

桥梁桩身完整性检测中超声波透射法的应用

张庆

湖北精兴建设工程质量检测有限公司, 湖北 荆门 448000

DOI:10.61369/ME.2026060002

摘 要 : 超声波透射法依据声时、声速、振幅及波形变化, 反映桥梁钻孔灌注桩内部混凝土的连续性与密实性。本文分析该方法的理论基础、检测准备、现场操作、数据处理及工程应用效果。结果表明: 完整桩声速保持在4200 m/s左右, 振幅衰减率约5%; 存在夹泥及局部离析的 Z2 桩声速均值降至3800 m/s, 振幅衰减率达25%, 经注浆处理后声速升至4050 m/s, 振幅衰减率降至11%, 完整性等级由Ⅲ类调整为Ⅱ类。该方法对深层缺陷定位与加固效果评价具有较高应用价值。

关 键 词 : 超声波透射法; 桥梁桩身; 完整性检测; 声速; 缺陷识别

Application of Ultrasonic Transmission Technique in the Inspection of Bridge Pier Integrity

Zhang Qing

Hubei Jingxing Construction Engineering Quality Inspection Co., Ltd. Jingmen, Hubei 448000

Abstract : The ultrasonic transmission method relies on changes in acoustic time, velocity, amplitude, and waveform to reflect the continuity and compactness of the concrete within the drilled and grouted piles of bridges. This paper analyzes the theoretical basis, preparation for testing, field operations, data processing, and the engineering application effects of this method. The results show that the average velocity of intact piles remains around 4,200 m/s, with an amplitude attenuation rate of approximately 5%. The average velocity of Z2 piles with mud entrapment and localized segregation drops to 3,800 m/s, with a significant amplitude attenuation rate of 25%. After grouting treatment, the velocity increases to 4,050 m/s, and the amplitude attenuation rate decreases to 11%. The integrity grade is adjusted from Class III to Class II. This method has high application value for the localization of deep-seated defects and evaluation of reinforcement effects.

Keywords : ultrasonic transmission method; bridge pile shaft; integrity inspection; sound velocity; defect identification

引言

桥梁桩基础承担上部结构荷载传递与地基稳定控制功能, 其施工质量直接关系桥梁运营安全。钻孔灌注桩施工受地层条件、泥浆护壁、混凝土灌注连续性、钢筋笼安装质量等因素影响, 桩身内部可能出现夹泥、离析、缩径、断桩等隐蔽缺陷。此类缺陷难以通过外观检查发现, 若未能及时识别, 可能削弱桩基承载性能并增加后期病害风险。因此, 建立可靠的桩身完整性检测方法具有重要工程意义。超声波透射法依托预埋声测管采集声学参数, 能够沿深度方向连续反映混凝土介质状态, 在缺陷定位、范围判别和质量复核方面具有较强针对性。分析其检测流程与应用效果, 可为桥梁桩基质量控制提供技术参考。

一、超声波透射法检测桥梁桩身完整性的理论依据

超声波透射法将预埋声测管之间的混凝土作为弹性波传播介质, 其判读基础来自声波在相对均匀介质中的近似直线传播特性以及能量随传播距离增加而逐渐衰减的规律。鉴于桥梁钻孔灌注桩内部混凝土应具有连续密实的结构状态, 发射换能器激发的超

声脉冲在接收端形成较稳定的首波到达时间、振幅以及频率响应; 当桩身存在断桩、夹泥、缩径等缺陷时, 声波传播路径会发生绕射、散射及局部反射, 介质等效弹性模量降低, 声时增大, 声速下降, 振幅衰减加剧, 主频向低频方向偏移。由此可将声学参数的异常变化作为识别桩身完整性变化的物理依据^[1]。

$$v = \frac{S}{t}$$

其中, v 表示声波传播速度, 单位为 m/s , S 表示发射换能器与接收换能器之间的测距, 单位为 m , t 表示声波首波从发射端传播至接收端所需时间, 单位为 s 。结合弹性波理论来看, 声速与混凝土密度以及弹性参数存在内在关联, 声速越稳定, 通常说明检测剖面内介质连续性越好; 若同一深度区间出现声速突降、振幅明显降低以及波形畸变同步出现的情况, 则可推导该区间存在结构离散或局部缺陷的可能性较高。

二、桥梁桩身超声波透射法检测的实施流程

(一) 检测前的准备工作

鉴于桥梁钻孔灌注桩内部空间不可见, 检测前准备需将声测管布设、仪器状态核查及现场条件整理纳入同一技术链条。声测管作为超声脉冲传播的耦合通道, 其数量宜结合桩径确定: 桩径不大于 800 mm 时可布设 2 根, 桩径为 800 mm 至 1600 mm 时宜布设 3 根, 桩径大于 1600 mm 时宜布设 4 根以上, 并沿钢筋笼内侧等角度固定, 使各检测剖面覆盖桩身主要截面。管材通常选用内径不小于 40 mm 的钢管或专用声测管, 接头应保持顺直密封, 管底封闭, 管口高出桩顶一定高度, 避免灌注及后续施工将泥浆、砂粒带入管内。某桥梁桩基工程中, 直径 1.5 m 的桩身布置 3 根直径 50 mm 声测管, 相邻管间距控制为 1.2 m , 该方案能够兼顾剖面覆盖范围与换能器下放稳定性^[2]。

仪器准备需围绕检测数据可比性进行核查。检测人员应对超声检测仪主机的采样间隔、增益、触发方式及零声时进行参数标定, 并借助标准试块或清水中固定距离测量来校验发射换能器与接收换能器的灵敏度。若同组换能器首波识别不稳定或幅值响应偏差较大, 应立即更换或重新配对。现场预处理还需对桩顶浮浆和松散混凝土进行修整, 使管口位置清晰可辨; 声测管内则借助清水冲洗、通球检查及反复抽排来处理沉渣和杂质, 保持管内充满清水。此类准备能够减少耦合不良、管道堵塞及仪器漂移对声时和波幅判读造成的干扰。

(二) 现场检测的操作步骤

现场检测需将声测管成孔质量、换能器运动控制及声学信号采集放在同一操作链条中进行控制。检测人员在管内水位稳定后, 将发射换能器与接收换能器分别下放至同一检测深度, 并借助深度标记电缆开展同步升降, 使两只换能器在相邻声测管内保持水平对应, 减少斜测距对声时判读的影响。结合桥梁钻孔灌注桩检测的分辨率需求, 测点间距宜控制为 10 cm/点 , 遇到波形突变、声时异常延长或波幅突然降低的深度段, 可将测点间距适当加密, 以便对异常区间边界进行细化识别。仪器参数设置应保持前后一致^[3]。某桥梁桩基检测中, 现场将采样频率设为 2 MHz , 发射电压设为 500 V , 增益依据首波清晰度进行小幅调整, 避免人为放大造成不同剖面数据缺乏可比性。换能器下放前可在探头表面涂覆甘油, 将甘油作为辅助耦合介质, 同时轻缓摆动电缆并反

复提放短距离, 促使探头周边附着气泡上浮排出。采集过程中需同步记录桩号、管号组合、测点深度及异常波形位置, 现场波形保存后立即核对首波识别线, 避免漏采及错位记录影响后续完整性判读。

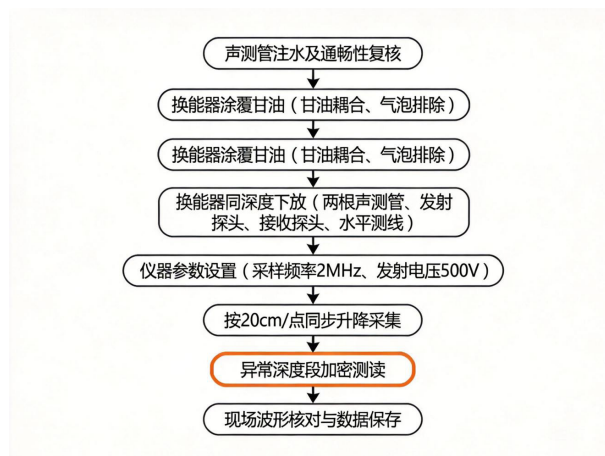


图1 桥梁桩身超声波透射法现场检测流程图

(三) 检测数据的初步处理

现场采集完成后, 检测数据需围绕波形可读性及参数一致性开展初步整理。鉴于桩身混凝土内部声波信号易受管壁摩擦、气泡残留及电磁干扰影响, 原始波形可选用小波变换法进行噪声滤波。小波变换法将非平稳声波信号分解到不同尺度上进行识别, 能够在保留首波突变特征的同时削弱高频随机噪声。处理时宜依据现场波形主频范围选取适宜小波基, 并将分解后的低能量噪声分量进行抑制, 避免首波位置因过度平滑而产生偏移^[4]。

完成滤波后, 应将每一测点的声时、测距及波幅峰值纳入同一数据序列进行校核, 并逐点计算声速与相对振幅。声速计算需要扣除仪器零声时及电缆延迟带来的系统误差, 振幅则宜在统一增益条件下进行归一化整理, 使不同剖面之间具有可比性。异常点识别可将声速低于 3800 m/s 作为初判阈值, 同时结合相邻测点变化幅度进行复核。若单个测点声速偏低但波幅及波形连续性未同步异常, 需重点排查耦合不良或首波拾取偏差; 若连续深度段出现声速下降、振幅衰减及波形展宽, 则该区间更可能对应混凝土离析、夹泥或局部缩径。

以某桥梁桩基检测数据整理为例, 数据处理人员将 3 根声测管形成的 3 个检测剖面分别绘制为深度方向声速曲线, 并对曲线突降位置进行交叉比对。当 2 个以上剖面在相近深度出现低于 3800 m/s 的连续异常带时, 可据此定位潜在缺陷区域, 为后续缺陷性质判读及复测布点提供依据。

三、超声波透射法在桥梁桩身完整性检测中的应用效果分析

(一) 工程案例中的检测结果验证

某跨河桥桩基工程选取 3 根试验桩 Z1 至 Z3 开展超声波透射法检测, 桩径均为 1.5 m , 声测管按三管等角度布设, 测点间距控制为 20 cm 。现场将声速平均值、振幅衰减率及波形连续性作为综合

判读依据。振幅衰减率用于表征声波能量在混凝土介质中传播后的损失程度，数值越高通常意味着界面散射及能量耗散越明显。检测统计结果见表1。

表1 某桥梁桩身超声波透射法检测结果统计表

桩号	声速平均值	振幅衰减率	缺陷类型	完整性等级
Z1	4200 m/s	5%	未见明显缺陷	I类
Z2	3800 m/s	25%	夹泥以及局部离析	III类
Z3	4100 m/s	8%	轻微离析	II类

从表1可见，Z1桩声速稳定且振幅衰减较小，波形首波清晰，桩身混凝土连续性较好；Z3桩在局部深度段存在轻微波幅降低，但声速仍保持在较高水平，判定为II类完整性。Z2桩声速平均值降至3800 m/s，振幅衰减率达到25%，异常深度段波形展宽明显，说明该区间混凝土密实性不足。施工单位针对Z2桩异常段开展低压水泥浆注浆加固处理，复检后声速平均值提高至4050 m/s，振幅衰减率降至11%，异常波形连续性得到改善，完整性等级调整为II类。

（二）检测结果与其他方法的对比评估

从桥梁桩身完整性评价的适配性来看，超声波透射法、低应变反射波法及静载试验所反映的工程信息各不相同。低应变反射波法依靠桩顶激励后反射信号推断桩身完整性，操作便捷，但深部缺陷信号易受桩周土阻尼、桩长及截面变化影响。以Z2桩异常段判读为例，超声波透射法借助3个声测剖面的声速曲线及波幅衰减变化，将夹泥及局部离析区间控制在设计桩顶以下约12.4 m至12.8 m，缺陷定位误差约为±10 cm；低应变反射波法对同一区

间仅能识别为中下部阻抗异常，定位误差约为±30 cm，边界识别能力相对不足^[5]。

静载试验更侧重承载性能评价，能够反映桩土共同作用下的竖向承载响应，却难以直接给出缺陷形态与深度范围。Z2桩注浆处理前，超声波透射法判定为III类桩，静载加载至6200 kN时沉降增长偏快，承载储备不足的评价倾向与完整性判读基本一致；注浆后复检声速平均值提高至4050 m/s，振幅衰减率降至11%，静载曲线也表现为沉降趋缓，说明超声波参数变化能够为加固效果判断提供较直接依据。综合来看，超声波透射法对深层缺陷及局部离析具有较强识别能力，适宜用于桥梁钻孔灌注桩质量控制；但该方法依赖预埋声测管，若管体堵塞、偏斜或耦合水状态不佳，检测剖面覆盖及参数可靠性会受到限制。

四、结语

超声波透射法在桥梁桩身完整性检测中能够形成较连续的深度方向声学信息，对夹泥、离析及局部缩径等隐蔽缺陷具有较好的识别能力。实际应用中，应重点控制声测管布设质量、管内清洁度、换能器同步升降和参数统一性，并结合声速、振幅、主频及波形特征进行综合判读。对异常区段还应通过加密测点、剖面对比和必要复检提高结论可靠性。该方法可作为桥梁钻孔灌注桩施工质量评价和缺陷处治效果验证的重要手段。

参考文献

[1] 周佳豪. 超声波透射法在大直径灌注桩桩身完整性检测中的应用研究 [J]. 现代工程科技, 2025, 4 (15): 129–132.
[2] 袁宝. 基于低应变反射波和超声波透射法的公路基桩完整性检测技术研究与应用 [J]. 科技创新与应用, 2025, 15 (20): 181–184.
[3] 毛强. 桥梁桩身完整性检测中超声波透射法的应用 [J]. 汽车周刊, 2025, (8): 70–72.
[4] 花兵. 超声波透射法在桥梁基桩完整性检测中的应用研究 [J]. 运输经理世界, 2025, (15): 80–82.
[5] 李洪远. 大直径灌注桩桩身完整性检测中超声波透射法的应用分析 [J]. 中国住宅设施, 2024, (5): 128–130.