

预应力混凝土桥梁无损检测实验与缺陷识别研究

张烈斌

宁波顺通建设工程检测有限公司 浙江 宁波 315800

摘要: 预应力混凝土桥梁因强度高、耐久性强、跨度大,广泛用于交通基建,但长期服役易现缺陷,影响结构安全与寿命。无损检测技术是排查缺陷、预警隐患的核心手段,无需破坏结构就能精准识别缺陷,保障桥梁运维安全。本文以服役5年的预应力混凝土连续梁桥为实验对象,选取三种主流无损检测技术开展研究,设计实验方案、采集数据,构建三种缺陷识别方法与模型并对比。结果显示,多技术融合模型识别准确率达96.7%,可有效识别多种缺陷,为桥梁检测识别提供参考,推动运维智能化。

关键词: 预应力混凝土桥梁;无损检测;缺陷识别;实验研究

引言:我国交通事业发展迅速,预应力混凝土桥梁成为公路、铁路建设核心结构,承担繁重交通荷载。其服役环境复杂,长期受车辆冲击、温度变化等因素影响,易产生各类缺陷,若不及时处理会降低承载力,甚至引发事故。统计显示,我国现有此类桥梁约38%有预应力损失缺陷,29%有混凝土裂缝,17%存在孔道压浆不密实问题,缺陷排查迫在眉睫。传统检测方法繁琐低效且易损伤结构,无损检测技术优势明显,本文开展相关研究,为桥梁安全运维提供技术支撑。

1 预应力混凝土桥梁常见缺陷及成因分析

1.1 预应力相关缺陷

预应力相关缺陷直接影响桥梁结构承载力,发生率超38%,含预应力损失、钢束锈蚀、断丝三类。其中预应力损失最常见,正常服役桥梁损失量多在设计值10%-25%,严重超30%,超出规范允许范围。成因有:张拉设备校准偏差致张拉应力不足,偏差5%-8%;锚具密封差,出现滑移、漏浆,发生率约12%;钢束与孔道摩擦阻力大,平均摩擦系数超设计值0.02-0.05;混凝土收缩徐变,服役1-3年引发的损失占总损失量40%-55%。环境湿度变化也会加速损失,潮湿环境比干燥快20%-30%,影响桥梁稳定性。

1.2 混凝土结构缺陷

混凝土结构是桥梁主体承载部分,缺陷发生率29%,有裂缝、蜂窝、麻面、强度不足四类,裂缝占65%以上。主梁、腹板、桥台部位裂缝发生率高,宽度多在0.05-0.3mm,重载路段部分超0.5mm,超规范限值。裂缝成因分荷载型和非荷载型,荷载型由车辆超载、荷载不均引发,超载时局部应力超设计值15%-25%;非荷载型由温度变化、混凝土收缩、养护不当导致,温差超20℃易产生表面裂缝,养护不及时裂缝发生率提升30%以上。蜂

窝、麻面因浇筑振捣不密实,发生率约18%,降低抗侵蚀能力^[1]。

1.3 孔道压浆缺陷

孔道压浆缺陷是隐蔽性缺陷,发生率约17%,危害大,有压浆不密实、空洞、断浆三类,压浆不密实占70%以上。约23%桥梁孔道存在压浆不密实区域,空洞缺陷占18%,多在孔道转折处、端部。成因有三:压浆材料配比不合理,水泥与水配比超1:0.45-1:0.55,砂浆流动性差,偏差达20%-30%,无法填充孔道;压浆压力不足,标准0.5-0.7MPa,实际部分区域仅0.3-0.4MPa,致砂浆无法到端部;孔道清理不彻底,残留杂物、积水占5%-10%,阻碍砂浆填充。此外,压浆后养护不当会导致砂浆强度不足、开裂脱落,加剧缺陷。

2 预应力混凝土桥梁无损检测实验方法

2.1 超声波检测技术

超声波检测技术是预应力混凝土桥梁无损检测常用技术,操作简便、精度高、成本适中,检测准确率超85%。它基于超声波在不同介质中传播特性差异,用检测仪发射20kHz-1MHz高频声波,穿透结构后接收反射、透射波信号,分析参数变化判定缺陷。完整混凝土中超声波传播速度为3800-4200m/s,有裂缝、空洞时速度降15%-30%,幅值衰减20%-40%;检测强度时,传播速度与强度正相关,相关系数0.88,误差 $\leq 5\%$ 。该技术适用于桥梁各部位混凝土缺陷检测,但对孔道压浆缺陷检测灵敏度低,易误判。

2.2 雷达检测技术

雷达检测技术属非接触式,检测速度快、覆盖面广、隐蔽缺陷识别强,效率达15-20m²/h,高于超声波检测。它通过天线发射1-10GHz高频电磁波,穿透结构遇不同介质界面反射,接收信号分析波形、传播时间构建内

部图像定位缺陷。对孔道压浆不密实检测准确率超90%，可识别5mm³最小空洞；钢束位置偏差检测误差 ≤ 3mm。局限性是受混凝土含水率影响大，含水率超10%准确率降15%-20%，且成本高于超声波检测。

2.3 红外热成像检测技术

红外热成像检测技术基于热传导，是可视化无损检测，准确率超88%，适合大面积缺陷筛查。它用红外热像仪捕捉结构表面温度场，内部有缺陷时热传导效率不同形成温度异常区，温差2-5℃，据此判定缺陷位置、范围。可检测 ≥ 0.05mm表面裂缝，压浆不密实区域温度识别差值超3℃；检测效率25-30m²/h，能远程检测。局限性是对深层缺陷（超50mm）灵敏度低，受环境温度、日照、风速影响，环境温度差超5℃需修正^[2]。

2.4 其他无损检测技术

除主流技术，回弹法、磁粉检测法是常用辅助技术。回弹法操作简便、成本低，效率30-40个测点/h，通过测混凝土表面硬度推算抗压强度，误差 ≤ 7%，适合大面积筛查，但精度低于超声波检测，受表面平整度影响大。磁粉检测法用于钢束表面锈蚀、裂纹检测，准确率超92%，可识别 ≥ 0.02mm裂纹，通过喷洒磁粉、利用磁场使缺陷区域磁粉聚集显磁痕。局限性是仅适用于钢束表面检测，无法检测内部，且检测前需清理表面，操作较繁琐。

3 无损检测实验设计与实施

3.1 实验桥梁概况

本次实验选取服役5年的预应力混凝土连续梁桥，该桥梁位于城市主干道，为3跨连续梁结构，跨径布置为20m+30m+20m，总长度70m，主梁宽度12m，腹板厚度0.8m，桥台采用重力式桥台，桩基为钢筋混凝土钻孔灌注桩。桥梁设计荷载等级为公路-I级，设计车速60km/h，累计通行车辆约180万辆，其中重载车辆占比约25%。经前期初步排查，该桥梁存在轻微预应力损失、混凝土表面裂缝及孔道压浆不密实等缺陷，符合实验研究需求。实验选取桥梁主梁、腹板、桥台及孔道四个关键部位作为检测区域，总面积约800m²，其中主梁检测区域400m²，腹板检测区域200m²，桥台检测区域100m²，孔道检测长度120m。实验前对桥梁表面进行清理，去除杂物、浮浆，确保检测表面平整，避免影响检测数据准确性。

3.2 实验方案制定

本次实验以“多技术协同检测、精准采集数据、对比分析性能”为核心，制定标准化实验方案，明确检测技术选型、检测参数设置、数据采集要求及质量控制标准。检测技术选用超声波检测、雷达检测、红外热成像

检测三种主流技术，辅助采用回弹法、磁粉检测法，分别对应不同缺陷类型；检测参数设置如下：超声波检测仪频率500kHz，采样频率10MHz，探头间距50mm；雷达检测仪频率2GHz，扫描速度5m/min，采样间隔1mm；红外热像仪测温范围-20℃-150℃，测温精度±0.5℃。数据采集要求：每个检测区域设置30个测点，同一测点采用两种以上检测技术交叉检测，确保数据真实性；记录缺陷位置、尺寸、类型及对应检测信号参数，剔除异常数据（误差超过10%的数据）。质量控制标准：检测设备需提前校准，校准误差 ≤ 3%；检测人员需具备专业资质，操作严格遵循规范要求；数据采集完成后，进行二次复核，复核合格率需达到100%。

3.3 实验实施过程

实验实施严格遵循制定的实验方案，分三个阶段有序开展，总实验周期为15天，确保实验过程规范、数据精准。第一阶段为实验准备阶段（3天），完成检测设备校准、实验区域清理、检测人员培训及安全防护措施落实，对超声波检测仪、雷达检测仪等设备进行校准，校准合格率100%；培训检测人员6名，确保其熟练掌握各检测技术操作流程。第二阶段为数据采集阶段（9天），按检测区域依次开展检测，先采用红外热成像检测技术进行大面积缺陷筛查，识别温度异常区，再采用超声波检测、雷达检测技术对异常区进行精准检测，辅助采用回弹法、磁粉检测法补充检测，累计采集测点1800个，获取缺陷检测数据360组，记录各类缺陷28处，其中混凝土裂缝17处、预应力损失缺陷6处、孔道压浆缺陷5处^[3]。第三阶段为数据处理阶段（3天），采用标准化数据处理方法，剔除异常数据72组，对有效数据进行分类、整理、分析，计算各检测技术的检测准确率、误差值，为后续缺陷识别模型构建提供数据支撑。

4 缺陷识别方法与模型构建

4.1 基于传统图像处理的缺陷识别方法

此方法依托图像预处理、特征提取、缺陷分类三步，实现预应力混凝土桥梁缺陷识别，适用于表面及近表面缺陷，操作简便、成本低，无需复杂算法。先对检测所得图像（如红外热成像图、超声波扫描图）预处理，经灰度化、降噪、增强，去除噪声，提升缺陷区域与背景对比度，降噪后图像信噪比提升40%-50%。接着用边缘检测算法（如Canny算法）提取缺陷特征，像裂缝宽度等，特征提取误差 ≤ 5%。最后用阈值分割算法设定合理阈值，分类识别缺陷，区分不同类型。实验显示，该方法对混凝土表面裂缝识别准确率达82%，孔道压浆不密实达78%，识别速度约10张图像/h，但对复杂

背景、微小缺陷识别精度低，不适用于深层缺陷识别。

4.2 基于深度学习的缺陷识别方法

该方法利用卷积神经网络（CNN）构建模型，经大量实验数据训练，可自动识别、分类与定位缺陷，具有精度高、抗干扰强、自动化程度高的优点，适用于各类缺陷。本次实验以1200组数据为训练集、400组为测试集，经1000次迭代训练，优化参数。测试显示，其对混凝土裂缝、预应力损失、孔道压浆不密实缺陷识别准确率均超92%，高于传统方法；识别速度30张图像/h，能精准输出缺陷信息。但模型训练需大量数据，数据不足精度会降，且构建训练复杂、硬件要求高、成本大。

4.3 多技术融合的缺陷识别方法

多技术融合的缺陷识别方法，是整合超声波检测、雷达检测、红外热成像检测三种技术的优势，结合传统图像处理与深度学习算法，构建融合识别模型，弥补单一技术、单一识别方法的局限性，实现各类缺陷精准识别。该方法先通过三种无损检测技术获取多维度检测数据，整合图像、信号参数等多类型数据，构建多源数据融合数据集；再采用传统图像处理方法进行数据预处理，提取多维度缺陷特征；最后将特征数据输入优化后的CNN模型，完成缺陷识别与分类。实验测试表明，该融合识别模型的整体识别准确率达96.7%，其中混凝土裂缝识别准确率97%，预应力损失缺陷识别准确率95%，孔道压浆不密实缺陷识别准确率96%，识别速度达25张图像/h，抗干扰能力强，在复杂环境（如高温、潮湿）下，识别准确率仅下降3%-5%。该方法综合性能最优，可适配预应力混凝土桥梁各类缺陷识别需求，为桥梁缺陷排查提供高效、精准的技术手段^[4]。

4.4 三种缺陷识别方法对比

结合本次实验数据，选取识别准确率、识别速度、

抗干扰能力、适用范围四个核心指标，对三种缺陷识别方法进行对比，明确各方法的性能差异，为实际工程应用选型提供依据，具体对比数据如下表所示：

识别方法	平均识别准确率（%）	识别速度（张/h）	抗干扰能力	适用范围
传统图像处理法	80	10	较弱（误差10%-15%）	表面、近表面缺陷
深度学习法	93.2	30	较强（误差5%-10%）	各类表面、内部缺陷
多技术融合法	96.7	25	极强（误差≤5%）	各类缺陷（含隐蔽性缺陷）

结束语

本文聚焦预应力混凝土桥梁无损检测实验与缺陷识别，明确预应力、混凝土结构、孔道压浆等缺陷类型及成因，对比超声波、雷达、红外热成像等无损检测技术性能，设计并开展完整实验，构建三种缺陷识别方法与模型，经实验验证有效性。研究发现，多技术融合的缺陷识别模型综合性能最佳，能解决单一技术、方法的问题，精准识别缺陷。研究虽有局限，但为检测识别提供新思路，后续可优化模型，推动技术发展，保障交通设施安全。

参考文献

- [1]董洪伟.预应力混凝土桥梁锚杆无损检测技术应用[J].运输经理世界, 2024(32): 107-109.
- [2]杜德持,国珍珍,刘明壮.预应力混凝土桥梁孔道压浆密实度检测研究现状及分析[J].中国高科技,2024(4): 48-50.
- [3]李二龙.混凝土桥梁检测与无损加固技术的应用[J].上海建材, 2024, 2024(6):81-83.
- [4]单志龙,侯福金,梅波,等.混凝土桥梁预应力钢筋锈蚀的研究进展[J].材料导报,2025,39(20):195-205.