

铁路桩基低应变与声波透射法检测参数及其判定标准研究

文 / 袁 帅 广信检测认证集团有限公司

摘要：铁路设施作为我国交通系统的重要组成部分，其质量和稳定性对我国交通运输安全和速度起到决定性影响。桩基结构是铁路设施的重要结构之一，起到承载、支护作用，因而桩基结构质量需要建设单位高度重视，通过科学检测探明桩基结构质量，从而保障铁路安全稳定。低应变法与声波透射法是目前我国市场环境中铁路桩基结构常用的检测技术，针对低应变法与声波透射法的检测参数及其判定标准需要相关人员加以学习和研究，从而更好地应用低应变法与声波透射法开展检测工作，为铁路桩基稳定提供更好的保障。本文以某铁路工程项目为例，针对铁路桩基工程中低应变法与声波透射法的实际应用进行分析，并对检测参数及其判定标准加以汇总阐述。

关键词：铁路；桩基结构；低应变法；声波透射法；检测参数；判定标准

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.12.058

引言

随着我国城市化建设的脚步不断加快，铁路成为连接城市交通系统的重要工具，在城市建设及经济发展中具有重要作用。而桩基结构施工是铁路工程的施工难点之一，由于桩基结构的所在位置较为特殊，因而导致桩基结构施工具有较强的隐蔽性，再加上桩基结构质量和稳定性容易受到外界因素干扰，因而导致在实际施工中桩基结构往往容易因外部影响导致质量、结构受损，进而影响桩基承载能力和支护能力，进而对铁路整体安全带来危害。因而建设单位需要通过科学检测技术进行检测，了解桩基结构的实际性能和潜在隐患并及时处理，从而保证铁路稳定性，提高施工质量和安全。

一、选用工程案例概述

本文选用铁路工程案例为我国某 I 级铁路工程，该铁路工程全长共计约为 250km，包括铁路、隧洞、桥梁多种形式，预计通车时速为 200km/h 左右。该铁路工程建设环境多为丘陵、山坡，因而导致整体路基稳定性较差，因而选定灌注桩作为路基桩基结构，从而提高路基稳定性，避免引发坍塌、沉降等灾害影响铁路运行安全。本文采用灌注桩桩径选定 0.6 米，桩间距为 1.5 米，桩长选定 22.5 米到 28 米不等，具体根据实际施工情况而定。为确保桩基结构施工质量，本工程建设单位分别采用低应变法与声波透射法对完工桩基结构进行质量检测，从而保证桩基施工质量。

二、低应变法概述

低应变法是工程项目中常用的桩基检测方法，主要用于对桩基结构的完整性进行检测。低应变法以一维波动方程理论为基础，在一维弹性连续杆中弹性波往往会保持连续传播，传播过程中的波阻抗、速度等参数不会发生改变。而一旦传播介质存在差异界面时就会导致传播参数变化，进而影响反射信号的速度和传播时间。而在桩基检测中采用低应变法能够无损检测出桩基结构内部是否存在缺陷，以此来检测桩基结构的完整性。低应

变法检测的成本低、效果好，但存在一定局限性，例如对于部分长度超过 50 米的大型桩基结构或检测精确度要求非常高的桩基结构往往难以起到较好检测效果^[1]。

通常在桩基结构检测中低应变法的应用流程如下：首先施工人员需要准备重力锤和传感器、信号接收器等检测装置，将桩基结构立直后安装好传感器及信号接收器，而后用重力锤在桩基顶部敲击，此时在敲击竖向激振作用下桩身会产生应力波并在桩身中传播。应力波在传播过程中始终保持相同参数，而一旦出现缺陷截面或达到桩基底部时，应力波会发生透射和反射现象，此时位于桩基顶部的接收器即可接收到反射信号，通过分析设备对反射信号的波形及各项参数进行分析即可计算出桩基结构的实际长度和缺陷情况，低应变法的应用原理如下图 1 所示。

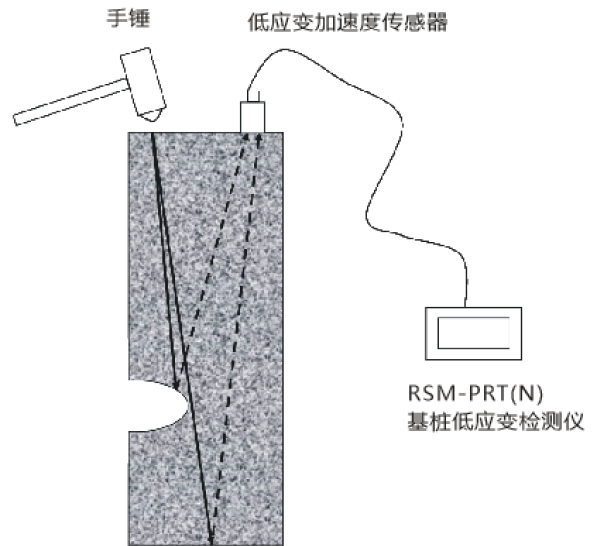


图 1 低应变法的应用原理图

三、低应变法的检测参数及其判定标准

(一) 低应变法的检测参数

采用低应变法时需要施工单位严格按照相关标准规范进行检测，严格把控好低应变法的各项检测参数，并

依照相关判定标准对桩基结构完整性进行评估判定。应用低应变法进行检测时务必保证桩身长度检测准确，通常桩身长度是指从桩基最底部到标高位置的长度，同时负责低应变检测的单位务必具有足够的资质水平和业务能力。通常低应变法检测多采用抽样检测方式，通常选取检测桩数量至少在总桩数的10%以上。选定检测桩基结构后即可对检测桩进行检查，务必保证检测桩的实际强度超过设计强度70%以上^[2]，确认无误后安装各项检测装置并精确测量桩身长度。首先根据设计长度计算出设计波速和反射信号接收时间，具体计算公式如下：

$$V = \frac{2L}{t}$$

其中V为实际波速，L为桩身设计长度，t为反射信号的接收时间。而后进行实际检测，如果发现波速与信号接收时间均明显偏差，则说明桩身内部存在缺陷，此时重新依照如下公式进行计算即可分析出桩身缺陷位置，具体公式如下：

$$x = \frac{1}{2000} \times \Delta t_x \times c$$

表1 低应变法的判定标准

桩身完整性类别	分类原则	时域信号特征	幅频信号特征
I类桩	桩身基本完整	2L/c时刻前无缺陷反射波，桩底反射波正常，与设计情况相符	桩底谐振峰排列等间距，相邻频差为 $\Delta f \approx c/2L$
II类桩	桩身存在轻微缺陷，不影响桩身结构承载力	2L/c时刻前出现轻微缺陷反射波，有桩底反射波	桩底谐振峰排列基本等间距，相邻频差接近 $\Delta f \approx c/2L$ ，
III类桩	桩身存在明显缺陷，影响结构承载力	存在明显缺陷反射波	桩底谐振峰排列基本等间距，相邻频差 $> c/2L$
IV类桩	桩身存在严重缺陷，无法正常使用	存在严重缺陷反射波或周期性反射波，无桩底反射波产生	相邻频差远大于 $c/2L$ ，无桩底谐振峰存在

四、声波透射法概述

声波透射法同样是建筑工程领域中常用的质量检测技术，声波透射法的原理是利用声测管来发射、接收声波信号，通过检测声波信号在桩身内的波幅衰减情况和频率变化情况来计算桩身结构完整性，检测核心参数指标为声速和波幅。当声波进入桩身时波形会与桩身内部结构保持一定相关性，当桩身内部不存在缺陷时波形往往规律均匀。而一旦内部存在缺陷就会导致声波产生散射和绕射现象，进而导致在传播过程中反射波出现频率变化、能力衰减和波形畸变，因而通过反射波即可实现对桩身内部密实度的检测^[4]。

与低应变法相比声波透射法的检测效率和精确度更高，受到外界阻尼的影响较小，同时能够检测出较为细小的内部缺陷问题，但声波透射法存在成本较高、检测工艺复杂的问题，同时声波透射法仅能够针对单一剖面进行检测，因而导致声波透射法的应用存在局限性。通常声波透射法多用于各类大型桩基结构检测中，或部分

其中 Δt 为反射波时间差，x为缺陷位置与桩顶距离。在采用低应变法时需要检测人员注意，采用信号接收设备记录波形时务必保证采集时间适当延长，通常在接收信号后延长5秒即可，保证最终记录的应力波波形完整。同时信号采集装置的采样频率尽可能根据实际桩身波速和频域分辨率决定，而采样点数最低为1024个，采样点数越多则最终得到的波形信号与实际信号越接近。

(二) 低应变法的判定标准

低应变法的判定标准依据《建筑基桩检测技术规范》而定。《建筑基桩检测技术规范》中将桩身完整性分为四个不同等级，具体如下表1所示。其中I类桩可正常投入施工使用，而II类桩和III类桩需要经过加固、修补并通过检测后才能允许使用。检测结果为IV类桩则需要重新施工制作，并通过会议总结原因并加以反思，探讨导致产生IV类桩的原因并加以改进。本工程共计采用低应变法对6根灌注桩进行检测，结果发现，按照《建筑基桩检测技术规范》6根灌注桩全部判定为I类桩，灌注桩施工质量基本满足桩基施工需要^[3]。

对于结构强度和质量要求非常高的桩基施工中，声波透射法的检测原理如下图2所示。

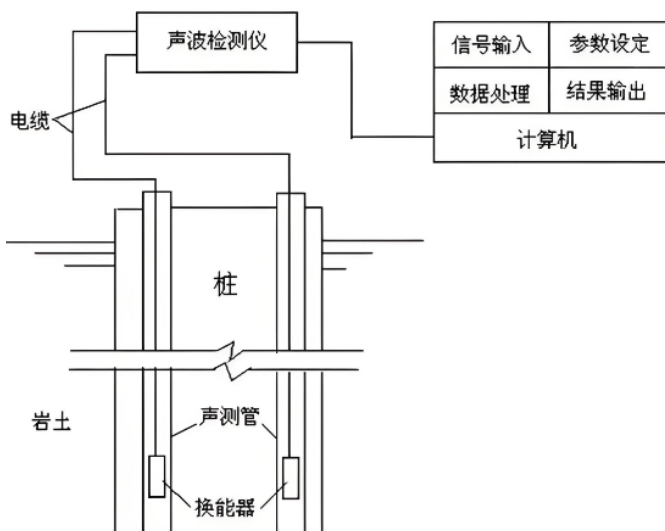


图2 声波透射法的检测原理图

五、声波透射法的检测参数及其判定标准

(一) 声波透射法的检测参数

声波透射法对于各项检测参数的要求非常高，在进行检测前检测单位务必严格检查各项检测工具及桩基结构情况，保证满足检测要求。检测使用的接收换能器与声波发射器务必具有良好的水密性，能够在 1MPa 的水压下保持不渗水，同时在检测前需要将接收换能器与声波发射器的谐振频率调整到 30-50kHz 之间，而有效工作面的轴向长度则不能超过 150mm，避免影响声波信号接收。声波检测仪在使用前同样需要进行参数调整，采样时间间隔 <0.5μs 为最佳，而声波检测仪的电压幅值应当控制为 200V 以上、1000V 以下，系统频带宽度 <200kHz^[5]。

在检测前检测人员需要将声测管提前注满水，声测管的外径、内径、和外壁间隔需要精确检测，保证检测参数误差在 1mm 以下，避免影响后续数据计算。而检测桩基结构的混凝土龄期至少保证 >14 天，避免因混凝土龄期问题影响检测结果。在检测时尽可能保持声测管与接收换能器在相同高度，即使无法放置在相同高度也务必保证高差在 20mm 以内。根据检测方案布置检测点，检测点之间的距离间隔应当小于 250mm。检测全过程均选择阶跃或矩形脉冲作为发射声波信号^[6]。

(二) 声波透射法的判定标准

声波透射法的判定标准同样依照《建筑基桩检测技术规范》设定，《建筑基桩检测技术规范》将桩基结构完整性分为四个等级，其中 I 类桩的桩身基本完整，声学检测结果显示声测线声学参数无异常，接收波形正常；II 类桩的桩身存在轻微缺陷，但基本不影响桩身结构承载力，接收声测线参数存在轻微异常和波形畸变情况，但所有异常声测线均无连续分布，且异常声测线数量小于检测剖面数量的 50%；III 类桩的桩身则存在明显缺陷，对整体结构承载力影响较大。声学检测结果表明声测线参数及波形均存在异常情况；而 IV 类桩则完全无法使用，桩身内部缺陷非常大，声学检测无法正常接收到反射波。

声波透射法的检测依照如下公式计算：

$$t = \frac{L}{V}$$

其中 t 为声波传播时间，L 为传播距离、V 为传播速度。

本工程共计采用声波透射法对 6 根灌注桩进行检测，具体检测结果如下表 2 所示。结果发现，按照《建筑基桩检测技术规范》6 根灌注桩均判定为 I 类桩，灌注桩施工质量基本满足桩基施工需要。

表 2 声波透射法检测结果

序号	检测深度 (m)	平均声速 (km/s)	声速异常判定值 (km/s)	离散系数 (%)
1	13.5	3.548	3.388	1.9
2	13.5	3.861	3.623	2.5
3	11.5	4.085	3.363	2.6
4	13.5	3.776	3.465	7.4
5	13.5	3.635	3.501	1.4
6	13	3.985	3.419	4.8

结语

综上所述，在铁路工程项目中桩基结构是决定铁路设施安全性和稳定性的关键，在施工中对桩基结构的施工质量需要建设单位严格把控，通过科学检测技术保证桩基结构的质量与完整性。在桩基检测中低应变法与声波透射法是常用的检测技术，两种检测技术均具有无损性，同时能够对桩基结构的内部缺陷进行精确定位，以此来探明桩基结构质量。而在实际应用中低应变法与声波透射法各有优势和局限性，因而需要铁路建设单位根据实际情况和质量要求灵活选择不同检测技术加以应用，并在实际检测中严格按照《建筑基桩检测技术规范》开展检测工作，明确不同检测技术的具体应用参数及判定标准，从而为铁路桩基施工质量和稳定性提供更好的保障。

参考文献

[1] 陈迎. 低应变法与声波透射法在桩基检测中的应用分析 [J]. 江西建材, 2024, (08): 98-100.
 [2] 钟勇飞. 低应变法和声波透射法在桩基完整性检测中的应用 [J]. 工程技术研究, 2023, 8(18): 81-83.
 [3] 薛小剑. 低应变法和声波透射法在桩基检测中的综合应用研究 [J]. 福建建材, 2023, (04): 14-17+26.
 [4] 叶天行. 低应变法和声波透射法在公路桥梁桩基检测中的应用 [J]. 交通世界, 2022, (31): 113-115.
 [5] 杨志林. 低应变法和声波透射法在某岩溶地区的应用 [J]. 福建建材, 2020, (10): 30-33.
 [6] 吴家彬. 桩基检测工作中声波透射法及低应变法的应用 [J]. 四川建材, 2020, 46(09): 35-36.