

# 常用桩基检测方法的配合应用

文 / 林柱坤 深圳市金众工程检验检测有限公司

**摘要：**桩基作为建筑工程中的重要隐蔽工程，其质量直接影响整体结构安全。单一检测方法受限于其原理与适用范围，难以全面、精准评估桩基质量，因此多种方法的配合应用成为行业发展趋势。本文系统分析常用桩基检测方法的技术原理、优势与局限，系统探讨其在工程实践中协同应用的策略，以“分类确定-分级筛查-精准定位-定量验证”的方法，通过工程案例验证多方法协同检测的可行性与优势。研究表明，科学选用检测方法组合可显著提升桩基质量评估的准确性与效率，为工程实践提供重要参考。

**关键词：**桩基检测；多方法协同；完整性；缺陷判定；承载力

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.19.033

## 引言

桩基工程在现代土木工程中占据着不可替代的核心地位。作为深埋于地下的隐蔽工程，桩基的施工质量无法通过常规手段直接观察与评判。任何潜在的缺陷都可能成为工程安全的重大隐患，其后果往往在结构使用后期才显现，修复代价极其高昂，甚至可能引发灾难性事故。长期以来，桩基检测技术不断发展，形成了多种基于不同物理原理的检测方法。然而，每一种检测方法都有其固有的技术特点和适用范围，也必然存在相应的局限性。因此，将多种检测技术结合应用，实现优势互补，已成为提升桩基质量控制效果的关键途径。

### 一、常用桩基检测方法概述

#### （一）低应变反射波法

**原理：**用手锤或力棒等小型冲击装置在桩顶施加低能量瞬态冲击（激振），产生以弹性纵波为主的应力波沿桩身向下传播。当波在传播过程中遇到桩身阻抗发生变化的界面时，将产生反射波。桩顶的传感器接收反射回的信号。通过分析反射波的到达时间、相位特征和相对幅值，推断桩身的完整性状况。**优点：**快速、经济、操作简便、无损、适用于大规模桩基快速普查、对桩底沉渣有一定识别能力。**局限：**随着深度增加，信号衰减，能量减弱，对深部缺陷的检测能力下降。对浅部轻微缺陷或渐变型缺陷（如缓慢缩颈）的分辨能力不足，容易漏判或误判。对于长径比（桩长/桩径）过大的桩，信号衰减严重，检测效果差。无法定量沉渣，容易受到地层干扰。对缺陷性质的判断（如区分缩颈与离析）主要依赖经验，定量评估缺陷程度（如缩颈率）精度不高。

#### （二）声波透射法

**原理：**在混凝土灌注桩中预埋平行声测管。检测时，将发射换能器和接收换能器分别置于同一剖面的两根声测管中，由发射换能器发射超声波脉冲，穿过两管之间的混凝土介质后被接收换能器接收。通过测量超声波在混凝土中的传播时间（声时）、首波幅值（波幅）、接收波主频（频率）等声学参数，并利用这些参数沿桩身深度方向的变化曲线，结合波形特征，综合判断桩身混凝土的均匀性、是否存在缺陷及其位置、范围和性质。**优点：**对桩身内部

缺陷的定位（深度、平面位置）、定性和定量（缺陷大小、性质）判断能力极强，是评价大直径灌注桩内部混凝土质量最有效的方法之一。对桩身内部缺陷的定位、定性和定量判断能力极强，是评价大直径灌注桩内部混凝土质量最有效的方法之一。**局限：**仅适用于灌注桩，必须在成桩前预埋声测管，且要求声测管平行、通畅、耦合良好（管中注满清水）。预埋管的质量（如管材、连接、绑扎）直接影响检测成败和效果。对未预埋管或管堵塞、严重倾斜的桩无法检测。对于底部沉渣无法检测。

#### （三）钻芯法

**原理：**利用工程钻机在桩身中钻取小直径（通常外径 $\Phi 101\text{mm}$ 左右）的混凝土芯样和桩底持力层岩土芯样。通过对取出的芯样进行观察、描述、测量（芯样连续性、完整性、混凝土胶结情况、骨料分布、有无夹泥、断桩、沉渣厚度等），并选取代表性芯样进行实验室抗压强度试验，从而直接、直观地评价桩身混凝土质量、桩长、桩底沉渣厚度以及桩端持力层的岩土性质和是否符合设计要求。**优点：**唯一能直观的检测桩长、混凝土强度、沉渣厚度、持力层性状的方法，兼检测局部桩身完整性。**局限：**只能检测局部位置，漏检率较高，局部破损，检测时间长，长径比大于30时钻孔容易偏出桩外。

#### （四）高应变动力检测法

**原理：**使用重锤对桩顶施加瞬态高能量冲击，使桩土体系产生显著的贯入度。在桩顶附近安装的力传感器和加速度传感器同步采集冲击过程中桩顶的力信号 $F(t)$ 和速度信号 $V(t)$ 。将实测信号进行拟合计算，根据阻抗变化（评估桩身完整性），并估算单桩的极限承载力。**优点：**试验时间较静载快且成本低，可提供承载力估算值。在测试承载力的同时，利用应力波反射和阻抗变化信息，能有效检测桩身明显的缺陷。**局限：**载力估算基于波动方程解的拟合，其精度受地质条件、桩型、锤击能量、传感器安装、参数选择、分析人员经验影响较大，需静载试验验证和校准。冲击能量大，波长较长，对桩身浅部、深部或轻微缺陷的分辨能力不如低应变和声波透射法。需要足够大的锤击能量和良好的桩头条件，对场地空间也有一定要求。

**(五) 静载试验法**

原理：在桩顶或桩侧通过反力装置施加接近或达到设计要求的竖向或水平荷载，实时量测桩顶在各级荷载作用下的沉降（或水平位移）随时间的变化规律，绘制图表。通过分析曲线的形态特征（如比例界限、极限荷载点、拐点）及相应的沉降控制标准（如陡降型、缓变型），直接判定单桩的竖向或水平抗压/抗拔极限承载力、承载力特征值以及桩土体系的变形特性。优点：最接近桩的实际工作状态，结果可靠，为规范公认方法。是验证和校准其他间接检测方法（如高应变法）结果的最重要依据。不仅能获得极限承载力，还能揭示桩-土体系的荷载传递机理、桩端阻力与桩侧摩阻力的发挥特性、桩的变形（沉降）特性。局限：反力装置的施工、运输、安装费用巨大，试验本身耗时。通常只能抽检极少数数量

的桩（通常为总桩数的1%且不少于3根），难以覆盖工程全部桩基。抽检结果能否代表整个工程的桩基质量，存在统计风险，尤其在地质条件复杂或施工质量离散性大的情况下。

**(六) 孔内摄像**

原理：孔内摄像是一种利用专门设计的摄像设备深入桩身预留孔或钻孔中，直接观测桩身混凝土内部状况、钢筋笼、桩底沉渣等情况的可视化检测技术。它提供了一种直观、高分辨率的内部缺陷检测手段。优点：裂缝识别精度高，直观呈现缺陷分布，可观测管桩接头有无脱开。局限：浑水环境需预处理，堵塞孔洞需通孔，只能观测孔洞部分，无法全面评估。孔内摄像通常不单独作为唯一判定依据，而是作为重要的补充和验证手段。

**二、六种桩基检测方法技术特点对比**

检测方法	核心检测对象	有效深度	缺陷定位精度	经济性	检测效率
低应变法	完整性普查	≤ 50m	中等	高（100-300元/根）	极高（3-5分钟/根）
声波透射法	完整性详查	>100m	高（≤ 10cm）	中（500-3000元/根+管材费，与桩长桩径相关）	高（20分钟）
钻芯法	桩长/强度/沉渣/持力层	≤ 100m	低（一孔之见）	低（约3000-20000元/根，与桩长相关）	低（1-2天/根）
静载试验	承载力	不受限	不适用	极低（2-15万元/根，与承载力特征值相关）	极低（3-10天/根）
高应变法	承载力+完整性	≤ 60m	中等	中-高（2000-10000元/根，与承载力相关）	中（1-2小时/根）
孔内摄像	裂缝可视化检测	不受限	高	中（2000元左右）	中（1小时/根）

**二、检测方法的配合应用策略**

**(一) “分类确定-分级筛查-精准定位-定量验证” 分层检测模式**

分类确定：应在工程施工前介入，根据检测目的、图纸及地质情况拟定检测方法及数量；

合理选择检测方法。通过两种或两种以上检测方法的相互补充、验证，能有效提高桩基检测结果判定的可靠性。

按桩类型分类：验收需要的预应力管桩（低应变、单桩竖向抗压静载、单桩竖向抗拔静载、孔内摄像）；

按桩受力分类：端承-摩擦桩此类以摩擦力为主的桩型需提高静载比例，可降低钻芯法比例；摩擦-端承桩此类桩型可提高钻芯法比例，同时降低静载比例；

对检测方法由影响的类型：对于桩身嵌岩比例大的桩，需考虑检测方法的精度及受到影响，例如低应变对于桩身嵌岩比例大的桩或者地层存在大量软硬夹层时，波形受到干扰大，准确度下降，此时宜采用超声法对桩

身完整性进行普查。

分级筛查：将检测过程视为一个信息逐步获取和深化的动态过程，一般认为，对于桩身完整性的精确度：钻芯法>声波透射法>低应变，经济性上也是同样排列。承载力：静载>高应变法>钻芯法（嵌岩桩取岩样抗压进行端承力计算）。在成桩后早期，采用快速、经济、覆盖面广的方法（主要是低应变法）对所有桩或大部分桩进行完整性初步普查，目的是快速识别可能存在较大缺陷（如断桩）的桩。

详查阶段：对疑似桩进行声波透射（预埋管桩）或高应变检测，精确定位缺陷；

验证阶段：对严重缺陷桩（III、IV类）或沉渣异常的桩进行钻芯取样，为处理方案提供依据；

承载力抽检：按规范比例（通常1%）进行静载试验，重要工程增至2%。

**(二) 方法组合推荐方案**

波形分析与声学成像互补：低应变法对浅部缺陷敏

感但深部信号衰减显著，而声波透射法通过多剖面扫描可精确定位深部缺陷。无损与有损验证互补：声波或低应变发现的疑似缺陷，可通过钻芯法直接观察混凝土状态并测定强度，避免误判。承载力与完整性关联：静载试验出现沉降异常时，需结合低应变/声波透射法、钻芯法辨析成因。对重要性较低的桩的低成本覆盖：以低应变、高应变法为主要检测手段，低成本的低应变进行普查，高应变进行深部缺陷检测及承载力推导，在必要的时候增加少量静载。

### （三）协同应用的方向

**提升评估的全面性与准确性：**整合不同方法针对桩基不同属性（完整性、承载力、材料强度、持力层）的检测信息，形成更完整的证据链，减少漏判和误判。例如，低应变普查发现疑点，用声波透射精确定位定性；高应变承载力估算存疑，用静载试验最终验证；钻芯验证可疑缺陷并检验混凝土强度。

**优化资源配置与成本效益：**以高效、低成本方法（如低应变）进行大面积普查筛选，锁定可疑目标或关键部位，再针对性地投入高成本、高精度方法（如静载、钻芯、详查声波）。避免对所有桩都采用昂贵方法，实现检测资源的最优配置。

**协同的逻辑推导：**若静载沉降异常且低应变/声波显示缺陷→缺陷可能是主因；若静载异常但完整性无问题→需排查持力层或土体问题（如补充地质钻探）；若完整性有缺陷但静载通过→评估缺陷位置是否影响长期耐久性（如腐蚀通道）。

**互补的原则：**空间维度的互补覆盖让完整性检测没有盲区，方法维度的互补让误判降低，性能维度的互补针对重点桩、有代表性的桩进行综合性能评估。

## 三、工程应用案例

### （一）分级筛查案例

某高层建筑项目，桩基主要为直径 800mm 灌注桩，设计承载力 5200kN。该类型桩数 453 根。普查阶段：低应变法检测全部 453 根桩，发现 16 根 III 类桩（3 根疑似缩颈，13 根嵌岩桩持力层正向反射）。详查阶段：对 16 根 III 类桩进行钻芯法复核，确认其中 11 根桩底沉渣在 300-800mm 之间。3 根桩身夹泥。承载力验证：随机选取 10 根（其中 3 根为注浆后的桩）桩进行高应变检测，结果均  $\geq 6000\text{kN}$ ；另选 5 根（其中 2 根为注浆后的桩）进行静载试验，实测承载力均满足设计要求。处理措施与效果：设计出具相应图纸对有沉渣及夹泥的桩进行洗孔注浆并进行低应变法、钻芯法、单桩竖向抗压静载逐项进行复测，13 根桩底有沉渣的桩以及 3 根桩身夹泥的桩经低应变法检测均为一二类桩。钻芯法检测结果均为一二类桩，2 根单桩竖向抗压静载桩均满足设计要求。



### （二）协同互补案例

某高层建筑项目，直径 2000mm 灌注桩，桩长 18-25m，声波透射法检测有 5 根桩为三四类桩，钻芯法检测未发现明显缺陷。普查阶段：声波透射法检测发现 12 根三四类桩。详查阶段：对 12 根三四类桩进行钻芯法复核，确认其中 7 根桩身有明显缺陷。另外 5 根无缺陷。协同验证：对 5 根桩先进行低应变法检测（辅助检测），发现在缺陷范围无明显反射波，声波透射法声测线明显确实，考虑为声测管握裹性不好，与混凝土剥离，沿管壁进行钻芯，芯样显示与声测管有剥离，继续采用孔内摄像进行验证，采集图像显示在缺陷段声测管与混凝土未紧密结合，导致声波无法传导至接受探头，误判为严重缺陷桩。处理措施：对钻芯孔用灌浆料进行高压注浆，在达到强度后重新进行声波透射法检测，检测结果显示该桩为一类桩。

### 结语

桩基主要检测方法的协同应用能有效降低检测的成本，减少错判漏判的几率，实现方法互补，降本增效，提升精度、可靠性，为工程质量保驾护航。随着技术的发展，新的桩基检测方法越来越多，未来的方法配合将会越来越紧密，朝着数据融合，AI 智能化的方向发展：多源数据融合与智能诊断：利用人工智能（AI）、大数据技术，开发能够自动处理、融合低应变波形、声波剖面、高应变曲线、地质信息、施工记录等多源数据的智能分析平台。在工程实践中，应始终坚持因地制宜、科学组合、动态优化、深度协同的理念，使桩基检测真正成为工程安全的坚实守护者。

### 参考文献

- [1] 中华人民共和国行业标准.JGJ 106-2014 建筑桩基检测技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [2] 中华人民共和国国家标准.GB 50007-2011 建筑地基基础设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [3] 刘金砺,高文生,邱明兵.建筑桩基技术规范应用手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [4] 王离.桩基工程检测技术[M].北京:人民交通出版社,2018.