

预应力混凝土实心方桩的检测方法研究

文 / 邓超 广州增城正源建设工程检测中心有限公司

摘要: 针对预应力混凝土实心方桩接桩界面检测信号易受干扰的工程难题, 通过理论分析、室内试验与现场验证, 构建低应变法与高应变法协同检测体系。基于应力波传播规律, 量化不同接桩工艺对界面波阻抗的影响, 提出以波阻抗比为核心的完整性分级标准。室内试验表明, 螺锁式与密封材料组合工艺在密封材料强度达标后可使波阻抗恢复至基准值的 100%。现场应用中, 高应变法有效解决低应变误判问题, 承载力拟合值与设计值吻合度达 98% 以上。通过设备参数优化与流程控制, 建立“初筛—验证—处理”闭环检测模式, 检测结论误差率降至 2.1%, 为实心方桩质量管控提供系统性技术方案。

关键词: 预应力; 混凝土; 实心方桩

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.17.048

引言

预应力混凝土实心方桩因截面规则、施工便捷, 在高层建筑、桥梁工程中广泛应用。螺锁式机械连接工艺通过高强螺杆与密封材料实现桩节拼接, 虽提升施工效率, 但接桩界面的 0.3mm 级初始间隙与密封材料早期强度不足 (如连接后 2 小时强度仅 15MPa), 导致低应变检测时出现幅值达 1.0cm/s 的同向反射信号, 易被误判为 IV 类桩。现有研究多集中于单一检测方法的参数优化, 缺乏对“检测信号—施工工艺—材料特性”耦合关系的系统分析。本文以螺锁式连接实心方桩为研究对象, 通过室内外试验, 揭示接桩界面状态对检测信号的影响规律, 提出基于时间效应的检测时机控制方法, 构建适用于工程实践的协同检测体系, 解决完整性判定与承载力验证的关键技术问题^[1]。

一、预应力混凝土实心方桩检测理论分析

实心方桩桩身完整性检测的核心是应力波在桩身中的传播特性。当桩顶受到瞬态激振力 (如 2kg 尼龙力锤敲击) 作用时, 弹性波以 4000m/s 的理论波速 (C80 混凝土) 沿桩身传播。波阻抗 Z 作为衡量桩身材料特性的关键参数, 其计算公式为

$$Z = p \cdot A \cdot c \quad (1)$$

式中, Z 为波阻抗 (N·s/m), p 为混凝土密度 (取标准值 2500kg/m³), A 为桩身截面积 (以 450mm×450mm 方桩为例, 截面积为 0.2025m²), c 为应力波波速 (C80 混凝土理论波速 4000m/s)。当桩身存在缺陷时, 界面两侧波阻抗差异引发反射, 反射系数计算公式为:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2)$$

式中, R 为反射系数 (无量纲), Z_1 桩身完整段波阻抗 (N·s/m), Z_2 缺陷段波阻抗 (N·s/m)。反应系数决定反射波幅大小, 从而为缺陷判定提供量化依据。螺锁式连接界面存在两种典型缺陷: 一是螺杆与套筒配合产生的 0.3mm 初始间隙, 二是密封材料未凝固时的低

强度状态 (连接后 2 小时强度仅为最终强度的 27%)。二者共同作用使界面波阻抗下降 15%~20%, 导致低应变检测出现误判。室内试验显示, 仅螺锁式连接的试件在 4 天后波阻抗仍为 $1.732 \times 10^6 \text{N} \cdot \text{s/m}$, 较基准值低 14.4%, 反射波幅持续保持 1.0cm/s, 完整性始终判为 IV 类; 而螺锁式与密封材料组合工艺试件在密封材料终凝 (12 小时) 后, 波阻抗随强度增长逐步恢复, 4 天时达基准值的 100%, 反射信号消失^[2]。

二、试验研究

(一) 室内对比试验设计与实施

为量化不同接桩工艺对检测信号的影响, 制备 3 组 5m+5m 试件, 几何尺寸与工程桩一致 (截面 450mm×450mm, 混凝土 C80)。工况设置如下: ①仅螺锁式连接, 螺杆扭矩 800N·m, 无密封材料; ②仅密封材料连接, 厚度 5mm, 未施加机械连接; ③螺锁式+密封材料连接, 按设计参数施工 (螺杆扭矩 800N·m, 双组分环氧树脂密封材料, A/B 质量比 3:1)。检测时间分别为连接后 2 小时 (密封材料初凝前)、24 小时 (初凝后)、4 天 (强度达标后), 采用基桩动测仪采集信号, 传感器通过 1mm 厚 AB 胶粘贴于桩顶中心 300mm 半径内, 确保刚性耦合。

(二) 试验结果与规律分析

试验数据见表 1。连接后 2 小时, 三组试件接桩处均出现同向反射, 波幅 0.9~1.1cm/s, 波速下降 12.5%~17.5%, 完整性判为 IV 类, 原因为密封材料未凝固 (强度 15MPa) 或界面间隙未消除。24 小时后, 仅密封材料组波幅降至 0.6cm/s, 波速提升至 3600m/s, 因密封材料强度增长至 30MPa (达最终强度的 55%), 界面刚度改善; 螺锁+密封组波幅降至 0.8cm/s, 波速 3400m/s, 机械连接与材料强度共同作用但未完全恢复连续性。4 天后, 仅密封材料组波幅 0.4cm/s, 波速 3800m/s, 完整性 II 类 (波阻抗恢复 95%); 螺锁+密封组波幅 0.1cm/s (仅桩底反射), 波速 4000m/s, 界面波阻抗完全恢复, 判定为 I 类桩。仅螺锁组信号无变化, 证明单纯机械连接无法解决间隙引起的波阻抗下降问题。

表 1 不同工况下接桩试件检测结果对比

工况	连接方式	检测时间	反射波幅 (cm/s)	波速 (m/s)	完整性类别	波阻抗 (N·s/m)
基准	切割前	-	0.1 (桩底)	4000	I 类	2.025×10^6
工况 1	仅螺锁式连接	2h 后	1.0 (接桩处)	3400	IV 类	1.732×10^6
工况 1	仅螺锁式连接	4d 后	1.0 (接桩处)	3400	IV 类	1.732×10^6
工况 2	仅密封材料连接	2h 后	0.9 (接桩处)	3500	IV 类	1.766×10^6
工况 2	仅密封材料连接	4d 后	0.4 (接桩处)	3800	II 类	1.924×10^6
工况 3	螺锁式 + 密封材料	2h 后	1.1 (接桩处)	3300	IV 类	1.660×10^6
工况 3	螺锁式 + 密封材料	4d 后	0.1 (桩底)	4000	I 类	2.025×10^6

试验结果表明：

1、密封材料连接初期 (2h)，三组试件接桩处均出现显著同向反射，完整性均判为IV类，原因为密封材料未凝固 (强度仅 15MPa) 及螺锁接头存在初始间隙，导致界面波阻抗下降 15% ~ 20%；密封材料达到强度 (4d)，仅密封材料组反射波幅降至 0.4cm/s，波速提升至 3800m/s，完整性升级为II类，反映密封材料强度增长 (45MPa) 对界面刚度的改善作用；

2、螺锁 + 密封组接桩处无反射信号，波速、基准桩一致 (4000m/s)，表明组合工艺在密封材料达到强度后完全恢复桩身连续性；仅螺锁组信号无变化，说明单纯机械连接无法消除界面间隙的不利影响。判定标准依据《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106-2014) 中桩身完整性分类原则，并结合螺锁式连接实心方桩的界面特性

进行了量化扩展。该规范将桩身完整性分为四类，其中 I 类桩要求桩身完整，II 类桩允许存在轻微缺陷且不影响承载力。

三、工程应用

(一) 项目概况

某沿海高层建筑项目采用螺锁式预应力混凝土实心方桩，单桩设计桩长 18m (上段 5m+ 下段 13m)，截面 450mm×450mm，混凝土 C80，单桩承载力特征值 2500kN，终压标准 6000kN (连续复压 3 次，每次沉降 ≤ 10mm)。场地地质分层见表 2，其中淤泥层厚度 8m，压缩模量仅 2.5MPa，易导致桩周土约束效应不足，影响检测信号识别。接桩工艺采用 M32 高强螺杆 (屈服强度 355MPa) 与 12mm 壁厚钢套筒连接，界面填充双组分环氧树脂，7 天抗压强度 55MPa，初凝 6 小时，终凝 12 小时。

表 2 各土层工程参数表

土层名称	天然重度 (kN/m³)	极限侧阻力 (kPa)	极限端阻力 (kPa)	压缩模量 (MPa)
杂填土	18.0	20	-	5.0
粉砂	18.0	30	-	8.0
粉质黏土	18.3	35	-	6.5
淤泥	15.8	15	-	2.5
细砂	18.5	40	-	12.0
卵石	21.0	100	8000	50.0

(二) 现场检测实施与质量控制

现场检测分三个阶段：①预处理，采用磨光机打磨桩顶传感器粘贴区域，平整度误差控制在 2mm 以内，丙酮清洗去除油污，确保传感器与桩顶通过 1mm 厚 AB 胶紧密耦合；②信号采集，在距桩心 150mm 处对称布置 4 个激振点，每个点激振 3 次，采集 5 组有效信号取平均，采样频率 10000Hz，时长 20ms，实时监控信噪比，低于 3:1 时重新检测；③数据处理，时域分析识别桩底反射时间 (如 18m 桩底反射时间 1.25ms，对应波速 4000m/s)，计算缺陷深度，频域分析提取主频验证波速合理性。

(三) 异常情况处理与高应变法验证

静载试验中，3 根试桩 (3-77、3-118、3-120) 加载至 3500kN 时沉降突增 (55 ~ 65mm)，超规范限值

(40mm)。低应变检测显示桩底反射清晰，接桩处波幅 0.1 ~ 0.2cm/s，判为 I 类桩，排除桩身断裂。进一步分析施工记录发现，检测时密封材料龄期仅 3 天 (强度 40MPa，达设计值的 73%)，推测界面刚度不足导致高荷载下塑性变形。采用高应变法复打检测，设备为 JGT-10 型检测仪与 DHP-160 型液压打桩机 (锤芯 16t，落距 1.8m，激振能量 288kN·m)，在桩顶下 1.5m 处安装应变式力传感器 (量程 ±5000kN，精度 1%FS) 与加速度传感器 (量程 ±50g)，采样频率 20000Hz。复打控制标准：最后 10 击贯入度 ≤ 10mm/ 击，桩身压应力 ≤ 12MPa (C80 设计值 38.5MPa 的 31%)。检测结果见表 3：复打后低应变波幅升至 0.4 ~ 0.6cm/s，判为IV类；高应变力 - 速度曲线吻合良好，接桩处无反

射，承载力拟合值 5050 ~ 5200kN，均满足设计要求（2500kN×2=5000kN）。分析认为，低应变信号变化是复打导致桩周土松弛，接头 0.2 ~ 0.3mm 微间隙暴露，而高应变激振能量压实间隙，证明接头在动态荷载下应力传递连续，低应变误判源于静态检测对微间隙的放大效应。

表 3 高应变法复打检测结果对比

桩号	低应变完整性	复打后低应变完整性	高应变承载力拟合值 (kN)	接桩处反射特征
3-77	I 类	IV 类	5100	无缺陷反射
3-118	I 类	IV 类	5200	无缺陷反射
3-120	I 类	IV 类	5050	无缺陷反射

四、检测方法对比与优化

(一) 低应变法的工程适用性分析

低应变法在实心方桩检测中表现出高效性与局限性。效率方面，单桩检测耗时 < 5min，适用于大规模普查。技术优势在于对早期缺陷的高敏感性，如密封材料初凝前（2 小时）可识别波阻抗下降 10% 以上的界面缺陷，及时发现不合格接桩。但受限于 2kg 力锤仅 15J 的激振能量，无法穿透 0.3mm 以上微裂缝，且桩周土侧阻力（如粉质黏土 50kPa）抑制接头横向变形时，难以检测未松弛状态的微间隙。此外，密封材料强度增长的时间效应显著，仅密封连接组需 4 天才能达 II 类桩标准，检测时机控制至关重要。

(二) 高应变法对低应变法的技术补充

高应变法的核心优势在于强大的激振能量（240kN·m，为低应变的 16000 倍），可压实 0.5mm 以下微间隙，使界面在动态荷载下保持应力连续。Case 法与 CAPWAP 法拟合直接提供单桩极限承载力，解决了低应变无法判定承载力的问题，避免了工程中因误判导致的盲目补桩。动态应力监测显示，复打时螺杆最大拉应力 2.8MPa，远低于设计抗拉强度 150MPa，且 200 次锤击后应力衰减 < 5%，证明接头长期性能稳定。二者协同作用使检测结论误差率从单一低应变的 12.3% 降至 2.1%。

(三) 检测体系优化策略

针对检测中发现问题，提出设备参数与流程优化方案。低应变法通过更换 3kg 尼龙力锤（能量提升 50%）、采用 AB 胶粘贴传感器（厚度 1mm），提升信号穿透能力与耦合质量；高应变法将采样频率提高至 20000Hz，配置 60mm 橡木 + 30mm 钢板锤垫，优化波形质量，减少振荡干扰。流程控制方面，明确接桩后静置 ≥ 4d（密封材料终凝且强度 ≥ 90%）、扭矩扳手现场抽检率 ≥ 10%，确保施工质量；低应变普查中，接桩反射波幅

> 0.3cm/s 时启动高应变验证，建立“初筛—验证—处理”的闭环检测体系。

结语

针对预应力混凝土实心方桩检测难题，构建低应变与高应变协同检测体系。明确螺锁式与密封材料组合工艺对界面性能的改善作用，提出波阻抗比判定标准与检测时机控制策略。工程应用表明，该体系显著提升检测准确性，误差率降至 2.1%，为实心方桩质量管控提供技术支持。

1) 协同检测体系通过低应变初筛与高应变验证，解决接桩界面缺陷误判与承载力判定难题，实现检测效率与精度双提升，单桩检测耗时 < 5min，成本较传统方法降低 60%。

2) 施工工艺与检测时机深度关联，密封材料强度增长直接影响界面波阻抗，明确接桩后静置 ≥ 4 天检测可避免早期低强度干扰，确保螺锁 + 密封工艺桩身连续性 100% 恢复。

3) 优化策略具工程普适性，设备参数调整（如 3kg 力锤、高频采样）与流程闭环控制（抽检率 ≥ 10%、三级验证），有效识别 II 类桩及以上缺陷，避免盲目处理，节约工期与成本。

参考文献

[1] 吴小鹭. 螺锁式机械连接预应力混凝土方桩施工技术 [J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(10): 91-93.
 [2] 陈朝辉. XC 弹卡式连接预应力混凝土实心方桩施工技术研究 [J]. 建筑施工, 2024, 46(06): 938-941.
 [3] 蒋元海. JC/T2723—2022《预应力混凝土实心方桩》标准解读 [J]. 混凝土与水泥制品, 2023, (04): 81-84.
 [4] 王志勇. 漳州市行政服务中心高强预应力混凝土实心方桩应用研究 [J]. 工程技术研究, 2022, 7(12): 48-50.
 [5] 陈虹霖, 陈刚, 徐铨彪, 等. 预应力混凝土实心方桩抗弯性能试验研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2022, (03): 39-44.