桥梁桩基施工常见缺陷成因分析及无损检测技术应用

罗 曼

湖北长江路桥有限公司 湖北 武汉 430077

【摘 要】：桥梁钻孔灌注桩是核心隐蔽工程，施工流程繁琐、干扰因素多，施工中易出现各类质量问题，喀斯特 V 型沟谷特殊地质会加重桩基病害隐患。文章梳理桥梁桩基桩顶、桩身中部、桩底的典型施工缺陷，结合外部条件与现场作业行为分析缺陷产生原因。阐释低应变反射波法、声波透射法、高应变法三种桩基无损检测技术的原理、短板与适用场景，界定不同工况下检测技术选用标准与缺陷信号甄别方式。结合工程实况搭建缺陷桩基分级处置模式，形成包含成因分析、检测判别、整改加固的完整技术框架，可为岩溶地区桥梁桩基质量管控与缺陷处置提供技术参考

【关键词】：桥梁桩基；施工缺陷；成因分析；无损检测；质量管控

DOI:10.12417/2811-0528.26.21.033

引言

钻孔灌注桩适配性与承载性能出色，广泛用于桥梁基础施工。隐蔽化施工的工序衔接紧凑，地质与工艺条件易引发沉渣堆积、混凝土拌合不均、桩身断裂等问题，损伤桩基承载力与桥梁结构稳定性。喀斯特 V 型沟谷水文地质复杂，地下水活动、边坡扰动会增加桩基病害风险，留存安全隐患。文章依托特殊施工场景分析桩基缺陷诱因，对比各类无损检测技术应用特点，规整检测判定与工程处置流程，提升桥梁桩基整体施工质量。

1 桥梁桩基施工常见缺陷及成因分析

1.1 桩基典型施工缺陷类型

桥梁钻孔灌注桩为隐蔽工程，施工流程较长且工序衔接紧密，现场易出现各类实体质量缺陷。缺陷依位置分为桩顶、桩身中部与桩底三类，桩顶浮浆、夹泥问题，源于超灌失控、护筒拔除、桩头凿除引发的混凝土扰动[1]。桩身缩颈、夹泥、空洞、断桩等病害，由孔壁坍塌、导管渗漏、灌注中断导致。喀斯特 V 型沟谷地质更易出现桩底缺陷，集中表现为桩底沉渣超标、混凝土拌合不均。端承桩沉渣厚度规范限值为 5cm，超厚沉渣会削弱桩基端承能力。缺陷桩底缺少完整混凝土芯样，只剩松散碎石堆积体，叠加拌合不均问题会加大桩基沉降，致使竖向与水平承载力不满足设计要求。

1.2 外部环境因素致缺陷成因

地质及水文气象环境易诱发桩基施工病害，喀斯特 V 型沟谷谷底汇集地表水，雨季雨水汇入桩孔，水体浸泡削弱泥浆护壁强度，引发护壁破损脱落并形成桩底沉渣。沟谷风口强风会扰动下放的钢筋笼，使其剐蹭孔壁损伤护壁结构。场地软弱土层与风化裂隙发育，施工荷载与振动改变坡体应力，诱发孔壁坍塌淤积桩底。岩溶裂隙渗水持续渗入桩孔，稀释泥浆影响固壁效果，扰动混凝土配比致使骨料砂浆分离，产生离析病害。

1.3 施工人为因素致缺陷成因

施工管控与工艺不规范会引发桩基质量缺陷，二次清孔后混凝土灌注不及时，孔壁脱落渣土回落堆积，造成桩底沉渣超标。泥浆配制标准不足，稠度偏低会削弱固壁携渣能力，让渣土在灌注过程快速沉降[2]。混凝土灌注突发设备故障会导致作业中断，混凝土初凝后，导管提升不当、埋深不足或脱离液面，会形成断桩、桩身夹泥问题。导管密封失效会让泥浆渗入管内，打乱压力平衡，阻碍混凝土正常下落。混凝土配比未适配现场水环境，水灰比失衡会加重离析问题。现场直接提拉导管复工而不清孔，会给桩底遗留质量隐患。

2 桥梁桩基主要无损检测技术解析

2.1 低应变反射波检测技术

低应变反射波检测以锤击桩顶产生应力波，传感器采集桩身反射波形，依据波形与波速特征判定桩身混凝土质量。该检测操作简单、耗时少、成本低，多用于批量桩基普查。技术存在应用短板，各类桩身病害的反射信号辨识度低，缺陷类型不易区分，仅可判别桩身完整等级，不能测算桩基承载数据。

2.2 声波透射法检测技术

声波透射法预埋声测管于桩基内供超声探头穿行，探头发射脉冲，采集声学参数变化，依托声速、波幅、PSD 判据评估桩身截面质量，定位夹泥、蜂窝、离析、桩底沉渣的深度位置，反映缺陷空间与纵向分布，不受桩长约束，现场检测效率高。声测管预埋增加施工成本，检测依托声测线参数畸变与异常分布划分Ⅰ～Ⅳ类桩身完整性。工程案例中该方法识别桩底 13.5～14.0m 区段沉渣、离析缺陷，检测结论可经钻芯取样验证。

2.3 高应变法检测技术

高应变法使用自重占桩身重量 10%以上的重锤自由坠落撞击桩顶，实时采集桩顶受力与速度变化曲线，单次检测即可判定桩身完整状态、测算单桩竖向承载力。该技术融合低应变检测与静载试验的部分功能，检测成本处于两类检测方式之间。竖向承载力测算结果存在 10%左右偏差，检测精准度弱于静载试验，可补足低应变无法测定承载力的缺陷，适用于抽样检测评定缺陷桩基的承载状态。

3 无损检测技术工程应用与判别

3.1 检测方法的选型原则

桩基检测方案的选型可参考场地地质状况、桩基设计形式、施工体量及预埋构件配置。大面积桩基初步筛查可借助低应变法完成整体性普查工作。端承桩、大直径桩基及岩溶沟谷复杂场地，适配声波透射法，依托预埋声测管完成全桩断面扫描，有效识别桩底沉渣等隐蔽底部缺陷。普查筛查出的Ⅱ、Ⅲ类异常桩，可抽取代表性桩体通过高应变法核验竖向承载能力。钻芯法多用于结果验证而非大面积普查，针对无损检测锁定的缺陷区域开展复核工作，确认缺陷埋深与形态特征。多种检测技术搭配应用，可弥补单一检测方式的性能短板，减少检测偏差与漏检问题的出现。

3.2 桩基缺陷信号判别要点

检测信号分析需依托多项参数协同研判，单一指标无法判定桩身质量状态。声波透射检测除声速数据外，波幅与 PSD 曲线的波动状态同样具备参考价值。波形出现波幅衰减、周期延长、首波缺失或反向波动时，声速未出现明显波动也可判定桩身存在夹泥、蜂窝等病害。桩底位置声速与波幅同步回落、PSD 数值骤增，对应桩底沉渣及混凝土离析问题。缺陷测线的纵向分布形态与横向覆盖范围，可作为桩身完整性分级的判定依据[3]。低应变波形解析聚焦反射波相位特点，甄别桩身阻抗的变化形式。高应变数据解读结合场地地质资料，比对桩侧摩阻力与端阻力计算数值，区分波形异常源于桩身破损或地层受力变化，规避单参数判定带来的检测误差。

3.3 检测结果指导工程处置

桩基无损检测的完整性分级结果，是制定缺陷处置方案的关键依据。Ⅰ类桩质量完好，可直接开展后续施工；Ⅱ类桩仅存在轻微局部缺陷，结合承载力复核结果，可判定其直接使用的可行性。Ⅲ类桩缺陷问题显著，案例中桩底沉渣病害的Ⅲ类端承桩，经数值模拟验证，其沉降变形、竖向及水平承载力均不满足设计标准，无法直接投入使用，必须实施加固处理。依托声波透射法精准锁定桩底缺陷位置后，可针对性采用高压注浆、扩底加固、小管径钢管桩补强等处置工艺。Ⅳ类桩缺陷严重、加固难度及风险极高，必要时可作废重打。加固完成后，可利用既有预埋声测管复检，对比加固前后声学参数差异，评估修复效果，形成缺陷识别、工程处置、效果核验的完整闭环体系。

4 结语

本文系统梳理了桥梁钻孔灌注桩桩顶、桩身及桩底的典型施工缺陷，明确了岩溶特殊地质条件与现场施工不规范两大核心致病诱因。通过对比三类主流桩基无损检测技术的优劣特性与适用工况，确立了差异化检测选型原则，提出多参数耦合的缺陷信号综合判别方法，有效降低了单一检测手段带来的误判风险。基于桩基完整性等级划分标准，构建了涵盖直接使用、评估复用、加固处置、作废重建的分级处置体系，形成“缺陷识别—精准处置—效果核验”的闭环质量管控模式。研究成果可有效解决岩溶沟谷区域桩基隐蔽缺陷识别困难、处置针对性不足的工程难题，对优化区域桥梁桩基施工质量、保障基础结构长期运营安全具有一定的工程参考价值。

参考文献：

[1] 周永强.桥梁桩基缺陷的成因及加固措施研究[J].建筑机械,2025,(7):306-308.

[2] 刘旭.桥梁桩基的施工缺陷及桩基加固方案对比分析[J].四川水泥,2024,(10):175-177.

[3] 潘天睿.施工过程中桥梁桩基缺陷成因分析及加固方案研究[D].贵州大学,2021.