

公路隧道衬砌空洞缺陷的检测与评估

张磊 徐晨啸

浙江爱丽智能检测技术集团有限公司 浙江 杭州 311700

摘要: 公路隧道衬砌空洞是常见的结构性问题,对隧道运营安全构成威胁。空洞形成原因复杂,包括施工因素和地质因素。为有效应对这一问题,发展了多种检测方法,如地质雷达法、超声波法和钻孔取芯法,它们各自具有独特的优势与局限性。在评估方面,基于结构力学、耐久性和无损检测技术的评估方法为空洞缺陷的量化分析和长期性能预测提供了有力工具。这些方法的应用有助于确保隧道结构的安全与稳定。

关键词: 公路隧道衬砌空洞;检测方法;评估方法

引言

公路隧道作为现代交通网络的重要组成部分,其结构安全性至关重要。衬砌空洞缺陷作为隧道工程中的常见问题,不仅影响隧道的整体稳定性,还可能引发严重的安全事故。因此,对衬砌空洞缺陷的检测与评估成为隧道维护和管理中的关键环节。本文将系统介绍衬砌空洞的形成原因、检测方法及评估方法,为隧道工程的实践提供理论指导和技术支持。

1 公路隧道衬砌空洞缺陷概述

公路隧道衬砌空洞缺陷,是隧道工程中一种较为常见的结构性问题,它指的是在隧道衬砌与围岩界面之间或衬砌结构体内部,由于多种因素导致的空间不密实现象。这些空洞的形成原因复杂多样,与施工工艺的不当执行、围岩的自然变形及稳定性变化密切相关。在喷射混凝土施工阶段,若喷射压力设置不当或控制不准确,会导致混凝土无法充分密实地覆盖围岩表面,形成局部空洞。在混凝土浇筑过程中,振捣操作的不充分也是导致空洞产生的重要原因。振捣不足会使得混凝土内部的气泡无法有效排出,进而在凝固后形成空洞,围岩的局部坍塌若未得到及时处理,也可能在衬砌背后留下空腔。这些空洞的存在,改变了衬砌结构的原始受力状态,还使得衬砌在承受外部荷载时,局部区域出现应力集中现象。长期以来,异常的应力状态对公路隧道衬砌构成了持续的威胁。这种不正常的应力分布加速了衬砌材料的老化过程,还导致了表面开裂、剥落等损伤现象的出现。随着时间的推移,这些损伤会逐渐累积,严重时甚至可能引发隧道的局部或整体结构坍塌,对隧道的运营安全带来风险。对公路隧道衬砌空洞缺陷进行及时、准确的检测与评估显得尤为重要。这是确保隧道结构稳定、保障行车安全、延长使用寿命的关键环节,必须给予高度重视并采取有效措施加以应对。

2 公路隧道衬砌空洞缺陷的形成原因

2.1 施工因素

在公路隧道施工进度里,混凝土浇筑环节的工艺偏差对衬砌空洞的产生影响显著。混凝土振捣工序极为关键,振捣不足时,新浇混凝土内部的空气无法充分排出,粗、细骨料不能紧密堆积,在混凝土内部形成众多微小空隙,这些空隙随着时间推移,发展为较大空洞。模板工程同样不容小觑,模板若安装不稳固,在混凝土浇筑压力作用下,极易发生位移、变形甚至跑模现象,致使衬砌混凝土在特定部位厚度难以达到设计标准,形成局部空洞区域。超挖回填操作的规范性也与衬砌空洞密切相关。当隧道施工遭遇超挖情况,若初期支护与二次衬砌间的超挖部分未依照标准流程进行回填,例如采用的回填材料不符合要求,或回填施工中未充分压实,都会使回填区域存在较多孔隙,成为衬砌空洞的潜在隐患。此类因施工工艺不当引发的衬砌空洞,在隧道建设中较为常见,严重威胁衬砌结构的整体性与稳定性。

2.2 地质因素

(1) 复杂且多变的地质条件对公路隧道衬砌施工质量提出了极高的挑战,并潜在地埋下了病害隐患。在软弱围岩地段,围岩因自身强度不足、自稳性能欠佳,在隧道开挖过程中易受扰动而发生显著变形。这种变形产生的巨大挤压应力直接作用于衬砌结构,会导致衬砌混凝土在局部区域出现裂缝甚至脱落,进而在脱落处形成空洞缺陷。(2) 地下水的长期侵蚀作用也是引发衬砌空洞的重要地质因素。若隧道穿越的地层富含地下水,水分将不断渗透进入衬砌混凝土内部。在水分与侵蚀性介质的共同作用下,混凝土中的水泥成分会发生复杂的物理化学变化,导致水泥石结构逐渐劣化,混凝土强度下降、密实度降低。随着侵蚀时间的不断延长,混凝土内部的微观孔隙会逐渐扩展并相互连通,最终形成明显的

空洞缺陷。(3)由地质因素引发的衬砌空洞往往具有隐蔽性和渐进性,在隧道运营初期可能难以察觉。随着运营时间的推移,这些空洞会严重削弱衬砌结构的耐久性和承载能力,对隧道的长期安全运营构成重大威胁^[1]。

3 公路隧道衬砌空洞缺陷的检测方法

3.1 地质雷达法

地质雷达是基于电磁波传播理论研发的检测设备。其工作时,通过发射天线向隧道衬砌结构发射高频电磁波,电磁波以特定速度在介质中传播。当遇到衬砌与空洞、衬砌与围岩等不同介电常数的界面时,部分电磁波会发生反射,反射波被接收天线捕捉。依据反射波的旅行时间、振幅以及相位等关键信息,运用专业的数据处理软件,可对衬砌内部结构进行成像分析。在公路隧道衬砌空洞检测实践中,地质雷达展现出诸多优势。它属于无损检测技术,不会对衬砌结构造成任何实质性损伤,能在不影响隧道正常运营的前提下开展检测工作。检测过程高效快捷,可沿隧道纵向连续采集数据,短时间内即可完成大面积区域的探测任务。其生成的二维或三维图像能直观清晰地呈现衬砌内部的结构状况,检测人员可精准定位空洞的位置,大致判断空洞的规模与形状。不过,地质雷达法也存在固有缺陷。受电磁波传播特性制约,其有效探测深度相对有限,一般在数米范围内,对于深埋较深的空洞难以有效探测。复杂的隧道环境中存在诸多电磁干扰源,如照明系统、通风设备等,这些干扰可能导致反射信号紊乱,降低检测结果的准确性与可靠性^[2]。

3.2 超声波法

(1)超声波检测技术是一种基于超声波在混凝土介质中传播特性差异来诊断衬砌内部缺陷的方法。在均匀密实的混凝土中,超声波传播稳定,声速恒定且衰减较小。当超声波遇到空洞等缺陷时,其传播路径会发生改变,导致声速降低,能量衰减明显增强。检测过程中,通过在衬砌表面布置发射和接收超声换能器,测量超声波在衬砌中的传播时间,进而计算出声速,并同时监测接收信号的波幅变化。(2)根据声速、波幅等参数与正常范围的偏离程度,结合专业的判读经验和算法,判断衬砌内部是否存在空洞,并确定空洞的位置和大致尺寸。超声波法具有较高的分辨率,对微小空洞也能敏锐察觉,能精确地定位空洞位置,为后续的缺陷评估与处理提供关键依据。(3)需要注意的是,超声波检测对测试条件要求较为严格。换能器与衬砌表面必须实现良好耦合,以确保超声波能量的有效传递。这就要求测试表面保持平整、干净,必要时需涂抹耦合剂。检测人员需

具备丰富的专业知识和操作经验,准确设置检测参数,正确解读检测数据,以避免误判。衬砌表面的不平整和钢筋等内部结构也可能对超声波传播产生干扰,影响检测精度。

3.3 钻孔取芯法

钻孔取芯是一种直接且直观的检测手段。具体操作时,借助专业钻孔设备,在隧道衬砌指定位置钻取圆柱状芯样。取出的芯样可直接用于观察其外观完整性,查看是否存在蜂窝、孔洞、分层等缺陷。通过对芯样进行抗压强度试验等力学性能测试,可获取混凝土的实际强度数据,进一步评估衬砌结构的质量状况。若芯样中出现空洞,其位置、大小、形态一目了然,能为空洞缺陷的判定提供确凿依据。这种检测方法最大的优势在于直观可靠,所获取的芯样信息真实反映了衬砌内部结构与混凝土质量,是验证其他无损检测方法结果的重要手段。但钻孔取芯属于有损检测,钻孔过程会在衬砌上留下孔洞,对衬砌结构的整体性造成一定破坏,尤其是在关键受力部位钻孔,会影响结构安全。且钻孔取芯检测范围极为有限,只能反映钻孔位置的局部情况,难以对整个衬砌结构进行全面评估。该方法成本较高,包括钻孔设备的租赁、芯样加工与检测费用等,检测效率也相对较低,不适用于大面积检测需求^[3]。

4 公路隧道衬砌空洞缺陷的评估方法

4.1 基于结构力学的评估方法

(1)基于结构力学的评估方法致力于通过严谨的力学模型,深入探究存在空洞缺陷的衬砌结构的力学行为。在构建力学模型时,需精确模拟衬砌的几何构形、材料属性以及空洞的详细参数,如空洞的位置、尺寸和形态等。有限元模型和解析模型是常用的两种力学模型,其中有限元模型因其强大的建模能力,能够精细描绘复杂结构,而在衬砌结构分析中得到广泛应用。(2)通过模拟不同工况下(如自重、围岩压力、车辆荷载等)衬砌结构的应力分布和变形状况,计算出结构关键部位的应力和应变值。这些数据为评估衬砌结构的承载能力提供了基础,即结构在破坏前所能承受的最大荷载。引入安全系数的概念,将计算得到的承载能力与实际可能承受的荷载进行比较,安全系数越高,说明结构的安全性越高。当空洞位于衬砌拱顶时,会导致拱顶处应力集中明显,结构承载能力下降,安全系数降低,威胁隧道整体结构的安全性。(3)该评估方法的突出优点在于能从力学的本质出发,以量化的数据直观地展示空洞缺陷对衬砌结构的影响程度,为后续制定维修加固方案提供坚实的理论支持。然而,它对计算输入条件要求

严格,结构参数如衬砌材料的弹性模量、泊松比等需通过实验室试验或现场检测准确获取,边界条件如围岩与衬砌的相互作用形式、约束条件等也需准确设定,否则会导致计算结果与实际情况存在较大偏差,影响评估的准确性。

4.2 基于耐久性的评估方法

从耐久性视角评估衬砌空洞缺陷,聚焦于衬砌结构在长期服役过程中的性能演变。混凝土碳化与钢筋锈蚀是影响衬砌耐久性的关键因素,而空洞的存在会加速这两个过程。在空洞区域,混凝土保护层厚度局部减薄甚至缺失,外界侵蚀性介质,如二氧化碳、氯离子等,更易侵入混凝土内部,加速混凝土碳化进程。碳化使混凝土内部碱性环境遭到破坏,钢筋表面钝化膜受损,引发钢筋锈蚀。为评估衬砌结构耐久性,需构建耐久性评估模型。以混凝土碳化模型为例,常见的有基于扩散理论的Fick第二定律模型,通过测定混凝土中二氧化碳浓度分布,结合环境温湿度等因素,计算混凝土碳化深度。对于钢筋锈蚀,可采用电化学监测方法,测量钢筋腐蚀电位、腐蚀电流密度等指标,判断钢筋锈蚀程度。综合这些监测数据,利用数学模型预测衬砌结构的剩余使用寿命。此评估方法高度关注结构长期性能,对保障隧道长期安全运营意义重大。但在实际应用中面临诸多挑战。复杂多变的隧道环境,如不同区域的温湿度差异、通风条件不同,会使侵蚀性介质的扩散与反应规律变得复杂,增加模型建立难度。混凝土碳化、钢筋锈蚀以及其他因素间存在复杂耦合作用,目前对这种多因素耦合下的耐久性评估研究仍不够完善,难以精准预测衬砌结构在复杂环境下的剩余寿命^[4]。

4.3 基于无损检测技术的评估方法

(1) 基于无损检测技术的评估方法是一种非破坏性的评估手段,旨在通过不损害衬砌结构完整性的前提下,对存在空洞缺陷的衬砌进行全面、准确的评估。这一方法主要依赖于先进的无损检测设备和技术,如红外热成像技术、地质雷达探测技术等。红外热成像技术通过捕捉衬砌表面温度分布的差异,揭示出空洞等内部缺陷引起的热传导异常,定位空洞的位置和范围。而地质

雷达则利用电磁波在混凝土中的传播和反射特性,对衬砌内部结构进行高分辨率的成像,直观显示空洞的形态和尺寸。(2) 在应用无损检测技术进行评估时,需要结合多种技术手段,以提高评估的准确性和可靠性。将红外热成像技术与地质雷达探测技术相结合,互为补充,验证检测结果的一致性。还需要对检测数据进行专业的处理和分析,提取出有用的信息,如空洞的位置、尺寸、形态以及其对衬砌结构整体性能的影响程度等。

(3) 基于无损检测技术的评估方法具有操作简便、快速高效、结果直观等优点,能为衬砌空洞缺陷的及时发现和有效处理提供有力支持。然而,该方法也存在一定的局限性,如检测设备的成本较高、对操作人员的专业技能要求较高、检测结果可能受到环境因素的干扰等。在实际应用中需要综合考虑各种因素,合理选择评估方法,以确保评估结果的准确性和可靠性。

结束语

综上所述,公路隧道衬砌空洞缺陷的检测与评估是确保隧道结构安全、延长使用寿命的重要保障。通过深入分析空洞的形成原因,发展高效准确的检测方法和科学合理的评估方法,可以及时发现并处理衬砌空洞缺陷,有效预防隧道安全事故的发生。未来,随着科技的进步和技术的不断创新,相信会有更多更先进的检测与评估方法涌现,为公路隧道的安全运营提供更加有力的保障。

参考文献

- [1]杨红文,朱德祥,冯国建.GPR技术在高速公路隧道衬砌质量检测中的应用[J].甘肃水利水电技术,2023,59(11):9-13.
- [2]咎文博,赵春晨,王宁,等.隧道检测与健康状况评价研究综述[J].筑路机械与施工机械化,2020,37(10):67-74.
- [3]方晓正,薛亚东.冲击回波法精细探测公路隧道衬砌空洞的模型试验及分析[C]//2019年全国公路隧道学术年会论文集.2019:1284-1292.
- [4]方晓正,薛亚东.冲击回波法精细探测公路隧道衬砌空洞的模型试验及分析[J].隧道建设(中英文),2019,39(8):1284-1292.