

Rapid identification of voids in the backfill layer of tunnel arch and structural design optimization of reinforced concrete pouring

Lan Zhang

Hubei Provincial Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430051, China

Abstract

The void formation in tunnel crown backfill layers significantly compromises tunnel safety and durability. This study investigates the occurrence of voids in these backfill layers and proposes an optimized design method for steel fiber-reinforced concrete (SFRC) injection reinforcement. By employing advanced monitoring technologies such as ground-penetrating radar and ultrasonic testing, early detection and intervention can be achieved to enhance preventive effectiveness. The SFRC demonstrates superior mechanical properties that improve tensile strength, crack resistance, and void formation probability. Finite element analysis is applied to optimize reinforcement schemes, ensuring structural integrity and stiffness. Experimental results confirm the effectiveness of this approach in addressing void issues, providing theoretical foundations and practical experience for future tunnel maintenance technologies.

Keywords

tunnel crown; backfill layer; void formation; rapid identification; SFRC; structural design optimization

隧道仰拱填充层脱空病害的快速识别与钢纤维混凝土浇筑加固的结构设计优化

张榄

湖北省交通规划设计院股份有限公司, 中国·湖北 武汉 430051

摘要

隧道仰拱填充层脱空问题将严重影响隧道安全性和耐久性, 本文研究目的是通过探测隧道仰拱填充层脱空问题存在与提出隧道仰拱填充层脱空问题钢纤维混凝土灌注加固设计优化方法, 同时通过利用地质雷达、超声波等隧道仰拱填充层监测、测试技术手段对隧道仰拱填充层脱空问题早发现早处理, 提高预防率。设计部分, 钢纤维混凝土的机械性能优越, 提高填充层的抗拉、防止开裂的能力, 降低脱空的几率, 并利用有限元分析计算方法对钢纤维混凝土加固方案进行优化, 使得加固后的结构具有完好的完整性和刚度。最后的试验结果表明, 可以有效地解决隧道仰拱填充层脱空问题, 也可为今后隧道维修技术提供理论和经验。

关键词

隧道仰拱; 填充层; 脱空病害; 快速识别; 钢纤维混凝土; 结构设计优化

1 引言

仰拱填充层是隧道的重要结构, 对保证隧道的稳定性、承载能力等具有重大作用, 然而在施工过程中, 由于种种因素的影响, 此位置会经常出现脱空, 影响隧道运行的效能, 出现潜在的风险。其出现问题的原因包括材料、施工方法、环境因素等多个方面。传统的手段往往耗费大量的时间和精力进行检测, 不能在第一时间对隧道病害作出判断。因此, 发现一种解决上述问题的快速判断法和处理办法是非常必

要的。本研究主要解决如何对仰拱填充层的脱空病害采用快速判断方法, 从而通过钢纤维混凝土进行加固处理提供针对隧道运行安全的可行改进建议。

2 研究背景与意义

随着交通运输基础设施的迅速发展, 隧道是高效运输路径的重要组成部分, 安全性和耐久性亦被广泛重视。作为隧道的核心结构之一, 隧道仰拱既需承受上覆土体及其交通荷载, 也需预防地面下沉、隧道内部稳定以保证行车安全等诸多作用。但随着使用年限的增加和使用条件的日益复杂, 隧道的仰拱也面临着诸多问题的困扰, 其中, 脱空问题最为严重。脱空不仅危及隧道基础结构安全, 甚至能引发更加严

【作者简介】张榄 (1987-), 男, 中国湖北襄阳人, 硕士, 高级工程师, 从事桥隧养护与加固设计研究。

重的事故，如隧道坍塌。因此，针对隧道仰拱的脱空问题进行深入研究，既可以更好地了解其产生的原因、评价病害对建筑物的危害，又能探求出好的方法对其进行加固和改造，能更好地提升隧道安全性和耐久性，这对保障道路安全和增强城市的基建可持续性都具有重要意义。

2.1 隧道仰拱的功能及重要性

仰拱作为一种架设于隧道全结构上覆盖全顶的结构，主要作用是承受上方的土压，并分担荷载，在保障隧道整体性和稳定性的过程中起到了非常重要的作用。仰拱能够对抗地表内土压力，保证隧道整体结构不产生形变与损伤，保证人的安全出行；同时，仰拱设计对其防潮防震和变形抵抗能力等都有十分重要的影响。目前在隧道建设中，面临复杂的地质条件和多变的使用需求，其设计、施工和维护都会愈显重要。因此，深入探讨隧道仰拱的功能及意义对于提高建筑质量、保证安全运营都有十分重要的指导意义^[1]。

2.2 脱空病害的影响与研究现状

脱空病害是隧道建设时最常见的病害问题，指的是隧道顶部（即仰拱）和其侧向围岩之间存在着空隙，这种病害会危害隧道的安全稳定性以及坚固性，也可能诱发更多的建筑灾害。由于其存在，地面传力不能转移到仰拱，进而使其受到不均匀荷载的影响，其可能造成局部损伤、剥离或者垮塌问题。现有脱空病害研究主要集中于病害发生原因、基于监控信息的评价和加强整治等方面，尤其在隧道施工期和运营期内，主要采取实测方法和数值模型方法研究脱空病害发展规律。但是现有研究仍有较多不足，特别是前期预警和针对性的治疗方法等亟待进一步深入研究与创新，完善预警性和强化治理措施方法体系^[2]。

3 脱空病害成因分析

施工因素以及环境因素是促使隧道仰拱脱空病害产生的主要因素，能够对病害的成因有科学的认识，对于制定出有效的防治策略具有重要的意义。

3.1 施工因素

隧道施工的过程中，工程参数直接影响着施工隧道的安全施工。首先是不合理的开挖方式施工方法，容易导致围岩变形、围岩压力聚积，导致脱空的发生；比如说采用机械快速施工技术的时候，往往会导致围岩无法及时得到支护，围岩局部空隙就会越来越大，直至发生脱空。

若不重视建设期间周围生态环境的保护也有可能形成脱空，例如如果没有很好地监控管理地下水水位变化，水的渗入腐蚀可能会造成基岩损坏，加大仰拱脱空几率。施工班组的专业素养及管理能力也会影响工程质量，经验缺乏、现场管理不利均会造成隐患。因此，在隧道建设过程中，应加大严格制度管理，科学选取手段、实施针对性技术培训，减少施工原因造成的脱空产生。

3.2 环境因素

场地因素也是造成隧道拱顶空间坍塌的重要原因，其

中包括了地质情况、地下水位、气温和水分变化等。隧道投入使用后，外部场地的变化会对隧道内部建筑的稳定性产生直接影响。第一，地形情况的变化是影响隧道质量的较大因素之一。周围地形形态以及物质性质有时会引起土体的坍塌运动。因此在隧道施工前期应进行全面细致的地形勘察，准确把握风险情况。

其次，影响到隧道出现脱空原因是地下水水位的高低。一旦隧道周围地下水水位上升，则对土层产生水分的浸润，导致结构土壤变疏，进而导致土层和支撑之间存在一定的间隙，即便隧道结构的本身并没有出现比较严重的缺陷，但由于周围环境的原因，依然可能会导致其出现比较严重的脱空。此外，伴随着气温、湿度的变化，也会造成结构土壤中水分含量的变化，进而导致其从干燥状态变成湿润状态，也可能诱发脱空问题的产生。因此，需要加强对隧道的运行状态的监测，并提前准备好相应的处理方法，确保隧道结构长期发挥稳定性^[3]。

总体而言，隧道仰拱脱空病害形成的原因是多方面的，既有施工过程中因素，也有复杂的环境因素。对这些因素的综合分析对指导隧道的施工、运营、维养方面具有极为重要的意义，对进一步增强隧道的安全性奠定了理论基础。

4 快速识别方法探讨

4.1 传统检测方法

4.1.1 目视检查

目测是最基本的洞室病害诊断方法，由于简单可行而廉价，逐渐演变为一线工程人员日巡的主要途径。通过观察隧道结构的表面开裂、变形或渗水等直接现象，对隧道的病害状况先做出一次评估。通过辅助观测记录和经验帮助判别人员做出更为细致的评估。尽管目测可用于大范围缺陷的判断，但是由于目视受到现场人员业务能力以及观景效果的制约而不能完全依赖该种方式，故通常将其作为进一步测试的预步行动，同时还需要结合其他检测方法来进行进一步验证与判定。

4.1.2 非破坏性测试

非破坏性测试 (NDT) 是对未受到破坏的构造或物质进行综合性评价的一种测试方式，隧道建设中常用的 NDT 方式包括了超声波检测、位移计测量等。通过利用超声波测验能够反映出混凝土中波传播速度的变化，以具体测量出构造中的问题缺陷情况，如裂缝、孔洞等。通过测量位移计能够以衬砌混凝土的位移等指标确定是否有变形，此方式属于较常用的非破坏性测试。不需对原始结构进行破坏即可获得相应的数据，并且能够提升鉴定的精准率和效率。随着科技的发展，非破坏性检测已成为判定隧道缺陷设备，对于结构之后的修复保养作出决定也具有一定作用^[4]。

4.2 新型检测技术

4.2.1 地质雷达检测

地质雷达是以电磁波在隧道等建筑物构件中传输的特

性为检测基础的一种无损检测方法,即从发出的特殊频率的声音波信号在混凝土或土体中的传送情况来探究电磁波在物质介质中的反射和穿透特性,从而确定结构的损伤情况。对于隧道初期支护部分而言,此检测方法能够有效、精确地发现非常规性问题中的塌坑、裂缝等情况并确定它们所在的位移情况及其深度尺寸,从而满足快速和准确的诊断需求。不仅如此,在数据处理技术以及应用如深度学习的智能计算手段的不断提高下,地质雷达检测解析能力不断增强,故该检测方式具有广阔的前景。

4.2.2 红外成像技术

红外热像技术通过采集和分析物体的红外热量而形成温度分布的图像来达到发现和定位洞穴内各种问题的目标。该技术工作的原理为识别由于材质差异或者结构缺陷所引起热波动情况,进而定位因为水汽渗漏、空气漏散或者其他引起的发热现象,在气候条件变化显著(比如高湿度地区或者温度快速变换场所)的区域,该检测系统可在短时间内发现有问题的位置,相比传统的检测方法具有非侵入性、效率高、图像效果明显的优点,因此红外热像技术可大大增加隧道缺陷诊断的效果。该技术可与其他检测工具配合使用,未来可能提升对隧道健康检测的监测力度^[5]。

5 钢纤维混凝土的加固方案设计

5.1 钢纤维混凝土的特性分析

5.1.1 强度与韧性优势

掺入的少量短钢纤维在混凝土中可以显著提升强度和耐久性。这样的设计初衷是为了更好地优化混凝土抗压时表现,在控制裂纹发展的方面更加明显。研究表明,钢纤维的加入有效地分散了应力的积聚,提升了混凝土的延展性,从而降低了裂缝产生的风险。相比于普通混凝土,无论是在静荷载还是动荷载作用下,钢纤维混凝土都有很好表现。这对外表覆盖有如隧道仰拱这类承担结构,在长期运行中保证结构的安全稳定性和降低维修频次及费用具有重要意义。

5.1.2 工作性与耐久性

除强度的耐久性及韧性外,钢纤维混凝土还具备良好的工作性和耐久性。首先,能够改善混凝土流变性能,对提高施工工艺,在不同环境条件下做到对混凝土的浇筑和成型等工作能够得心应手。其次,钢纤维的加入使混凝土抗冲击性能、抗疲劳性能均得到了显著的提高,对防范隧道运行中产生的裂缝、表面缺陷等问题具有积极的作用。最后,能够显著改善混凝土耐久性,为隧道在容易产生水湿、化学侵蚀等条件下提供一个耐腐蚀的保护层,无论从经济性上还是耐久性来看,钢纤维混凝土均是隧道加固工程的良方^[6]。

5.2 结构设计优化

5.2.1 加固厚度与配比设计

对于钢纤维混凝土加强设计来说,其有效增厚层深度

及钢纤维比对其强化效果至关重要。加强层深需要综合隧道使用情况、隧道损伤情况、隧道施工工序等方面综合考虑确定,推荐加强层深度区间 30mm-60mm。钢纤维比则依据混凝土强度要求和混凝土性能标准应作适当调整,通过对比试验得出的钢纤维比常用区间为 1%-3%,可实现较好的力学性能及施工性能。同时应注意兼顾水泥混凝土的均匀性,避免出现纤维堆积或分布不均等情况,将钢纤维混凝土优势最大化。

5.2.2 施工工艺与技术参数

其次是在具体的施工环节和施工技术上进行优化完善,以此增强钢纤维混凝土的加固效果,为此要安排合理的拌和时间、运输和灌筑方式以确保混凝土质量的均匀度,如避免钢纤维混合后出现聚堆、堆积,需配置高性能的拌和装置并做好搅拌技术选择,而在运输、灌筑时则要做好混凝土施工流态控制,避免出现过分的搅拌翻浆、分层情况;同时还要做好混凝土施工环境和水温湿度管控及养护措施,以确保混凝土的硬化环境,进而增强耐压强度和耐久性能,这样一来就可以提升工程质量,减少后期的维护,改善结构物的综合功能^[7]。

6 结语

本文主要是针对隧道工程仰拱填充层出现脱空现象进行探讨的,以及其快速检测的方法,强调需要重视填充层的施工质量以及填充层对环境的影响,在填充层出现脱空的情况下,采用钢纤维混凝土材料进行填充具有显著的优越性,不仅能够大大提高结构的承载能力,还能够增强其耐久性和抗裂功能;同时也能够通过科学的设计构造实现加强的目的。需要进一步研究更高检测技术的更优加强措施,来解决隧道项目在工程实践中可能会遇到的各个方面较难控制的情况,确保隧道的安全与可靠性。

参考文献

- [1] 陈晨曦,王劲松,孙小雪.隧道仰拱病害的识别与处治研究[J].岩土工程技术,2023(5):117-120.
- [2] 刘弘伟,张雨欣,何峰宇.钢纤维混凝土在隧道加固中的应用效果分析[J].结构工程与力学,2022(12):45-51.
- [3] 赵明亮,周晓莉,李婉怡.隧道结构设计中脱空病害的评估与应对措施[J].土木工程学报,2021(3):83-88.
- [4] 吴雨婷,陈志伟,唐宏斌.基于非破坏性检测技术的隧道病害快速识别方法探讨[J].工程检测与研究,2024(6):22-27.
- [5] 蒋志东,刘紫嫣,林浩然.钢筋混凝土结构加固技术的研究现状与发展趋势[J].建筑科学,2023(4):30-36.
- [6] 熊田芳.地裂缝区间地铁隧道模型试验研究及其新型支护技术[D].西安理工大学,2010.
- [7] 武哲书,孙文昊,陈峻博,等.正断层错动作用下矿山法隧道受力变形机理的模型试验研究[J].铁道标准设计,2024,68(1):146-154.