

基桩质量检测技术体系

(V1.13)



2014-07-08 初稿

2021-02-23 第 10 次修订

2021-08-02 第 11 次修订

2021-10-27 第 12 次修订

四川升拓检测技术股份有限公司

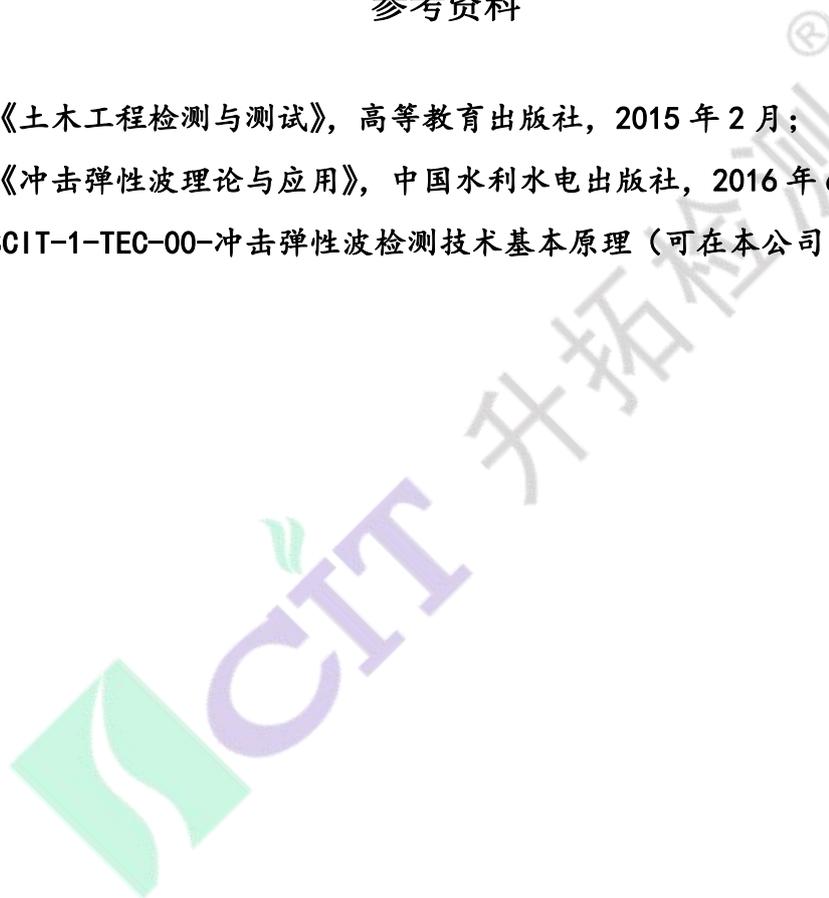
www.scentralit.com

本报告对应设备

- 1、 低应变基桩完整性检测仪 (SEL-PIT) PA 型
- 2、 低应变基桩完整性检测仪 (SEL-PIT) R 型
- 3、 基桩声波投射检测仪 SUT-PIT

参考资料

- 1、 《土木工程检测与测试》，高等教育出版社，2015年2月；
- 2、 《冲击弹性波理论与应用》，中国水利水电出版社，2016年6月；
- 3、 SCIT-1-TEC-00-冲击弹性波检测技术基本原理（可在本公司网站上下载）



目 录

简略语.....	5
术语.....	5
符号说明.....	5
第 1 章 概述.....	1
第 2 章 新设桩基低应变法完整性检测.....	2
2.1 测试的意义.....	2
2.2 桩基检测技术概述.....	2
2.2.1 桩基检测现状.....	2
2.2.2 桩基检测中存在的问题.....	3
2.3 低应变反射波法.....	4
2.3.1 低应变法概述.....	4
2.3.2 桩身弹性波的传播理论基础.....	6
2.3.3 桩基完整性测试原理.....	8
2.3.4 波长与检测分辨力的关系.....	10
2.3.5 波长与有效检测深度的关系.....	12
2.4 行业检测规程的解读与探讨.....	12
2.4.1 测试对象.....	13
2.4.2 测试设备要求.....	14
2.4.3 测试数量和比例.....	14
2.4.4 现场检测.....	15
2.4.5 数据分析与判定.....	16
2.5 提高检测精度的方法.....	18
2.5.1 影响检测精度的主要因素.....	18
2.5.2 提高测试精度的主要方法.....	19
2.5.3 典型状况的时域、频域信号.....	21
2.6 灌注桩实例分析.....	23
2.6.1 基于特征线法的桩身特性反演.....	23
2.6.2 工程实例分析（传统示例）.....	24
2.6.3 工程实例分析（验证基桩，成都，2019.05）.....	25
2.6.4 现场验证（深圳，2019.07）.....	28
2.6.5 工程应用中的注意事项.....	33
2.7 中空薄壁桩柱长度检测.....	34
2.7.1 铁路架线柱基础长度检测（广西、2013）.....	34
2.7.2 铁路拉线柱基础长度检测（湖南、2015.09）.....	35
2.7.3 管桩长度检测（安徽、2021.07）.....	36
2.8 特点和检测流程.....	38
2.8.1 低应变检测法的局限.....	38
2.8.2 公司检测设备的特点.....	39
2.8.3 测试流程.....	40
第 3 章 现役桩基检测技术.....	41

基桩质量检测技术体系

3.1	测试的意义.....	41
3.2	现役基桩无损检测方法和原理.....	41
3.2.1	激振与信号接收.....	42
3.2.2	研究及技术现状.....	43
3.2.3	本系统开发方法.....	45
3.3	提高检测精度的方法.....	45
3.3.1	影响检测精度的主要因素.....	45
3.3.2	提高激振信号的品质.....	46
3.3.3	降低承台反射信号的影响.....	47
3.3.4	振动模态分析.....	48
3.4	工程应用例.....	48
3.4.1	VMC 合成试验.....	48
3.4.2	长基桩侧壁激振试验（天津，2012）.....	49
3.4.3	桥墩下基桩缺陷检测（甘肃，2013）.....	49
3.4.4	桥墩下基桩缺陷检测（山西，2019）.....	51
3.4.5	涵洞下基桩缺陷检测（成都，2020.12）.....	53
3.5	特点和检测流程.....	54
3.5.1	公司检测设备的特点.....	54
3.5.2	测试流程.....	54
第4章	跨孔声波透射法.....	56
4.1	概述.....	56
4.1.2	检测方法和缺陷判据.....	56
4.1.3	现行规程对比和解读.....	57
4.1.4	现有检测方法的主要问题.....	60
4.2	测试结果的三维成像.....	62
4.2.1	三维成像与二维成像的比较.....	62
4.3	测试精度的提高.....	63
4.3.2	声测管位置偏斜的修正.....	64
4.3.3	声测管位置偏斜的修正.....	64
第5章	BQIM 管理机能.....	65
第6章	结语及致谢.....	66
	【参考文献】.....	2
	版本修订说明.....	3
	技术支持.....	4

简略语

FFT: Fast Fourier Transform (快速傅立叶变换), 是一种常用的信号频谱的分析方法。

VMC: Virtual Multi-Channels (虚拟多频道), 是可利用较少的采集频道通过信号合成的方式扩展通道的方法

PSD: Phase Sensitivity Detection, 相敏检测指标

术语

弹性波: 是在固体材料中传播的物质粒子的微小振动传播形成的波, 也曾被称为“机械波”、“应力波”、“地震波”等。由于变形微小, 物体处于弹性状态, 因此被称为弹性波;

阻抗: 反映材料声学特性的参数, 等于材料的密度与波速的乘积;

机械阻抗: 反映材料声学特性的参数, 等于材料的截面积与阻抗的乘积。机械阻抗是决定弹性波反射特性的参数;

时域分析: 在横轴为时间轴的图形上进行分析, 常用于较长锚杆和锚索长度的分析;

频域分析: 在横轴为频率轴的图形上进行分析, 常用于较短锚杆和锚索长度的分析;

符号说明

C_m = 计算波速, 在基桩完整性分析时所用的弹性波波速;

λ = 弹性波波长;

第 1 章 概述

桩基工程除因受岩土工程条件、基础与结构设计、桩土体系相互作用、施工以及专业技术水平和经验等关联因素的影响而具有复杂性外，桩的施工还具有高度的隐蔽性，发现质量问题难，事故处理更难。因此，基桩检测工作是整个桩基工程中不可缺少的重要环节，只有提高基桩检测工作的质量和检测评定结果的可靠性，才能真正做到确保桩基工程质量与安全。

其中，在检测基桩的完整性检测方面，目前最常用的有以下两种方法：

- 1) 基于冲击弹性波的低应变检测技术：由于其测试方便、效率高等优点，得到了极其广泛的应用。但是，不可否认的是，低应变检测技术也不可避免地存在着一系列的缺点和不足之处，影响力测试结果的信赖性；
- 2) 跨孔声波透射法：由于该方法测试结果较为直观和可靠，是目前判断基桩完整性最有效的方法之一。但该方法仅适用于预埋声测管的基桩，因此在应用范围上受到较大的限制。

为此，我们历时多年开发了基桩检测技术体系。该体系以低应变反射波法和跨孔声波透射法为基础，不仅可以检测新设基桩，还可以检测在役基桩、码头支柱以及高桥墩等柱状结构，具有测试效率高、可靠性好等特点。

该技术体系的检测内容主要包括：

- 1) 新设基桩（桩头露出）的长度、完整性（缺陷程度及位置范围）
- 2) 在役基桩（有承台）的长度、完整性



照片 1-1 基桩检测仪 SRB-MATS

第 2 章 新设桩基低应变法完整性检测

2.1 测试的意义

在各类结构建筑物中的质量问题和重大质量事故多与基础结构工程质量有关，其中有不少是由于桩基工程的质量问题，而直接危及主体结构的正常使用与安全。我国每年的用桩量超过数百万根，其中沿海地区和长江中下游软土地区占比尤其突出。如此大的用桩量，如何保证质量，一直倍受建设、施工、设计、勘察、监理各方以及建设行政主管部门的关注。桩基工程除因受岩土工程条件、基础与结构设计、桩土体系相互作用、施工以及专业技术水平和经验等关联因素的影响而具有复杂性外，桩的施工还具有高度的隐蔽性，发现质量问题难，事故处理更难。因此，桩基检测工作是整个桩基工程中不可缺少的重要环节，只有提高桩基检测工作的质量和检测评定结果的可靠性，才能真正做到确保桩基工程质量与安全。

20 世纪 80 年代以来，我国桩基检测技术，特别是桩基动测技术得到了飞速发展。从国内外桩基检测实践看，如果不将动测法作为质量普查和承载力判定的补充手段，很难在人力和物力上对桩基工程质量进行有效的检测和评价。因此，利用理论和实践渐趋成熟的动测技术势在必行。但同时应注意，与常规的直接法（静载法、钻芯法）相比，动测法对检测人员的经验与理论水平要求高。况且，动测法在国内起步已三十多年，但推广应用才十多年，仍属发展中的技术，经验和理论有待进一步积累和完善。

2.2 桩基检测技术概述

2.2.1 桩基检测现状

近年来，为加强基础结构工程桩基动力检测的管理，统一检测方法及技术规定，确保检测分析成果的质量，我国先后制定了《公路工程桩基动测技术规程》JTG/T F81-01-2004，《港口工程桩基动力检测规程》JTJ249-2001，《港口工程桩基静载荷试验规程》JTJ255-2002，《建筑桩基检测技术规范》JGJ106—2014、《铁路工程桩基检测技术规程》TB10218-2008 等。

目前，桩基质量检测的两项重要内容主要为桩基的承载力检测和桩身完整性检测。其中桩基承载力检测主要方法有单桩竖向抗压（拔）静载试验、单桩水平静载试验、高应变动测法，桩身完整性检测方法主要有低应变反射波法、高应变动测法、声波透射法、孔内成像法、取芯法等。

单桩竖向抗压（拔）静载试验方法是确定单桩竖向抗压（拔）极限承载力，判定工程桩竖向抗压（拔）承载力是否满足设计要求。

基桩质量检测技术体系

单桩水平静载试验是确定单桩水平临界和极限承载力,判定工程桩水平承载力是否满足设计要求以及确定浅层地基土水平抗力系数的比例系数,以便分析工程桩在水平荷载作用下的受力特性。

高应变动测法主要分析桩侧和桩端土阻力,推算单桩轴向抗压极限承载力,检测桩身缺陷位置、类型及影响程度,判定桩身完整性类别,试打桩及打桩应力监测。

开挖目视法一次开挖可对基桩的长度、缺陷、以及地质条件清楚的了解,但由于工作量大、成本高、对结构破坏性大,不能广泛使用,适用检测范围非常有限;另一方面,处于港口、码头、河流等水下基桩该方法根本无法使用。

低应变反射波法是通过分析实测桩顶速度响应信号的特征检测桩身完整性,判定桩身缺陷位置及影响程度,判断桩端嵌固情况以及完整性类别。

声波透射法是通过预埋在桩身的声测管,用声测换能器的发射和接收,测出被测混凝土介质的声学参数,分析声测管之间混凝土的缺陷位置及影响程度,判定桩身完整性类别;还可利用桩身钻孔取芯检测取芯孔周围混凝土的缺陷及影响程度。

孔内成像法是在基桩上钻孔,放入 CCD 摄像机对孔壁摄像,进而判断基桩损伤的有无和部位。该方法比较直观,测试精度高,但仍然需要在桩头部位进行测试,并且需要钻孔。

取芯法是利用钻孔取芯机械设备,直接对桩身钻孔取芯,检测混凝土灌注桩的桩长、桩身混凝土的强度,桩底沉渣厚度和桩身完整性,判定或鉴别桩端持力层岩土性状。

目前桩基完整性检测比较归纳如下。

表 2-2-1 桩基完整性检测对比

名称	测试内容	优点	缺点
开挖目视	基桩完整性	结果直观	工作量大、对结构破坏较大、成本较高
取芯法	基桩完整性、混凝土强度	结果直观	需桩头露出、受钻心质量影响、成本较高
孔内成像法	基桩完整性	结果比较直观,精度高	需要桩头露出,并且进行钻孔
声波透射法	基桩完整性	精度较高	需桩头露出且需要预留检测孔。
低应变反射波法	基桩完整性	操作简便、结果较为直观	需桩头露出、信号需人工判断

2.2.2 桩基检测中存在的问题

目前,国内有关基桩检测的标准虽已形成初步系列,但这些标准只针对一类检测方

法单独制定，有关设计规范对桩基检测的规定比较原则，主要侧重于为桩基设计提供依据。这些标准施行后暴露出的问题可归纳为：

- 1) 各方法之间在某些方面（如抽检数量、桩身完整性类别划分及判据、测试仪器主要性能指标、复检规则等）缺乏统一的标准（至少是能被共同接受的一个下限原则），使检测人员在方法应用、检测数据采用及评判时显得无所适从，容易造成桩基工程验收工作的混乱。
- 2) 由于技术上的原因，各检测方法都有其一定的适用范围。若将检测能力和适用范围不适宜的扩大，容易引起误判。
- 3) 桩基检测通常是直接法与半直接法配合，多种方法并用。当需要对整个桩基质量进行评定时，单独的方法无法覆盖，各个标准（包括地方标准）并用时又出现主次不分或不一致。
- 4) 目前已有的桩基检测技术都是针对新桩，对于现役桩（有承台桩）基本是束手无策。而现役桩在工作过程中难免出现病变，也需要检测。

2.3 低应变反射波法

2.3.1 低应变法概述

近二三十年来，桩基无损检测，以动测为主其他方法为辅已成为桩基检测的主要发展趋势。国内外利用冲击弹性波以及振动等媒质，研究开发了一系列针对桩身质量的测试方法（PIT: Pile Integrity Test），取得了巨大的成果。

其中，采用低能量瞬态或稳态激振方式在桩顶激振，对桩身完整性进行判定的检测方法最为常用。由于产生的桩体应变一般小于 0.01‰，桩-土系统处于弹性状态，故称为“低应变法”。常用的方法有动力参数法、锤击贯入试桩法、水电效应法、机械阻抗法、共振法、反射波法等。

据建设部所发工程桩动测单位资质证书的数量统计，上述各方法中，最为常用的是反射波法。该方法采用瞬态冲击方式，通过实测桩顶加速度或速度响应时域曲线，基于一维波动理论分析来判定基桩的桩身完整性，这种方法称之为反射波法（或瞬态时域分析法）。

所用动测仪器一般都具有傅立叶变换功能，可通过速度幅频曲线辅助分析判定桩身完整性，即所谓瞬态频域分析法；也有些动测仪器还具备实测锤击力并对其进行傅立叶变换的功能，进而得到导纳曲线，这称之为瞬态机械阻抗法。当然，采用稳态激振方式直接测得导纳曲线，则称之为稳态机械阻抗法。无论瞬态激振的时域分析还是瞬态或稳态激振的频域分析，只是习惯上从波动理论或振动理论两个不同角度去分析，数学上忽略截断和泄漏误差时，时域信号和频域信号可通过傅立叶变换建立对应关系。所以，当

桩基质量检测技术体系

桩的边界和初始条件相同时，时域和频域分析结果应殊途同归。综上所述，考虑到目前国内外使用方法的普遍程度和可操作性，可将上述方法合并统称为低应变（动测）法。

对于桩身不同类型的缺陷，低应变测试信号中主要反映出桩身阻抗减小的信息，缺陷性质往往较难区分。例如，混凝土灌注桩出现的缩颈与局部松散、夹泥、空洞等，只凭测试信号就很难区分。因此，对缺陷类型进行判定，应结合地质、施工情况综合分析，或采取钻芯、声波透射等其他方法。

由于受桩周土约束、激振能量、桩身材料阻尼和桩身截面阻抗变化等因素的影响，应力波从桩顶传至桩底再从桩底反射回桩顶的传播为一能量和幅值逐渐衰减过程。若桩过长（或长径比较大）或桩身截面阻抗多变或变幅较大，往往应力波尚未反射回桩顶甚至尚未传到桩底，其能量已完全衰减或提前反射，致使仪器测不到桩底反射信号，而无法评定整根桩的完整性。在我国，若排除其他条件差异而只考虑各地区地质条件差异时，桩的有效检测长度主要受桩土刚度比大小的制约。因各地提出的有效检测范围变化很大，如长径比 30~50。桩长 30~50m 不等，故难以规定有效检测长度的控制范围。具体工程的有效检测桩长，应通过现场试验，依据能否识别桩底反射信号，确定该方法是否适用。

对于最大有效检测深度小于实际桩长的超长桩检测，尽管测不到桩底反射信号，但若有效检测长度范围内存在缺陷，则实测信号中必有缺陷反射信号。因此，低应变方法仍可用于查明有效检测长度范围内是否存在缺陷。

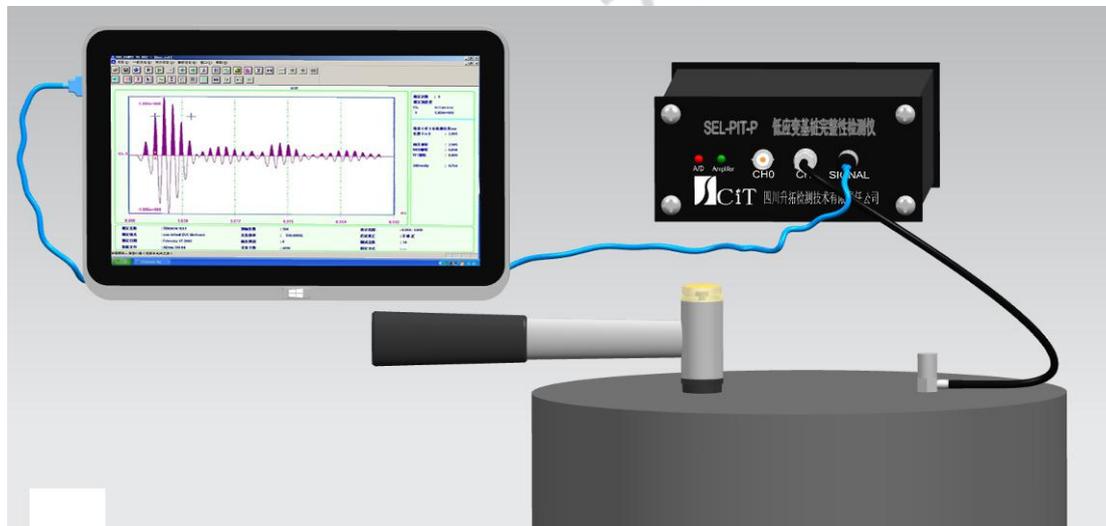


图 2-3- 1 桩基低应变检测示意图

此外，尽管利用实测曲线拟合法分析能给出容许承载力的定量结果，但由于桩的尺寸效应、测试系统的幅频相频响应，高频波的弥散、滤波等造成的实测波形畸变，以及桩侧土阻尼、土阻力和桩身阻尼的耦合影响，低应变法还不能达到精确定量容许承载力的程度。

综上所述，低应变法主要检测内容有：

- 1) 桩身完整性：桩身截面尺寸相对变化、材料密实性、连续性等；
- 2) 桩身缺陷：使桩身完整性恶化，在一定程度上引起桩身结构强度和耐久性降低的桩身断裂、裂缝、夹泥（杂物）、空洞、蜂窝、松散等；
- 3) 桩身缺陷指标：位置、类型（性质）和程度。

2.3.2 桩身弹性波的传播理论基础

1) 边界条件要求

低应变法的理论基础以一维线弹性杆件模型为依据。因此受检桩的长细比、瞬态激励脉冲有效高频分量的波长与桩的横向尺寸之比均宜大于 5 倍设计桩身截面宜基本规则。另外，一维理论要求应力波在桩身中传播时平截面假设成立，所以，对薄壁钢管桩和类似于 H 型钢桩的异型桩，低应变方法基本不适用。

根据弹性波特征，绝大多数的基桩可视为一维杆件。满足一维杆件的边界条件是

$$\left. \begin{array}{l} \lambda > 2D \\ D < \frac{1}{5}L \end{array} \right\} \quad (2-3-1)$$

式中， λ ：波长；

D ：桩的直径；

L ：桩长。

一般的基桩都能满足这样的条件。

2) 弹性波沿一维杆轴线方向的传播理论

根据弹性力学的论述，利用锤击等方法激发的弹性波在基桩中的传播适用于一维杆轴线方向的弹性波传播理论。对于不同的桩身状态，有：

(1) 桩身处于自由状态

取一维杆的轴线作为 X 轴，（式 4-1-1）所示。设一维杆为等截面，截面面积为 A ，弹性模量为 E ，密度为 ρ ，且材质均匀连续。在任意截面 x 处的微单元 dx 受纵向外力 p 扰动而自由振动，振动位移表示为 $u(x,t)$ 。

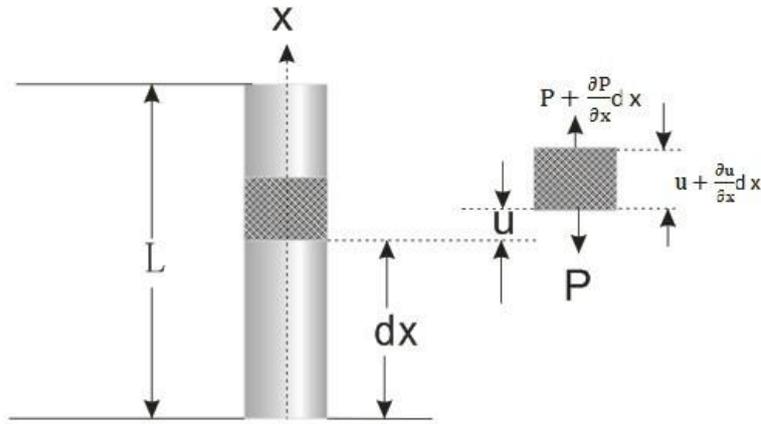


图 2-3-2 一维杆中质点纵向振动

该微元 dx 在 $x+dx$ 处，受扰动后产生的纵向张力以 $p(x)$ 表示，则

$$p(x) = AE\varepsilon \quad (2-3-2)$$

式中， $\varepsilon(x) = \frac{\partial u}{\partial x}$ ，于是上式可写为

$$p(x) = AE \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2-3-3)$$

而 $x+dx$ 截面处的总张力为：

$$p + \frac{\partial p}{\partial x} dx = AE \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx \right) \quad (2-3-4)$$

据牛顿定律，平衡力差产生物体的加速度，即：

$$\frac{\partial p}{\partial x} dx = \rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2-3-5)$$

整理后，有：

$$AE dx \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2-3-6)$$

$$\frac{E}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

整理后可得一维杆的质点纵向振动微分方程，可知 C 是弹性波沿一维杆轴向传播速度，也就是桩身轴向波传播速度。

$$(2-3-8)$$

亦即以 $x - Ct$ 和 $x + Ct$ 为参数的任意函数均可满足式 4-1-9，它表明初始的扰动将保持其原始波形，并以 C 的速度传播。 $x - Ct$ 表示向下传播的，是我们在桩顶激励时所研究的。

(2) 桩身处于非自由状态

实际的桩是埋入地层中的，桩身与周围土体间存在摩擦。当桩的上端受到冲击扰动后，产生的弹性波动沿桩身向下传播。同样，可导出其波动方程。从中可见，此时桩身内的波传播速度仍为 C 。

(3) 弹性波波速

在三维体（亦即弹性波的波长小于结构的）无限体的波速，一般桩身混凝土的泊松比在 0.2 左右，可计算。这就是透射法检测到的 P 波波速比反射法测到的一维杆的波速要高的原因。

在工程应用中，桩波速 C 的统计值一般如下：水下灌注桩桩身在 3400~4000m/s；干作业灌注桩桩身在 4000~4400m/s；预制桩桩身在：4200~4400m/s。

2.3.3 桩基完整性测试原理

当弹性波遇到截面变化或者材质变化时（如桩底、断桩或严重离析等部位）或桩身截面积变化（如缩径或扩径）部位，其反映在机械阻抗（一般用 z 来表示材料的机械阻抗， $z = \rho CA$ ，这里的 A 是断面截面积）的变化。在机械阻抗发生变化的界面上，传播的弹性波会产生波的反射和透过。

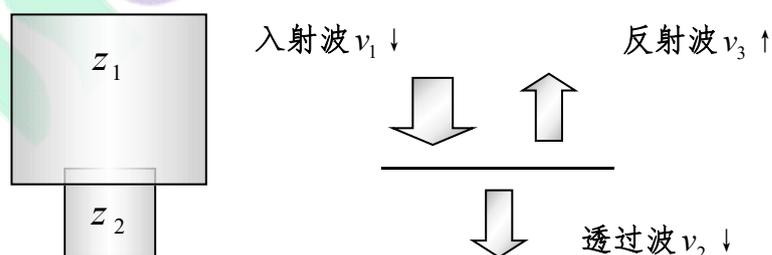


图 2-3-1 变化的机械阻抗面发生的反射和通过

这里， v_1 ， v_3 表示单元 1 的粒子的运动速度（入射和反射， $v = \partial u / \partial t$ ）， v_2 表示单元 2 的粒子的运动速度， \uparrow 、 \downarrow 表示上行和下行。在界面上，物体内部由于弹性波产生的压力和粒子速度仍然保持连续，即：

$$\begin{aligned}
 p_1 + p_3 &= p_2 \\
 v_1 + v_3 &= v_2
 \end{aligned}
 \tag{2-3-11}$$

若仅考虑一维情况（ x 方向），压力 p 可以表示。此外，反射波和透过波的大小用振幅率来表示。因此，在桩基检测中测试得到的反射波具有如下性质。

- (1) 在均质桩身中，由于机械阻抗相同（ $z_1 = z_2$ ），不产生反射；
- (2) 对于摩擦桩，桩底一般位于土质材料中。由于土体材料的阻抗较低即在机械阻抗减少（ $z_1 > z_2$ ），根据（2-3-14）可知反射波 v_3 为正，表明产生反射且反射信号的相位与入射信号相同（图 2-3-2）。而桩基为嵌岩桩时，其机械阻抗增加，反射波 v_3 为负，表明桩底反射信号的相位与入射信号相反；

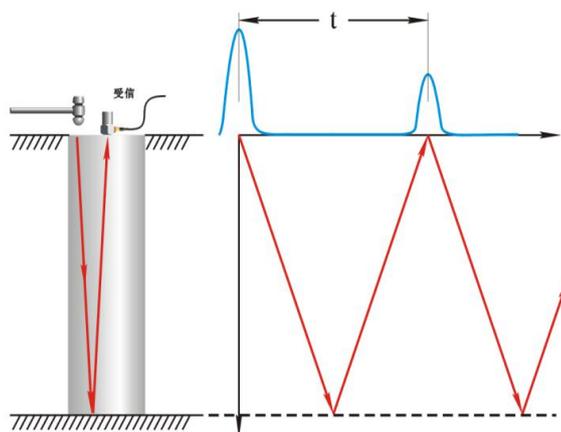


图 2-3-2 完整摩擦桩反射信号示意图

- (3) 当有缩径（下图）或扩径时，机械阻抗分别减少或增加。与摩擦桩或嵌岩桩类似，产生同相或反向的反射波；

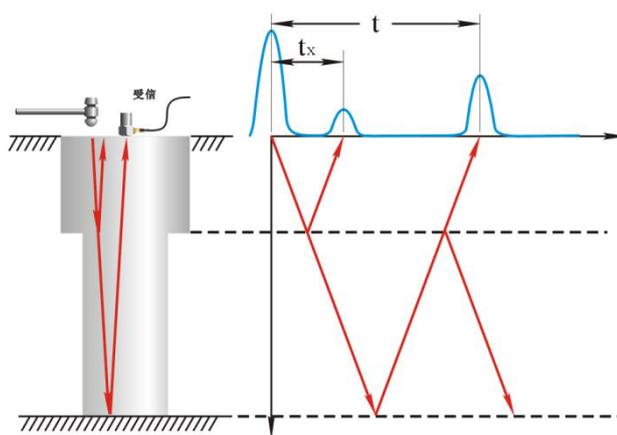


图 2-3- 3 变截面桩反射示意图

(4) 当出现断桩、薄弱层等，一般均会造成机械阻抗减少，从而产生同相反射。

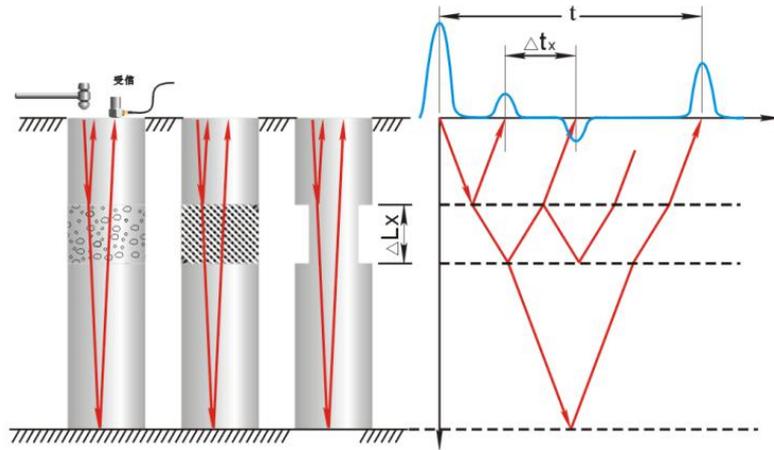


图 2-3- 4 缺陷桩反射示意图

2.3.4 波长与检测分辨力的关系

在上一节的理论介绍中，振幅反射率等均与弹性波的频率（波长）无关。而实际上，低应变反射法对缺陷的检测能力与频率有着密切的关系。其原因在于，桩身缺陷除断桩等极端条件外，一般均非单纯的阻抗降低，而可以看成是一种夹层。

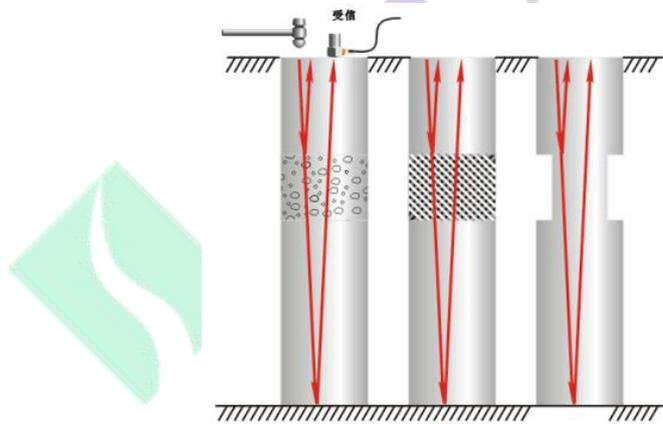


图 2-3- 5 夹层型缺陷

若令健全部位为媒介 1 ($z_1 = \rho_1 v_1 A_1$)，夹层缺陷部位为媒介 2 ($z_2 = \rho_2 v_2 A_2$)，则在媒介 1 和媒介 2 的上下两个交界处均会产生透射和反射。当入射波是调谐波时，可将各入射波、反射波表示为：

桩基质量检测技术体系

$$u_1(x,t) = Ae^{i(k_1x-\omega t)} + Be^{-i(k_1x+\omega t)}$$

$$u_2(x,t) = Ce^{i(k_2x-\omega t)} + De^{-i(k_2x+\omega t)}$$

$$u_3(x,t) = Ee^{i(k_1x-\omega t)}$$

其中, A 、 C 、 E 为 x 方向媒介 1、2 及 3 (与媒介 1 相同) 前行波的振幅, B 、 D 为 1-2、2-3 界面反射波的振幅, 沿 x 反方向传播, 且有

$$k_1 = \frac{\omega}{v_1}, \quad k_2 = \frac{\omega}{v_2}$$

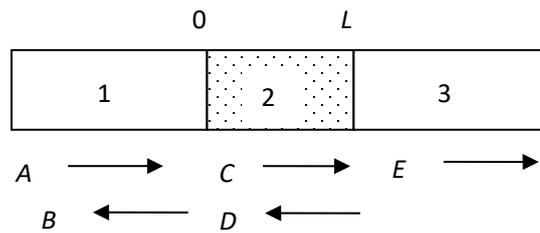


图 2-3-6 波的定义

$k_1 = \omega/V_1$: 媒介-1 中的波数

$k_2 = \omega/V_2$: 媒介-2 中的波数

L : 媒介-2 的长度

由此可见,

- (1) $z_1 = z_2$ 时, $B = 0$
- (2) 当 $k_2L = n\pi$ 时, $B = 0$

此时, 反射信号为 0, 激发的能量将会全部透过媒介, 若仅考虑透过和反射信号的振幅比。同样, 可以得到振幅反射率的绝对值 R 。

下面, 以一个计算例来说明。设某桩基直径为 1m, 弹性波波速为 3.6km/s, 密度为 2400kg/m³。夹层厚 0.1m, 波速降低为 1/3, 为 1.2km/s。计算得到的反射率与入射弹性波频率之间的关系如下图所示。可以看出,

- (1) 反射系数与入射弹性波的频率有关;
- (2) 在一定频率范围内, 随着频率的增加, 反射系数也有明显的提高。另一方面, 当频率较低时, 反射率很低, 无法辨别缺陷的影响;

- (3) 此外需要注意的是，在特定的频率下，反射系数会出现低下的现象。在特定的频率下，反射系数会急剧降低。因此，采用变频激振的方式是有效的。

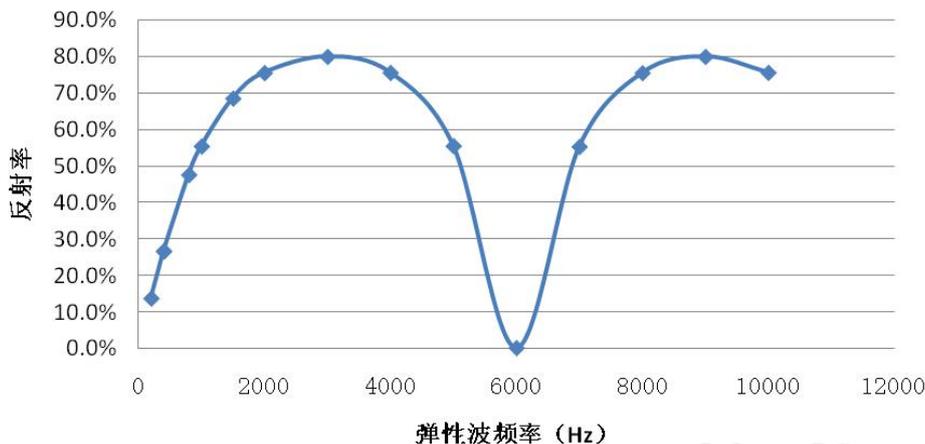


图 2-3-7 夹层型缺陷反射率与弹性波频率间的关系

2.3.5 波长与有效检测深度的关系

决定桩基低应变反射法有效检测深度的因素，主要取决于信噪比。而提高信噪比的方法主要有增加激振力度、降低噪声、增强反射信号等方法。其中，反射信号的强弱除了与激振力度有关以外，还与

- 1) 阻抗变化：缺陷规模越大，阻抗变化的幅度、范围越大，反射率也就越高；
- 2) 激振波长：激振波长的增大对反射信号起的作用是相反的。

一方面，长波会降低缺陷的反射率，另一方面也会降低弹性波在桩基传播中的衰减，有助于保持信号的幅值。根据 1 维弹性波理论，在桩基中传播的弹性波的振幅幅值可以表示。材料粘性衰减特性的常数，与桩的比表面积、周围土质等有关。一般来说，桩的比表面积越大、周围土体约坚硬、粘性越大，值越小。

可以看出，弹性波的波长越短，其粘性衰减越大，而且与波长、距离呈指数关系。

2.4 行业检测规程的解读与探讨

目前，我国正在施行的桩基质量的检测规程主要有三个，即：

- [1] 中华人民共和国行业标准：建筑桩基检测技术规范（JGJ 106—2003，J 256—2003）
[S]. 中华人民共和国建设部，2003. 07. 01 实施。（下面简称建筑规范）

- [2] 中华人民共和国行业标准：铁路工程基桩检测技术规程(TB10218-2008, J808-2008) [S]. 中华人民共和国铁道部, 2008.06.05 发布、2008.07.01 实施. (下面简称铁路规范)
- [3] 中华人民共和国行业标准：铁路工程基桩无损检测规程(TB10218-99) [S]. 中华人民共和国铁道部, 1999.03.02 发布、1999.06.01 实施.
- [4] 中华人民共和国行业标准：基桩动测仪(JG/T3055-1999) [S]. 中华人民共和国建设部, 1999.03.22 发布, 1999.09.01 实施. (下面简称基桩动测仪)

在此,我们就这几个规程在测试对象、测试设备要求、抽检数量、分析方法以及质量判定等方面,结合我们的设备和测试经验进行比较、解读和探讨。

2.4.1 测试对象

基桩有多种类型,根据施工方法的不同,可分为预制桩和灌注桩两大类。其中,根据所用材料的不同,预制桩可分为混凝土桩(截面方形或圆形,桩径 300—500mm,一般工厂制单桩长为 12m,现场连接,可焊接接桩、法兰连接桩、硫磺胶泥接桩)、钢桩(H型钢桩和钢管桩)和木桩三类。

灌注桩在桩位直接成孔,放入钢筋笼,浇灌混凝土。根据施工工艺,又可分为:

- 1) 钻孔灌注桩:常用桩径 600~650 mm,桩长 10~30m 采用泥浆护壁大直径 1500~3000m,下钢套管护壁
- 2) 沉管灌注桩:常用桩径 300~500,长 20m,施工速度快,但易出现缩颈,离析。
- 3) 挖孔桩:人工控孔和机械挖孔,用于大直径桩 0.8~3.5m

低应变反射法的适用对象对比可见下表。

表 2-4- 1 基桩低应变检测测试对象

基桩类型		建筑规范	铁路规范	基桩动测仪
预制桩	混凝土桩	√	√	
	钢管桩	×	×	
	木桩	×	×	
灌注桩		√	√	

表 2-4- 2 基桩低应变检测测试对象要求

基桩特性		建筑规范	铁路规范	基桩动测仪
尺寸	直径要求	-	<2.0m	

基桩质量检测技术体系

	长度要求	现场确定	一般<40m,可现场确定	
形状	桩顶	平整密实,且与桩轴线基本垂直		
	桩身	-	规则截面	
强度		达到设计强度的70%,且不小于15MPa		

2.4.2 测试设备要求

对于测试设备的要求,《基桩动测仪》根据性能,将检测仪分为三级。而其他两个规程则在此基础上做了具体的要求。

表 2-4-3 基桩低应变检测设备硬件主要要求

项目		基桩动测仪			建筑规范	铁路规范
		1级	2级	3级		
AD转换	分辨率, Bit	≥8	≥12	≥16	符合《基桩动测仪》要求	≥12
	采样频率, KHz	≥20		≥25		2~100
	采样点数	≥1024				≥1024
加速度测量	≤10%频率响应 (Hz)	3~3000	2~2500	1~8000		
	传感器安装谐振频率 (KHz)	≥5	≥10		≥10	
	系统动态范围 (dB)	≥40	≥66	≥80	宜≥60dB	
	传感器				宜压电式, 灵敏度>100mV/g	

【说明】采样频率、点数等均为单通道值

表 2-4-4 基桩低应变检测分析软件要求

建筑规范	铁路规范
应具有信号显示、储存和处理分析功能	应具有信号采集、滤波、放大、显示、储存和处理分析功能

2.4.3 测试数量和比例

表 2-4-5 测试数量和比例

建筑规范	铁路规范 (铁路工程基桩无损检测规程)
(1) 柱下三桩或三桩以下承台抽检桩数不小于1根;	(1) 基桩完整性检测数量应符合铁路工程设计和相关验收标准的要求;

基桩质量检测技术体系

<p>(2) 设计等级为甲级，或成桩质量可靠性较低的灌注桩，抽检数量不少于总桩数的 30%，且不得少于 20 根，其它桩基工程的抽检数量不少于总桩数的 20%，且不得少于 10 根；</p> <p>(3) 地下水以上终孔且持力层通过核实验的人工挖孔桩、单节混凝土预制桩，不少于总桩数的 10% 且不应少于 10 根。</p> <p>(4) 根据工程实际情况可适当增加。</p>	<p>(2) 参考《铁路工程基桩无损检测规程》，对于大跨度桥梁的基桩、直径不小于 1.5m 的基桩，同一墩台基桩数量不超过 2 根时，应全数检测；</p> <p>(3) 抽检数量不少于总桩数的 30%，且不得少于 10 根；</p> <p>(4) 当检测不合格的桩数大于抽测数的 30%，应加倍抽测；当加倍抽测后不合格的桩数仍大于抽测数的 30% 时，应全部检测；</p>
--	--

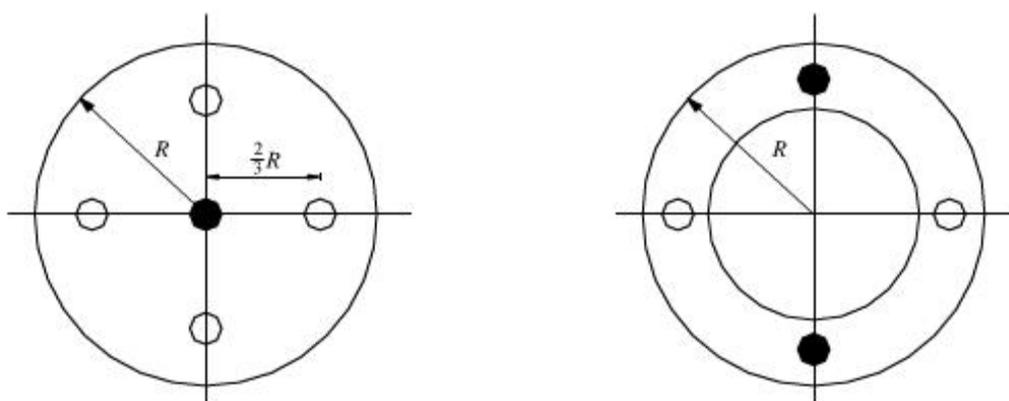
2.4.4 现场检测

有关传感器的安装、激振点布点以及激振方式的选取等，请参见下表。

表 2-4-6 现场检测

项目	建筑规范	铁路规范
传感器的安装	<p>(1) 与桩顶面垂直；</p> <p>(2) 用耦合剂粘结时，应具有足够的粘结强度。</p>	<p>(1) 与桩顶面垂直；</p> <p>(2) 可用黄油、橡皮泥、石膏等材料作为耦合剂粘。</p>
激振点的位置	<p>(1) 实心桩的激振点位置应选在桩中心，传感器宜安装在距桩中心 2/3 半径处；</p> <p>(2) 空心桩的激振点与传感器宜在同一水平面上，且与桩中心连线形成 90° 角，且安装位置宜在桩壁厚 1/2 处（图 2-4-1）；</p> <p>(3) 激振点及传感器的安装位置均应避开钢筋笼的主筋影响。</p>	
激振方向	沿桩轴线方向	
激振装置	<p>应通过现场敲击试验，选择适合重量的激振锤和锤垫。宜用宽脉冲获取桩底或桩身下部缺陷反射信号，宜用窄脉冲获取桩身上部缺陷反射信号</p>	<p>应根据缺陷所在位置的深浅，及时改变锤击脉冲的宽度。当检测长桩的桩底反射信息或深部缺陷时，冲击入射波脉冲应较宽，反之应较窄。</p>
信号采集和筛选	<p>1) 根据桩径大小，桩心对称布置 2~4 个测点；</p>	<p>1) 桩径 $D \leq 0.8m$，布置 2 个测点；</p> <p>2) 桩径 $0.8 < D \leq 1.25m$，布置 3 个</p>

	<p>2) 每个测点记录的有效信号数不宜少于 3 个;</p>	<p>测点;</p> <p>3) 桩径 $1.25 \leq D < 2.0\text{m}$, 布置 4 个测点;</p> <p>4) 每个测点重复检测次数不宜少于 3 次, 且检测波形应具有良好的一致性。信号干扰大时, 可采用信号增强技术和多次平均的方式来提高信噪比;</p>
--	---------------------------------	--



●: 激振点; ○: 传感器

表 2-4-1 激振点与传感器的安装位置

需要说明的是, 激振信号对测试精度的影响是很明显的, 主要有两点:

- 1) 激振信号脉冲的宽窄: 采用软质 (如尼龙、塑料)、重锤, 并采用厚的锤垫, 可以激发宽频脉冲。反之, 采用硬质 (如金属)、轻锤, 并采用薄的锤垫, 则可激发窄频脉冲;
- 2) 激振信号的幅值: 敲击力大可以提高激振信号的幅值, 有利于提高测试深度。但过大的激振力可能造成传感器的错位, 以及延长激振信号的衰减时间, 不利于测试浅部缺陷。

2.4.5 数据分析与判定

两个规范对数据分析与判定的要求基本相同。

1) 桩身波速平均值的确定

当桩长已知, 桩底反射信号明确时, 在地质条件、桩型及成桩工艺相同的基桩中, 选取

不少于 5 根 I 类桩的桩身波速按下式计算其平均值 c_m 。

桩身质量检测技术体系

其中， c_i 为第*i*根受检桩的桩身波速值（km/s），可按时域法或频域法求得。

2) 桩身缺陷位置 x

$$\text{时域: } x = \frac{1}{2} c_m \cdot \Delta t_x$$

$$\text{频域: } x = \frac{c_m}{2\Delta f'}$$

其中， x ：桩身缺陷距传感器安装点的距离（m）；

Δt_x ：时域信号第一峰与缺陷反射波峰间的时间差（ms）；。

$\Delta f'$ ：幅频曲线上缺陷相邻谐振峰间的频率差（KHz）；

3) 桩的完整性判定

桩身完整性应结合缺陷出现的深度、测试信号衰减特性以及设计桩型、成桩工艺、地质条件、施工情况、混凝土波速，依据测试时域特征、幅频特征进行综合分析判定。

表 2-4- 7 桩身完整性判定

桩等级	时域信号特征	幅频信号特征
I 类桩	$2L/c_m$ 时刻前无缺陷反射波，有桩底反射波	桩底谐振峰排列基本等间距，其相邻频差 $\Delta f \approx c_m / 2L$
II 类桩	$2L/c_m$ 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，其相邻频差 $\Delta f \approx c_m / 2L$ 。轻微缺陷产生的谐振峰与桩底谐振峰之间的频差 $\Delta f' > c_m / 2L$
III类桩	有明显缺陷反射波，其他特征介于 II类和IV类之间	
IV类桩	$2L/c_m$ 时刻前出现严重缺陷反射波或周期性反射波，无桩底反射波； 或因桩身浅部严重缺陷使波形呈低频大振幅衰减振动，无桩底反射波； 或按平均波速计算的桩长明显短于设计桩长。	缺陷谐振峰排列基本等间距，其相邻频差， $\Delta f' > c_m / 2L$ 无桩底谐振峰； 或因桩身浅部严重缺陷只出现单一谐振峰，无桩底谐振峰。

【说明】出现下列情况之一，桩身完整性判定应结合其他检测方法进行：

- (1) 实测信号复杂、无规律，无法对其进行准确分析和评定；
- (2) 当桩长的推算值与实际桩长明显不符，且又缺乏相关资料加以解释或验证；
- (3) 桩身截面渐变或多变，且变化幅度较大的混凝土灌注桩；
- (4) 某一场地多数桩底反射不明显，无法对桩身完整性和桩长作出判定。

2.5 提高检测精度的方法

2.5.1 影响检测精度的主要因素

综上所述，影响基桩完整性检测精度的主要因素有：

1) 激振信号的质量

激振信号的质量对测试结果有很大的影响。

一般来说，高频（窄脉冲）信号对缺陷更加敏感，但衰减快，适合于短桩的检测。低频（宽脉冲）信号则相反。因此，通过现场试验，选取合适的激振锤和锤垫是重要的。

2) 速度信号和加速度信号

用于基桩完整性检测的信号可以是速度信号 $\dot{y}(t)$ ，也可以是加速度信号 $\ddot{y}(t)$ 。

可以看出，相比速度信号，加速度信号有一个 ω 倍的增幅。由于缺陷谐振峰的频差 $\Delta f'$ 大于桩底的频差 Δf ，因此，加速度信号更适合识别缺陷反射。

但是，由于激振产生的弹性波加速度信号并非理想的脉冲信号，而是一个衰减振动信号。当然，理想的激振波形应如下图 A，即产生的波形衰减较快。而如图 B 那样的振动残留时间长的波形显然不利于检测。

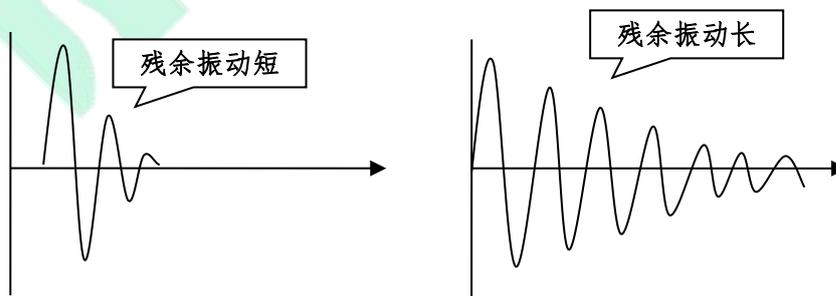


图 2-5-1A 良好的激振信号

图 2-5-1B 不良的激振信号

因此，如何减少残留振动的时间对于提高检测精度是非常必要的。此时，速度信号则具有收敛快的特点。此外，防止 2 次激振（激振棒激振）也是非常重要的。

- 3) 反射信号的提取：对于较长、大直径桩，桩底的反射信号较为微弱，对其的合理识别是判定桩基完整性的前提：

2.5.2 提高测试精度的主要方法

针对所述影响测试精度的主要因素，采用以下措施对提高测试精度是必要的：

1) 提高激振信号的质量

- (1) 桩头处理：灌注桩应凿去桩顶浮浆或松散、破损部分，并露出坚硬的混凝土表面桩顶表面应平整干净且无积水，并将敲击点和响应测量传感器安装点部位磨平。对于预应力管桩，法兰盘与桩身混凝土之间结合不紧密时，应采用电锯将桩头锯平。

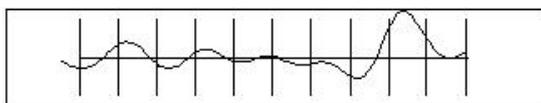


图 2-5-2A 桩头有浮浆的测试波形

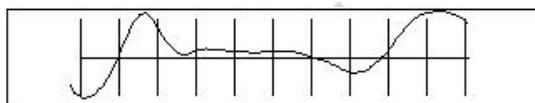


图 2-5-2B 桩头无浮浆的测试波形

- (2) 传感器的设置：传感器用耦合剂粘结时，粘结层应尽可能薄。必要时可采用冲击钻打孔安装方式，但传感器底安装面应与桩顶面紧密接触。此外，在有经验时，用人工压着的方式也可以得到较好的固定效果。
- (3) 合理选取激振锤和锤垫：控制激励脉冲的宽窄以获得清晰的桩身阻抗变化反射或桩底反射，同时又不明显产生波形失真或高频干扰。
- 2) 加速度、速度双模的分析方法。通过对测试得到的加速度信号进行数值积分，即可得到速度信号。

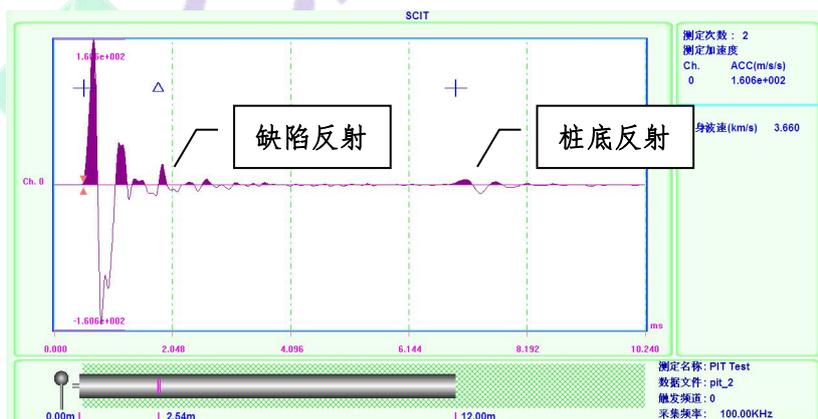


图 2-5-3 加速度测试波形

桩基质量检测技术体系

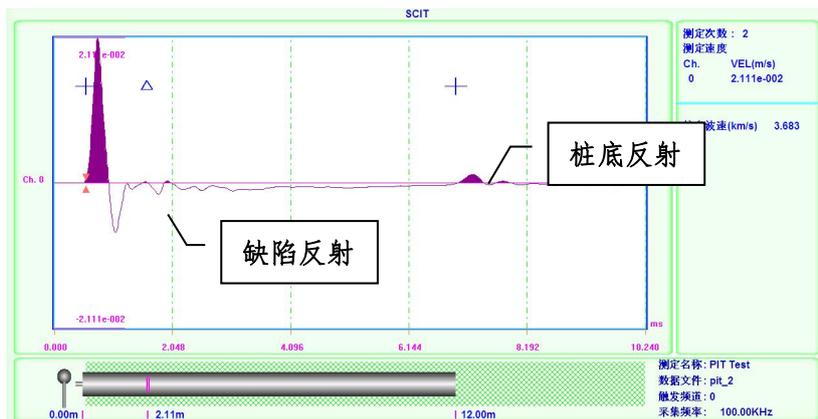


图 2-5-4 速度波形

两种信号互相验证，可有效地提高判定精度。

3) 反射信号的提取精度的提高:

反射信号的增幅处理 (TAR); 由于桩底的反射信号传播距离长, 衰减大, 信号非常微弱。因此, 采取必要的增幅手段是有益的。增幅一般采用两种方式, 即线性增幅和指数增幅。

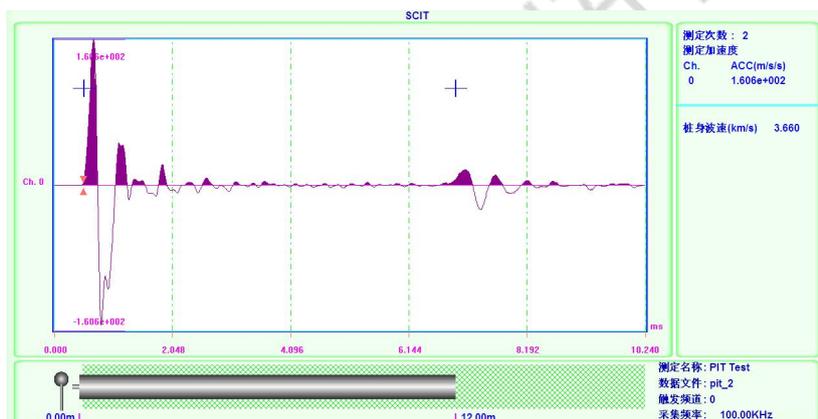


图 2-5-5 TAR 增幅后波形 ($t_0: 2\text{ms}$, $m: 0.8$)

积算平均 (Stacking) 处理, 可减少随机噪声的不利影响。当噪声为随机信号 (白噪声) 时, N 次测试数据经积算平均处理后, 其信噪比 (S/N) 可提高 \sqrt{N} 倍。

反射信号的匹配识别技术 (Matching): 可大幅提高反射信号的识别能力, 并取得国家发明专利。由下图可以看出, 采用信号匹配技术不仅可以消减噪声的影响, 而且有助于确定缺陷的位置 (峰值位置)。

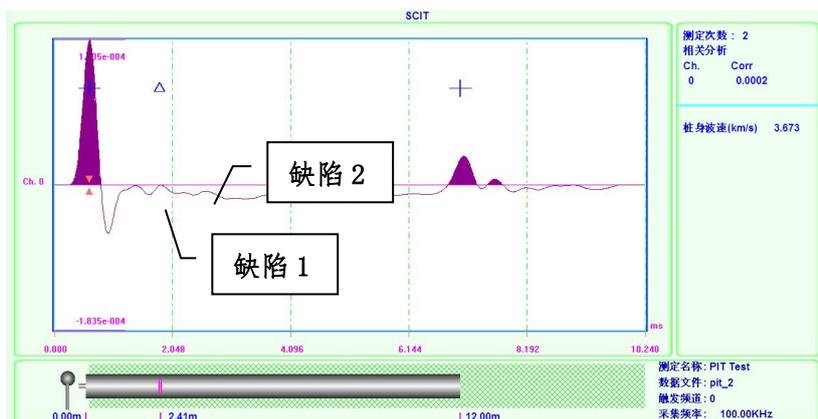


图 2-5-6 对速度信号进行匹配处理后结果

4) 降低噪声:

噪声主要包括环境噪声（如周围的机械振动）和内部电气噪声（如电缆噪声、仪器内部各类噪声等）。为了降低外部环境噪声，可以选则在机械施工停止的期间进行测试。而降低内部噪声则需要更好的仪器。

此外，采用滤波（包括数字滤波，如 BPF、EMD 等）技术也是降低噪声，提高信噪比的有效方法。

2.5.3 典型状况的时域、频域信号

1) 断桩的反射

若桩身较长，上部断裂，波阻抗界面明显，反射系数大就会产生多次反射。如下图所示可见断桩部位的 1 次、2 次、3 次乃至 4 次反射。其规律是：多次反射波的波幅按指数规律衰减；且反射的时间间隔基本相同。至于断桩多次反射的次数，与断裂部位的长度、断裂部位桩身的声波衰减系数的大小、断裂处的反射系数有关。

需要指出的是，断桩难以得到桩实际底部反射信号。

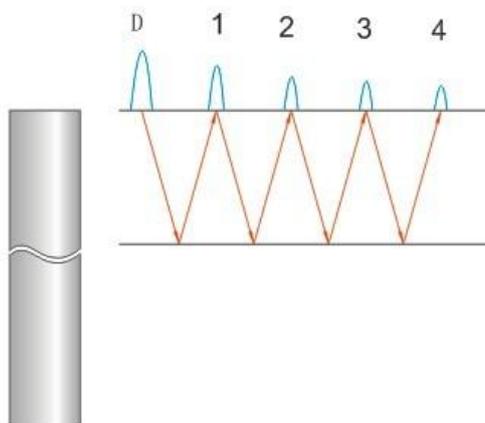


图 2-5-7 断桩反射特征

2) 扩径的多次反射

桩身扩径会产生反射，但其多次反射的规律较为特殊。如下图所示，激励的首波 D 会在扩径处产生多次反射，一次反射波 R1 的相位与 D 相反，但扩径二次反射波 R2 的相位则与 D 相同，扩径的三次反射波 R3 又与 D 反向，如是循环。

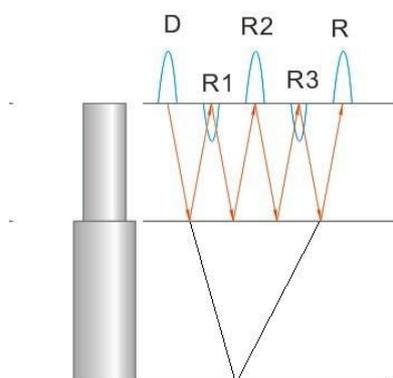


图 2-5-8 扩径桩反射特征

需要指出的是，扩径桩能得到桩实际底部反射信号，但比完整桩底部反射明显较弱。

3) 缩径的多次反射

与扩径对应的缩径的多次反射如下图所示。这种情况可以用振速反射系数直接判断缩径部位多次反射的相位。其规律是多次反射波 R1、R2、R3 的波幅按指数规律递减；且反射的时间间隔基本相同。至于缩径的多次反射的次数，与缩径部位的长度、缩径部位桩身的波衰减、缩径处的反射系数的大小有关。

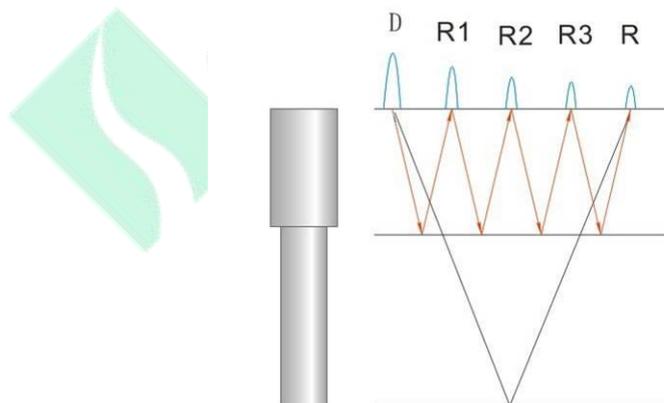


图 2-5-9 缩径桩反射特征

需要指出的是，缩径桩能得到桩实际底部反射信号，但比完整桩底部反射明显较弱。

4) 扩底桩的反射

扩底桩的桩底直径加大，在直径加大的部位，会产生与首波相位相反的反波，于

是在桩底反射之前，有一个反相位的扩底信号。

5) 嵌岩桩的桩底反射

当基岩埋深较浅，基岩成为持力层，桩底将设计在岩体的中风化层，并嵌入中风化层一倍半桩径的深度，这便是嵌岩桩。嵌岩桩的桩底反射可能有三种情况：

- (1) 桩底有沉渣。可见桩底反射，随沉渣厚度增加桩底反射波越加明显；
- (2) 无沉渣，且岩体与桩身波阻抗相等会无法观测到桩底反射；
- (3) 无沉渣，岩体波阻抗大于桩身波阻抗，可见桩底反射信号，且桩底反射波 R 与首波 D 相位相同。

6) 桩头附近缺陷的反射波

- (1) 近桩头混凝土严重离析的“反射波”记录近桩头混凝土严重离析。在这种情况下，激励桩头时的波形是一个典型质弹体系在受到外力激励时的振荡波形。激励的力脉冲较窄，后面的振荡波形频率很低。
- (2) 桩身浅部缺陷的反射。靠近桩头附近缺陷的反射波，因其到达桩顶的时间很短，很可能和首波 D 相干涉。当缺陷反射波的顶峰和首波的峰顶到达时间完全一致而叠加时，这时缺陷将无法识别，属于盲区。除此之外的其他情况，均可和首波叠加干涉作出反映。

2.6 灌注桩实例分析

2.6.1 基于特征线法的桩身特性反演

如下图所示，特征线表示了距离~时间轴上弹性波传播的轨迹。其中，实线为脉冲上升沿的传播轨迹，虚线为脉冲波结束时刻发出的卸载波的传播轨迹。

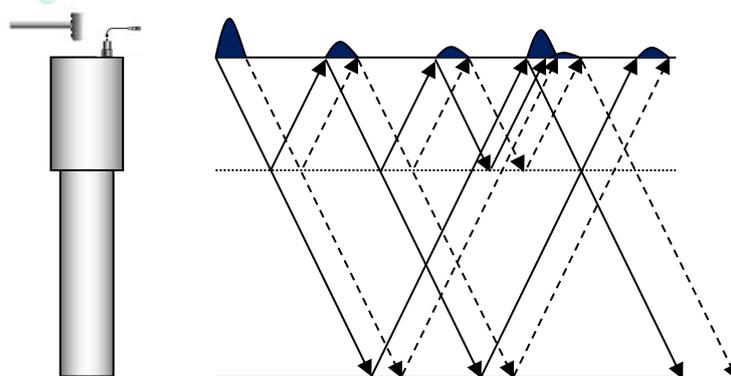


图 2-6-1 特征线法的基本概念

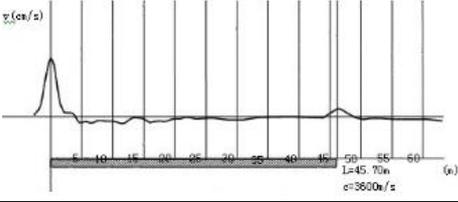
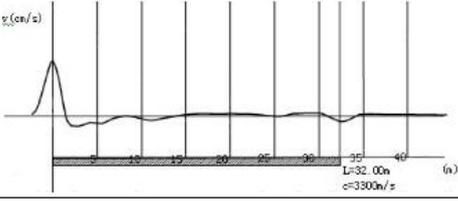
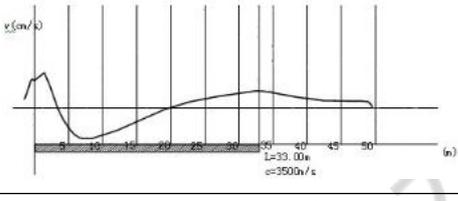
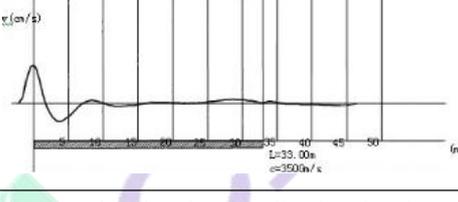
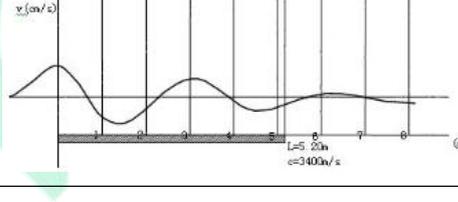
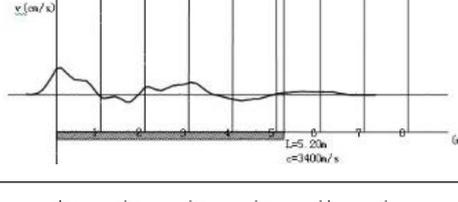
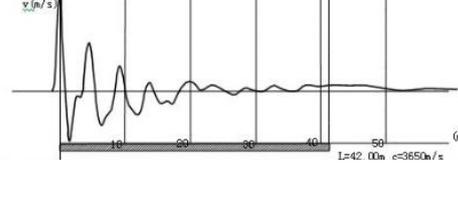
基桩质量检测技术体系

利用特征线法，可以计算出不同桩身状态下反射信号的组合。

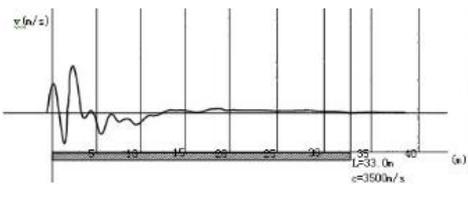
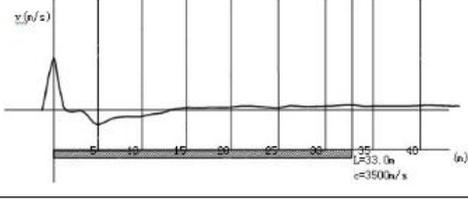
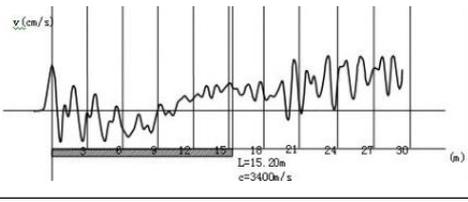
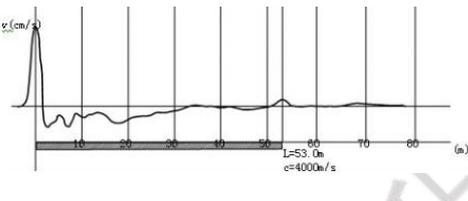
2.6.2 工程实例分析（传统示例）

我们收集了一些典型的基桩检测案例，供相关人员参考：

表 2-6-1 工程实例表

桩概述	测试波形	波形解读
钻孔灌注、嵌岩、 $\Phi 1200$ 、C30、45.7m		桩底逆向反射明显，表明有沉渣； 缺陷反射不明显，表明桩身完整； 波速：3.60km/s 判为III类桩；
钻孔灌注、嵌岩、 $\Phi 1200$ 、C30、32.0m		桩底正向反射明显，表明嵌岩好； 缺陷反射不明显，表明桩身完整； 波速：3.30km/s 判为I类桩；
钻孔灌注、嵌岩、 $\Phi 1200$ 、C30、32.0m		初测： 曲线呈低频振荡，经开凿发现桩头松散；
		复测： 凿去 1.2m 后复测，曲线正常； 波速：3.50km/s 判为I类桩；
夯扩灌注桩、 $\Phi 377$ 、C25、5.2m		尼龙锤测试： 呈低频振荡，无法分辨浅部缺陷
		铁锤测试： 在 0.6m 处存在同相、多次反射， 经开挖验证为浅部局部离析； 波速：3.40km/s，判为III类桩；
钻孔灌注桩、 $\Phi 1000$ 、C30、42m		4.5m 处缺陷同相反射明显，并伴有 多次反射，桩底反射不明显； 经开挖验证，4.5m 左右存在局部 离析，截面缺陷 1/4~1/3； 判为III/IV类桩；

基桩质量检测技术体系

钻孔灌注、 $\Phi 800$ 、C30、 33m		处理前： 1.5~2m 处缺陷同相反射明显， 桩底反射不明显； 经开挖验证，2m 处严重夹泥达 1 半桩径，判为 III 类桩；
		处理后： 凿除后复测，曲线正常； 判为 I 类桩；
钻孔灌注桩、 $\Phi 800$ 、C25、 15.2m		缺陷等间距多次反射，桩底反射 不明显； 经开挖验证，1.8m 处断裂； 判为 III/IV 类桩；
预应力管桩、 $\Phi 1200$ 、C60、 53m。桩头距 水面 9m，距入 土处 19m；		9m 处反向反射为入水处： 19m 处反向反射为入土处： 判为 I 类桩；

2.6.3 工程实例分析（验证基桩，成都，2019.05）

对某灌注基桩（摩擦桩，桩径 0.8m，桩长约 13.6m），先用跨孔超声进行了详细的缺陷检测案例，然后用低应变设备进行了检测，传感器布置位置位于声测管附近，并与其他厂商的设备进行了对比。



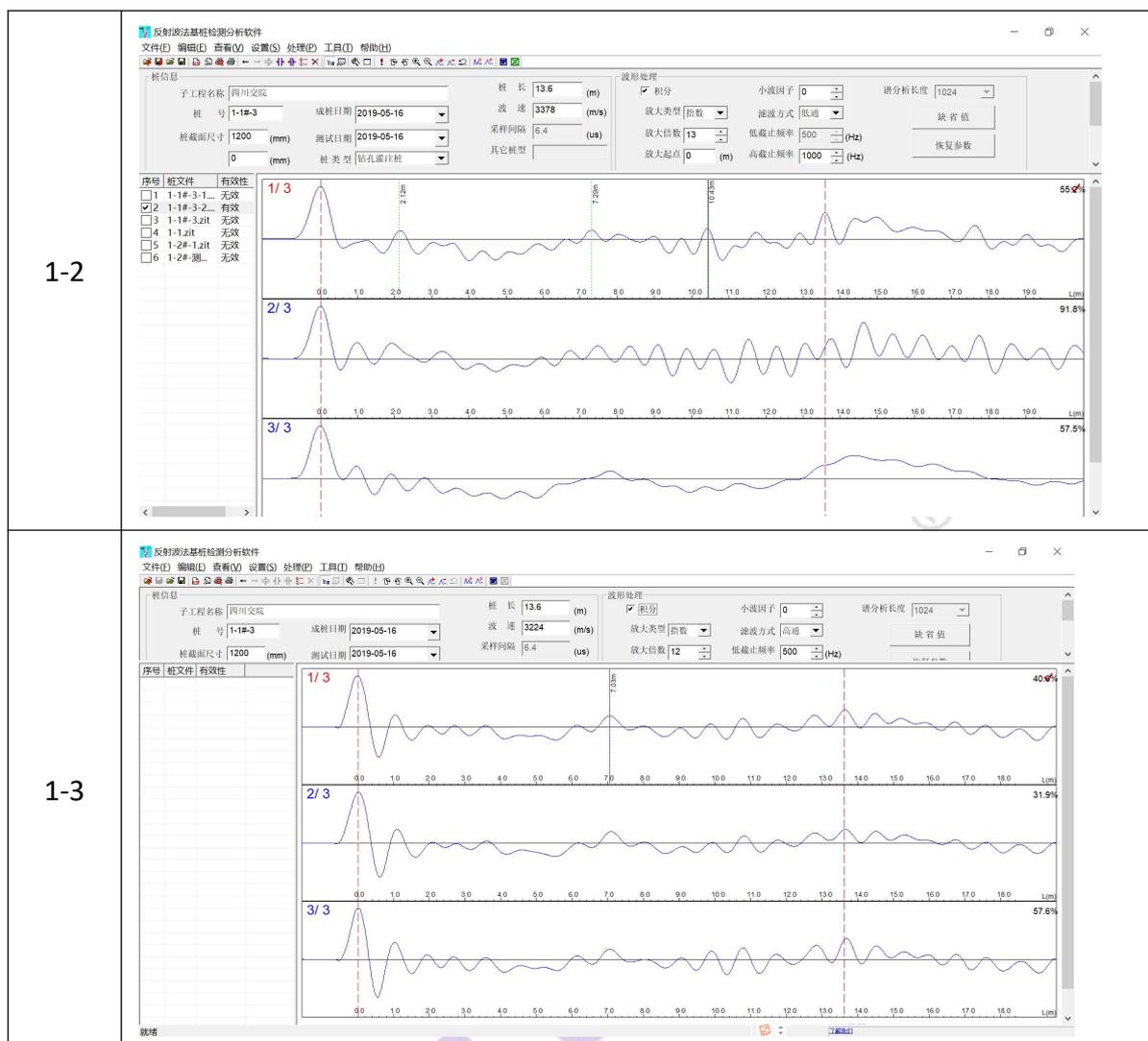
图 2-6-2 对象基桩

桩基质量检测技术体系

表 2-6-3 检测波形分析表

桩号-测点号	升拓	厂家 1
1-1		 NO. 35 桩号: 1-1#-1 桩径: 1200mm 沉管灌注桩 2019-05-13 低通: 1000.00Hz 桩长: 13.00m 波速: 3459m/s 指数放大: 15.00
1-2		 NO. 42 桩号: 1-1#-2 桩径: 1200mm 沉管灌注桩 2019-05-13 低通: 1500.00Hz 桩长: 13.00m 波速: 3030m/s 指数放大: 15.00
1-3		 NO. 50 桩号: 1-1#-3 桩径: 1200mm 沉管灌注桩 2019-05-13 低通: 1500.00Hz 桩长: 13.00m 波速: 3446m/s 指数放大: 15.00 延迟: 0.00m
厂家 2		
1-1	 反射波法桩基检测分析软件 工程名称: 四川交院 桩号: 1-1#-3 桩长: 13.6 (m) 波速: 3224 (m/s) 分析长度: 1024 列表: 1/3, 2/3, 3/3 日期: 2019-05-16	

基桩质量检测技术体系



通过对比测试，可以看出：

- 1) 根据对同一位置检测的原始波形来看，我公司检测设备的检测波形与厂家 1 的设备相近，并无太大差异；
- 2) 从信号处理结果方面，我公司设备采用了 BPF+区段增幅、信号匹配、TAR 等信号处理技术，对缺陷及桩底的识别能力更明显。

2.6.4 现场验证（深圳，2019.07）

受国家某检测中心邀请，对深圳某在建居住小区桩基的长度及完整性进行检测，被检测的桩基的桩基为 1.0m，设计桩长为桩长分别为 27m 及 37m。基桩类型为端承摩擦桩、端承抗拔桩，桩身混凝土设计强度为 C40。

为了更准确的检测桩长及桩身缺陷深度，检测前对已取样进行波速标定，波速标定及桩长检测方法为单一反射法。标定波速为 3.92KM/S，并以此为基准对基桩长度及完整性进行检测，并对检测结果进行取芯验证。

基桩质量检测技术体系

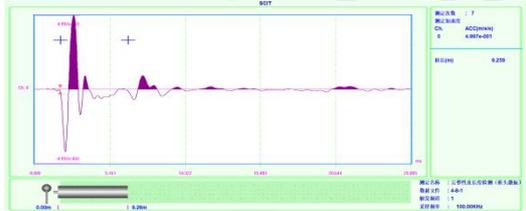
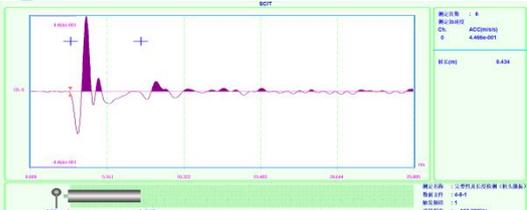
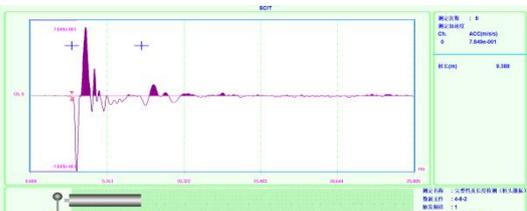
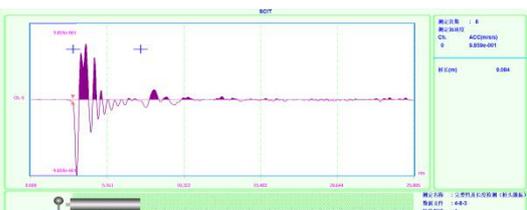
取芯验证结果表明，该设备及技术对基桩长度及完整性检测结果准确度高，稳定可靠，得到相关单位的高度评价。



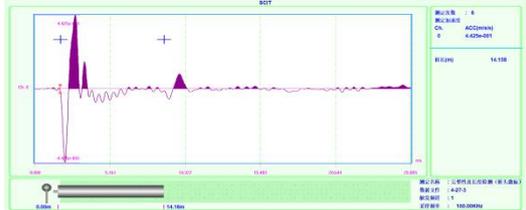
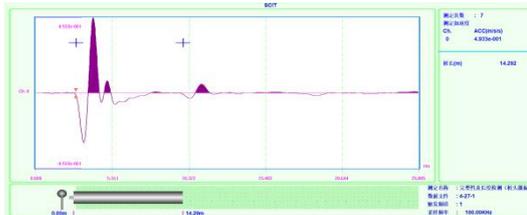
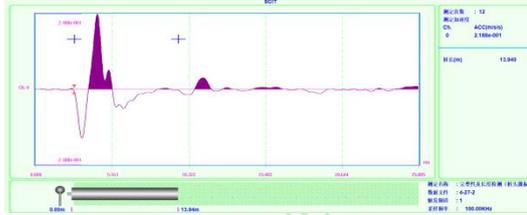
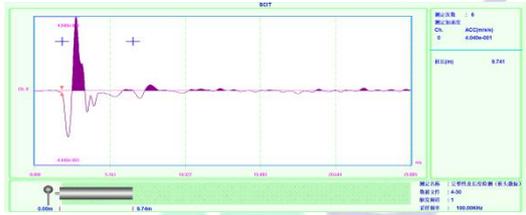
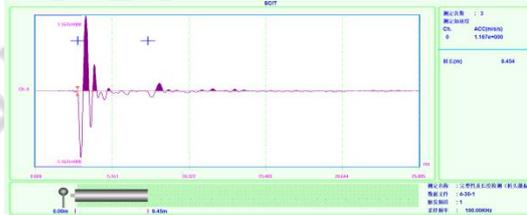
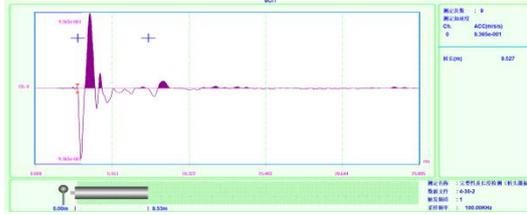
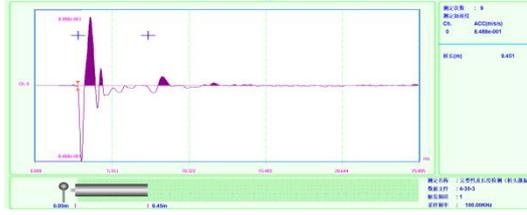
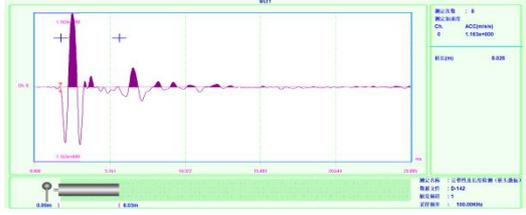
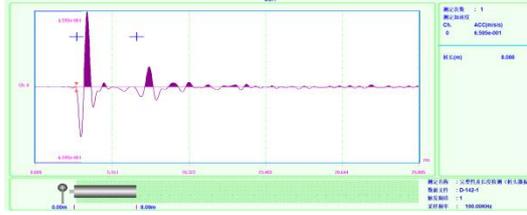
图 2-6-5 波速标定及现场检测场景

本次共检测基桩数量为 42 根，根据检测结果发现其中 4 根基桩桩身出现严重缺陷，并按照规范进行检测。检测结果波形请参考表 2-6-4。

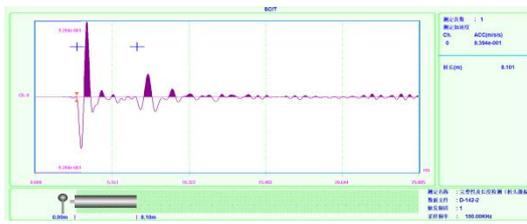
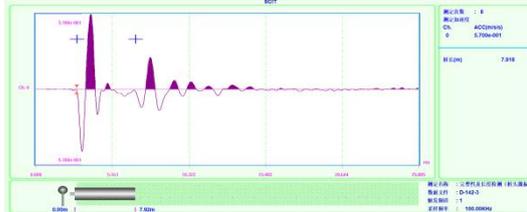
表 2-6-4 检测波形分析结果表

桩号	图谱（初测）	复测（按照低应变测法，每根桩测试 3 个方位）	
4-8	 <p style="text-align: center;">疑似缺陷深度 (m): 初测: 9.26 复测: 1#:9.43 2#:9.39 3#:9.08</p>	1#	
		2#	
		3#	

基桩质量检测技术体系

桩号	图谱 (初测)	复测 (按照低应变测法, 每根桩测试 3 个方位)
4-27	 <p>疑似缺陷深度 (m): 初测: 14.16 复测: 1#:14.29 2#:13.94 3#:13.97</p>	<p>1#</p> 
		<p>2#</p> 
		<p>3#</p> 
4-30	 <p>疑似缺陷深度 (m): 初测: 9.74 复测: 1#:9.45 2#:9.53 3#:9.45</p>	<p>1#</p> 
		<p>2#</p> 
		<p>3#</p> 
D-14 2		<p>1#</p> 

基桩质量检测技术体系

桩号	图谱（初测）	复测（按照低应变测法，每根桩测试3个方位）
	疑似缺陷深度（m）： 初测：8.03 复测：1#：8.09 2#：8.10 3#：7.92	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="margin-bottom: 10px;">2#</div>  <div style="margin-bottom: 10px;">3#</div>  </div>

根据检测结果，初测和复测的检测波形稳定，初测和复测结果重复性好。为了验证检测结果的准确性，对其中的3根桩进行取芯验证。取芯场景请参考图 2-6-6。取芯结果照片请参考表 2-6-5，结果请参考表 2-6-6。

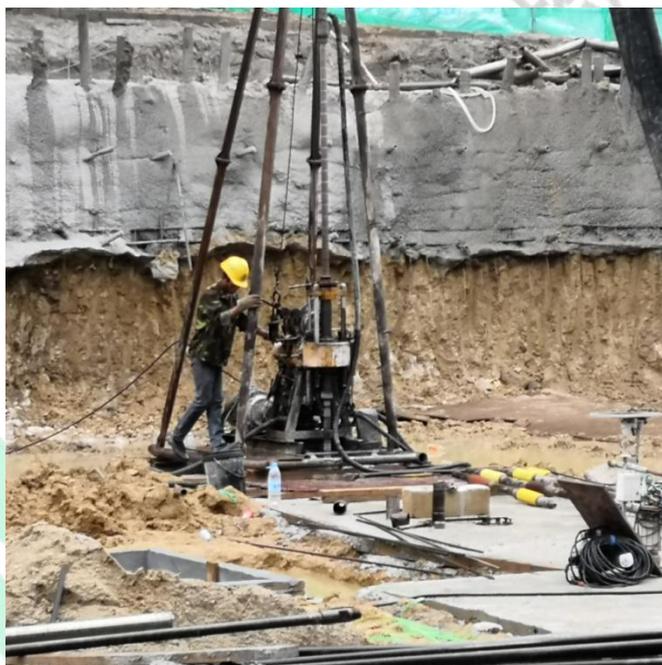


图 2-6-6 现场取芯场景

基桩质量检测技术体系

表 2-6- 5 检测波形分析结果表

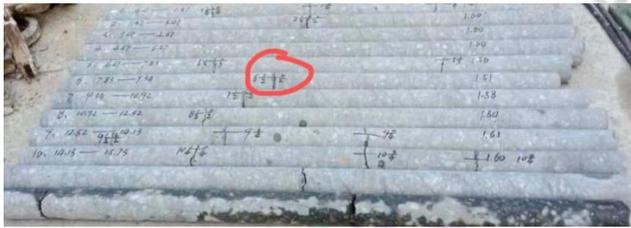
桩号	取芯照片	断口情况
4-8		
D-142(第一次)		
D-142(第二次)		
4-27		

表 2-6- 6 检测及钻芯对应结果表

桩号	第 1 次取芯	第 2 次	检测结果 (复测平均值)
4-8	9. 60m	未取	9. 30m
D-142	8. 52m	8. 46m	8. 04m
4-27	14. 96m	未取	14. 07m

备注	<p>1) 受不同基桩浇筑日期、所处条件、混凝土批次等差异, 桩身弹性波波速有一定差异, 因此桩身缺陷深度存在一定的偏差;</p> <p>2) 计算桩身缺陷的弹性波波速为现场对直径为 8cm, 长度为 1.59m 的芯样标定的波速。</p>
----	--

2.6.5 工程应用中的注意事项

不容忽视的是, 低应变反射法在工程检测中常常受到诟病, 在重要的桥梁基础的检测中有被声波透射法取代的趋势。当然, 造成这种局面的主要原因在于检测精度达不到要求。另一方面, 低应变反射法的优越性仍然无法被取代, 因此, 如何提高低应变反射法的检测精度和信赖性是当务之急。

在此, 就低应变反射法应用中的一些问题和注意事项加以讲述。

1) 激振波长的选取

如前所述, 低应变反射法的理论基础是 1 维弹性波东理论。该理论要求弹性波在桩身中传播时平截面假设成立, 因此要求桩的长细比、弹性波波长与桩横向尺寸之比均宜大于 5。对于大直径桩, 则要求很长的波长。

反过来, 如 2.3.4 所述, 波长越长, 对缺陷的分辨力也就越低。因此, 为了保证对缺陷的检测分辨力, 在可能的条件下提高激振频率是有必要的。

2) 速度与加速度信号的选取

目前, 在基桩低应变反射法检测中, 绝大多数采用速度型传感器等获取速度信号。相对加速度信号, 速度信号相当于低通滤波, 其效果是对加速度信号中的尖峰、毛刺等进行了平滑, 从而有利于对信号的判读。

但是, 低通滤波的结果也造成了有效频率的降低, 从而影响了对缺陷反射的识别。另一方面, 加速度信号中高频噪声成分较多, 对波形的解读相对困难并容易引起误判。因此, 我们认为加速度、速度各有所长, 应当结合使用。

3) 检测缺陷的类型

目前, 仅有少数情况可以判断缺陷的具体类型: 如预制桩桩身的裂隙、中小直径灌注桩的浅部断裂(挖土机的碰撞)、地下水渗入造成的灌注桩局部混凝土松散等。大多数情况下, 只能反映阻抗降低的信息, 而其具体原因(如缩径、局部松散、夹泥、空洞等)往往难以特定。

此外, 当有多个缺陷时, 下部的缺陷往往难以被识别。

4) 最大有效测试深度

桩的有效检测长度主要受到桩土刚度比、设备性能（S/N 等）的制约而有所不同。《建筑规范 JGJ106》中未规定有效检测长度，而《铁路规范》则提出为 40m。

当然，具体工程中，应通过现场试验，依据能否识别桩底反射信号来确定检测范围。

5) 桩身混凝土质量

从理论上，根据弹性波波速推定混凝土强度是可能的，对此我们也做了大量的工作（参见“SCIT-1-TEC-02-混凝土质量综合检测技术体系”）。但是，在实际灌注桩施工过程中，其长度往往难以精确控制，容易产生较大的误差。

6) 桩长

根据我们的经验和研究成果，28 天强度混凝土的波速可采用下值。

表 2-6-2 桩长测试用波速参考值（单位：km/s）

混凝土标号	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60
1 维波速	3.33	3.59	3.76	3.89	3.98	4.05	4.11	4.17	4.23	4.26

但需要注意的是：

- (1) 对于不同配比的混凝土，上述波速约有±5%的误差；
- (2) 当龄期不足 28 天时，波速会低于上表；
- (3) 当有断桩时，可能会把断桩位置测为桩长。

7) 其他类型桩

对于刚性桩（水泥粉煤灰碎石桩，即 CFG 桩），相关规范如《建筑地基基础工程施工质量验收规范》GB50202-2002 也明确规定要用低应变反射法检测。

2.7 中空薄壁桩柱长度检测

对于中空薄壁管、柱，由于比表面积小，使得弹性波信号衰减大，底部反射信号弱。同时，由于内空会造成对激振声响的共鸣，进一步增加了检测的难度。

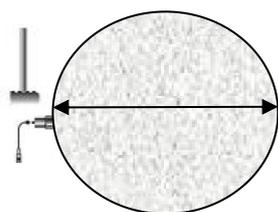
2.7.1 铁路架线柱基础长度检测（广西、2013）

应南宁某铁路局科学研究院邀请，我们对铁路架线柱的基础长度进行了检测。架线柱设计深度为 4m，测试部位直径为 0.7m，设计强度为 C25。

1) 弹性波波速标定

对于桩头有外露高度的基桩可以采用冲击回波法进行标定，具体如下：

基桩质量检测技术体系



单面反射法



图 2-7-1 波速标定

经标定，架线柱基础弹性波的波速为 3.86km/s，与经验值 3.76km/s 相符。

2) 基础埋深测试

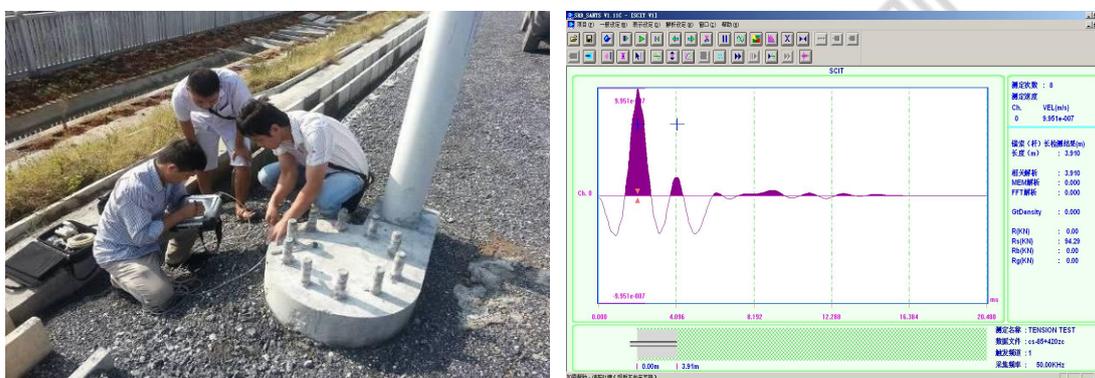


图 2-7-2 测试情景及典型解析波形

表 2-7-1 基础埋深测试结果

桩号	测试长度 (m)	设计长度 (m)	标定波速 (km/s)	误差 (%)
cs-85+367zc	4.13	4.00	3.86	3.25
cs-85+420zc	4.01		3.86	0.25
cs-85+367yc-1	3.90		3.86	-2.50
cs-85+390yc	3.94		3.86	-1.50

本次测试的特点恰恰在于基础长细比小（仅有 5.6 左右），而且埋深较浅。委托方邀请了多家单位，均无法得到满意的结果。最后，本设备采用高频激振和信号匹配等方法圆满地完成了该项工作。

2.7.2 铁路拉线柱基础长度检测（湖南、2015.09）

应某铁路建设指挥部及相关单位的邀请，我们对铁路接触网的混凝土拉线基础深度进行测试。在此之前，相关单位利用小应变和雷达等检测手段已进行过测试，但测试结

果较差。

1) 结构及计算用参数

该基础采用钢筋混凝土浇筑，由基础和承台两部分构成，混凝土强度设计为 C25。其中基础部分为直径约 0.7m 的圆柱体，设计深度为 2.4m；承台部分为边长 0.7m 的正方体组成，设计深度为 0.2m 左右，两部分一起浇筑。

根据混凝土强度等级，我们选取计算用弹性波波速为 3.60km/s。

2) 检测及验证结果

我公司检测人员同建设指挥部、监理、工务段、检测方、项目部及施工方一起进行了测试，测试采用 D17 锤，传感器采用专用耦合剂耦合。

对测试结果随机进行了开挖验证。测试结果与验证结果如下：

表 2-7-2 测试与开挖验证结果对比表

编号	测试深度 (m)	开挖实际深度 (m)	相对误差
yz	2.496	2.48	0.65%
6	1.501	1.55	-3.16%

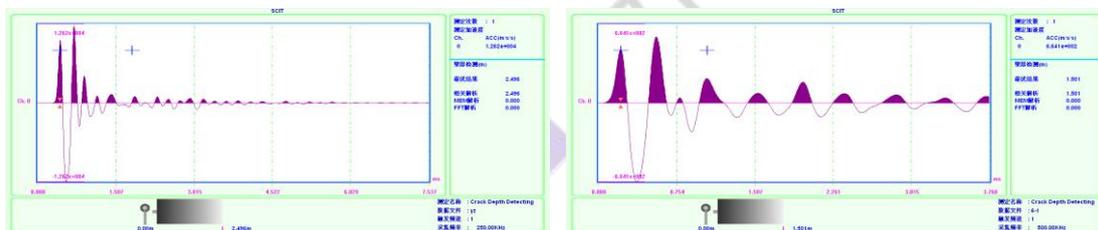


图 2-7-3 典型解析波形 (左: yz, 右: 6号)

2.7.3 管桩长度检测 (安徽、2021.07)

应相关单位委托，对宁芜高速改扩建工程某合同段进行预制 PHC 管桩长度检测。施工时，将不同长度 (9~13m) 预制管桩采用静压方式打入软土路基，并在端头进行焊接连接。预制桩砼强度 C80，桩径 400mm，壁厚 60mm，预应力主筋抗拉强度不低于 1420MPa。

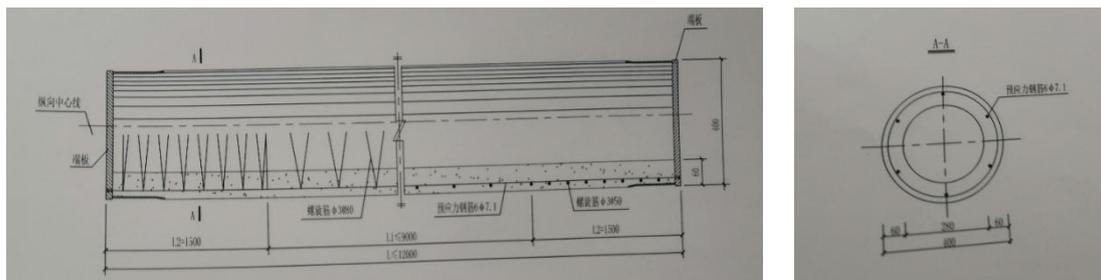


图 2-7-4 预制 PHC 桩



图 2-7-5 管桩现场检测示意图

1) 波速标定

对已压入的管桩进行波速标定。该管桩长度为 36m(从上到下配桩长度：13m+13m+10m)，标定得到的波速为 3.86km/s。

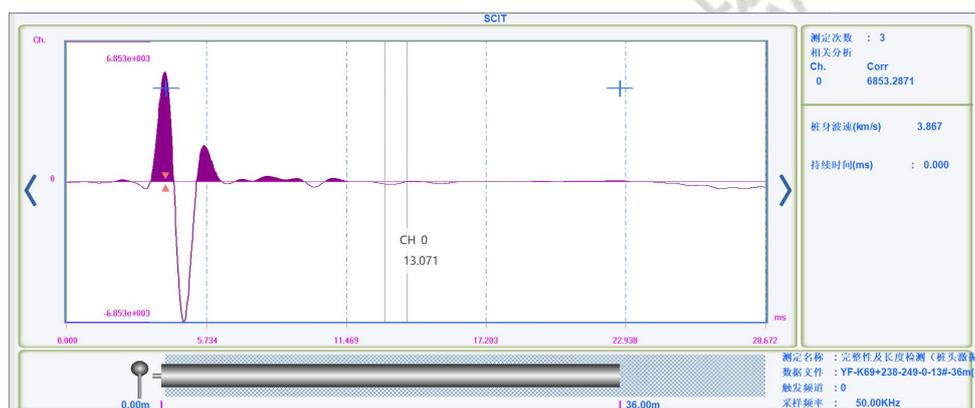


图 2-7-6 波速标定典型波形图 (压入管桩)

而对于空置管桩，其反射信号非常明显，但标定波速可能略有增加。



图 2-7-7 波速标定典型波形图 (空置管桩)

2) 典型测试结果

长度正常、异常的检测分析波形图参见 2-7-8、2-7-9。

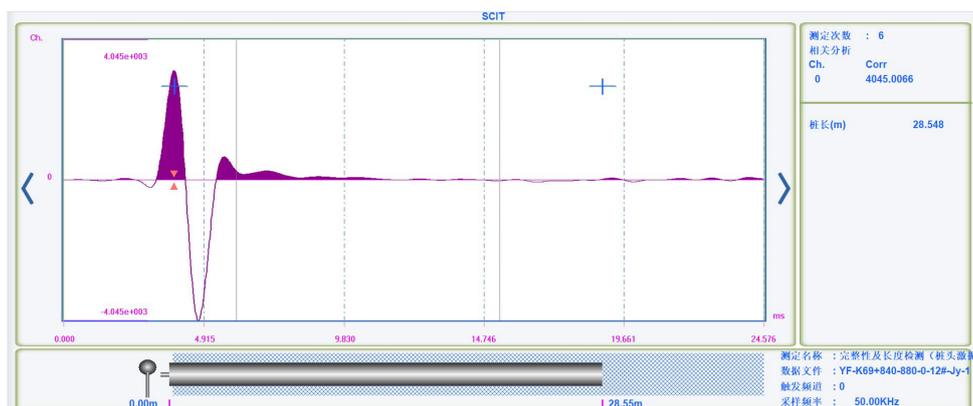


图 2-7-8 管桩长度正常的检测结果图

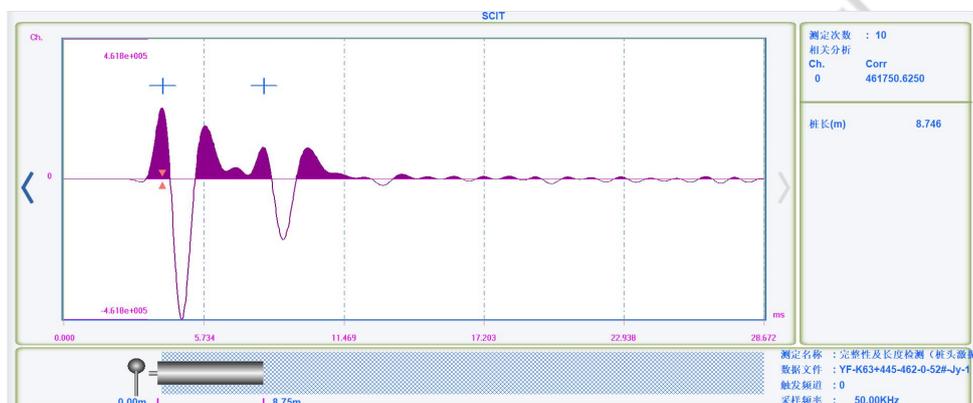


图 2-7-9 管桩长度异常的检测结果图

2.8 特点和检测流程

目前，市面上已有多家公司、十余款乃至数十款基桩检测设备。其中，不少产品已经历了长期的应用。然而，不可否认的是，低应变反射法检测技术在实际工程应用中也面临着越来越多的困难，并有逐步被声波透射法所取代的趋势。

2.8.1 低应变检测法的局限

低应变反射法所面临的最大困难就是其对缺陷识别能力较差。造成该困难的原因有以下几点：

1) 技术难度大

尽管低应变反射法的理论较为简单，但在实际应用有相当的技术难度。例如，在桩头附近的浅部缺陷的反射容易被激振信号所掩盖，从而形成检测盲区。有学者认为，在激振波长的 1/5 以内的浅层缺陷，低应变法是有困难的^[1]。

另一方面，对于深部的缺陷，则由于反射信号微弱、信噪比低而无法判别。

2) 检测范围与缺陷识别能力的矛盾；

从理论上讲，为了保持低应变反射法的理论基础（1 维弹性波波动理论）的适用性，激发的弹性波的波长应该大于桩径的 5 倍。若以直径 1.5m 的灌注桩为例，需要的弹性波的波长应长于 7.5m（折算频率则低于 500Hz）。由前述分析可知，即使存在 10cm 厚的，缺陷的机械阻抗降低 2/3 的软弱夹层，反射率也仅有 4%左右。再考虑到弹性波在基桩桩身传播过程中的衰减，这样的软弱夹层已极难被检出。

3) 无法检测多个缺陷；

当桩身有缺陷时，一方面会形成反射，从而降低透过的弹性波信号。另一方面，反射信号会产生多次反射，该反射会掩盖深层缺陷的反射信号

4) 土层的影响；

当桩周土层的阻抗变化较大时，也会造成桩土系统整体阻抗的变化，进而产生反射信号。该反射信号在判读时容易与缺陷反射信号混淆和误判。

5) 人为因素影响大；

基桩完整性分类的判定标准主要依据两个指标，即桩底反射信号的有无、桩身缺陷反射信号的有无及强弱。然而，缺陷反射信号的识别不仅取决于缺陷的形态和范围，与其所在的位置、激振波长、系统噪声等均有关系。因此，对缺陷的判定很大程度上取决于分析人员的经验。此外，下述不规范操作也会引起检测结果失真：

- (1) 为图方便，不处理桩头就直接检测，如桩顶浮浆未去掉或测点不平整造成所采曲线不可靠；
- (2) 锤击时在检波器旁敲击，造成所采集信号失真；
- (3) 混凝土龄期过短就进行检测所采集曲线会出现异常形状，从而误判。

2.8.2 公司检测设备的特点

我公司开发的 SEL-PIT 是在通常的桩基检测原理的基础上，吸收了我公司开发的混凝土缺陷检测、岩锚（杆、索）检测技术和设备的长处开发而成。其特点在于：

1) 设备的基础噪声低、频响范围广

设备的核心元器件（包括传感器、放大器、AD 等）均为原装进口，使得设备整机的基础噪声低，频响范围广。为提高检测范围、识别能力和检测精度奠定了坚实的基础。

2) 对缺陷的分辨力高

对缺陷的分辨力是决定低应变反射法技术、设备的核心指标。通过采用了下述一系

列的技术和措施，从而有效地提高了对缺陷的分辨力：

- (1) 采用了相对较高的激振频率和加速度信号：通过该方法可提高缺陷的信号反射率；
 - (2) 开发了多种降噪技术和 S/N 增强技术：考虑到高频、加速度信号的衰减大、S/N 低的弱点，开发了相应的积算平均、BPF（带状滤波）、EMD（经验模态分解）、TAR（振幅增强）等技术，可大大地提高信噪比（S/N）；
 - (3) 开发了信号匹配技术以提高对有效反射信号的识别：该技术能够有助于从噪声中抽出对象信号，从而提高对缺陷反射信号的识别能力；
 - (4) 具有同屏多帧波形表示的机能，而且可以表示为浓淡、等值线等图形；
 - (5) 具有预触发机能，能够完整地记录激发波形，有助于进一步分析。
- 3) 兼容当前的主流技术

仪器兼容了当前主流技术的优点，如不仅采用了加速度信号，也可同时通过数值积分的方法转换为速度信号，从而减少信号毛刺，提高光滑性。

2.8.3 测试流程

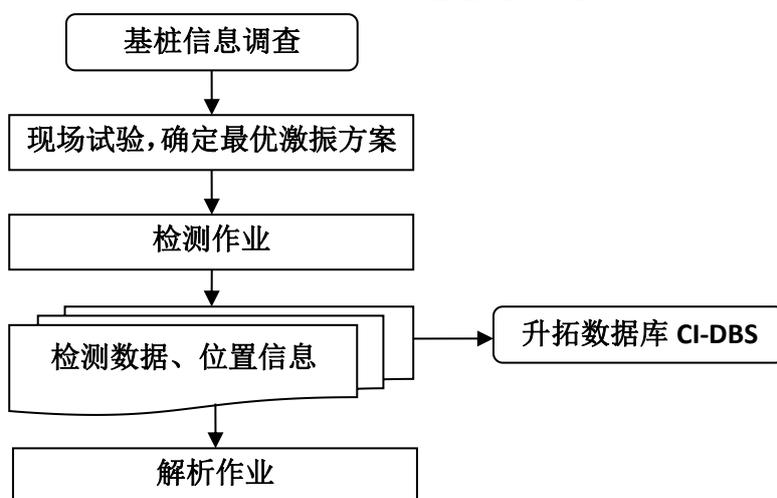


图 2- 8-1 基桩完整性低应变检测流程

第3章 现役桩基检测技术

3.1 测试的意义

如前所述，目前所有的桩基检测方法，都是针对新桩，只是在工程施工过程中对成桩进行检测，而对于现役桩基（已有承台）确实束手无策。

另一方面，桩基在运行过程中由于地质灾害、受力变化、流体侵蚀、地震、撞击等原因，桩基础将会出现各种形式的病变，如应力破坏、钢筋锈蚀、混凝土老化等。对这样的病变应及时发现及时处理，对桩基完整性应及时评估排除隐患是非常必要的。此外，对于码头桩受到波浪、海水的侵蚀以及船舶的撞击等，在运行过程中老化较快，对此的检测、评估就显得更为重要。



图 3- 1-1 现役桩基

目前桩基的测试方法，无论是动测还是静测，都需要在桩顶无附属物的情况下进行。而现役桩基不能满足这样的条件。因此，寻求一种快速无损检测现役桩基完整性的方法，是极其必要的。

3.2 现役桩基无损检测方法和原理

对于在役高桩码头等现役桩基，考虑到其数量庞大、检测时间及经费有限，以及上部结构的影响，采用低应变法检测桩基完整性是比较理想的。然而，相对于新建桩基，在役桩基由于上部结构（包括纵、横梁和面板）的干扰，击振后形成应力波的大量反射，严重干扰有效信号的判读，明显的三维效应也使一维波动理论误差增大，如何激发信号、消减上部结构的影响是该技术的关键所在。

为此，国内外学者们从激振、信号接收与处理等方面开展了很多研究，我们也开发了相应的技术和设备。

3.2.1 激振与信号接收

由于顶部承台等结构的影响，使得激发、接收的信号远比新设桩基装顶的复杂。因此，采用单点激发、单点接收的方式难以对有效反射信号进行分离和处理。所以，多点激振、多点接收就顺理成章了。

从理论上讲，激振与接收存在以下几种组合：

- (1) 桩顶敲击，桩顶接收；
- (2) 桩顶敲击，桩侧接收；
- (3) 桩侧敲击，桩顶接收；
- (4) 桩侧敲击，桩侧接收；

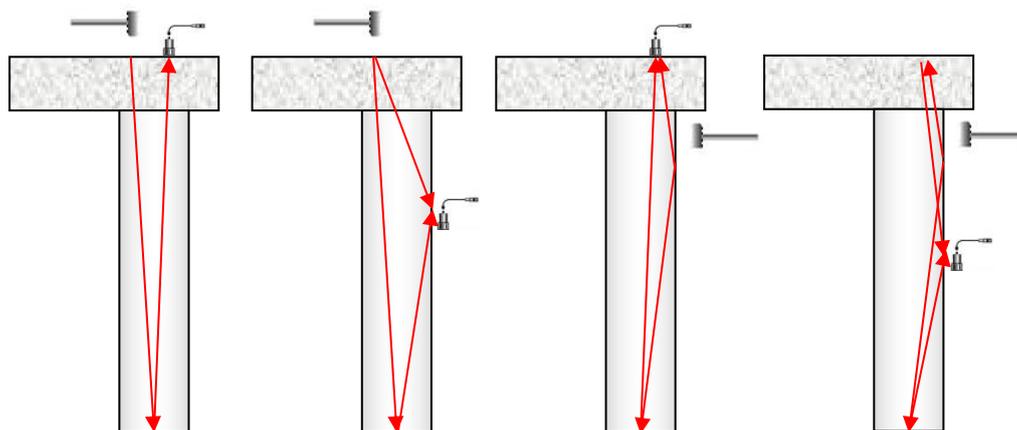


图 3- 2-1 在役桩基完整性低应变检测激振与接收组合

表 3-2- 1 激振与接收的特点

激振	接收	激振信号	接收信号	承台干扰	作业空间
桩顶	桩顶	信号强、质量高	强	大	需要对准桩顶位置空出
	桩侧		较强	较大	
桩侧	桩顶	信号弱、振动大、质量较差	很弱	较大	需要侧壁露出一定距离
	桩侧		较弱	较小	

可以看出，在承台上桩顶投影部位激振、桩侧接收是最为理想的。然而，承台上部通常有柱、墩等上部结构，往往不具备桩顶激振的条件。此时，桩身激振也就成了必然。

因此，JTJ 249—2001《港口工程桩基动力检测规程》第 4.3.6 条规定：上部有承台的桩的检测，可采用桩侧竖向激振或承台面内范围重锤竖向激振，并采用桩侧安装加速度传感器接收信号。

3.2.2 研究及技术现状

根据上述的激振和接收，学者们也提出了多种检测方法：

1) 双速度法

对于既有结构下桩基，弹性波在结构界面处或桩顶处会产生极为复杂的反射和透射，不仅产生下行波，而且产生上行波。在桩基低应变检测技术中，上行应力波最为重要，因为只有上行应力波才能反映桩身阻抗或土阻力发生变化的信息，是有效波。对于既有结构下的桩基完整性检测来讲，应想办法获取上行应力波。识别上部结构产生的次生反射波，避免与桩身阻抗变化或桩底引起的上行反射波混淆。

为解决既有基础下桩基检测的分离干扰波的问题，M.Johnson 在 1996 年提出沿桩身布置两个加速度传感器，如下图，同时测量两点加速度时域曲线。一方面可以利用两点间的距离和时差得到桩身波速，更重要的是可以分离出有效的上行波。其根据 B.Lundberg 和 A.Henchoz 在 1977 年提出的桩身的上下行波可通过实测两点应变得到分离，通过速度和应变的关系，给出了下行波的计算公式。

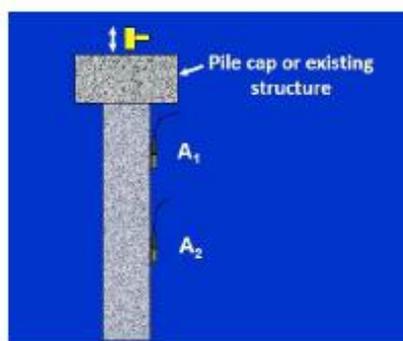


图 3-2-2 双速度法示意图

优点：通过分离，得到和缺陷信息紧密相关的上行速度波，从而一定程度上减少上部结构的次生反射带来的影响，降低判读的难度。操作相对容易，费用低廉。

缺点：此种方法要求桩身要有一定的出露距离以安装传感器，某些条件下无法满足。传感器只能安装在桩身的外侧面，当桩在两传感器之间不均匀或桩身不够平整时，对结果影响较大。此外，双速度检测方法对实际测试传感器精度和信号分析方法要求高。

2) 横波法（也称为“扭转波法”）

针对大直径桩中一维纵波假设不成立的问题，提出了横波检测技术，也称为扭转剪切波法，美国称之为弯曲波法(Bending Waves, BW)。在桩侧通过横向激励产生一个扭转波，被安装在桩身同一侧的传感器所记录并分析。

我国 JGJ/T 1993-1995 《桩基低应变动力检测规程》第 4.4.8 条规定：对桩体浅部断裂的定性判断，可通过横向激振，比较同类桩横向振动特征的差异进行辅助判断。



图 3- 2-3 横波测试方法

优点：不同频率的扭转剪切波都以相同的波速传播，不会发生速度频散。另外，剪切波速远低于纵波波速，容易获得更小的盲区半径和更高的分辨率。此外，扭转波测桩所采用的平面假设将减弱桩径的影响，因此，对于大直径桩，扭转波一般也能够满足一维波动方程，从而能较好地解决了大直径桩的小应变测试问题。

缺点：最大的问题就是如何获取正确的信号，开发出简单实用的击振设备以激发和接收高质量的剪切波。我们对此进行了一定的研究和尝试，结果表明激振方式和信号对测试结果影响很大，稳定性较差。

3) 超震波法

从形式上看，超震波法具有反射波法和平行震测法的综合特征。测试中将多个接收器沿桩身外侧放置（一般共线等距）。在桩顶或桩身敲击，测量质点速度随时间变化曲线。变换深度重复上述过程即可获得直达波和反射波的到达时间图，直达波到达的波峰点连线和反射波的波峰点连线交点即为桩底或缺陷点。

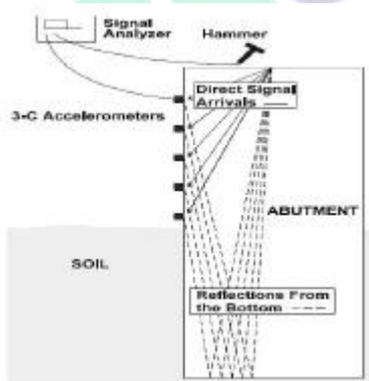


图 3-2-4 超震波法示意图

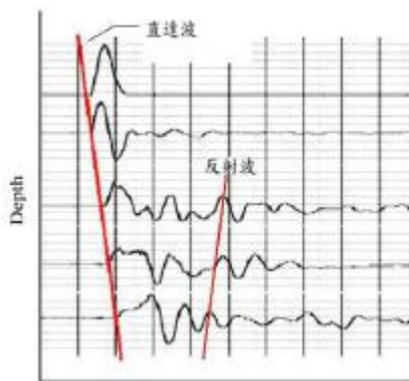


图 3-2-5 超震波法实测曲线

优点：实践表明，超震波法对于单基础测量效果较理想，比反射波法可信度高。

缺点：桩身需要较大的暴露距离以安置多组传感器。

此外，还有桩长增量逼近法等结合数值分析的方法，但缺乏实用性，因此未得到实际应用。

3.2.3 本系统开发方法

我们结合“双速度法”和“超震波法”的优点，提出了相应的检测方法。

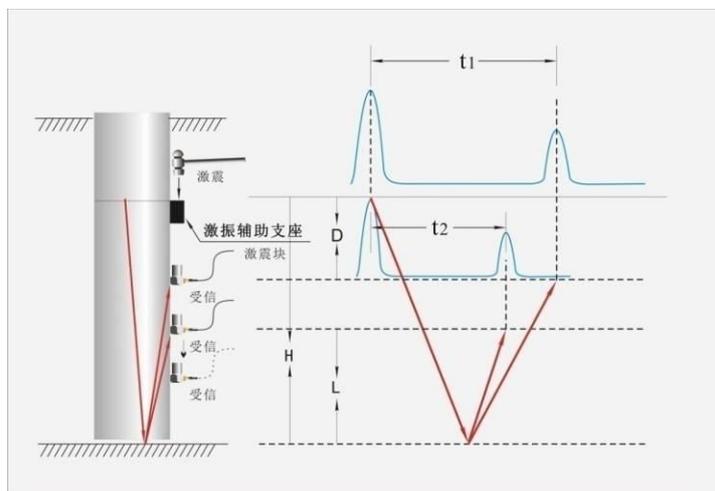


图 3-2- 6 现役桩基检测原理

其基本原理与新设桩基的完整性检测相同，所不同的是：

- 1) 传感器安装在桩身的侧壁；
- 2) 解析信号为多频道信号；
- 3) 激振在桩身侧壁或承台上面桩头投影位置。

3.3 提高检测精度的方法

3.3.1 影响检测精度的主要因素

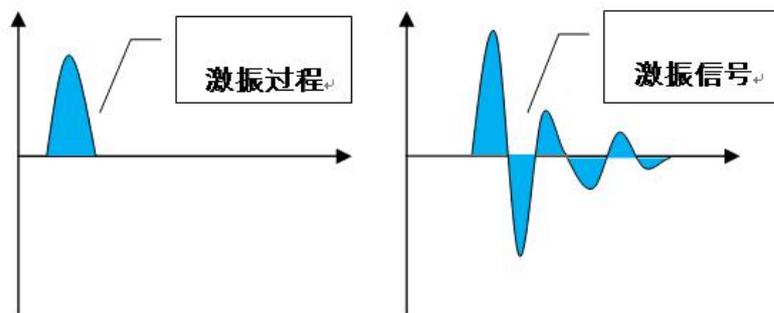
影响在役桩基完整性检测精度的主要因素中，除了包含新设桩基检测各影响因素外，由于承台和顶部约束的存在，还存在如下不利的影响因素：

- 1) 激振信号质量差；

无论是在承台上部激振还是在桩侧激振，其激振信号的质量均会大幅降低。

- (1) 桩顶激振：尽管激振信号本身与新设桩基相同，但激发的能量仅有一小部分能够传递到基桩，其余的大部分能量均分散传递到承台内部。同时，由于承台内部弹性波能量的折、反射，使得入射到基桩内的弹性波持续时间延长，进一步降低了信号的品质；
- (2) 桩侧激振：由于在检测中使用的弹性波 P 波需要沿桩长方向激发信号，因

此无法通过直接敲击桩身的方法激振。通常需要借助激振块等工具，通过敲击激振块将能量传递到基桩上。这样一来，激发的能量受到限制，而且由于激振块本身的振动，使得激振持续时间增加，品质下降。



理想的脉冲信号 持续时间长、品质差的激振信号

图 3-3- 1 激振信号比较

2) 承台的反射；

对于新设基桩，反射信号只可能来自激振点的下部亦即桩身。而在桩身侧壁激发的信号，不仅可能来自激振点下部桩身，而且一定会来自激振点上部的承台。这两种信号互相干扰，会给数据分析带来很大的困难。

因此，如何提高激振信号的品质和降低承台反射信号的影响是决定在役基桩完整性检测技术的重要因素。

3.3.2 提高激振信号的品质

我们从两个方面着手以提高激振信号的品质，即激振方式的优化（硬件技术）和自由振动信号的抑制（软件技术）。

1) 激振方式的优化

对于桩身激振，我们开发了特制的激振块和与桩身的粘结方式，具有以下特点：

- (1) 敲击时激振块的声响较小，不易引起桩身共鸣；
- (2) 敲击后激振块与桩身及时脱离，避免持续影响桩身。

2) 自由振动信号的抑制

采用锤击等方式激振时，被击打部位会产生一定时间的振动。该振动又作为新的振动源，使得激发的信号的持续时间远远长于击打的时间（激振过程）。对于有承台的在役基桩，该现象尤其明显。

根据上式可以知道，残留信号的振幅按几何级数衰减，可回归出衰减信号参数。

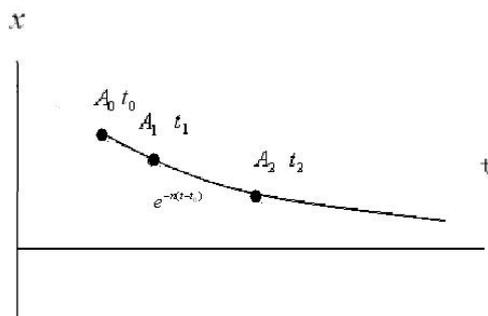


图 3-3- 2 自由衰减包络线

值得说明的是，在激振后的自由振动，其周期特性及衰减特性均只与系统本身的特性有关，为一固定值。因此，对于测试的信号，减去回归出的衰减信号，从理论上即可消除残留振动的影响。

3.3.3 降低承台反射信号的影响

承台的反射与桩身下部（桩底或缺陷）的反射的最大区别在于波的方向不同。根据这一特性，我们开发的半波移动技术，通过改变两个传感器的位置关系，从而削减从上部承台处反射的信号，增强从桩身下部反射的信号。由于上部承台的反射信号与下部桩身的反射信号之间存在相位差，因此通过适当地改变两个检波传感器的位置和控制激振波长，使传感器间距与激振信号的半波长一致，就可以很好地削减承台对信号的不利影响。

如下图所示，以反射波形为基准，移动激振位置。移动的距离（时间轴）如果正好为激振卓越周期的1/2时，这两个波形叠加后激振信号的自由振动部分能够被大大消除。

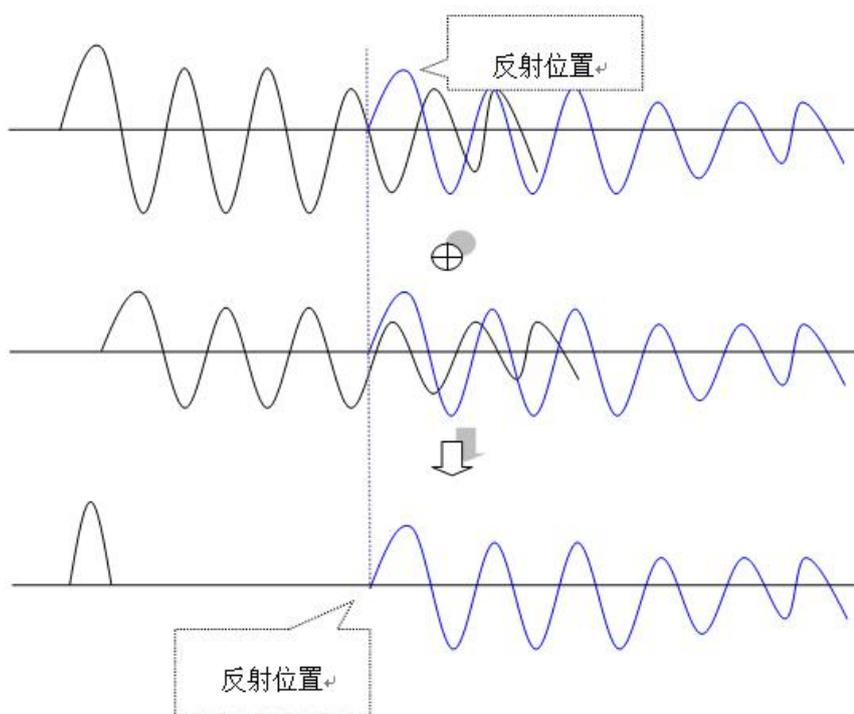


图 3-3- 4 半波移动法的概念

同时，结合虚拟多频道技术（VMC）技术更直观的对反射波形进行判读，可以更好地测试桩身的健全性及材质状况。

3.3.4 振动模态分析

结合固有振动的测试/分析技术，提高对桩顶附近损伤的检测精度。当桩顶附近有明显的损伤时，其固有振动频率会有一定的降低。因此，通过测试/分析桩顶部振动模态，可以间接地推测其健全性。

该方法对结构形式相近、数量庞大的港工而言是一个较为理想的解决方法。

在役结构下桩基的健全性检测是一个世界性的难题，迄今为止未有成熟的解决方法。本体系在提出一系列创新、解决方案的基础上，力争有所突破。所提出的测试方案尽管存在一定的开挖工作量，但其适用面广，同时可以达到较好的精度/成本的平衡。我们认为在现有的技术条件下，是一种比较现实可行的技术路线。

3.4 工程应用例

3.4.1 VMC 合成试验

对 5.5m 空置钢筋数据，激振点为端部，传感器位于钢筋侧面，距端部距离分别为 60、80、100、120cm。可以看出，VMC 及半波移动的效果是非常明显的。

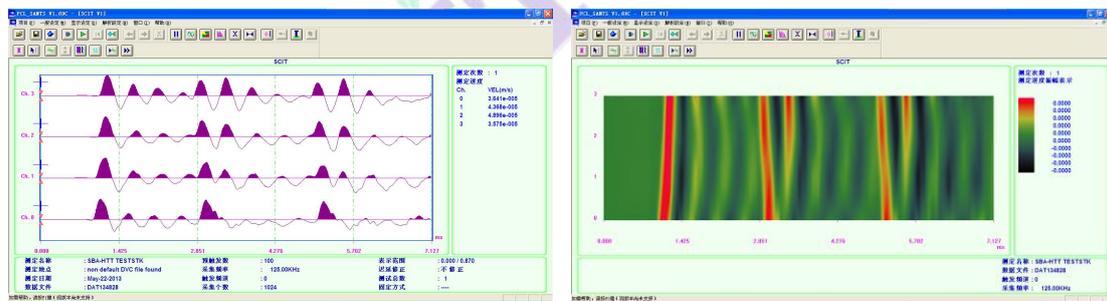


图 3-4-1 VMC 信号合成（波形图及等值线图）

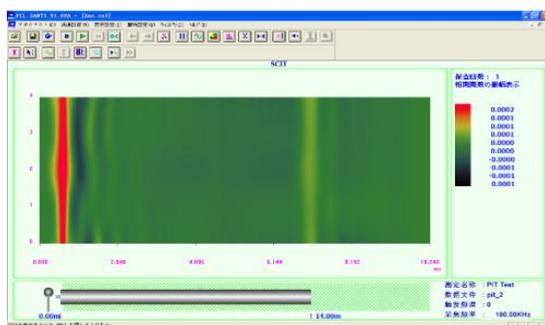


图 3-4-2 半波移动后等值线图

3.4.2 长桩侧壁激振试验（天津、2012）

受天津质检站委托，我们对天津市某公路大桥改建现场桩基进行实验性检测，现场桩基为灌注桩，历史久远，桩基设计长度 46m。

为了验证侧壁激振的效果，我们在桩侧安装传感器、桩侧利用激振块激振。测试结果表明，明显地接收到桩底的反射信号。另一方面，激振信号持续时间长，需要进行相应的处理。



图 3-4-3 现场检测场景

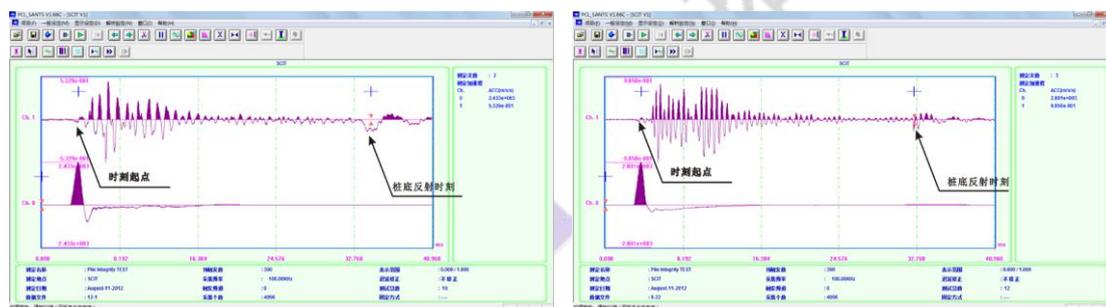


图 3-4-4 检测波形图（左：1#桩，右：2#桩）

表 3-4-1 桩长计算结果

测试桩号	设计长度	波速	测试长度
1#桩	46m	3.1km/s	46.96m
2#桩	46m	3.1km/s	44.95m

3.4.3 桥墩下桩基缺陷检测（甘肃，2013）

受相关单位委托，我们对甘肃某公路在役桩基进行了现场检测并验证。在测试中，采用了桩顶激振和桩侧激振，并通过开挖进行了验证。测试结果得到了业主、委托方和施工单位的一致好评。

桩基质量检测技术体系



图 3-4-5 现场检测场景



图 3-4-6 验证开挖场景

检测结果表明：

- 1) 现场条件允许的情况下，采用桩头激振测试信号较好；
- 2) 塑料锤激振效果较其它方式激振效果好；
- 3) 侧壁激振信号品质较低，必须进行 VMC 处理；

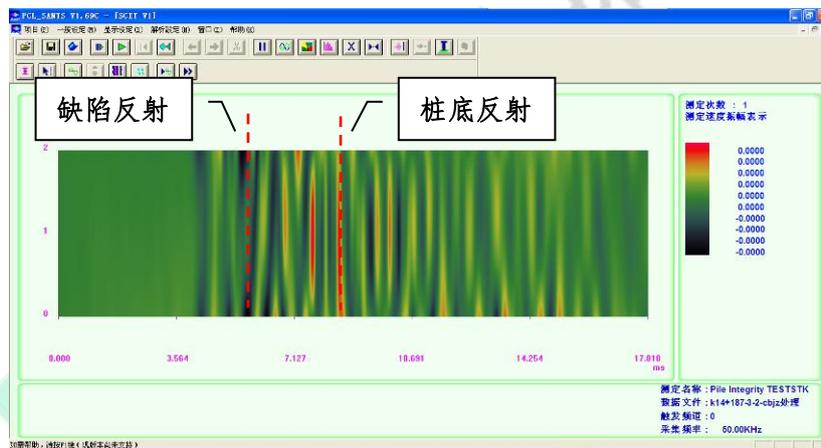


图 3-4-7 侧壁激振 VMC 处理

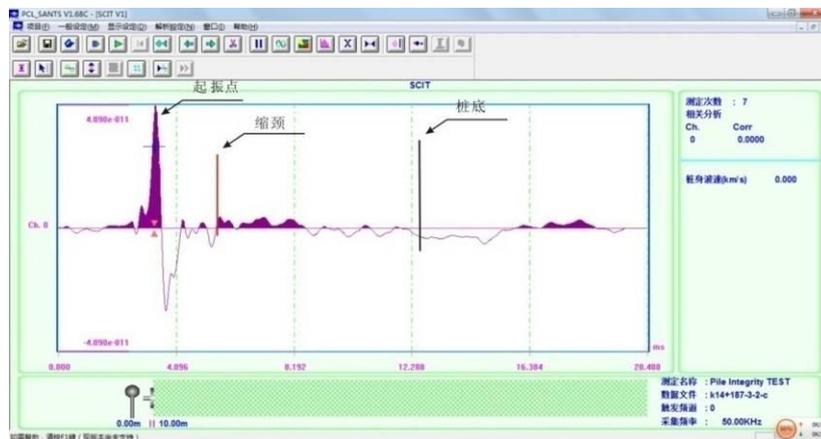


图 3-4-8 桩头激振信号匹配处理结果

3.4.4 桥墩下桩基缺陷检测（山西，2019）

受相关单位委托，我公司对某高速公路大桥的桩基完整性进行检测。由于该桩基上部已经浇筑完成，因此不具备普通低应变检测条件。

该桩基设计强度等级为 C30，桩径为 1.3m，设计桩长为 24m，桩基类型为摩擦桩。由于该桩基系梁已经埋入地下，为了避免对检测结果的影响，确定对该桩基进行开挖，露出系梁，并将传感器的测点布置于系梁以下 80cm 处。

1) 现场波速标定

为准确检测桩基的缺陷深度，利用基桩低应变检测仪（SEL-PIT-R）对该混凝土的波速进行现场标定。标定位置为系梁与立柱结合部位，直径为 1.5m，采用为双面透过法。

表 3-4-2 透过法波速标定结果表（单位：km/s）

序号	1	2	3	4	5	平均值
检测结果	4.412	4.381	4.356	4.396	4.402	4.389

根据反射波速与透过波速的关系（反射波速为透过波速的 0.96 倍），确定检测桩身完整性的波速为 4.214km/s。

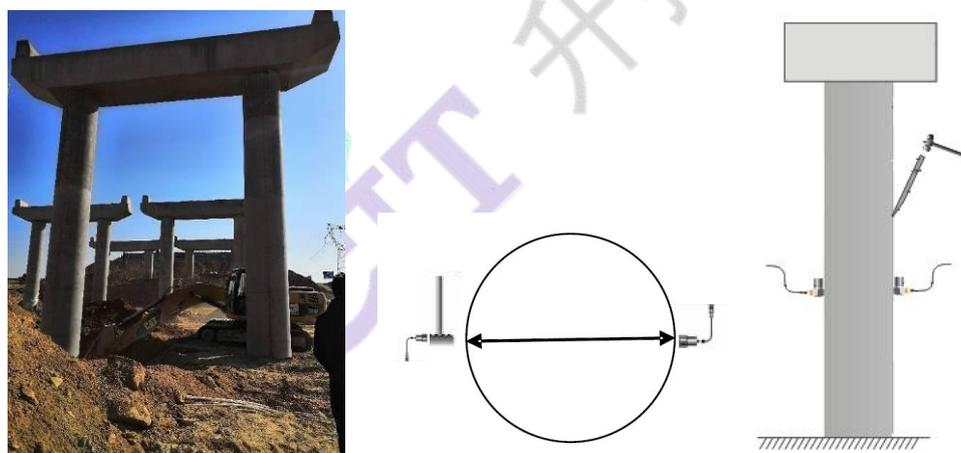


图 3-4-9 测试情景、波速标定及侧壁测试概念

2) 侧壁低应变检测

通过在侧壁安装两个加速度传感器，获取从桩基部分关系密切的上行波对基桩的完整性进行分析判断。为了提高测试精度，分别在该桩基的 3 点、6 点、9 点、12 点方向分别激振测试。代表性的波形，以及各方位得到的检测结果、彩色等值线图如下。

桩基质量检测技术体系

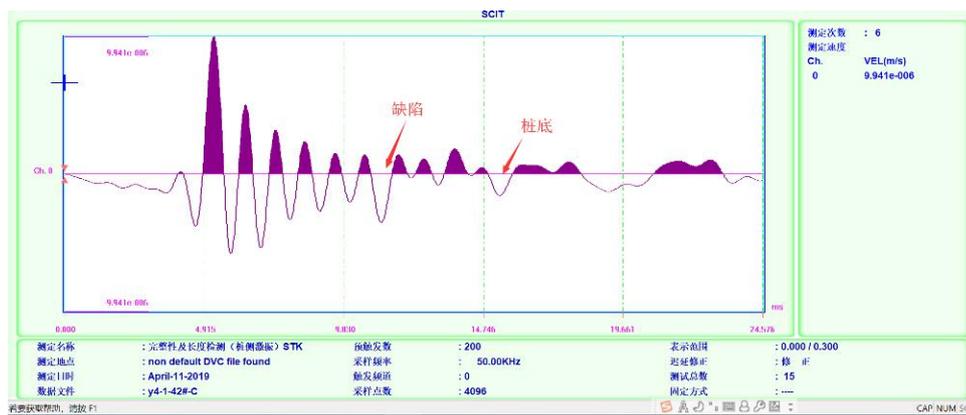


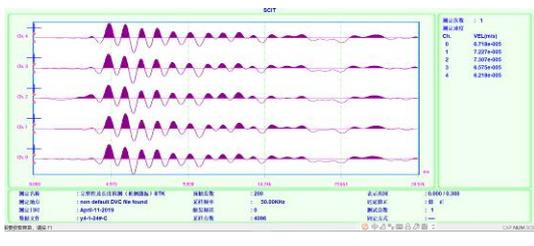
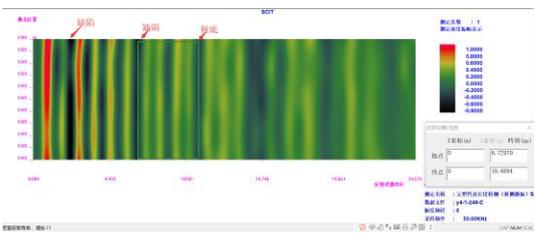
图 3-4-10 侧壁低应变检测示例波形

检测结果表明，在距离系梁底部约 15.2m 的位置有较明显的缩径缺陷。

表 3-4-3 侧壁低应变法检测结果

点位	检测波形图	波形等值线图
1#		
	分析：在距离系梁下表面约 15.3m 位置有较为明显的缩径缺陷。	
2#		
	分析：在距离系梁下表面约 15.35m 位置有较为明显的缩径缺陷。	
3#		
	分析：在距离系梁下表面约 15.3m 位置有较为明显的缩径缺陷。	

基桩质量检测技术体系

点 位	检测波形图	波形等值线图
4#		
<p>分析：在距离系梁下表面约 5.86m、14.8m 位置有较为明显的缩径缺陷。</p>		

3.4.5 涵洞下基桩缺陷检测（成都，2020.12）

受中国水电四局邀请，我公司技术人员采用基桩低应变检测仪（SEL-PIT-R）对四川某涵洞既有基桩长度进行了检测。

该涵洞下部有地铁线路穿过，为了避免影响该桥的安全稳定性，进行本次基桩长度检测。因该桥处于运营状态，不具备桩顶激振的检测条件，根据现场实际情况，确定采用侧壁低应变反射法进行检测。该基桩设计强度等级为 C30，桩身直径为 1500mm。

该基桩检测总长度为 15.9m（测点到路面距离 1.8m，测点到桩底为 14.1m），测试结果与客户以前的取芯结果一致性高（从路面取芯长度为 16.1m），测试结果得到了客户的高度认可。



图 3-4-10 被测对象



图 3-4-11 分析波形

3.5 特点和检测流程

尽管不少学者对在役桩基的无损检测技术做了大量的研究，但至今尚无普遍得到认可的技术和设备。我们开发的相关设备在现有技术进行了集成和发展，以期能够有所进步和突破。

3.5.1 公司检测设备的特点

我公司开发的 SEL-PIT (R 型) 是在 PA 型的基础上开发而成。除了具有 PA 型的各种优点以外，还具有：

1) 具备 VMC 机能

利用多次激振的方式，可以将测试频道扩充至 32 及以上，从而有利于提高检测精度和信赖性。

2) 对缺陷的分辨力较高

如前所述，在役桩基的完整性检测是一项非常困难的工作。我们通过采用了下述一系列的技术和措施，从而的大地提高了对缺陷的分辨力：

- (1) 具有半波移动机能：通过半波移动机能，可以消减承台反射的影响和增强桩底、缺陷反射信号；
- (2) 开发了残留振动信号抑制技术，结合信号匹配技术可以有效地提高激振信号的质量和对有效反射信号的识别；
- (3) 开发了侧壁激振的专用设备，有助于获取较高质量的激振信号；

3.5.2 测试流程

基桩质量检测技术体系

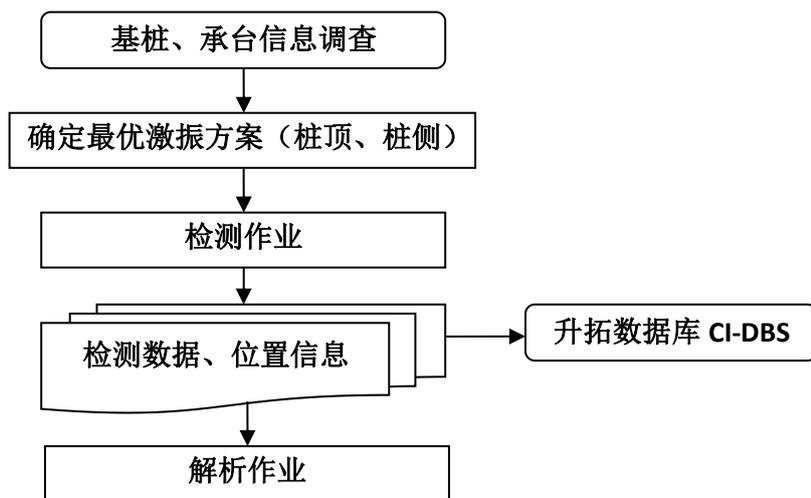


图 3- 5-1 基桩完整性低应变检测流程



第4章 跨孔声波透射法

4.1 概述

声波透射法（也称跨孔声波、跨孔超声法）是利用声波的透射原理对桩身混凝土介质状况进行检测。该方法测试客观性好、分辨力高，近年来在交通、水利等大型工程中的应用日益广泛。但因需要声波管，因此仅适用于在灌注成型过程中已经预埋了两根或两根以上声测管的现浇基桩。

由于信号激发与接收的方便，在声测管中需要灌水作为耦合材料。同时，信号激发与接收与超声波基本相同。但需要说明的是，激发的信号在桩体中传播过程中仍然转变为弹性波。

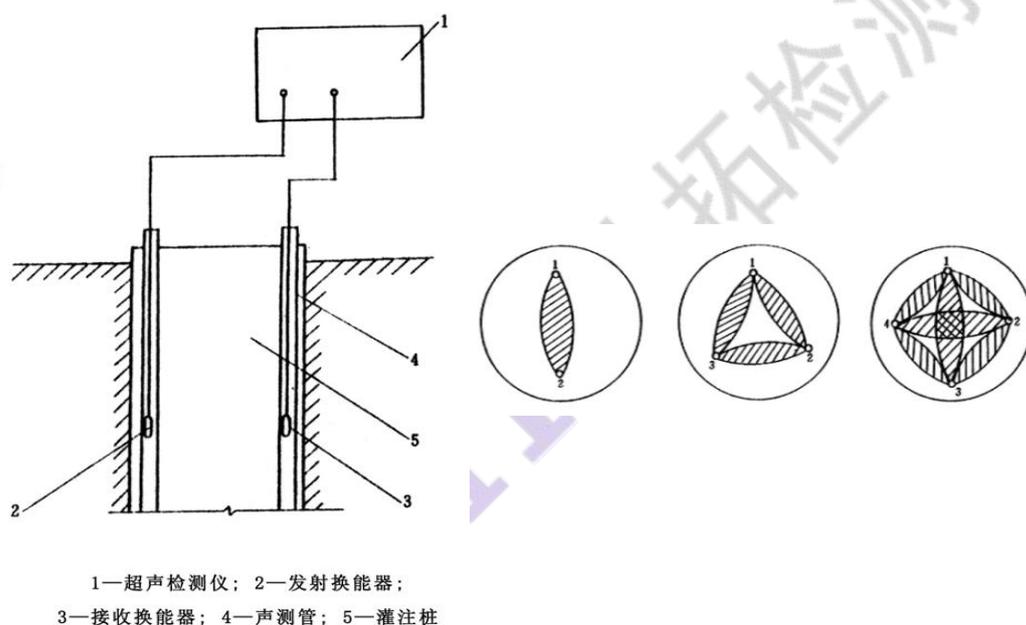


图 4-1-1 声波透射法检测概念和检测面积（双管、三管和四管）

4.1.2 检测方法和缺陷判据

波速、波幅和主频都是反映桩身质量的声学参数测量值。大量实测经验表明：声速的变化规律性较强，在一定程度上反映了桩身混凝土的均匀性，而波幅的变化较灵敏，主频在保持测试条件一致的前提下也有一定规律。因此在确定测点声学参数测量值的判据时，采用了三种不同的方法。

1) 波速

透射波速越低，反映混凝土质量越差或者有缺陷，因此，波速的数值及其变化是有效的检测指标。波速通常要对声测管的影响进行修正，第 i 测线基桩混凝土的波速 v_i ：

将波速 v_i 作为判断缺陷有无的基准，一般采用以下两个指标：

- (1) 临界波速 v_D ：通常采用数理统计的方法，根据测试结果得出。不同的规范有不同的求取方法，将在下节详述；
- (2) 低限波速 v_L ：一般根据本地区经验，由预留同条件混凝土试件的抗压强度与波速的对比试验来确定；

2) 波幅

当混凝土基桩中存在缺陷时，从中透过的声波（弹性波）的衰减将会增加（波幅降低）。因此，根据接收端弹性波的波幅，也可判断缺陷的有无。少 6 分贝的意义即当信号首波幅值衰减量为其平均值的一半时的波幅为临界值：

3) 主频及波形畸变

当混凝土基桩中存在缺陷时，从中透过的声波（弹性波）的主频有降低的倾向，而且，首波附近也会出现波形畸变。因此，根据接收端弹性波的主频的降低，以及首波畸变的变化，也可判断缺陷的有无；

上述波速、波幅和主频这 3 个参数中，波速为最主要的判定依据。然而，在实际的声测管中，由于安装和施工等原因，声测管的间距常常不能保证固定。为此，需要引入辅助判据。

设测点的深度为 H ，声时值随深度变化的关系可用函数式 $t_c = f(H)$ 表达。当内部存在缺陷时，由于在缺陷与完好混凝土界面处声时值的突变，从理论上说，该函数应是不连续函数而且在缺陷处只表现为斜率的变化。该斜率 S_i 可用相邻测点的声时差值与测点间距距离之比求得。

但是，斜率只反映了相邻两测点声时值的变化速率。另一方面，传播时间差本身也是与缺陷大小直接相关的参数。为了进一步反映缺陷的大小，可以加大传播时间差在判据中的权数。

实验证明， PSD 判据对缺陷十分敏感，且基本上不受声测管不平行，或混凝土强度不均匀等原因所引起的变化。这是由于非缺陷所引起的声时变化都是渐变过程，虽然总的声时变化量可能很大，但相邻测点间的声时差却很小，因而 S 值变化很小。

4.1.3 现行规程对比和解读

针对声波透射法，不同行业间的技术规程中也有一定的区别。在此，主要针对

[1] 建筑基桩检测技术规范（JGJ 106—2014），简称“建筑规范”

[2] 铁路工程基桩检测技术规程（TB10218-2019），简称“铁路规范”

[3] 公路工程基桩检测技术规程 (JTG/T 3512—2020), 简称“公路规范”

进行对比和解读。这 3 个规程, 主要差别的地方有:

1) 适用范围

由于声测管位置误差以及耦合对测试结果影响较大, 同时声测管的埋设也会对施工造成一定的影响, 所以规范中规定了该方法的适用范围:

表 4-1-1 基桩声波透射法适用范围

规范	建筑规范	铁路规范	公路规范
适用桩径	不小于 600mm	无明确限制	不小于 800mm

2) 管距的修正

在“公路规范”中, 引入了管距修正的相关要求, 提出“当声测管倾斜造成声速-深度曲线在一定深度范围内缓慢上升或下降而波幅基本不变时, 可对管距进行合理修正后对数据进行统计分析。”

在实际的基桩跨孔测试中, 声测管倾斜的现象非常常见, 声测管弯曲部分各测点测距将偏离在桩头的测量值, 导致声速值偏离混凝土声速正常取值, 一般这种变化沿深度方向有一定规律, 表现为仅有声速值有规律地偏离 (高或低) 混凝土正常取值, 此时一般采用曲线拟合等方法对各条测线测距作合理修正, 然后重新计算各测点的声速。如果不对声测管倾斜进行合理的修正, 将严重影响声速的临界值的合理取值, 因此“公路规范”10.4.6 条规定声测管倾斜时可作测距修正。

3) 波速临界值的取值

目前, “铁路规范”和均采用保证率作为波速临界值的判别标准:

$$v_D = \bar{v}_c - 2\sigma_v$$

其中, \bar{v}_c 、 σ_v 分别为波速均值和标准偏差。

另一方面, “建筑规范”和“公路规范”则参考数理统计学判断异常值的方法, 采用“双边剔除法”经过多次试算而得出的。异常值的识别步骤如下:

① 将某个测试面的测试波速按照从大到小进行排列:

$$v_1 \geq v_2 \geq \dots \geq v_{k'} \geq \dots \geq v_i \geq v_{n-k} \geq v_{n-1} \geq v_n$$

其中, k 、 k' 分别是拟去掉的低波速和高波速的数据的个数, 均从 0 起。

② 逐一去掉并记录样本中的最小、最大数据, 计算剩余数据的平均值 v_m 、标准差

s_x ;

③ 初算波速异常小值判断值 v_{01} 和异常大值判断值 v_{02}

$$v_{01} = v_m - \lambda s_x$$

其中，根据残存的数据个数 $(n - k - k')$ ，由下表查 λ ：

表 4-1-2 统计数据个数 $(n - k - k')$ 与对应的 λ 值

数据数	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
λ	1.28	1.33	1.38	1.43	1.47	1.50	1.53	1.56	1.59	1.62
数据数	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
λ	1.64	1.69	1.73	1.77	1.80	1.83	1.86	1.89	1.91	1.94
数据数	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58
λ	1.96	1.98	2.00	2.02	2.04	2.05	2.07	2.09	2.10	2.11
数据数	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78
λ	2.13	2.14	2.15	2.17	2.18	2.19	2.20	2.21	2.22	2.23
数据数	80	82	84	86	88	90	92	94	96	98
λ	2.24	2.25	2.26	2.27	2.28	2.29	2.29	2.30	2.31	2.32
数据数	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145
λ	2.33	2.34	2.36	2.38	2.39	2.41	2.41	2.43	2.45	2.46
数据数	150	160	170	180	190	200	220	240	260	280
λ	2.47	2.50	2.52	2.54	2.56	2.58	2.61	2.64	2.67	2.69

④ 按照 $k = k' = 0, 1, \dots$ 的顺序，将参加统计的数列最小数据 v_{n-k} 与 v_{01} 相比较，当

$v_{n-k} \leq v_{01}$ 时则剔除 v_{n-k} 。同样，将最大数据 $v_{k'+1}$ 与 v_{02} 相比较，当 $v_{k'+1} \geq v_{02}$ 时则剔除 $v_{k'+1}$ ；

⑤ 每次剔除一个数据，对剩余的数据重复上述②~④；

⑥ 重复上述计算和比较，直至剩余数据中不存在异常值为止；

⑦ 此时，异常判断的统计值 v_0 按下式计算：

$$v_0 = \begin{cases} v_m(1 - 0.015\lambda), & C_v < 0.015 \\ v_{01}, & 0.015 \leq C_v < 0.045 \\ v_m(1 - 0.045\lambda), & C_v \geq 0.045 \end{cases}$$

其中， $C_v = s_x / v_m$ ，为波速的变异系数（也称离散系数）。

- ⑧ 为了进一步考虑桩身混凝土的普遍质量，对 v_0 和桩身混凝土低限值 v_L 以及 v_p 进行比较。当 v_0 位于 v_L 和 v_p 之间时， v_D 取 v_0 ；而 v_0 位于 v_L 和 v_p 之外时，则应综合分析原因，采用其它检测面、桩的数据。

由此可见，“建筑规范”综合考虑了混凝土浇筑质量等因素，因而更加科学。而公路和铁路规程则可能出现与预期完全相反的结果。

4) 桩基分级

在桩基分级方面，主要在桩的 I、II 类分级方面有所区别：

表 4-1-3 桩基分级

规范	I 类	II 类
建筑规范	声学参数、接收波形均正常； 参数、波形存在轻微异常，异常点不连续分布且在横向分布小于检测剖面数量的 50%	参数、波形存在轻微异常，异常点连续分布或横向分布大于检测剖面数量的 50%； 参数、波形存在明显异常，异常点不连续分布且在横向分布小于检测剖面数量的 50%；
铁路规范	各点参数均正常，无波速低于低限值；	某一剖面个别测点参数出现异常，无波速低于低限值；
公路规范	各点波速、波幅均大于临界值，波形正常；	某一剖面个别测点波速、波幅略小于临界值，波形基本正常；

可以看出，铁路规范和公路规范对 I 类桩的判定更为严格，对测试工作的要求也更高。另一方面，建筑规范中则考虑了可能出现的偶然误差。

4.1.4 现有检测方法的主要问题

在桩基检测实践中，发现的最主要的问题有：

- 1) 声测管的偏斜：其不仅直接影响波速，而且对波幅也有同样的影响。尽管在“建筑规程”中多处提到，要“先对管距进行合理修正”，但对修正方法和依据并无具体规程和说明。尽管采用 PSD 可以在一定程度上消除此类影响，但判断时人为因素很大。
- 2) 波速 v_L 低限值的取值：试件的养护、测试条件与基桩有较大的不同，具体的取值规定也不明确。此外，在不少施工现场，并无相应的实验条件；
- 3) 提升过程中声测管摇摆产生的误差；

下面是我们在实际测试过程中发现的一些典型问题案例：

1) 怀疑声测管严重偏移

图中，测试得到的波速在 3~7km/s，超出常识。

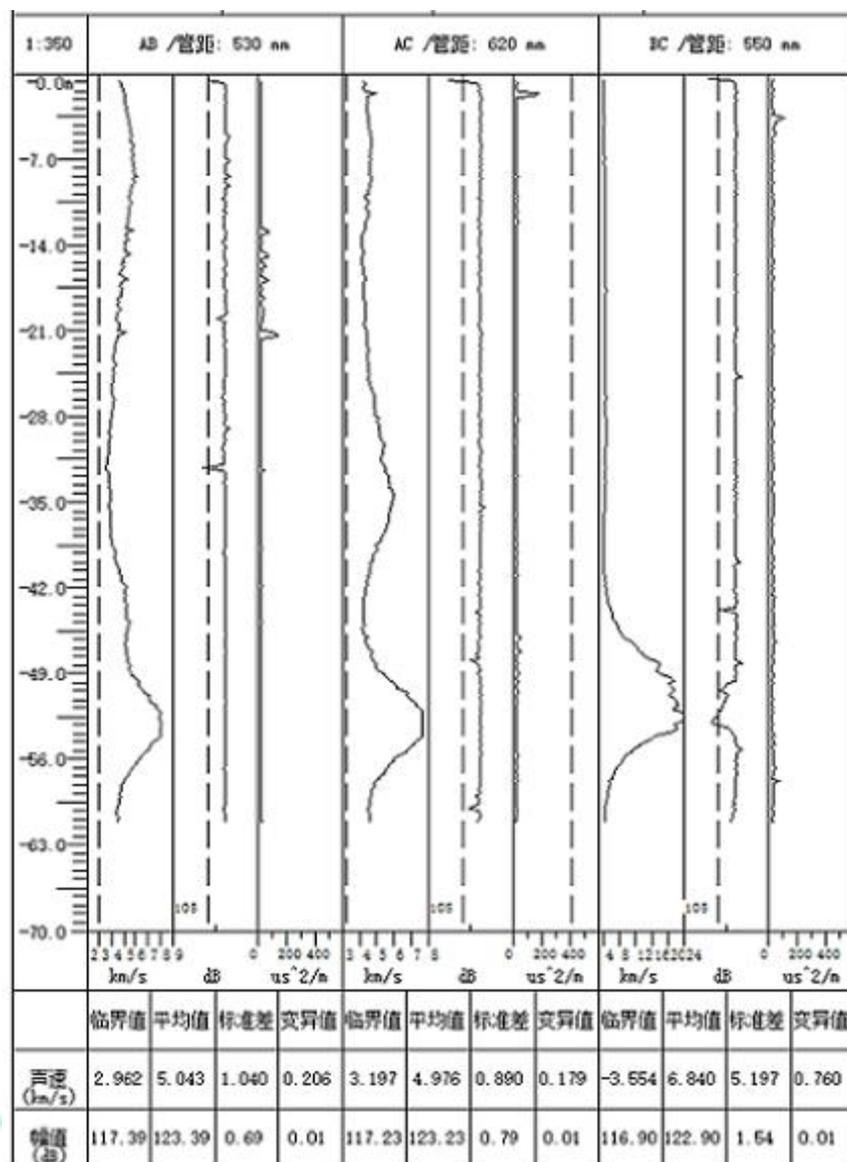


图 4-1-2 声测管发生严重偏移的案例

2) 测试波速偏低，但缺乏低限值

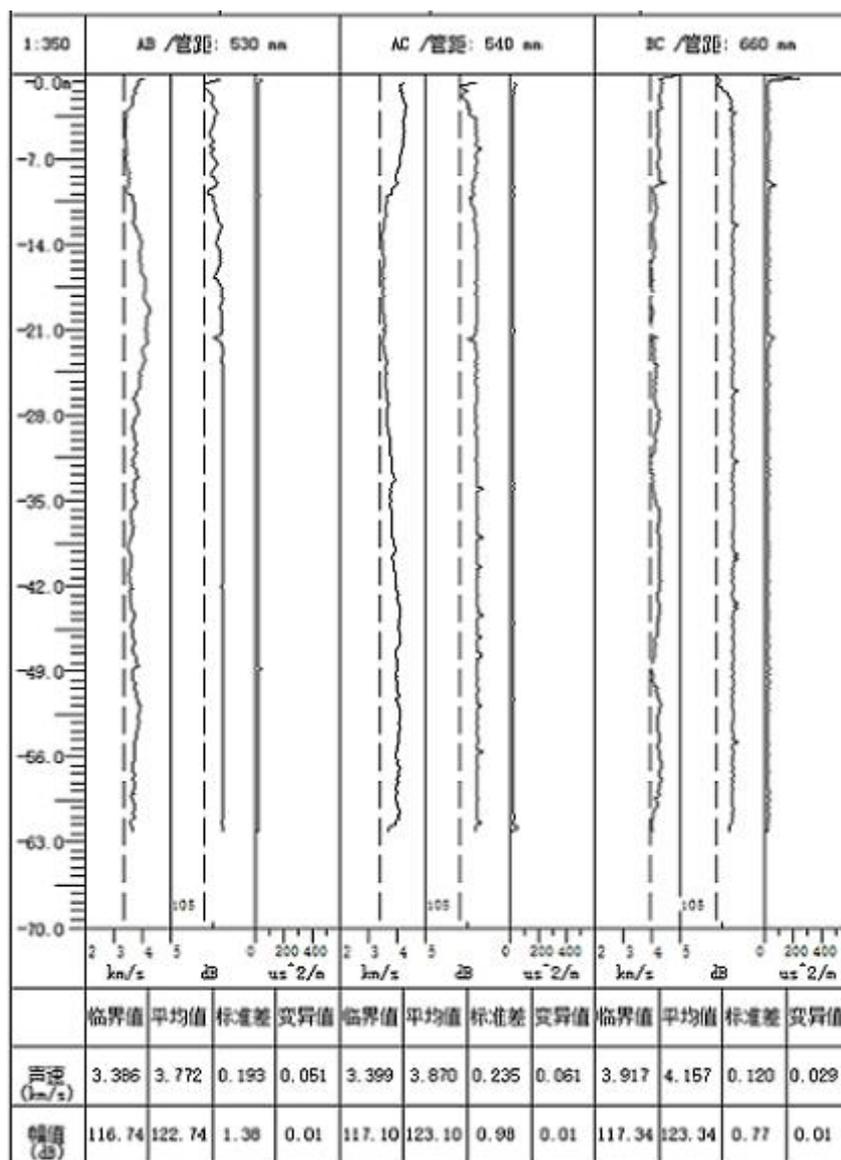


图 4-1-3 波速明显偏低，但缺乏低限值的案例

4.2 测试结果的三维成像

4.2.1 三维成像与二维成像的比较

采用三维成像的方法，较传统的二维成像方式可以更加直观和鲜明。

桩基质量检测技术体系

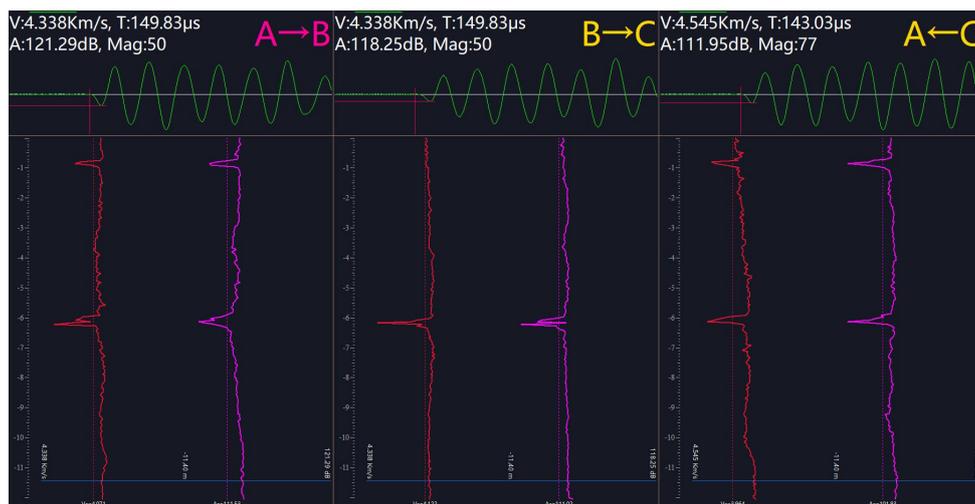


图 4-2-1 二维桩基测试结果：

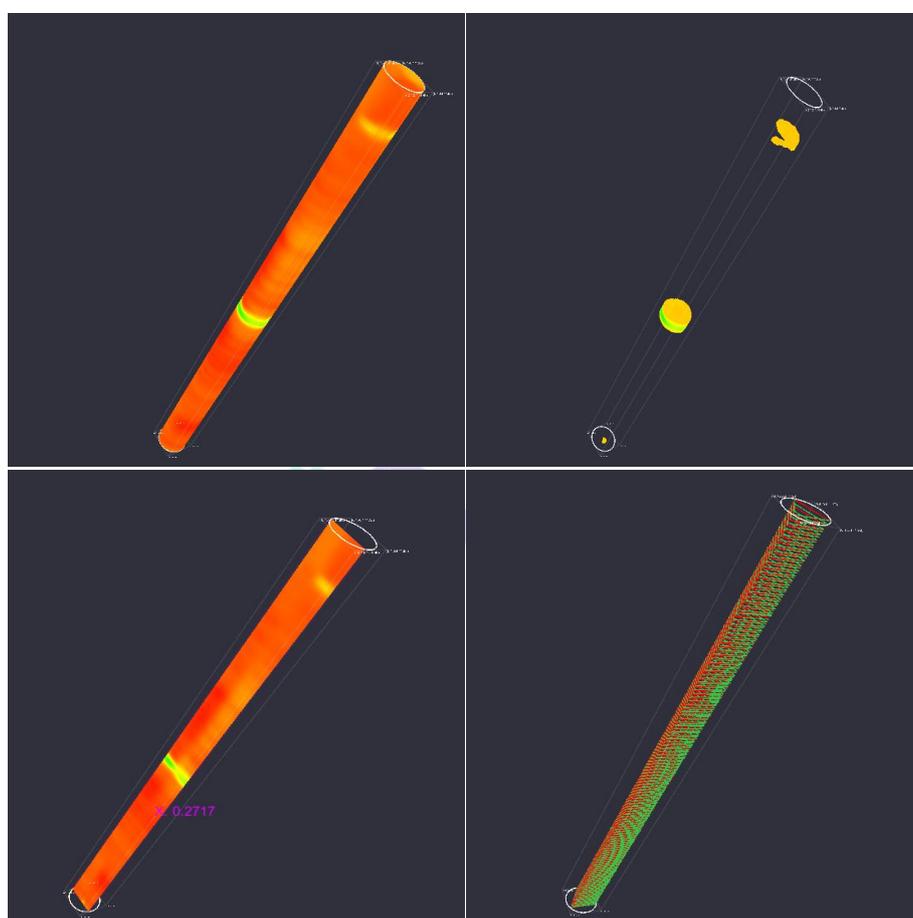


图 4-2-2 三维桩基测试结果

整体展示（左上）、缺陷展示（右上）

纵向切片（左下）、测线显示（右下）

4.3 测试精度的提高

针对前述的声波透射法的问题，可以采用以下方法提高其测试精度。

4.3.2 声测管位置偏斜的修正

1) 声测管的距离修正采用如下原则:

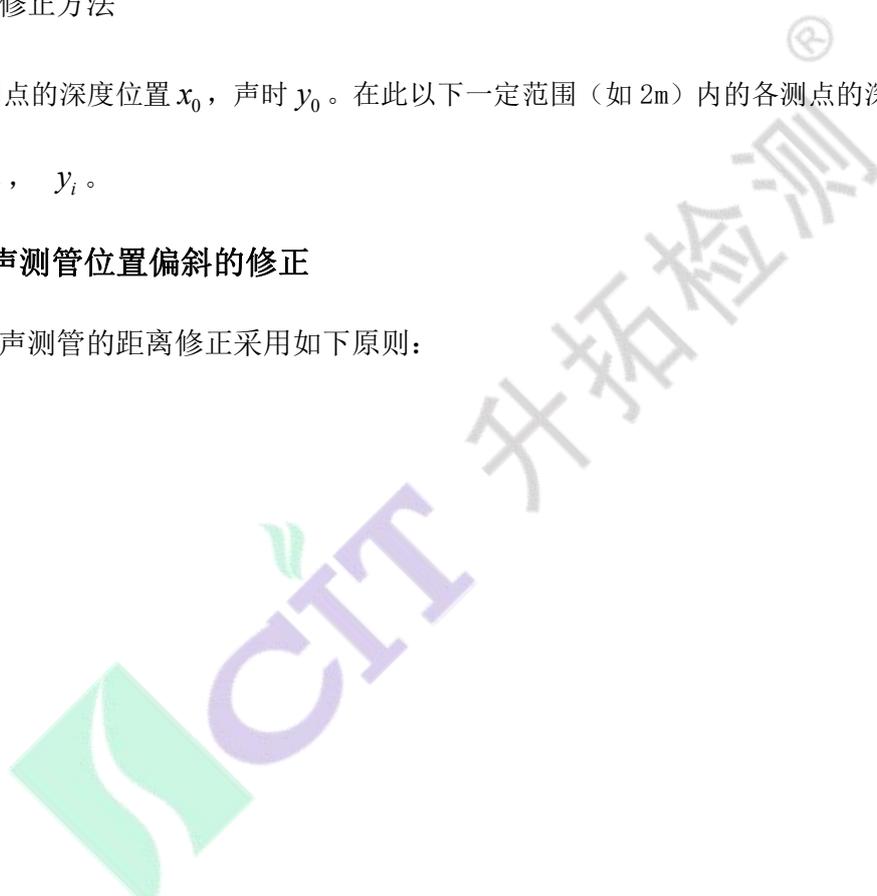
- (1) 以测试的声时 y 为修正参数;
- (2) 以桩顶声波管的声时 y_0 为基准值, 认为其没有误差;
- (3) 在一定长度 (如 2m) 内距离变化为 2 次曲线;
- (4) 采用逐点移动最小二乘法拟合的方法;

2) 修正方法

令桩顶测点的深度位置 x_0 , 声时 y_0 。在此以下一定范围 (如 2m) 内的各测点的深度、声时分别为 x_i , y_i 。

4.3.3 声测管位置偏斜的修正

3) 声测管的距离修正采用如下原则:



第 5 章 BQIM 管理机能

为了更有效地对检测信息加以管理，也对检测工作加以监督，我们开发了升拓检测数据库系统 CI-DBS (Central Inspection Data Base System) 以及建筑质量及健康信息模型系统 (BQIM)。该系统具有如下机能：

- 1) GPS 机能
- 2) 远程无线传送
- 3) 数据库机能
- 4) 检测信息可视化机能

详细资料可参阅“SCIT-1-TEC-12-2017-工程质量及健康信息模型系统(BQIM)”。

数据库网站网址：www.scitdbc.com



第 6 章 结语及致谢

基桩完整性的低应变反射检测技术经过学者们大量的、长期的研究，已经具备了很高的水平并得到了极其广泛的应用。然而，不可否认的是，由于对缺陷检出能力的不足等诸方面原因，低应变反射法面临着信任降低，有被声波透射法所取代的动向。

另一方面，低应变反射法的优越性也是非常突出的。它不仅具有测试简单、成本低等优点，而且在一些条件下的适用性是声波透射法所不可替代的。例如，预制桩、声波管发生堵塞、在役基桩等均无法使用声波透射法。

为此，我们在近 20 年对冲击弹性波检测技术研究，以及在岩锚、混凝土结构检测技术和设备的基础上，开发了本套设备（PA 型和 R 型）。其中，包含了大量的独创性技术，我们也殷切地希望这些技术和设备对低应变反射技术的进一步发展起到相应的推动作用。

此外，本文中部分内容来自网上收集资料，因无法查找作者及出处，只能在此表示诚挚的谢意！

最后，衷心向各位合作伙伴以及为本文提供了宝贵资料的：

南宁铁路局科学研究所

天津市交通质量监督局

甘肃省交通质监站

中水七局

中水四局

浙江省交通科学研究院

四川省交通职业技术学院

湖南恒德工程质量检测有限公司

中铁十七局

中交二航局

和其他关心、支持我们的各位朋友表示诚挚的谢意！

【参考文献】

- [1] 中华人民共和国行业标准：建筑桩基检测技术规范（JGJ 106—2014）[S]. 中华人民共和国建设部，2014. 04. 26 发布、2014. 10. 01 实施.
- [2] 中华人民共和国行业标准：铁路工程桩基检测技术规程（TB10218-2008）[S]. 中华人民共和国铁道部，2008. 06. 05 发布、2008. 07. 01 实施.
- [3] 中华人民共和国行业标准：公路工程桩基动测技术规程（JTG/T F81-01-2004）[S]. 中华人民共和国交通部，2004. 11. 01 实施.
- [4] 中华人民共和国行业标准：桩基动测仪（JG/T3055-1999）[S]. 中华人民共和国建设部，1999. 03. 22 发布，1999. 09. 01 实施.
- [5] 中华人民共和国行业标准：港口工程桩基动力检测规程（JTJ 249—2001）[S]. 中华人民共和国交通运输部，2001.
- [6] 工程地质手册（第四版）[M]. 中国建筑工业出版社，2007.
- [7] 吴佳晔、张高强等：冲击弹性波激励残留信号的消减及反射信号的抽出技术[P]. 中华人民共和国发明专利 ZL200910082851. 4.

版本修订说明

V1.00: 初版

V1.01: 增加了插图;

V1.02: 修正了公式中的个别错误 (2.3.3), 更新了部分图片;

V1.03: 修订了 2.3.4, 增加了混凝土柱长度检测及验证实例 (2.7.2);

V1.05: 增加了跨孔声波透射法 (第四章);

V1.06: 增加了声测管修正方法 (4.2.1)

V1.07: 修订了低应变检测法的局限 (2.8.1) 和第 5 章 (BQIM 管理系统)

V1.08: 增加了在役基桩完整性检测示例 (3.4.4)

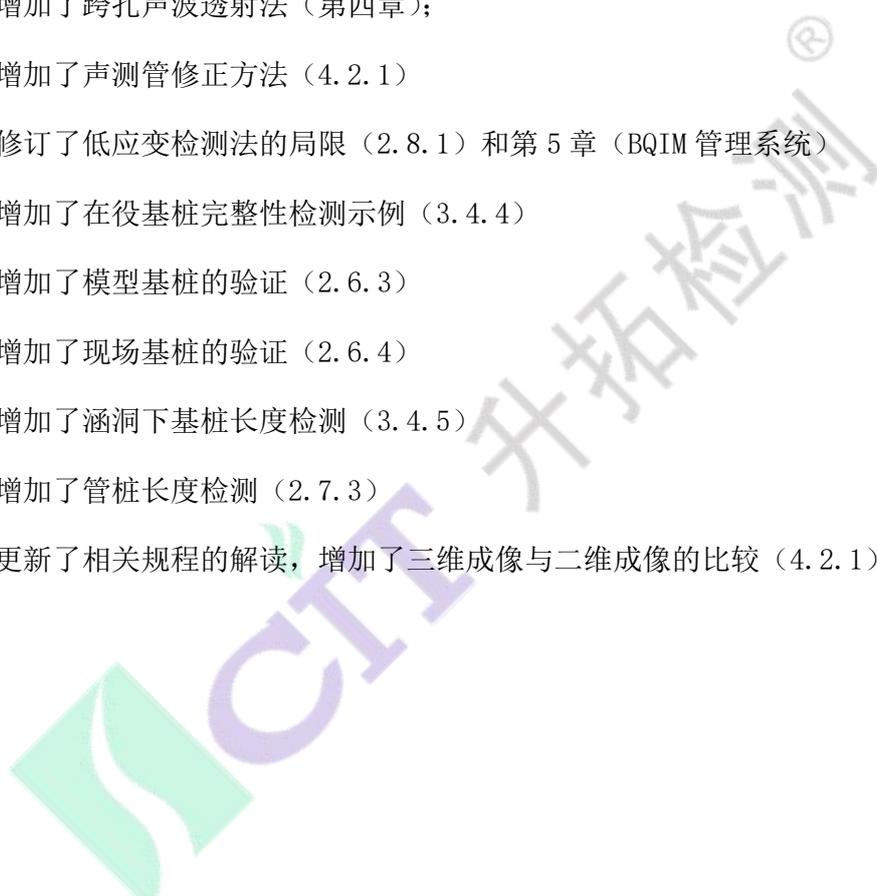
V1.09: 增加了模型基桩的验证 (2.6.3)

V1.10: 增加了现场基桩的验证 (2.6.4)

V1.11: 增加了涵洞下基桩长度检测 (3.4.5)

V1.12: 增加了管桩长度检测 (2.7.3)

V1.13: 更新了相关规程的解读, 增加了三维成像与二维成像的比较 (4.2.1)



技术支持

- ✘ 本资料为内部资料，仅供本公司及相关单位人员参考。未经本公司许可，任何单位和个人不能下载、阅读以及转载；
- ✘ 有关本资料相关的任何疑问，请咨询：
 - ✘ 四川升拓检测技术股份有限公司 客服咨询专线
 - ✘ TEL: (028)6861-1507、6861-1511、6861-1527
 - ✘ MAIL: Support@scentralit.com
 - ✘ HTTP: www.scentralit.com
- ✓ 有关本资料的最新更新，可在本公司网站的下载中心下载：

http://www.scentralit.com/download_201003181343459218.html

