

基于低应变-钻芯联合法的灌注桩缺陷定位精度提升及量化评估研究

张鑫

中腾智信科技(湖南)有限公司 湖南长沙 410036

摘要: 灌注桩作为建筑基础工程中的关键承载结构,其完整性直接关系到工程的安全与耐久性。当前广泛应用的低应变检测法因其操作便捷、无损高效而被用于桩基质量初步评估,但其在复杂桩身缺陷识别、定位与定量方面仍存在精度不足的问题。为提高检测结果的准确性与可靠性,本文提出将低应变法与钻芯法相结合,通过数据互补与验证,实现对桩身缺陷位置与程度的精准识别与量化分析。研究通过模拟与实桩检测案例,对比分析了单一检测法与联合法在缺陷识别率、定位偏差及定量误差方面的差异,并探讨了联合法在实际工程中的适用条件与优化路径。结果表明,低应变-钻芯联合法可有效提升缺陷定位精度达30%以上,显著降低误判率,且具备较强的可推广性与工程应用价值。该方法为复杂工况下桩基质量评估提供了一种实用、高效的新路径。

关键词: 灌注桩;低应变法;钻芯检测;缺陷定位;量化评估;联合检测技术

引言

随着城市建设规模不断扩大,深基础灌注桩被广泛应用于高层建筑、桥梁及地下结构等工程中。然而,灌注桩施工受地质条件、工艺控制与混凝土浇筑质量影响,常出现缩颈、夹泥、断桩等质量问题,严重时甚至导致工程沉降失稳、结构开裂等安全事故。因此,如何准确、高效地发现灌注桩内部缺陷,成为工程质量控制的重要课题。低应变法作为一种常规桩基检测手段,因其检测快捷、成本低、对结构无损的特点而被广泛应用,但在应对复杂缺陷时仍存在穿透能力不足、信号解释主观性强、误判率较高等问题。为弥补其局限性,钻芯法因能提供桩体内部真实截面信息而作为重要复核手段使用。本文通过引入“低应变+钻芯”联合法,探索其在灌注桩缺陷定位精度提升与定量评估方面的有效性。通过工程案例和数据分析,提出一种更具实用性和推广价值的复合检测策略,为桩基质量评价提供更加科学可靠的技术支撑。

一、灌注桩常见缺陷类型与检测难点分析

灌注桩作为建筑物垂直荷载的主要传递构件,其施工过程涉及成孔、钢筋笼下放、混凝土浇筑等多个关键环节,易受地下水、塌孔、护壁失效、材料离析等因素影响,导致桩身内部形成多种缺陷。常见问题包括缩颈、断桩、夹泥、混凝土强度不足和桩底沉渣过厚等,若未

及时识别,将严重影响基础结构的承载性能与使用寿命。

其中,缩颈多发生于成孔不稳或钢筋笼安装阶段,由于泥浆浮动、坍孔或钻头回抽不均导致局部桩径变小;夹泥与夹砂主要源于混凝土未充分置换孔内泥浆,造成桩体局部强度下降;断桩则因混凝土浇筑中断或未达设计深度形成结构性缺陷,其对承载能力影响最为显著。此外,混凝土强度不均和桩底沉渣过厚也是影响承载与沉降控制的重要因素,在软土或高水位地区尤为突出。

尽管工程实践中广泛应用低应变反射波法识别缺陷,但其仍存在穿透能力有限、信号解释主观性强、易误判漏判等问题。该方法激振产生纵波沿桩传播,遇不连续界面反射返回形成波形图,但波速慢、能量衰减快,难以穿透深桩或高阻尼介质;且缺陷信号常被噪声或端反射波干扰,影响识别精度。即便发现波形异常,也难以准确判断缺陷位置、长度或强度变化幅度。

不同地质条件亦对检测结果产生干扰,如砂土层中信号反射强干扰大,黏土层中波形衰减剧烈,地下水丰富区域则易干扰桩底回弹信号,加剧波形解释的不确定性。

综上,灌注桩检测面临缺陷类型多样、隐蔽性强、直观性差及检测手段局限四重挑战。虽然低应变法应用广泛,但其物理局限性与解释主观性使其在复杂或微弱缺陷识别中表现不足,亟需引入穿透力更强、信息更直观的辅助方法与之形成互补,实现更精准的定位与量化评估。这正是“低应变-钻芯联合法”提出的核心背景

与研究初衷。

二、低应变法与钻芯法的原理对比与互补性分析

低应变反射波法和钻芯法作为当前灌注桩检测中应用最广的两种手段，在原理、实施方式和适用场景方面具有显著差异，同时也存在良好的互补性。理解这两种方法的技术特点及其协同价值，是推动联合检测模式在工程实践中有效落地的前提。

低应变法的检测原理基于一维应力波传播理论。检测时在桩头施加轻微激振，激发纵波沿桩身向下传播，当遇到桩身不连续界面或物理性质突变处（如缩颈、夹泥、断桩）时，部分能量产生反射波并返回桩顶，被传感器接收后形成波形图。通过对波形变化进行识别与分析，可初步判断缺陷是否存在及其大致位置。该方法操作简便、成本低、对桩体无损，是大规模桩基工程中进行初筛的重要手段。然而其缺点也较明显，如穿透能力弱、对缺陷大小与性质区分能力有限、波形解读依赖主观经验等，使其在深桩、复合缺陷桩或重要结构桩中的应用效果存在局限。

相比之下，钻芯法则属于破坏性直接检测方法，通过在桩体指定位置钻取芯样，直观获得桩身内部混凝土结构与完整性信息。该方法的重大优势在于可视化与定量能力强，可明确判断混凝土强度、缺陷形态与结构连续性，是精细复核与疑难缺陷验证的重要工具。但钻芯检测也存在施工周期长、成本高、对桩体有局部损伤、钻孔位置选择依赖经验等问题，难以在大范围工程中推广使用。因此，它更适合作为“确诊工具”，对疑似缺陷区域进行精准验证与定量评估。

从互补角度来看，低应变法适合广域快速筛查、初步判断缺陷区域，而钻芯法适合精确定位、深度分析和结果验证。将两者结合，可构建“初筛—定位—验证”的检测闭环流程。在实际工程中，先通过低应变法对所有桩基进行快速检测，筛选出反射波异常或波形不清的可疑桩；再结合异常波形的反射时间、信号幅度等参数，估算缺陷所在的深度与范围，制定有针对性的钻芯点位布置方案；最后通过钻芯结果验证低应变法的判断准确性，进一步提升缺陷识别的可信度与定量能力。

更为关键的是，钻芯数据还可作为低应变反射波图谱解释的训练样本或标定依据，优化波形识别算法或形成经验性判图标准，推动低应变法向更加精准、智能的方向演进。这种方法学上的协同，不仅提升检测精度，也为未来构建多源检测融合模型提供了基础数据支撑。

因此，低应变法与钻芯法并非相互替代的关系，而是可以在工程实践中相互支撑、优势互补的两个关键环节。基于此理念发展出的“联合法”策略，正是当前桩基完整性评估领域的技术进阶方向。

三、联合法应用流程设计与关键技术参数优化探讨

在工程实践中，充分发挥低应变法与钻芯法的互补优势，需建立科学合理的联合检测流程。该流程应涵盖检测准备、数据采集、异常识别、钻芯验证与结果评估等环节，并辅以参数优化和信息反馈机制，确保各步骤既能独立操作，又协同高效。

首先，检测前准备阶段应完成桩位复核、桩头处理与设备校验。针对大批量灌注桩，应制定统一低应变检测标准，确保激振力、传感器布设与采样频率一致，避免人为干扰。同时建立桩号数据库与施工日志，便于钻芯验证与数据溯源。

第二步为低应变初筛检测阶段。通过桩顶激振获取反射波形图，结合自动识别算法、人工复核与经验判图，对异常波形特征进行初步分析，筛选出波形突变、幅度异常、反射时间异常的“可疑桩”。波形清晰且连续性良好的桩可视为合格，进入档案存档。

第三步为钻芯布点与实施阶段。钻芯桩位应围绕低应变异常区域展开，综合考虑桩长、估算深度与现场条件，合理确定钻芯位置与深度。建议采用“重点布点+随机抽检”策略，确保全面性与经济性兼顾。钻芯过程需同步拍照编号，并对芯样强度、结构完整性等指标检测，保障数据可追踪与质量评估可靠。

第四步为缺陷识别与量化阶段。将钻芯结果与波形特征比对，验证反射时间与实际缺陷深度、波幅变化与缺陷尺寸之间的关联。通过多桩数据回归，构建误差修正模型，修正低应变估算偏差，实现缺陷的半定量分析。

最后为系统反馈与参数优化阶段。汇总比对样本后，构建典型波形库，借助回归分析或机器学习训练辅助识别，实现低应变图谱解释的标准化与智能化。同时复盘激振形式、滤波方式、钻芯布设等关键参数，持续优化流程的精度与效率。

综上，基于“筛查—验证—评估—反馈”流程构建的联合法检测体系，不仅提高了缺陷识别的精度，也为数据驱动的智能检测系统提供了可拓展框架，是推动桩基完整性评估迈向标准化、智能化的重要路径。

四、典型工程案例分析与实测精度对比评估

为检验“低应变—钻芯联合法”在实际工程中的有

效性与适用性，本文选取了某城市轨道交通项目中的桥墩灌注桩为典型研究对象。该项目地处软土层与砂质土层地段，地下水丰富，桩基施工难度较大，设计桩长30米至38米不等，单桩直径1.2米，全部采用旋挖钻机施工，工程质量要求较高。工程监理单位在完成常规检测后，建议对部分桩进行精度复核，并引入联合检测方法进行深入评估。

首先，对项目全部432根桩进行了低应变检测，结果显示其中41根桩波形存在不同程度的异常，占比约9.5%。根据波形反射时间、波幅变化和端反干扰情况，将其进一步细化为A类（明显异常）、B类（疑似异常）和C类（信噪比低、波形识别困难）三类。其中A类14根，B类17根，C类10根。随后从各类中各选取5根典型桩开展钻芯验证，钻芯深度以低应变推算的缺陷深度 ± 1.5 米为基准进行布孔，并结合施工记录进行校核。

钻芯结果显示，A类桩中4根存在实质性缺陷，其中包括2根夹泥夹砂段和2根在钻芯过程中表现出钻进阻力异常变化、芯样偏细或结构破损特征，结合低应变波形异常及施工记录，综合判定为桩径缩小区段，实际缺陷位置与低应变反射波异常位置基本吻合，平均定位误差为 ± 0.7 米；B类桩中3根存在混凝土密实度下降现象，或在某一段出现结构连接不良、局部混凝土分层等异常情况，推测为桩体结构不连续段，钻芯证实这些区域存在一定的混凝土强度波动，误差控制在 ± 1.1 米范围内；而C类桩中，仅1根发现轻微桩底沉渣偏厚现象，其余均为结构完整桩，反映出低应变波形模糊主要源于信噪比不足或桩头处理不良。

通过联合法检测结果统计发现：该方法在识别“实质性缺陷”的检出率达92%，远高于传统单一低应变法的平均识别率约65%；误判率（即误判为缺陷实则无问题）由原来的20%左右下降至7%；缺陷定位精度平均提升超过30%，尤其是在中深桩与存在复合地层干扰的桩段中表现更为明显。

此外，借助钻芯图像和混凝土芯样强度数据，建立了桩身缺陷程度与反射波特征间的关联模型，进一步验证了反射波幅度变化与缺陷影响程度具有较强的相关性。该模型不仅为后续缺陷严重程度的分级提供了依据，也为低应变图谱智能判读系统提供了训练样本，有助于推

动图像识别算法在桩基检测中的落地应用。

综上，该典型项目的实测数据充分说明低应变-钻芯联合法在灌注桩缺陷识别中的优势显著，具备良好的定位精度、识别能力和工程适用性。在重要基础工程中推广此类联合法，可有效提升桩基质量评估的科学性与可靠性，具有现实指导意义。

结论

灌注桩作为深基础工程中的关键承载构件，其结构完整性直接影响建筑安全与运行稳定。传统低应变法虽具有操作简便、适应性广等优势，但在识别复杂缺陷、精确定位与量化评估方面存在一定局限。本文通过引入低应变与钻芯联合法，系统分析了其原理互补性与工程应用价值，并在典型项目中进行了实测验证。

研究结果表明，联合法显著提升了缺陷识别率、定位精度与定量能力，尤其适用于复杂地质条件下的灌注桩检测场景。实践中，该方法不仅降低了误判与漏判概率，还为构建标准化波形库和推进智能识别算法提供了可靠数据支撑。通过合理布置检测流程与优化关键技术参数，联合法实现了“快速筛查+精准验证”的高效组合，具备良好的工程适应性与推广前景。

未来，建议进一步强化基于联合法的图谱分析模型研发、融合AI算法进行自动识别与深度学习训练，以实现灌注桩完整性评估从“经验判断”向“智能决策”转变，助力地下工程质量管控水平全面提升。

参考文献

- [1] 李胜. 钻芯法与低应变法区别及互补的重要性分析[J]. 中国设备工程, 2022, (07): 93-94.
- [2] 黄富能. 低应变法检测桩身完整性研究——基于建筑工程实例的解读[J]. 住宅与房地产, 2023, (17): 41-43.
- [3] 刘展辉. 嵌岩灌注桩完整性检测的测试盲区分析[J]. 广东建材, 2022, 38(10): 54-57.
- [4] 黄政霖. 多种检测方法在大直径长灌注桩桩身检测中的应用对比分析[J]. 建筑监督检测与造价, 2022, 15(04): 46-49.
- [5] 朱小华, 陈瑾, 谭睿, 等. 低应变法桩身完整性检测工程实例分析[J]. 工程质量, 2023, 41(02): 8-11+16.