

基于无损检测技术的岩土工程桩基缺陷识别与评估研究

黄宇

浙江中岩工程技术研究有限公司 浙江杭州 310015

摘要: 岩土工程桩基作为建筑结构的关键承重组件,其质量缺陷可能引发安全隐患。探讨无损检测技术在桩基缺陷识别中的应用,重点分析超声波检测、声波透射法、反射波法等主流方法。无损检测技术利用声波、电磁波等物理信号在桩体中的传播特性,通过反射、透射或衰减变化评估内部缺陷。其核心优势在于非破坏性、高精度及可重复性,适用于各类桩基材料。

关键词: 无损检测;桩基缺陷;超声波检测;声波透射法;反射波法

岩土工程桩基的完整性直接影响建筑安全,传统检测方法如钻芯法存在破坏性、成本高且效率低等问题。无损检测技术(NDT)通过物理波响应分析桩体内部特性,避免结构损伤,成为现代工程的首选方案。

一、桩基缺陷类型与成因

(一) 桩基缺陷的主要类型

无损检测(如低应变、高应变法)常发现以下缺陷:桩身缺陷:包括混凝土离析、截面缩小、夹泥或空洞等。例如,检测信号显示桩身浅部或中部反射波异常,可能对混凝土质量不均或局部缺失。桩底缺陷:主要表现为沉渣过厚或桩端持力层未充分压实,导致桩底反射信号异常(如端阻力反射弱)。桩侧缺陷:如泥皮过厚或桩周土体扰动,影响桩土间摩擦力,常通过侧阻力波反射异常体现。

(二) 缺陷的成因分析

缺陷多源于施工过程中的操作不当或地质条件变化:桩身缺陷成因:混凝土浇筑时超灌不足或浮浆控制不严,导致桩顶夹泥;水下灌注中导管气密性差或拔管过快,可能引发断桩或离析。钢筋笼下放困难(如坍塌度不当或笼体设计不合理)会导致局部混凝土包裹不全。桩底缺陷成因:清孔不彻底使沉渣残留,降低桩端承载力;地质条件差(如局部塌孔)时,混凝土翻浆受阻形成缺陷。桩侧缺陷成因:泥皮过厚或桩周土体扰动减弱了侧摩阻力,常见于软土地基或成孔扰动较大的情况。

(三) 无损检测的作用与局限

无损检测能快速识别缺陷位置和类型(如通过反射波信号判断桩身完整性),但对复杂缺陷(如深层裂隙)需结合钻芯法或静载试验验证。检测结果异常时(如嵌

岩桩桩底同向反射强烈),应进一步分析以避免误判。若需具体处理措施,可根据缺陷类型采用注浆、补桩或纠偏等方法,但需以检测数据为依据。

二、无损检测技术原理与方法

(一) 基本原理

岩土工程桩基的无损检测技术通过物理方法评估桩身完整性,避免破坏结构,其核心原理基于应力波传播、声波特性及阻抗变化分析。以下是主要方法的理论基础:低应变反射波法,基本原理:通过小锤轻击桩顶产生瞬态应力波,波在桩身传播时遇到缺陷(如裂缝、夹泥)或桩底界面会发生反射^[1]。传感器捕捉反射信号,分析其幅值、相位及时程曲线,判定阻抗变化位置及缺陷性质。关键机制:缺陷处波阻抗差异导致反射系数变化,若桩身均匀,反射信号弱;存在缩颈或空洞时,阻抗减小引发负向反射;扩径则产生正向反射。声波透射法,基本原理:在桩内预埋声测管,发射超声波穿过混凝土,接收探头捕获透射波。缺陷(如离析、蜂窝)会改变声速、波幅及频率,通过分析参数异常定位缺陷范围和程度。关键机制:超声波遇缺陷发生绕射、折射和衰减,声时延长或波幅骤降提示不连续区,结合多剖面数据可三维成像缺陷。高应变法,基本原理:重锤冲击桩顶产生高能量应力波,穿透桩身至深层。通过监测桩顶力与速度响应,结合波动方程反演,评估桩身完整性及承载力。关键机制:深层缺陷(如断桩)或桩底沉渣会显著改变应力波传播路径,能量衰减特性反映缺陷对结构承载力的影响。声呐探测法(岩溶地区适用),基本原理:针对复杂地质,声呐探头发射高频声波穿透桩底岩层,溶洞或软弱夹层因波阻抗差异产生特征反射。多

接收器捕获回波，结合三维定位解析持力层完整性。关键机制：利用泥浆耦合增强声波传递，溶洞界面反射信号强度与岩体弹性模量直接相关，实现快速无损评估。

（二）常用方法

（1）超声波检测：常用超声波检测方法，超声波检测在桩基工程中主要有三种方法，适用于不同场景：桩内单孔透射法适用于仅有一个声测管通道的特殊情况，如钻孔取芯后需补充检测芯样周围混凝土质量。该方法将换能器置于同一孔中，通过隔声材料隔离或使用专用一发双收换能器，使超声波沿孔壁混凝土表层滑行后返回接收端。其优势在于操作简便，但需注意钢质套管会干扰声波绕行，因此不适用于含套管的孔道。桩外单孔透射法，当桩上部结构已施工或桩内无通道时，可在桩外紧贴桩边的土层中钻孔作为检测通道。发射换能器置于桩顶，接收换能器从外部孔中自上而下移动，声波穿过桩身混凝土与土层界面后进入接收端。该方法可检测夹层、断桩等缺陷，但因超声波在土中衰减快，有效检测深度有限，且精度较低。多孔透射法（平测法、斜测法、扇形扫测法），平测法：发射和接收换能器置于同一高度，沿声测管同步提升，逐点检测声学参数，适用于桩身缺陷的普查。斜测法：换能器保持一定高差同步提升，能更有效探测特定方向的缺陷，如倾斜裂缝或局部离析区。扇形扫测法：固定一个换能器，另一个在垂直方向移动，形成扇形扫描，用于精细定位缺陷范围，尤其在桩顶或桩底区域受限时适用。多孔透射法通过综合分析声速、波幅和波形频率，可提高缺陷识别的准确性，避免单一参数误判。方法选择与适用性，选择方法需考虑桩基尺寸、施工条件及缺陷类型。例如，大直径桩（>1500mm）通常预埋多根声测管，优先采用多孔透射法；而小直径桩或特殊场景（如外部钻孔）可选用单孔法。斜测法和扇形扫测法常用于缺陷加密检测，通过缩小小采样间距（如10cm）提升分辨率。实际应用中，需结合现场条件（如声测管通畅性、耦合剂使用）和数据分析技术（如PSD数值判据）以优化评估结果。

三、缺陷识别与评估流程

（一）现场检测要点

检测前准备，资料收集：先拿到工程地质资料、施工记录、设计图，明确检测目的和要求。现场处理：清理桩头浮浆、杂质，打磨平整激振点和传感器安装位置，减少干扰。设备调试：检查仪器性能，按规范安装，比如声测管要用丝扣或套管焊接，确保数据可靠。检测方

法选择，低应变检测法：用震击桩顶，分析反射波判断桩身完整性，适合一般高度桩基。高应变检测法：重锤冲击桩顶，通过应力波测承载力，但桩长有限制。声波透射法：埋设声测管，用超声波测声速和波幅，准确率高，适合大直径桩。现场操作要点，设备安装：传感器和激振点要平整，声测管连接牢固，避免数据失真。数据采集：按规范操作仪器，记录波形，注意环境干扰。时间控制：低应变和声波法要求混凝土强度达设计70%且 $\geq 15\text{MPa}$ ，一般14天左右。数据分析与评估，波形分析：看反射波特征，判断缺陷位置和类型。数据对比：同工程桩数据综合比对，提升结果准确性。重复检测：必要时加密检测，确保数据可靠。注意事项，方法适用性：高应变法不适用于长桩，声波法需预埋声测管。环境控制：减少现场振动、电磁干扰，保证数据质量。

（二）数据分析与验证

数据分析流程，数据预处理，数据清洗：剔除异常值、填补缺失数据，确保数据集完整性。例如，通过插值法处理传感器缺失的声波信号。标准化处理：统一不同检测方法的单位（如声速单位为m/s，波幅单位为dB），消除量纲影响。去重与对齐：合并多源数据（如超声波、声波透射法），确保时间序列和空间位置的一致性。缺陷特征提取，声学参数分析：利用超声波检测数据，提取声时、声速、波幅和主频等参数。例如，声速降低可能暗示混凝土内部裂缝或空洞。波形与频谱分析：通过反射波法识别缺陷反射信号，分析波形畸变和能量衰减特征。浅部缺陷常表现为多次反射波，而深部缺陷则显示为单一反射信号^[2]。多参数融合：结合声场阴影区重叠法，定位缺陷位置并评估其范围。例如，声波透射法通过多根声测管的交叉扫描，精确定位缺陷区域。缺陷分类与评估，完整性分级：根据参数变化程度，将桩基分为完整（I类）、轻微缺陷（II类）、中等缺陷（III类）和严重缺陷（IV类）。例如，声速显著下降且波幅衰减超过50%可能判定为III类缺陷。缺陷性质推断：通过波形特征区分缺陷类型（如裂缝、离析或缩颈）。多次反射波通常指示浅部断裂，而多层反射则暗示多处缺陷。承载力关联分析：结合高应变法数据，评估缺陷对竖向抗压承载力的影响。例如，深部缺陷可能显著降低桩基承载能力。验证方法，感官验证法，视觉检查：桩头处理后观察混凝土面完整性，排除浮浆或裂缝干扰。例如，凿除浮浆层可避免浅部信号畸变导致的误判。听觉辨识：敲击桩头，通过声音差异（如“空鼓”声）辅助识别浅

部缺陷。适用于低应变法的盲区验证。开挖验证法，适用场景：针对桩顶以下3m内的浅部缺陷（如缩颈或断裂）。例如，基坑开挖后直接凿除缺陷段，验证检测结果准确性。技术要点：确保开挖深度与检测缺陷位置一致，并同步检测桩身垂直度。钻芯法验证，核心取样：在疑似缺陷区域钻取混凝土芯样，通过实验室测试验证强度与完整性。例如，芯样强度低于设计值可确认缺陷存在。局限性：微破损特性可能影响桩基结构，需谨慎选择取样位置。多方法交叉验证，数据一致性检查：对比超声波、声波透射法和反射波法的结果，确保缺陷位置和性质的一致性。例如，声速异常区域在三种方法中均显示缺陷信号。历史数据对比：参考同类工程的历史检测报告，评估当前数据的合理性。工程应用要点，检测时机选择：混凝土强度需达到设计值的70%以上（通常约14天龄期），以确保数据可靠性。仪器校准：检测前验证传感器精度和系统延时，避免安装误差导致的数据偏差。综合判断：单一参数易产生误判，需结合多参数分析和地质资料，排除土层波阻抗变化等干扰因素。通过上述流程，无损检测技术可高效识别桩基缺陷，为岩土工程提供科学评估依据，确保结构安全性与耐久性。

四、工程应用案例

（一）案例背景

某6层住宅楼采用预应力管桩，地下室开挖后发现部分桩体倾斜，怀疑存在桩身缺陷。工程地质以粉质黏土和淤泥为主，易引发施工质量问题。

（二）检测过程

方法选择：采用低应变反射波法进行完整性普查，结合超声波透射法对异常桩精确定位。操作细节：在桩顶安装传感器，用重锤敲击激发应力波。通过接收反射波形，分析桩底和缺陷界面的信号变化。例如，波形周期性振荡可能指示护壁接壤处干扰，需凿除验证。

（三）缺陷识别与评估

波形分析：部分桩动测曲线显示浅部缺陷反射，但凿除后未发现混凝土异常，最终确认为护壁结构干扰。另一案例中，竖向裂纹导致波形凌乱，经抽芯取样验证为爆破施工所致。综合评估：根据声速和波幅变化，将桩身完整性分为四类：完整、轻微缺陷、明显缺陷和严重缺陷。例如，某桩在6.3m处声速显著降低，评级为严重缺陷，需全面加固。

（四）处理效果

修复措施：对缺陷桩凿除2m后重测，波形恢复正常，桩底反射清晰。采用注浆填充裂纹，恢复承载能力。工程意义：通过无损检测及时发现并处理缺陷，避免了结构安全隐患，验证了多参数综合判断的有效性。

五、挑战与优化方向

（一）主要挑战

技术局限性，微小缺陷识别困难：低应变法对浅部缺陷敏感，但深部微小裂缝或均匀性不足易漏检；声波透射法在复杂缺陷（如夹泥与空洞并存）时区分度低。数据解读模糊性：声学参数异常阈值缺乏量化标准，导致完整性类别判定主观性强。操作复杂性，环境干扰：现场噪声或传感器耦合不良影响信号质量，需反复校准。多技术协同难度：综合应用不同方法时，数据融合与冲突解决机制不完善，增加分析复杂度。成本与效率平衡，设备与人力投入高：高精度传感器和专业操作人员需求提升检测成本，尤其在大型项目中。周期较长：声波透射法需预埋声测管，延长施工准备时间；低应变法虽快，但深部检测效率受限。

（二）优化方向

技术创新，智能识别算法：引入机器学习分析波形数据，自动识别缺陷模式，减少人为误判。多模态传感器融合：结合声波、电磁等传感技术，提升缺陷检测全面性和准确性。流程优化，标准化参数设置：建立声学参数异常临界值数据库，规范完整性分类标准。机器人辅助检测：开发爬壁式检测机器人，实现自动化数据采集，降低人力依赖并提升效率。管理改进，全过程质量控制：从设计到验收强化环节衔接，利用数字化平台实时监控检测数据。人员培训与认证：加强操作人员技能培训，确保技术规范执行一致性。

总之，无损检测技术为桩基缺陷识别提供了高效、经济的解决方案。未来研究应聚焦多技术融合与智能化分析，以应对岩土工程中的复杂缺陷场景。

参考文献

[1]戴恒, 廖有芳. 岩土工程领域的超声波透射法桩基检测技术研究[J/OL]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2025(1) [2025-01-01]. <https://www.cqvip.com/doc/journal/1000004285602>.