

# 公路工程中道路桥梁的桩基施工检测技术分析

李 云

云南航安工程检测有限公司 云南 昆明 650501

**摘 要:** 桩基作为公路桥梁结构的关键承重构件,其施工质量直接关系到桥梁整体的安全性、耐久性和服役性能。随着我国交通基础设施建设规模不断扩大,对桩基施工质量控制提出了更高要求。桩基检测技术作为保障桩基工程质量的重要手段,在施工过程中发挥着不可替代的作用。本文系统梳理了当前公路工程中常用的桩基检测技术,包括低应变反射波法、高应变动力测试法、声波透射法、钻芯法以及静载试验等,深入分析了各类方法的基本原理、适用条件、技术优劣及应用。在此基础上,探讨了现有检测技术在实际应用中存在的问题,并对未来桩基检测技术的发展趋势进行了展望,旨在为提升公路桥梁桩基施工质量控制水平提供理论参考和技术支撑。

**关键词:** 公路工程; 桥梁桩基; 施工检测; 无损检测; 质量控制

## 引言

随着我国“交通强国”战略的深入推进,高速公路、国省干线及农村公路网络持续完善,桥梁工程作为公路交通体系中的关键节点,其建设数量和规模呈快速增长态势。桩基础因其承载力高、沉降小、适应性强等特点,被广泛应用于各类桥梁工程中,尤其在软土地基、深水区域或地质条件复杂的路段更为常见。然而,桩基属于隐蔽工程,一旦施工完成便难以直观检查其内部质量状况,若存在缩颈、断桩、离析、夹泥、桩底沉渣过厚等缺陷,将严重影响桥梁结构的整体安全性和使用寿命。因此,科学、准确、高效地开展桩基施工质量检测,成为保障桥梁工程安全运行的核心环节。近年来,随着传感技术、信号处理算法、人工智能等新兴技术的发展,桩基检测方法不断演进,从传统的破坏性检测逐步向高精度、高效率、智能化的无损或微损检测方向发展。然而,不同检测方法在适用范围、检测精度、成本效益等方面存在显著差异,如何根据具体工程条件选择合适的检测技术组合,是当前工程实践中亟需解决的问题。

## 1 桩基施工质量常见问题及检测必要性

### 1.1 桩基施工常见质量问题

在公路桥梁桩基施工过程中,受地质条件、施工工艺、材料质量、操作水平等多种因素影响,桩基极易出现各类质量问题。例如,在钻孔灌注桩施工中,若清孔不彻底,桩底易残留大量沉渣,导致有效嵌岩深度不足,严重削弱端承力;混凝土浇筑过程中若导管提拔过快或混凝土供应中断,可能形成断桩或夹泥层;而在软弱土层中成孔时,孔壁失稳可能导致局部缩颈甚至塌孔。此外,混凝土配合比控制不当、振捣不密实或养护不到位,也会造成桩身强度不足或内部蜂窝离析。钢筋笼在吊装

过程中若定位不准,还可能引起保护层厚度不足,加速钢筋锈蚀,影响结构耐久性。这些问题往往具有隐蔽性,若未通过有效检测及时发现,将在桥梁运营阶段逐渐显现,轻则引发不均匀沉降、结构开裂,重则可能导致灾难性事故。

### 1.2 桩基检测的必要性

鉴于桩基工程的高度隐蔽性及其对上部结构安全的决定性作用,开展系统、科学的桩基检测不仅是国家相关规范强制要求的验收程序,更是实现全过程质量控制的关键举措。通过检测,不仅可以验证桩基是否满足设计所要求的承载力与变形控制指标,还能全面评估桩身完整性,精准识别潜在缺陷的位置、形态与严重程度。这些信息对于判断桩基是否需要补强、加固乃至报废具有决定性意义<sup>[1]</sup>。同时,检测数据的积累也为优化后续类似工程的施工工艺提供了宝贵经验,有助于从源头上减少质量问题的发生。更重要的是,高质量的桩基检测能够显著降低桥梁全生命周期内的运维风险与维护成本,为公众出行安全和国家基础设施资产保值提供坚实保障。

## 2 常用桩基检测技术原理与应用

### 2.1 低应变反射波法

低应变反射波法是一种基于一维弹性杆波动理论的无损检测方法。其基本原理是在桩顶施加一个瞬态激振力(通常由手锤敲击产生),由此激发的应力波沿桩身向下传播。当波在传播过程中遇到桩身截面阻抗发生变化的界面——如缩颈、扩颈、裂缝、离析或桩底——部分波能量将发生反射并返回桩顶。安装在桩顶的加速度传感器接收这些反射信号,经放大、滤波和数字化处理后,通过分析反射波的到达时间、幅值和相位特征,即可推断桩身是否存在缺陷及其大致位置。该方法因其操作简便、

成本低廉、检测速度快,特别适用于对大批量桩基进行完整性普查。然而,其局限性也较为明显:一方面,由于高频成分在传播过程中衰减较快,该方法对深部缺陷的分辨率有限,尤其在长桩或大直径桩中效果不佳;另一方面,它无法提供桩基承载力的直接信息,且检测结果易受桩头处理质量、传感器耦合状态及激振方式等因素干扰。

## 2.2 高应变动力测试法

高应变动力测试法则通过在桩顶施加一个较大的冲击荷载来模拟桩的实际工作状态。具体而言,使用一台重量约为桩重1%至2%的重锤从一定高度自由下落,猛烈撞击桩顶,同时利用安装在桩侧的力传感器和速度传感器同步记录桩顶的力-时间曲线和速度-时间曲线。基于这些实测数据,结合桩-土相互作用模型,可采用CASE法进行快速估算,或通过更为精确的CAPWAP (CasePileWaveAnalysisProgram)反演分析,综合评估桩的竖向承载力及桩身完整性。相较于低应变法,高应变法不仅能定性判断缺陷,还能定量给出承载力值,因此在重要工程中具有较高价值<sup>[2]</sup>。其适用对象主要为预制桩和大直径灌注桩,尤其在港口、码头及大型桥梁基础中应用广泛。然而,该方法对设备要求较高,现场组织复杂,且在软土地区或超长桩中,由于土阻力发挥滞后,可能导致承载力低估。在某特大斜拉桥主墩桩基检测中,工程方采用高应变法对直径2.5米、长度60米的钻孔灌注桩进行测试,所得承载力结果与后续静载试验的偏差控制在8%以内,充分证明了其在特定条件下的可靠性与工程实用性。

## 2.3 声波透射法

声波透射法是一种精度较高的桩身完整性检测技术,尤其适用于大直径灌注桩的质量控制。该方法需在桩基施工前预先在钢筋笼内对称绑扎2至4根声测管,待混凝土浇筑完成并达到一定强度后,通过换能器在一根声测管中发射超声脉冲信号,另一根管中的接收换能器同步接收穿透桩身混凝土的声波。通过对声波在传播过程中的声速、波幅、主频及波形等参数进行系统分析,可以有效识别混凝土内部的不均匀区域、空洞、夹泥或离析等缺陷,并能较为准确地定位其空间位置。由于超声波在致密混凝土中传播速度快、衰减小,而在缺陷区域则表现为声速降低、波幅衰减显著,因此该方法具有较高的灵敏度和分辨率。其最大优势在于能够实现桩身横截面的“扫描式”检测,形成近似三维的缺陷分布图像。然而,该技术的前提是必须预埋声测管,这不仅增加了施工成本和工序复杂性,还对声测管的垂直度和平行度提

出了严格要求,否则将引入测量误差。在某跨海通道桥梁工程中,针对直径达3.0米的超大直径桩基,施工单位采用了四管声波透射法进行全面检测,成功在距桩顶28米深处识别出一圈环状夹泥层,为后续采取高压注浆补强措施提供了关键依据,充分体现了该方法在高风险、高要求工程中的不可替代性。

## 2.4 钻芯法

钻芯法是一种微损但直观可靠的桩基检测手段。其操作过程是使用金刚石钻头从已成型的桩身中垂直钻取连续的混凝土芯样,通过直接观察芯样的完整性、胶结状态、骨料分布均匀性以及是否存在蜂窝、孔洞、夹泥等现象,对桩身质量做出判断。同时,所取芯样还可送至实验室进行抗压强度试验,从而获得桩身混凝土的实际强度值。这种方法的重大优势在于结果真实、可信度高,常被用作其他无损检测方法判定结果的最终验证依据。然而,钻芯法也存在明显不足:首先,钻孔本身会对桩身结构造成局部损伤,虽属微损,但在关键受力部位仍需谨慎;其次,检测成本高、周期长,难以大规模应用;最重要的是,钻芯仅能反映钻孔路径上的局部情况,若缺陷恰好位于钻孔之外,则可能被遗漏,存在“以点代面”的风险。在某山区高速公路桥梁项目中,一根桩基经低应变法初步判定为Ⅲ类桩(存在明显缺陷),但因涉及废桩处理的重大决策,业主方要求进一步验证。随后采用钻芯法在疑似缺陷区域钻取芯样,结果显示虽有轻微离析,但整体胶结良好,未影响结构承载能力,最终避免了不必要的经济损失和工期延误,凸显了钻芯法在争议性判定中的仲裁作用。

## 2.5 静载试验

静载试验被公认为评估单桩竖向抗压承载力的“金标准”。其原理是通过液压千斤顶对桩顶施加逐级递增的竖向荷载,同时利用高精度位移传感器实时监测桩顶的沉降量,绘制出荷载-沉降(Q-s)曲线。通过分析该曲线的形态特征,如比例界限、极限荷载点及残余沉降等,可准确确定桩的极限承载力和工作性状。静载试验最接近桩在实际使用中的受力状态,因此其结果最具权威性。然而,该方法的缺点同样突出:设备庞大、反力装置(如堆载或锚桩)设置复杂、检测周期长(通常需数天甚至数周),且费用极其高昂,通常仅对代表性桩或地质条件复杂区域的关键桩进行抽检,抽检比例一般不超过总桩数的1%至2%<sup>[3]</sup>。尽管如此,在重大桥梁工程中,静载试验仍是不可或缺的终极验证手段。例如,在某长江大桥引桥桩基承载力验证中,最大加载值高达25,000千牛,通过完整的加载-卸载循环,不仅验证了设计承载力的安全

储备,还获取了宝贵的桩-土相互作用参数,为后续类似工程的设计优化提供了重要参考。

### 3 各类检测技术对比分析

在实际工程应用中,上述各类桩基检测技术各有侧重。

表1: 各类检测技术对比

检测方法	检测内容	是否破坏	成本	效率	精度	适用桩型
低应变法	完整性	否	低	高	中	所有(≤50m)
高应变法	承载力+完整性	否	中高	中	中高	预制桩、大直径灌注桩
声波透射法	完整性(三维定位)	否	中	中	高	大直径灌注桩(≥0.8m)
钻芯法	完整性+强度	微损	高	低	高	所有
静载试验	承载力	否	极高	极低	极高	所有(重点桩)

注:实际工程中常采用“低应变普查+声波/高应变普查+钻芯/静载验证”的组合策略。

### 4 当前桩基检测技术存在的问题

尽管桩基检测技术体系日趋成熟,但在工程实践中仍面临诸多挑战。首先,部分检测方法(尤其是动力测试类)的结果解释高度依赖工程师的个人经验,缺乏统一、量化的判识标准,容易导致主观偏差。其次,各类检测方法往往独立实施,数据孤岛现象严重,未能有效融合多源信息以构建更全面的桩基健康状态评估模型。再者,随着PHC管桩、钢-混组合桩、后压浆扩底桩等新型桩型的推广应用,现有检测理论和设备对其适配性不足,亟需针对性研究。此外,检测过程的智能化与自动化程度仍然较低,大量依赖人工操作与判读,不仅效率受限,也影响结果的一致性。最后,部分地方或行业标准更新滞后,未能及时吸纳人工智能、物联网等新技术成果,制约了先进检测方法的规范化推广与应用。

### 5 未来发展趋势

面向未来,桩基检测技术正朝着多源融合、智能判识、实时监控的方向加速演进。一方面,通过整合低应变、声波、电阻率成像、红外热成像等多种物理场数据,构建基于多源信息融合的桩基健康状态综合评估模型,有望显著提升缺陷识别的准确性与全面性。另一方面,人工智能技术,特别是深度学习算法,正在被广泛应用于检测信号的自动分析中。通过训练卷积神经网络(CNN)或长短期记忆网络(LSTM)对海量历史检测数据进行学习,可实现缺陷类型的自动分类与严重程度量化,大幅减少人为干预<sup>[4]</sup>。与此同时,物联网技术的发展使得在桩基施工阶段嵌入分布式光纤光栅或MEMS微型传感器成为可能,从而实现从“事后检测”向“全过程实时监测”的

范式转变。此外,基于声波透射或探地雷达数据的三维可视化重建技术,将使桩身内部缺陷的空间分布更加直观清晰。为支撑这些技术革新,加快制定涵盖新型桩型与智能检测方法的行业标准体系,已成为推动桩基检测技术高质量发展的当务之急。

### 6 结语

桩基作为公路桥梁工程的“根基”,其施工质量直接决定结构安全与服役寿命。当前,低应变法、高应变法、声波透射法、钻芯法及静载试验等检测技术已形成较为完整的体系,各有优势与适用场景。在实际工程中,应根据桩型、地质条件、工程重要性等因素,科学选择检测方法组合,实现“经济、高效、精准”的质量控制目标。未来,随着人工智能、物联网、大数据等技术的深度融合,桩基检测将朝着智能化、实时化、三维化方向发展。建议行业主管部门加快标准更新,科研机构加强多物理场耦合模型研究,施工单位提升检测人员专业素养,共同推动我国公路桥梁桩基检测技术水平迈向新高度,为交通基础设施高质量发展筑牢安全基石。

### 参考文献

- [1]陈恒,宣胜男.公路工程中道路桥梁的桩基施工检测技术[C]//广西生产力学会.新质生产力与科技发展学术研讨会论文集.宁波正信检测科技有限公司;宁波甬科交通工业有限公司,;2025:17-19.
- [2]高阳.公路工程中道路桥梁的桩基施工检测技术[J].江苏建材,2024,(04):124-125.
- [3]李晓光.公路工程中道路桥梁的桩基施工检测技术研究[J].运输经理世界,2021,(02):61-62.
- [4]宋新斌.公路工程中道路桥梁的桩基施工检测技术分析[J].运输经理世界,2020,(11):72-73.