氧化钙转变为碳酸钙,从而降低其耐久性。其他病害如道床与衬砌空洞、衬砌破损等也会影响隧道结构的稳固性,必须加以重视和修复。

### 2.3 病害对隧道运营安全的影响

隧道病害直接影响隧道的安全性与运营效率。裂缝和渗漏不仅降低了隧道的承载能力,还可能导致结构的进一步破坏,危及隧道的使用安全。钢筋锈蚀使得混凝土的抗拉强度降低,增加了隧道坍塌或裂缝扩展的风险。混凝土碳化则导致混凝土的保护性降低,使得钢筋更容易受到腐蚀。长期积水和裂缝渗漏不仅会腐蚀隧道内的钢筋,还可能造成其他设备损坏,影响隧道的功能性,增加维护成本。病害的积累将使隧道的正常运营面临更大的安全隐患,因此及早检测与修复对于保障隧道安全至关重要。

## 3 城市隧道病害检测技术分析

### 3.1 外观与裂缝检测技术

外观检测技术是对隧道外部及内部表面状况进行检查,通过目视观察与仪器辅助,识别出裂缝、脱落、侵蚀等病害。外观检测常通过高精度摄影、无人机扫描、红外热成像等技术手段,对隧道表面进行实时监测。裂缝检测主要采用裂缝宽度仪、激光扫描仪、裂缝形变监测仪等设备,结合图像处理技术进行裂缝的定量分析。对于微小裂缝,通常使用激光测距仪或声波检测仪进行监测。裂缝检测的精度可以达到毫米级,通常在每平方米范围内检测裂缝宽度与分布情况。检测结果可为隧道修复与加固提供依据。

### 3.2 混凝土强度与碳化深度检测技术

混凝土强度检测技术主要采用回弹法、超声波法和锤击法等。这些方法可以快速地评估混凝土的抗压强度,并为后续修复提供参考数据。回弹法通过测量回弹仪的回弹值,与混凝土的抗压强度进行相关性分析。超声波法则通过声波的传播速度来反映混凝土内部的密实度与强度。混凝土碳化深度的检测通常通过取芯法或指示剂法进行。通过在混凝土表面涂上指示剂,观察碳化深度的颜色变化,或者通过取芯检测后切割横断面,测量碳化层的深度,通常使用电子显微镜或化学分析法精确测量。碳化深度的测定结果对于评估混凝土耐久性具有重要意义。

### 3.3 钢筋保护层与锈蚀检测技术

钢筋保护层厚度检测主要采用超声波检测技术与电磁检测技术。超声波通过声波在混凝土中的传播速度来测定钢筋的覆盖层厚度,具有非破坏性且高效。电磁检测则是通过测量磁场变化来评估钢筋的数量、位置及其保护层厚度。钢筋锈蚀检测技术一般采用电化学方法,如半电池电位法、极化法以及电流法等。通过对钢筋的电化学腐蚀进行监测,获得钢筋表面腐蚀的电位和电流密度,从而评估锈蚀情况。这

些检测方法可以精准识别锈蚀程度,并为进一步修复提供科学依据。

### 3.4 结构底板与衬砌空洞检测技术

结构底板与衬砌空洞检测主要使用地质雷达(GPR)与超声波检测法。地质雷达通过发射高频电磁波并接收回波信号,能够无损检测混凝土结构内部空洞、裂缝及脱落情况。该技术适用于大范围、非接触的检测,并且能够准确定位空洞的位置及大小<sup>[2]</sup>。超声波检测技术则通过声波的传播速度变化来探测底板和衬砌的缺陷,常用于局部区域的空洞检测。超声波检测可以通过反射波分析,准确评估底板与衬砌的完整性,并提供空洞深度与形态的详细数据,为后续的修复提供指导。

## 4 隧道病害修复技术

### 4.1 常见病害修复技术及措施

隧道病害修复主要针对裂缝、渗漏和钢筋锈蚀等问题。针对裂缝修复,常用的技术包括注浆法和碳纤维加固法。注浆法通过注入特殊材料填补裂缝,能够有效封闭裂缝,防止水分渗透。根据研究,裂缝修复后的强度提升可达到30%以上。对于渗漏问题,防水涂料和聚氨酯树脂注射法是常见的修复手段,涂料和树脂可在短时间内恢复隧道的防水功能,降低渗漏量。钢筋锈蚀的修复则包括更换锈蚀钢筋及其加固。采用碳纤维增强复合材料进行加固,已证明能够提高30%至40%的结构承载力,增强隧道的抗腐蚀能力。修复技术的选用通常依据隧道病害的严重程度、检测结果以及修复预算进行决策。

### 4.2 混凝土修复技术

混凝土修复主要使用环氧树脂注入、喷涂修复和加固法。环氧树脂注入法适用于较小裂缝的修复,能有效提高混凝土的粘结强度和耐久性。喷涂修复法则广泛用于表面损伤较严重的情况,喷涂的厚度可根据损伤程度调节,达到修复混凝土表面强度的目的。加固法则主要通过钢筋网或碳纤维复合材料进行加强,能够提升混凝土的抗拉强度和延展性。在修复过程中,通常通过力学测试验证修复效果,混凝土修复后其抗压强度可以恢复至80%至90%的原始强度。对于重度破损的混凝土,常常结合多种技术进行综合修复,以确保修复效果。

### 4.3 钢筋锈蚀修复技术

钢筋锈蚀修复的技术包括电化学法、锈蚀层清除法和加固法。电化学法通过施加电流来逆转钢筋的锈蚀过程,恢复钢筋的抗腐蚀能力,通常能有效提高80%以上的防腐蚀效果。锈蚀层清除法则通过机械手段去除钢筋表面的锈蚀层,然后进行防锈处理。加固法常使用碳纤维复合材料包裹钢筋,既能恢复其强度,又能提供长期的防腐保护。研究表明,采用碳纤维复合材料加固后的钢筋,其承载力和抗腐蚀性能分别提高了40%和50%以上。钢筋锈蚀修复后,不仅能够恢复

钢筋的使用性能,还能有效延长隧道结构的使用寿命<sup>[3]</sup>。

#### 4.4 防水修复与防护技术

隧道防水修复主要采用聚氨酯、环氧树脂及喷涂防水材料。聚氨酯材料具有较强的弹性和良好的耐水性,适用于隧道渗漏的修复,防水效果可达到 90% 以上。环氧树脂则常用于加固和密封裂缝,具有良好的抗渗性和粘结性。喷涂防水材料可以快速覆盖大面积区域,对于隧道大面积渗漏问题有很好的修复效果。修复后的隧道在防水性能上通常能提高 40% 至 50%。此外,使用防水涂料和无机防水材料的结合,也能显著提升隧道防护的效果,减少长期渗水对结构的破坏。

### 5 隧道耐久性提升技术

#### 5.1 隧道材料的耐久性优化

隧道耐久性优化材料主要通过采用改良混凝土、耐高温及抗腐蚀的钢材来提升结构的使用寿命。改良混凝土中,加入特种矿物掺合料(如硅灰、粉煤灰等)可提高混凝土的抗渗性和抗冻性,使其能够承受更恶劣的环境条件。耐高温钢材和耐腐蚀合金钢材的使用,可有效防止隧道钢筋在高温或湿润环境中的腐蚀与损坏。根据实践,采用这种优化材料后,隧道的使用寿命可延长 30% 以上,结构抗腐蚀能力提高 50% 以上。通过材料的优化,隧道的耐久性得到显著提升,减少了后期的维修和养护成本。

#### 5.2 结构加固与耐久性增强

结构加固技术常通过增设支撑体系、加强外部框架和提高结构抗压强度来提高隧道的耐久性。采用碳纤维增强聚合物(CFRP)进行加固,可以大幅度增强隧道结构的抗拉强度,通常其抗拉强度可提高 40% 以上。增强型混凝土加固技术也是常用方法,通过增加混凝土层厚度和加入钢筋网,提升结构的整体强度。此外,预应力加固技术可以有效提高隧道的抗变形能力,在极端载荷条件下能够有效分担压力,提高隧道的承载力。综合使用加固与增强措施,隧道结构的抗震性能和耐久性可以提高 50% 以上<sup>[4]</sup>。

#### 5.3 防腐蚀技术应用

隧道结构的防腐蚀技术主要通过防腐涂层、阴极保护法以及合金钢材材料的应用来实现。防腐涂层能够有效隔绝水分与氧气的侵入,防止钢筋的锈蚀与腐蚀,涂层寿命可达 15 年左右。阴极保护法通过外加电流使金属表面形成保护性电位,从而避免腐蚀,效果良好。合金钢材材料,尤其是高耐腐蚀的不锈钢和复合钢材,能够极大地提升隧道结构的抗腐蚀性,使用寿命通常可延长 40% 以上。防腐蚀技术的应用,不仅提升了隧道结构的耐久性,还能有效降低维护和修

复成本。

### 6 隧道结构病害防控的未来发展方向

#### 6.1 病害预防与智能检测技术的结合

未来隧道病害的防控将越来越依赖于智能化监测技术的广泛应用。通过在隧道中安装各种传感器和监控设备,能够实时获取结构的健康数据,及时发现可能的病害问题,例如裂缝、渗漏、钢筋锈蚀等。当监测数据异常时,系统能够及时发出警报,提供早期预警,为病害的修复和处理提供有力支持。智能检测技术不仅提高了病害检测的准确性和及时性,还减少了传统人工巡检的工作量和错误率,大大提升了隧道维护的效率和经济性。随着技术的进一步发展,智能监测技术将在隧道病害防控中发挥更大作用。

#### 6.2 绿色环保修复技术的发展

随着环保意识的增强,绿色环保修复技术在隧道病害防控中的应用将会越来越广泛。这些技术的核心理念是通过使用无害化的修复材料和低能耗的修复工艺,减少对环境的负面影响。绿色修复材料通常采用无机材料、可再生资源和环保型涂层,这些材料不仅具有优良的修复性能,而且不含有害物质,避免了传统修复技术中污染物的释放。此外,绿色修复技术还具有节能减排的优势,修复过程中的能源消耗大幅降低,施工对周围环境的影响减小。

#### 6.3 隧道耐久性设计理念的创新

隧道耐久性设计理念的创新将是未来隧道建设的重要发展方向。随着对隧道使用年限的要求不断提高,传统的隧道设计理念已经无法满足日益增长的耐久性需求,力求通过新型材料和技术手段,提高隧道的抗腐蚀、抗震和抗压能力。新型耐久性材料的应用将成为隧道设计的重要组成部分,例如自修复混凝土、超高强度钢材、耐腐蚀合金等材料,未来的隧道设计将更加重视环境因素,如化学侵蚀、温湿度变化等,确保设计能够适应不同的环境变化,最大程度地延长隧道的使用年限。通过设计理念的创新,未来隧道的耐久性将得到大幅提升,保障隧道长期安全运营。

#### 参考文献

- [1] 李新涛.基于铣挖法的城市隧道近接穿越建筑物施工技术研究[J].铁道建筑技术,2025,(10):153-156.
- [2] 吴志欢.结合岩口生态修复的城市隧道设计技术研究[J].江苏建筑职业技术学院学报,2024,24(04):11-15+22.
- [3] 郭光明,王呈义,董松.高速公路密集隧道群安全耐久与低碳环保技术研究[J].交通节能与环保,2023,19(S1):38-41.
- [4] 王家滨,牛荻涛,何晖,宋占平.盐湖侵蚀环境喷射混凝土耐久性性能劣化规律及机理研究[J].土木工程学报,2019,52(06):67-80.