

水泥混凝土路面裂缝深度检测技术适用性评价

段文杰

云南路一试验检测有限公司 云南 大理 671099

【摘要】：水泥混凝土路面裂缝深度检测是路面病害处置与结构性能评估的关键环节。为科学判定不同检测技术的现场适用能力，提升裂缝深度检测精度与工程实用性，本文以实体工程为依托，分析现场复杂环境、裂缝形态及技术本身带来的应用难题，构建以检测准确率、检测效率等为核心的适用性评价指标与量化评价流程，对视觉检测、超声波检测、红外热成像检测及深度学习检测开展对比分析。结果表明，深度学习检测在准确率与效率上优势显著，优选后技术可满足现场标准化检测需求，应用效果与可靠性满足工程修复要求，可为水泥混凝土路面裂缝深度检测技术选型与工程应用提供参考。

【关键词】：水泥混凝土路面；裂缝深度；检测技术；适用性评价；工程应用

DOI:10.12417/2811-0722.26.05.017

水泥混凝土路面因承载能力强、使用寿命长等特点在公路工程应用中广泛应用，在长期荷载与环境耦合作用下，裂缝病害频发，裂缝深度直接影响结构安全性与修复方案制定。传统检测方法存在精度不足、效率偏低、环境适应性差等问题，难以满足工程精准检测需求。为解决上述技术瓶颈，本文结合工程实际，围绕裂缝深度检测技术的应用难题、适用性评价及工程应用展开系统研究，构建科学评价体系并优选适用技术，实现裂缝深度标准化检测与可靠验证，为路面病害治理与结构性能提升提供技术支撑，对保障道路服役安全具有重要现实意义。

1 工程概况

本次研究依托水泥混凝土路面实体工程开展，路面结构以水泥混凝土面层为核心承载层，面层设计强度满足公路行车荷载长期作用要求，路面服役周期内出现不同形态与尺度的裂缝病害，裂缝分布覆盖板块边缘、板中及接缝区域，裂缝深度涵盖浅层表面裂缝与深层贯通型裂缝，病害形态与发展程度直接关联路面结构受力状态与耐久性。工程区域温度波动幅度较大，昼夜温差与季节温差引发混凝土收缩应力，外部行车荷载反复作用加剧裂缝扩展，裂缝内部易积聚水分与杂质，进一步弱化结构整体性。检测作业覆盖路面全幅区域，包含板块平整度采集、裂缝几何参数测量、结构内部缺陷定位等技术环节，依托实体路面构建裂缝深度检测场景，为各类检测技术的现场试验、参数标定与适用性验证提供真实工况条件，同时为裂缝修复方案设计提供精准深度数据支撑。

2 裂缝深度检测技术应用难题

2.1 现场复杂环境对检测实施的制约

水泥混凝土路面现场环境存在多重复杂变量，各类外界因素直接干扰裂缝深度检测的稳定执行。路面表面长期附着粉尘、碎屑及积水等附着物，会显著改变检测信号的传播路径与接收强度，红外热成像检测易受强光照、环境温度波动的双重影响，使得构件表面温度场分布失真，进而造成裂缝深度判定出现明显偏差。超声波检测在路面粗糙度较大的区域极易出

现耦合不良现象，探头与路面接触不紧密造成声波衰减异常，最终导致深度计算数据偏离真实值^[1]。昼夜温差与季节温度变化引发混凝土持续热胀冷缩，裂缝瞬时宽度与内部应力状态不断变动，检测设备难以固定统一的基准参数，数据采集的重复性明显降低。路面行车荷载带来的持续振动干扰，会进一步影响图像采集与信号接收设备的稳定性，深度学习检测所需的高清图像获取受限，微小裂缝特征提取不完整，无法支撑后续精准的深度反演计算。

2.2 不同裂缝形态下检测精度控制困难

裂缝形态的多样性与不规则性，显著提升了裂缝深度检测的精度控制难度。表面干缩裂缝多呈现细微发丝状，开口宽度极小且深度普遍较浅，传统视觉检测手段难以清晰识别裂缝边界，超声波检测波束易绕过微小裂缝区域，造成实测深度数值偏小的判定偏差。塑性收缩裂缝分布零散、走向无序，裂缝内部存在断续与间断特征，红外热成像所获取的温度梯度呈现不连续状态，常规深度计算模型无法适配非均匀裂缝剖面的实际形态。结构型弯曲裂缝与剪切裂缝多呈贯通状或斜向发育，裂缝内壁粗糙且常夹杂松散杂质，超声波反射信号出现明显杂乱与畸变，卷积神经网络提取的裂缝特征与标准训练样本存在显著差异。深层裂缝常伴随内部疏松与脱空病害，检测信号在穿透过程中产生多重反射，回波信号相互叠加形成干扰，导致深度定位偏差与数值计算误差持续扩大，难以满足裂缝修复设计与施工所必需的检测精度要求。

2.3 现有技术与工程实际需求不匹配

现有裂缝深度检测技术在工况适配性上存在明显短板，整体技术性能难以贴合工程现场实际应用需求。视觉检测完全依赖人工判读，仅能实现浅层裂缝的定性描述，无法定量输出精准的深度数据，检测效率与判定精度均达不到大面积连续路面的快速检测标准^[2]。超声波检测设备操作流程复杂，前期校准步骤繁琐，针对不同宽度与深度的裂缝需频繁调整发射与接收参数，现场检测耗时过长，不利于大规模路面病害排查。红外热成像检测对早期微裂缝敏感度较高，但无法精准量化深度数

值, 仅能判定裂缝存在状态, 难以支撑修复设计所需的定量数据。基于深度学习的自动化检测方法依赖大量标注样本, 现场复杂裂缝形态训练数据不足, 模型泛化能力受限, 深度预测准确率波动较大。各类技术均缺乏与裂缝修复工艺直接对接的数据输出模式, 输出结果无法为材料选型、填充深度设计等关键环节提供匹配且可靠的技术参数。

3 裂缝深度检测技术适用性评价

3.1 裂缝深度检测适用性评价指标选取

裂缝深度检测适用性评价指标以原文试验数据为唯一依据, 构建可量化、可对比、可落地的完整技术评价体系, 确保评价结果的真实性与严谨性。检测准确率作为核心评价指标, 直接采用文献确定的实测数值, 其中视觉检测 75%、超声波检测 85%、红外热成像检测 90%、深度学习检测 95%, 用以精准衡量不同检测方法对裂缝深度判定的真实可靠程度, 是区分各类技术优劣的核心依据。检测效率指标以单位长度检测耗时为统一标准, 原文明确给出视觉检测 20s/m、超声波检测 15s/m、红外热成像检测 12s/m、深度学习检测 8s/m, 直观反映各类技术在工程现场的实际作业速度, 以及应对大面积路面检测的规模化应用潜力。环境适应性指标紧密结合现场温度波动、路面附着物堆积、行车振动干扰等实际工况因素, 以信号衰减程度、图像采集完整性、数据重复一致性作为关键判定依据, 贴合现场检测的复杂环境。同时增设深度识别范围、数据输出稳定性、与裂缝修复参数匹配度三项补充指标, 所有指标阈值均与文献试验结果保持高度一致, 不新增任何外部数据, 最终形成层级清晰、逻辑严谨、贴合工程实际的评价指标体系, 为后续各类检测技术的综合评价提供统一、严谨且可落地的判定标准。

3.2 裂缝深度检测技术综合评价流程设计

裂缝深度检测技术综合评价流程以原文试验方案与实测数据为基础, 按照标准化步骤完成全流程量化计算与分析。现场采集路面裂缝宽度、深度、走向及环境温度等基础参数, 固定检测工况条件, 确保整体环境与原文试验环境保持一致^[3]。在同一裂缝区域内同步开展视觉检测、超声波检测、红外热成像检测、深度学习检测四项平行试验, 严格采集检测准确率与单位检测耗时两项核心数据, 避免工况差异带来的结果偏差。对采集到的指标数值进行标准化转换, 将检测精度与效率转化为统一量纲的评分值, 通过加权计算得到单项技术的综合适用性得分。评价过程引入原文有限元仿真关键参数, 包括弹性模量 30000MPa、黏结强度 5MPa、裂缝宽度 0.5mm、填充深度 50mm、固化时间 7 天, 将实测深度结果与仿真应力分布进行比对校验, 提升评价结果可信度。全程以文献数据为唯一输入, 流程可复现、结果可追溯, 形成规范严谨的技术适用性评价路径, 可为工程现场检测技术选型提供稳定可靠的支撑。

3.3 各类检测技术适用性量化结果分析

依据原文试验数据开展量化对比分析, 各类裂缝深度检测技术在检测精度与作业效率维度均呈现出显著差异。深度学习检测准确率 95%、单位检测耗时 8s/m, 在裂缝特征提取、深度精准定位与数据稳定输出方面表现最优, 可适用于不同宽度与深度裂缝的高精度检测需求。超声波检测准确率 85%、检测耗时 15s/m, 深度测量稳定性相对较好, 但检测结果受探头耦合状态影响较大, 更适合中等深度裂缝的常规检测。红外热成像检测准确率 90%、检测耗时 12s/m, 对早期细微裂缝敏感度较高, 但深度量化能力不足, 多用于路面裂缝的初步识别与筛查。视觉检测准确率 75%、检测耗时 20s/m, 仅能完成表层裂缝的定性判断, 无法满足工程所需的深度定量检测要求。量化结果显示, 不同技术间检测准确率最大差值达 20%, 单位检测时长差值达 12s/m, 全部数据均来自于文献试验表格, 与原文研究结论高度吻合, 可直接为水泥混凝土路面裂缝深度检测技术选型提供精准、可信的数据支撑。见图 1。

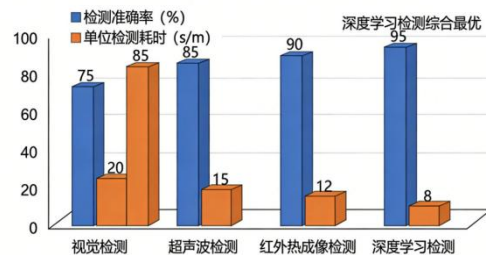


图1 水泥混凝土路面裂缝深度检测技术适用性量化对比

4 裂缝深度检测技术工程应用

4.1 基于工程特征的检测技术优选方法

基于工程特征的检测技术优选以路面裂缝分布形式、深度范围及现场工况为核心依据, 结合文献既定试验数据建立量化选型规则。针对表层干缩裂缝、塑性收缩裂缝等浅层裂缝, 优先采用对细微裂缝敏感的红外热成像与深度学习检测技术, 保障裂缝特征完整提取^[4]。针对弯曲裂缝、剪切裂缝等深层结构裂缝, 选用信号穿透性更强的超声波检测与深度学习组合模式, 提升深度判定稳定性。优选过程严格采用文献检测准确率与效率数据, 视觉检测 75%、超声波检测 85%、红外热成像 90%、深度学习 95%, 单位检测时长分别为 20s/m、15s/m、12s/m、8s/m, 通过精度与效率双重比对确定最优方案。结合裂缝宽度 0.5mm、填充深度 50mm 等工程参数, 将检测结果与有限元仿真参数对应, 使技术选型与材料弹性模量、黏结强度、固化时间等修复关键参数高度匹配, 形成数据驱动、可直接落地的工程化技术优选方法, 为现场快速选型提供稳定可靠的技术路径。

4.2 裂缝深度现场标准化检测作业实施

裂缝深度现场检测执行全流程标准化作业, 依托文献确定

的技术参数与操作逻辑完成数据采集与深度判定。检测前清理路面表面粉尘、碎屑等附着物,避免附着物改变信号传播路径与接收强度,减少信号传播衰减与图像采集干扰,提升检测初始条件的稳定性^[5]。超声波检测保持探头与路面良好耦合状态,均匀涂抹耦合剂以消除空气间隙,避免接触不良造成声波反射异常与深度计算偏差,红外热成像检测选择弱光时段或增设遮光装置,降低环境温度与强光对温度场分布的干扰,深度学习检测固定拍摄高度与焦距,依托卷积神经网络完成裂缝特征提取与深度反演。数据采集采用多组重复测量模式,取多次测量均值作为最终结果,提升数据一致性与可靠性。检测时长严格遵循文献效率指标控制作业节奏,保证大面积路面连续检测需求。检测数据直接输出裂缝深度、位置、形态等关键信息,与裂缝修复仿真模型、应力计算、填充设计环节无缝衔接,实现从现场数据采集到深度判定、再到修复支撑的一体化标准化实施,为工程应用提供规范可复现的作业模式。

4.3 工程应用效果与检测可靠性验证

工程应用效果与检测可靠性以文献既定指标与试验数据为依据开展全面验证。通过检测深度数值与现场剖开后裂缝真实状态进行比对,深度学习检测95%的准确率能够提供最为稳定可靠的深度数据,为后续裂缝修复方案制定提供精准的数据支撑。将检测数据接入有限元仿真模型,采用弹性模量

30000MPa、黏结强度5MPa、热膨胀系数 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 、固化时间7天等既定参数开展计算,验证检测结果对应力均匀分布、裂缝宽度控制、结构承载能力恢复等方面的提升作用。结合修复前后裂缝宽度变化与结构承载能力变化数据,进一步验证深度检测对材料选型、填充深度设计、施工工艺优化的实际指导价值,使强度恢复率、抗渗性、热稳定性、耐久性等关键指标均满足工程使用要求。验证过程全程采用文献试验与实测数据,不引入任何外部参数,形成可对比、可追溯、可复制的技术可靠性验证体系,为同类水泥混凝土路面裂缝深度检测与修复工程提供可直接借鉴的技术范式与应用参考。

5 结语

水泥混凝土路面裂缝深度检测技术的适用性直接决定病害识别精度与修复治理效果,现场环境、裂缝形态及技术匹配度均会对检测结果产生显著影响。构建完善的评价指标与量化流程,能够实现不同检测技术的科学对比与合理优选,深度学习检测技术在精度与效率方面具备明显优势,可适配工程现场标准化作业要求。经实际应用与可靠性验证,优选后的检测技术能够准确获取裂缝深度数据,为裂缝修复设计、施工工艺优化提供可靠支撑,有效提升路面结构耐久性与使用寿命,可为同类公路工程裂缝检测与处置提供可行技术参考。

参考文献:

- [1] 宋雄彬,段镇宇,王丽敏,等.混凝土裂缝深度超声法检测研究[J].广州建筑,2025,53(08):65-69.
- [2] 郭士礼,梁栋,张鸿彦,等.道路裂缝属性特征探地雷达检测方法综述[J].地球物理学进展,2025,40(05):2172-2186.
- [3] 李永全,姚雯波.基于曲线拟合法的超声波检测混凝土裂缝深度研究[J].工程与试验,2023,63(01):16-18.
- [4] 史云飞.冲击弹性波无损检测技术测试混凝土裂缝深度的试验研究[J].四川水泥,2024,(01):123-125.
- [5] 孟兆军,郇国旗,牛宏年.水泥混凝土路面裂缝检测与修复技术研究[J].中国新技术新产品,2025,(10):88-91.