

江苏省建设工程质量检测人员培训教材

低应变法检测 补充讲义

江苏建科建筑技术培训中心

二〇一九年十一月

目 录

第一章 概述-----	1
第一节 桩基础的基本知识-----	1
第二节 基桩常见质量问题-----	2
第三节 桩基检测的历史-----	4
第四节 低应变检测的有关规范要求-----	4
第二章 低应变法检测基本原理-----	6
第一节 基本假设-----	6
第二节 低应变法检测的定义和适用范围-----	6
第三节 低应变法的特点-----	7
第四节 低应变法的理论知识-----	7
第三章 低应变法检测实践-----	26
第一节 仪器设备-----	26
第二节 低应变法检测的基本规定-----	41
第三节 现场检测-----	45
第四节 检测数据分析与判定-----	54
第五节 低应变检测应注意的问题-----	57
第六节 低应变检测的局限性-----	61
第四章 工程实例-----	64

第一章 概述

第一节 桩基础的基本知识

桩基础pile foundation 属于一种深埋基础，它是由在岩土中设置的桩体（灌注桩或预制桩）和联结于桩顶的承台组成的基础。若桩身全部埋于土中，承台底面直接与土体接触，称为低承台桩基，一般的工业与民用建筑的桩基础均属于低承台桩基。若承台底面以至桩身上部露出地面，称为高承台桩基，位于河床内的桥桩基础属于高承台桩基。

基桩-----桩基础中的单桩foundation pile，有木桩、混凝土桩、钢筋混凝土桩、型钢桩等。

一、桩的分类

1、按材料分类

有木桩，混凝土桩，钢桩，组合桩等桩型。

木桩的使用经历了漫长的历史时期，如意大利威尼斯水城 1561 年前开始建立在泻湖的沼泽地上，房屋基础就采用了木桩。后三种桩直至 19 世纪 20 年代人类才使用，从上世纪 90 年代开始在我国大量使用。

2、按成桩时对地基土的挤压分类

有非挤土桩、部分挤土桩、挤土桩。

3、按桩的功能分类

1) 抗压桩，又可分为摩擦桩、端承桩、端承摩擦桩、摩擦端承桩

2) 抗拔桩（使用在地下室、水池、下穿隧道的基础下）

3) 水平受荷桩

4、按成桩方法分类

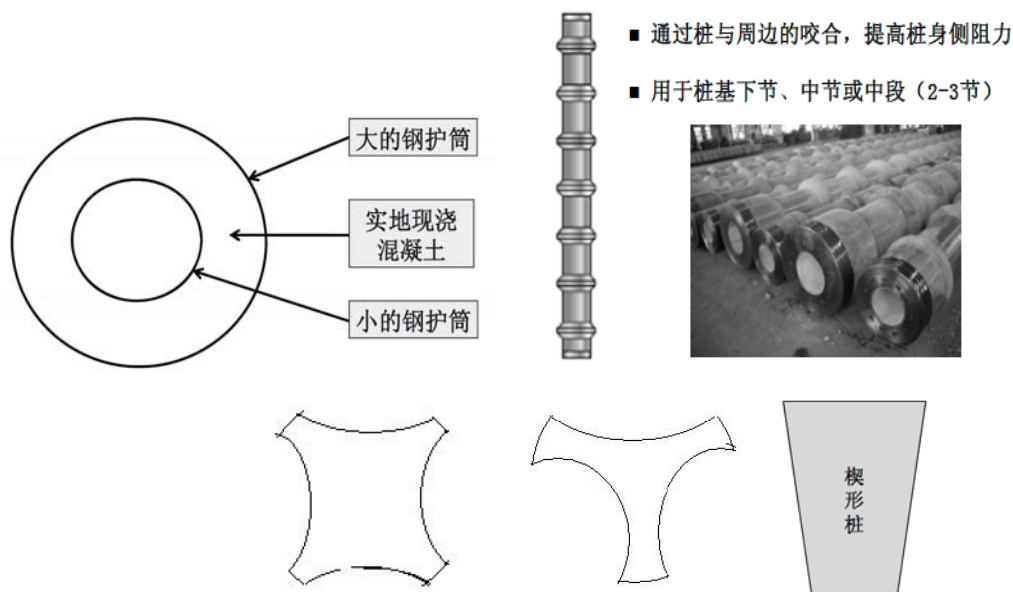
有打（压）入桩、就地灌注桩（直接在地基土上用钻、冲、挖的方式成孔，就地浇注混凝土而成桩）。

5、按成孔工艺分类

有沉管灌注桩、钻（冲）灌注桩、人工挖孔灌注桩、挤扩多支盘灌注桩等。

二、一些新型桩

PCC桩，类似预应力桩、楔型桩 X、Y型桩、预应力混凝土异型桩、挤扩灌注桩。



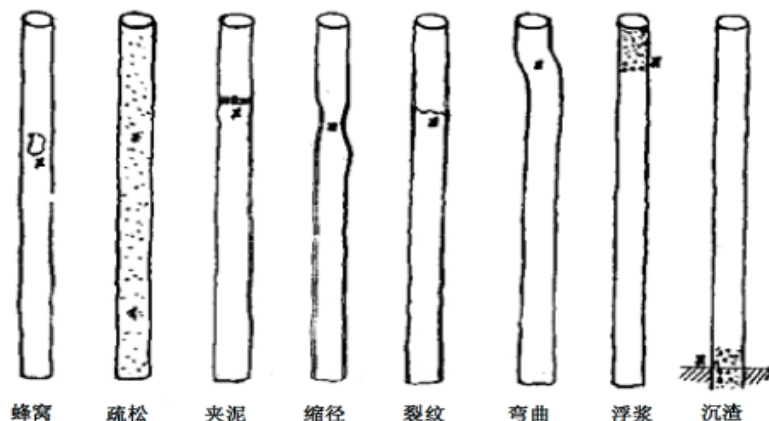
第二节 基桩常见质量问题

一、振动沉管灌注桩

- 1、拔管速度过快，管内灌注高度过低，不足以产生一定的排挤压力，在淤泥层中易产生缩颈。
- 2、在地层存在有承压水的砂层，砂层上覆盖有透水性差的粘土层，孔中浇注混凝土后，由于动水压力的作用，沿桩身至桩顶出现冒水现象，凡冒水桩一般形成断桩。
- 3、当振动沉管采用活瓣桩尖的，时有活瓣张开不灵活，混凝土下落不畅，引起断桩或混凝土密实度差。
- 4、预制混凝土质量差，沉管过程被击碎而塞入桩管内，当拔管至一定高度后，桩尖下落而被孔壁卡住，形成桩身的下段无混凝土，即产生俗称的吊脚桩。

二、冲、钻孔灌注桩

- 1、配置护壁泥浆相对密度不合适，造成塌孔，形成断桩或夹泥。
- 2、浇注混凝土不连续，造成断桩、夹泥或桩身混凝土离析。
- 3、清孔不干净或孔底泥浆质量控制不好，桩底沉渣过厚。
- 4、导管漏水或拔管过快，造成断桩。



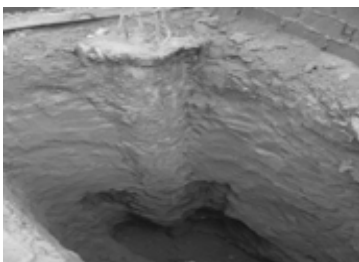
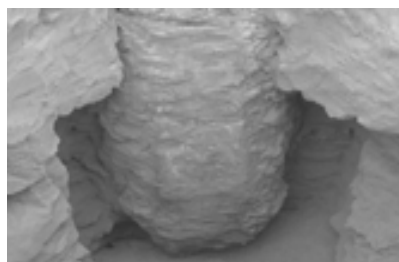
三、挖孔桩可能出现的问题

- 1、桩身混凝土离析，混凝土强度达不到设计要求。
- 2、桩端持力层未达到设计要求
- 3、孔底水未抽干或不易抽干情况下浇注混凝土，桩底附近混凝土胶结差。
- 4、清底不干净，桩底有虚土，（桩底沉渣）。
- 5、桩径偏差大，扩大头尺寸不符合设计要求。

四、预制桩容易出现的问题

- 1、土方施工时，抗弯强度较小容易造成桩身断裂。
- 2、施工顺序不妥造成浮桩。土方开挖不当造成倾斜桩、断桩。上下轴线不重合。
- 3、施工挤土造成桩拉、挤断或脱节。
- 4、打桩或运输过程中造成桩身断裂或桩顶破碎。
- 5、接桩焊接质量差或焊接后冷却时间不足，造成接桩处出现脱焊或焊接不牢。
- 6、锤击反射产生的拉应力超过桩的抗拉强度时，造成桩身中上部出现环状裂缝。

五、各种缺陷照片



第三节 桩基检测的历史

弹性波在固体介质中的传播现象研究始于 19 世纪中叶，但直到 1931 年才有人意识到打桩问题是一波传播问题，桩基动力测试技术是从有了计算机才真正开始发展的，1960 年后世界上部分国家开展了系列动力测试桩的研究工作，并于 20 世纪 80 年代形成了实用的高应变现场测试和室内波动方程分析方法。采用低应变检测桩身完整性研究工作也在同期开展，其中机械阻抗法在 20 世纪 70 年代初已取得了进展，而低应变反射波法早期研究虽然也在英、法等国开展但其研究并不成功。进入 80 年代后反射波法发展速度很快，在国际上基本占据了低应变动力检测桩身完整性的主导地位。

我国的动力检测理论研究和实践开始于 20 实际 70 年代，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、共振法等，80 年代以波动方程为基础的高应变法进入了快速发展期。国内有近十家单位引进了美国、瑞典的打桩分析仪 PDA，其中少数单位引进了波形拟合分析软件 CAPWAP。在国内所有用桩量大的地区均开展了高应变法的适用性、可靠性研究，动测设备的软硬件研制也取得了长足进展。主要仪器有 ZK 系列桩基振动检测仪、中科院地基所的 FEIPWAPC 波形拟合分析软件、FEI-A 桩基动测分析系统和 DJ-3 型试桩分析仪，中科院武汉岩土所的 RSM 系列以及岩海公司的 RS 系列桩基动测仪。80-90 年代各种低应变法在基本理论、机理、仪器研发、现场测试和信号处理技术、工程桩或模型桩验证研究、实践经验积累的方面，取得了许多有价值的成果。

90 年代中期出台了《基桩低应变动力检测规程》(JGJ/T93-95)，2003 年 7 月 1 日开始实施《建筑基桩检测技术规范》(JGJ106-2003)，江苏省于 2013 年 1 月 1 号出台了《建筑地基基础检测规程》(DGJ32/TJ142-2012)。住建部发布的《建筑基桩检测技术规范》(JGJ106-2014)已于 2014 年 10 月 1 日起实施。

第四节 低应变检测的有关规范要求

基桩的桩身完整性检测是《建筑地基基础工程施工质量验收规范》GB50202-2018 质量检验标准中的主控项目。《建筑基桩检测技术规范》(JGJ106-2014)适用于建筑工程基桩的承载力和桩身完整性的检验和评价，本规范强制性条文规定工程桩应进行单桩承载力和桩身完整性抽样检测。低应变法适用于检测混凝土桩的桩身完整性，检测桩身缺陷及位置，其有效检测桩长范围应通过现场试验确定。完整性检测的目的是发现某些可能影响承载力的缺陷，最终仍是为减少安全隐患、可靠判定工程桩承载力服务的。

地基基础设计等级表

设计等级	建筑和地基类型
甲级	重要的工业与民用建筑物 30 层以上的高层建筑 体型复杂，层数相差超过 10 层的高低层连成一体建筑物 大面积的多层地下建筑物(如地下车库，商场、运动场等) 对地基变形有特殊要求的建筑物 复杂地质条件下的坡上建筑物(包括高边坡) 对原有工程影响较大的新建建筑物 场地和地基条件复杂的一般建筑物 位于复杂地质条件及软土地区的二层及二层以上地下室的基坑工程 开挖深度大于 15m 的基坑工程 周边环境条件复杂、环境保护要求高的基坑工程
乙级	除甲级、丙级以外的工业与民用建筑物 除甲级、丙级以外的基坑工程
丙级	场地和地基条件简单，荷载分布均匀的七层及七层以下民用建筑及一般工业建筑物；次要的轻型建筑物 非软土地区且场地地质条件简单、基坑周边环境条件简单、环境保护要求不高且开挖深度小于 5.0m 的基坑工程

第二章 低应变法检测基本原理

第一节 基本假设

反射波法是以应力波在桩身中的传播反射特征为理论基础的一种方法。该方法假定桩为连续弹性的一维均质杆件，并且不考虑桩周土体对沿桩身传播的应力波的影响。因此，桩的典型弹性体振动模型是直杆的纵向振动。在推导直杆的纵向振动方程时，作以下基本假设：

材料均匀；

直杆等截面；

直杆变形中横截面保持为平面，且彼此平行；

直杆横截面上应力分布均匀

忽视直杆的横向惯性效应。

第二节 低应变法检测的定义和适用范围

低应变法是采用低能量瞬态或稳态激振方式在桩顶激振，实测桩顶部的速度时程曲线或速度导纳曲线，通过波动理论分析或频域分析，对桩身完整性进行判定的检测方法。

低应变测试一般情况下只产生 10^{-5} - 10^{-6} 动应变，桩、土之间产生位移很小。而高应变法作用在桩身上能量大，应力和应变水平接近或达到工程桩实际受力的应力、应变水平，动荷载使桩克服土阻力产生贯入度，从而使桩、土之间产生塑性位移。

低应变法检测目的：检测桩身缺陷及其位置，判定桩身完整性类别。

桩身完整性：反映桩身截面尺寸相对变化、桩身材料密实性和连续性的综合性指标。“相对变化”和“综合性”体现了低应变反射波法检测的技术能力定位。“连续性”包含了实际桩长比施工记录桩长短的情况。

桩身缺陷：在一定程度上使桩身完整性恶化，引起桩身结构强度和耐久性降低，出现桩身断裂、裂缝、缩颈、夹泥(杂物)、空洞、蜂窝、松散等不良现象的统称。

低应变法适用于检测混凝土桩的桩身完整性，判定桩身缺陷的程度及位置。桩的有效检测桩长范围应通过现场试验确定。

对桩身截面多变且变化幅度较大的灌注桩，应采用其他方法辅助验证低应变法检测的有效性。

第三节 低应变法的特点

操作方便、效率高，属于快速普查桩的施工质量的一种半直接法。

与静载试验和钻芯法等直接方法相比，动测法检测速度快、费用低、检测覆盖面广。

低应变法激振能量小，作用荷载远小于桩的使用荷载，产生的应变很小，不足以使桩产生贯入度（或桩土之间不产生相对位移。因此低应变检测只用于桩身完整性检测，用于承载力检测时则理论依据不充分。

第四节 低应变法的理论知识

一、有关应力波的基本术语

振动-----物体或系统在平衡位置附近以某种方式进行的往复运动；

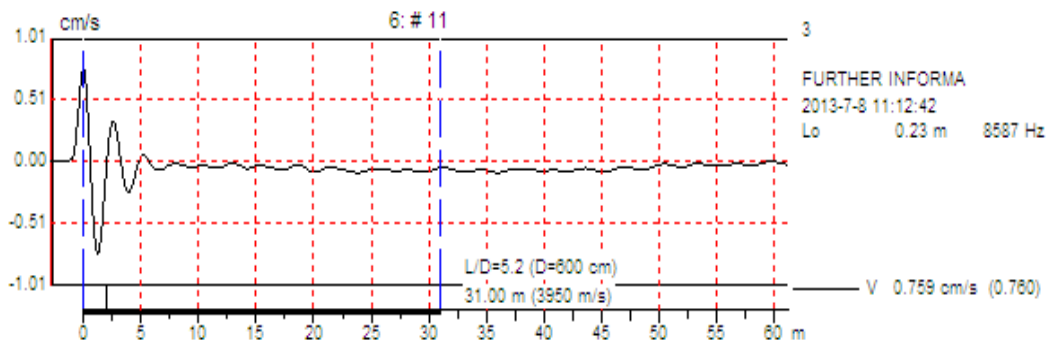
质点速度-----质点在其平衡点附近往复运动的速度，一般是几个 m/s；（不是波速）

应力波-----振动在连续介质中传播的过程；

应力波波速-----应力波沿桩身传播的速度；一般是几千 m/s

应力波特性-----具有反射、透射、散射、叠加、弥散（衰减）等特性

思考：低应变测试时，仪器上显示的纵坐标的单位是什么？是什么物理参数？



纵坐标：0.759cm/s 约 7.6mm/s

纵坐标：1250mv、7.36mm/s

二、波动方程及其解

1、波动方程简单推导: 以微单元 dx 为分析对象, u 为在 x 处的位移

$$v(x, t) = \frac{\partial u(x, t)}{\partial t}$$

杆中微元质量 $m = \rho A dx$, 加速度 $a = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$,

微元受到的扰动力 $Ad\sigma = A(\sigma(x+dx) - \sigma(x))$,

根据牛顿定律 $A(\sigma(x+dx) - \sigma(x)) = ma = \rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$,

两边同除以 $A dx$ 并取极限 $dx \rightarrow 0$ 则得 $\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial x}$,

根据胡克定律 $\sigma = E\varepsilon = E \frac{\partial u}{\partial x}$, 带入上式则得 $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$

$$C = \sqrt{E/\rho}$$

其中横截面积为 A , 弹性模量 E , 质量密度为 ρ 。

同理, 设杆件周围介质为均质, 且弹性系数为 k , 粘滞阻尼系数为 η 时, 波动方程变成:

$$AE \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \eta \frac{\partial u}{\partial t} - ku = A\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

设边界条件 $u|_{t=0} = \phi(X)$, $\frac{\partial u}{\partial t}|_{t=0} = \psi(x)$ 一维弹性自由杆的解可通过特征线代换解出通解:

$$u(x, t) = f_1(x+xt) \text{ (上行波)} + f_2(x-xt) \text{ (下行波)}$$

$$\text{特解: } u(x, t) = \frac{1}{2} [\phi(x+Ct) + \phi(x-Ct)] + \frac{1}{2C} \int_{x-Ct}^{x+Ct} \psi(\zeta) d\zeta$$

非自由杆的解可用欧拉公式构造成显式函数, 解出位移表达式:

$$u(x, t) = B_1 e^{-k_2 x} e^{i(k_1 x - \omega t)} + B_2 e^{k_2 x} e^{-i(k_1 x + \omega t)}$$

$$\text{速度解: } v(x, t) = \frac{\partial u(x, t)}{\partial t}$$

2、波动方程求解得到的结果

(1) $k=0$, $\eta=0$ 即一维线弹性自由杆

波速与频率无关, 无频散, 波无衰减。

(2) $k \neq 0$, $\eta=0$ 即有弹性约束, 无粘滞阻尼

波速与频率有关, 有频散, 波无衰减。

(3) $k \neq 0$, $\eta \neq 0$ 即有弹性约束和粘滞阻尼

波速与频率有关, 有频散, 波发生衰减。

(4) 粘滞阻尼越大, 波的衰减越快。

(5) 波的频率越高, 则衰减越快。

实际的基桩是埋设在非均质的土中即 $k=k(x)$, $\eta=\eta(x)$, 因此其解的形式更加复杂, 目前只能通过数值模拟方法获得其数值解, 但其规律应该更接近于 $k \neq 0$, $\eta \neq 0$ 的情形。

三、 应力波基本概念

由波阵面动量守恒条件:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_I}{\rho_1 C_1} - \frac{\sigma_R}{\rho_1 C_1} &= \frac{\sigma_T}{\rho_2 C_2} \\ Z_1(V_I - V_R) &= Z_2 V_T \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \sigma_R &= \sigma_I \left[(Z_2 - Z_1) / (Z_1 + Z_2) \right] = -R \sigma_I \\ \sigma_T &= \sigma_I \left[2Z_2 / (Z_1 + Z_2) \right] = T \sigma_I \\ V_R &= -V_I \left[(Z_2 - Z_1) / (Z_1 + Z_2) \right] = R V_I \\ V_T &= V_I \left[2Z_1 / (Z_1 + Z_2) \right] = n T V_I \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_1 &= \rho_1 C_1 A_1 \\ Z_2 &= \rho_2 C_2 A_2 \end{aligned} \quad n = \frac{\rho_2 C_2 A_2}{\rho_1 C_1 A_1}$$

V_I : 入射波 V_R : 反射波 V_T : 透射波

四、反射波和透射波

当波传播到两种介质的阻抗变化分界面时, 一部分从界面返回, 形成反射波。一部分进入到另一种介质, 形成透射 (折射) 波。反射波和透射波的幅值大小及方向由前述的理论决定。

1、不考虑桩周阻尼的影响, 桩顶入射波在变截面处的反射与透射

$$\begin{cases} \sigma_T = \sigma_I \left[2A_1 / (A_1 + A_2) \right] \\ \sigma_R = \sigma_I \left[(A_2 - A_1) / (A_1 + A_2) \right] \end{cases} \quad (2-2)$$

及

$$\begin{cases} V_T = V_I \left[2A_1 / (A_1 + A_2) \right] \\ V_R = -V_I \left[(A_2 - A_1) / (A_1 + A_2) \right] \end{cases} \quad (2-3)$$

式中下标 I、R、T 分别表示入射、反射和透射。

由式 (2-1) 及式 (2-3) 可得:

1) 对于截面均匀, 无缺陷的桩, 即 $A_1=A_2$, 或 $Z_1=Z_2$, 则有

$$\begin{cases} \sigma_T = \sigma_I & V_T = V \\ \sigma_R = 0 & V_R = 0 \end{cases} \quad (2-4)$$

可见, 均匀桩不产生反射波, 入射波以不变的波速和应力幅值与方向向下传播。若在桩的顶端安装加速度传感器, 则可测得各截面反射波加速度信号 (或速度信号) 为零。

2) 当下行压缩波遇到截面减小时, 即 $A_1 > A_2$, 则产生反射波和透射波。由式 (2-2) 可见, σ_R 与 σ_I 异号, 这表明反射应力波为上行拉力波。根据应力符号的定义, 上行拉力波与下行压缩波的方向一致。因此, 当该反射到达顶端时, 在杆顶所检测到的应力反射波与初始冲击压缩波的方向一致 (如均为负)。由式 (2-3) 可见, v_R 与 v_I 符号一致, 这表明反射波的速度也与入射相同向。因此, 用传感器在桩顶检测出的反射波速度信号和初始入射波速度符号也相同。即 SIT 曲线 (速度曲线) 上具有相同的特征。

总之, 当在桩顶检测出的反射波速度或应力与入射波信号极性一致, 则表明在相应位置存在截面缩小; 反之, 当反射波信号与入射被初始信号极性相反时, 则表明在相应位置存在扩颈。

3) 由式 (2-2) 和 (2-3) 还可看出, 变截面处反射波幅值 (速度或应力幅值) 与截面的变化差值 (A_1-A_2) 成正比。截面变化越大, 反射波信号越强。当然, 这仅在一定的线性范围之内。

4) 由式 (2-2)、(2-3) 可见, 透射波的速度或应力在缩颈或扩颈处均不改变方向或符号。且缩颈处透射波的幅值大于入射波。而扩颈处则相反。

5) 由式 (2-3) 可见, 缩颈引起的反射波幅值总小于入射波。

6) 自锤击压缩波出现时刻算起, 变截面处所产生的反射波信号到达顶端迟后的总时差

$$t = 2L/c \quad (2-5)$$

式中, L 为变截面到桩顶端传感器安装点的距离, c 为桩的速度。

2、桩尖处的反射波与透射波的符号和幅值

对于桩尖处的反射波与透射波的符号和幅值, 则应根据前述波在不同介质面处的反射与透射理论决定:

$$\begin{cases} \sigma_R = \sigma_I [(Z_2 - Z_1)/(Z_1 + Z_2)] \\ \sigma_T = \sigma_I [2Z_2/(Z_1 + Z_2)] \end{cases} \quad (2-6)$$

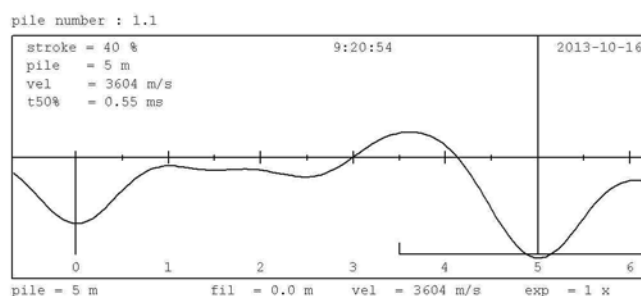
$$\begin{cases} V_R = -V_I [(Z_2 - Z_1)/(Z_1 + Z_2)] \\ V_T = V_I [2Z_2/(Z_1 + Z_2)] \end{cases} \quad (2-7)$$

由式(2-7)可进行以下诊断：

1) 一般，由于桩的阻抗大于土的阻抗，即 $Z_1 > Z_2$ (或 $(\rho c)_1 > (\rho c)_2$)，

由式(2-7)得，在桩尖处的反射波和入射波的应力异号，即反射波为上行拉力波；而反射波的速度信号和入射波速度信号符号相同，若在桩的顶端观测，则反射波的速度，应力都与锤击下行波符号一致。这使得各缩颈处的反射波符号相同。

2) 由式(2-7)可见，桩尖处的反射波的应力 σ_R 和速度 v_R 的幅值均弱于入射波。而随着土质变“软”，或土阻抗变小， σ_R 与 v_R 反射波的幅波变大，特别是当桩土阻抗相差很远，而桩可看成自由端时，由式(2-7)则有 $\sigma_R \approx -\sigma_I$ ， $v_R = v_I$ ，则反射波幅值近似与入射幅值相等。此时，桩尖处的应力为零，而速度加倍。当然，实际上由于桩内阻力的存在，反射波速度要稍小一些。



3) 相反地，随着桩尖处土阻抗的增加，反射波的幅值变小，特别是当桩尖为固定时，则有 $\sigma_R \approx \sigma_I$ ， $v_R \approx -v_I$ ，可见，这种情况下，桩尖处反射波的速度为零，而应力加倍，这时在桩顶处将测不到桩尖处的反射速度。因此，在使用反射波进行桩的完整性进行诊断时，桩尖附近土的阻抗对桩尖处反射波速度和应力的幅值会产生明显的影响。

五、 波的叠加原理

两列波相遇后，仍然保持他们各自的特性（频率、波长、振幅、震动方向等）不变，并按照原来的方向继续前进，好象没有遇到过其它波一样。

在相遇区域内，任一点的振动为两列波单独存在时在该点所引起的振动位移的矢量和。

六 、波阻抗、反射系数、透射系数

低应变法是以应力波在桩身中的传播特征为理论基础的一种方法。该方法假定桩为连续弹性的一维均质杆件，测试时在桩顶竖向激振，弹性波沿着桩身向下传播，当桩身存在明显的波阻抗差异截面（即桩身存在缺陷时，如断裂、缩颈、夹泥、离析或遇桩底土层）或桩身截面积发生变化时，将产生反射波，经接收、放大、滤波和数据处理，可识别来自不同部位的反射信息。通过对反射信号进行分析计算，判断桩身混凝土的完整性，判定桩身缺陷程度及其位置。

1、由一维波动理论可知，桩阻抗是其横截面积，材料密度和弹性模量的函数

$$\text{阻抗 } Z = EA/c = \rho c A$$

$$\text{弹模 } E = \rho c^2$$

Z : 桩的广义波阻抗 (单位为 $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$)

c : 桩的声波速度 (单位为 m/s)

E : 桩的弹性模量 (单位为 N/m^2)

ρ : 桩的质量密度 (单位为 kg/m^3)

A : 桩的面积 (单位为 m^2)

式中 Z 为桩的广义波阻抗 (单位为 $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$), c 为桩的声波速度 (单位为 m/s), E 为桩的弹性模量 (单位为 N/m^2), ρ 为桩的质量密度 (单位为 kg/m^3), ρc 为桩的声特性阻抗或声阻抗率 (单位为 $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)。波阻抗 Z 仅与材料本身有关, 大小由杆体材料 (桩身材料) 本身性质所决定。

例题: 关于阻抗 Z 、弹模 E 的计算

已知某方桩的质量密度为 $2450\text{kg}/\text{m}^3$, 桩长为 20m , 横截面尺寸为 $450\text{mm}\times 450\text{mm}$, 实测波速为 $C=4000\text{m}/\text{s}$, 假定桩身材料均匀, 请计算

1)、求桩身阻抗;

2)、弹性模量;

答: 阻抗 $Z = \rho CA = 2450\text{kg}/\text{m}^3 \times 4000\text{m}/\text{s} \times 0.45^2\text{m}^2$

$$= 1984500 \text{ (N}\cdot\text{s}/\text{m})$$

弹模 $E = \rho C^2 = 2450\text{kg}/\text{m}^3 \times 4000\text{m}/\text{s} \times 4000\text{m}/\text{s}$

$$= 3.92 \times 10^{10} \text{ (N}/\text{m}^2)$$

$$= 3.92 \times 10^4 \text{ MPa}$$

阻抗比值 $n = Z_1/Z_2$ ($Z_{\text{上}}/Z_{\text{下}}$)

在桩顶激振后, 将产生压缩波, 以波速 c 沿桩身向下传播。当遇到波阻抗界面时, 产生反射波和透射波。根据应力波传播理论, 只要这两种介质在界面处始终保持接触 (既能承压又能承拉而不分离) 则根据连续条件和牛顿第三定律, 界面上两侧质点速度、应力均应相等。

$$n = Z_1/Z_2 = \rho_1 C_1 A_1 / \rho_2 C_2 A_2$$

2、反射系数、透射系数:

将式 (2-6)、式 (2-7) 联立求解可得:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_R &= \sigma_I \left[(Z_2 - Z_1) / (Z_1 + Z_2) \right] = -R \sigma_I \\ \sigma_T &= \sigma_I \left[2Z_2 / (Z_1 + Z_2) \right] = T \sigma_I \end{aligned} \right\} \quad (2-9)$$

$$\left. \begin{aligned} V_R &= -V_I \left[(Z_2 - Z_1) / (Z_1 + Z_2) \right] = R V_I \\ V_T &= V_I \left[2Z_1 / (Z_1 + Z_2) \right] = n T V_I \end{aligned} \right\} \quad (2-10)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{n-1}{n+1} \\ T &= \frac{2}{1+n} \end{aligned} \right\} \quad (2-11)$$

式中：R——反射系数

T——透射系数

式（2-9）～（2-11）是反射波法诊断的依据，桩身各种性状以及桩底不同的支承条件均可归纳成以下三种波阻抗变化类型：

1) 波阻抗近似不变 ($Z_1=Z_2$)

桩底支承介质与桩身阻抗近似，桩身完整、均匀、无缺陷都属于这种类型。

$Z_1=Z_2$ ，则 $n=1$ ， $R=0$ ， $T=1$ ，由式（4-9）、式（4-11）有 $\sigma_R=\sigma_I=0$ ，应力波全反射，无反射信号产生。因此，若桩底岩石与桩身混凝土阻抗接近时，将无法得到桩底反射信号。

2) 波阻抗减小 ($Z_1>Z_2$)

桩底支承介质较桩身材料软以及桩身断裂、缩颈、离析、疏松、裂缝、裂纹等缺陷都属于这种类型。

$Z_1>Z_2$ ，则 $n>1$ ， $R>0$ ， T 恒 >0 ，由式（4-9）可知， σ_R 与 σ_I 异号，反射波为上行拉力波。根据应力符号的定义，上行拉立波与下行压缩波的方向一致，由式（4-10）可知， v_R 与 v_I 符号一致，用传感器在桩顶检测出的反射波速度和初始入射波速度符号相同。总之，在桩顶检测出的反射波速度、应力均与入射波信号极性一致。

当桩底支承介质的阻抗远小于桩身阻抗或桩身完全断裂时， $Z_1 \gg Z_2$ ，则 $n \rightarrow \infty$ ， $R=1$ ， $T=0$ ，由式（4-9）、式（4-10）有 σ_R 与 σ_I 同号， $v_R=v_I$ 即桩底处的应力为零，而速度加倍。由于透射波为 0，桩身完全断裂处发生全反射，应力波仅在断裂位置以上多次反射，无法检测断裂部位以下的桩身质量。

3) 波阻抗增大 ($Z_1<Z_2$)

桩底支承介质较桩身材料硬，桩身扩径、鼓肚都属于这种类型。

$Z_1<Z_2$ ，则 $n<1$ ， $R<0$ ， T 恒 >0 ，由式（4-9）、式（4-11）可知， σ_R 与 σ_I 同号，反射为上行压缩波， v_R 与 v_I 符号相反。总之，在桩顶测出的反射波速度、应力均与入射波信号极性相反。

当桩底支承介质的阻抗远大于桩阻抗，桩底近似为固定时， $Z_1 \ll Z_2$ ，则 $n=0$ ， $R=-1$ ， $T=2$ ，由式（4-9）、式（4-10）有 $\sigma_R=\sigma_I$ ， $v_R=-v_I$ ，即桩底处的速度为零，而应力加倍。

七、与阻抗比有关的几点规律

$$n = Z_1/Z_2 = \rho_1 C_1 A_1 / \rho_2 C_2 A_2$$

Z_1 、 Z_2 为截面两端的广义波阻抗, 其中密度 ρ 和速度 C 决定了混凝土的密实性和连续性, A 反映截面的尺寸变化, 因此桩身阻抗能够一定程度上反映桩的完整性指标变化。

$$V_R = R * V_i, \quad \text{反射系数 } R = (n-1)/(n+1)$$

当 $Z_1 > Z_2$ 时, $n > 1$, $R > 0$, 为低阻抗反射或缺陷类反射, 入射波与反射波极性相同;

当 $Z_1 < Z_2$ 时, $n < 1$, $R < 0$, 为高阻抗反射或非缺陷类反射, 入射波与反射波极性相反。

透射波不改变入射波的符号。

前面已经推导, 透射系数 $T = 1 - R = 2/(1+n)$, 当波从某界面透射再返回该界面, 则透射系数:

$$T = (1-R)(1+R) = 1 - R^2$$

当桩身存在多个界面时, 波往返透过中间界面, 则透射系数为 $(1-R_1^2) * (1-R_2^2) * \dots * (1-R_n^2)$, 可见多界面时反射到桩顶的波衰减将很严重。

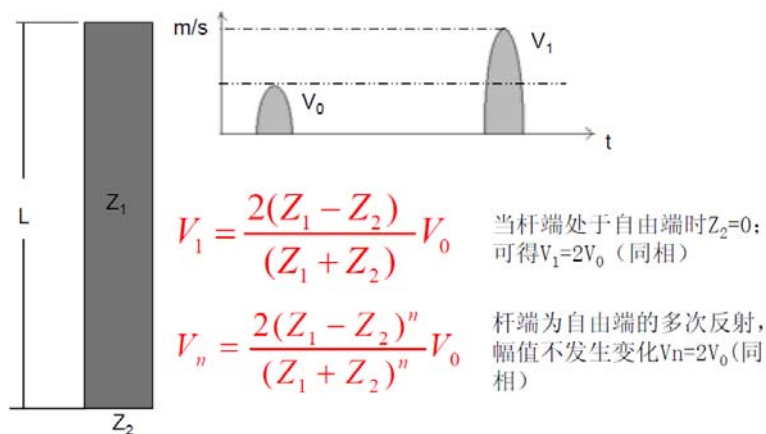
与阻抗有关的几点规律:

1、对于桩身波阻抗减小位置, 当缺陷很严重时, 肯定会产生二次乃至多次反射; 它的一次、二次乃至多次反射波速度与入射波速度相位一致。

2、对于桩身阻抗增大位置, 当波阻抗增大很严重时, 肯定会产生二次乃至多次反射; 它的奇次反射波速度信号与入射波速度信号相位反相, 偶次反射波速度信号与入射波速度相位一致。

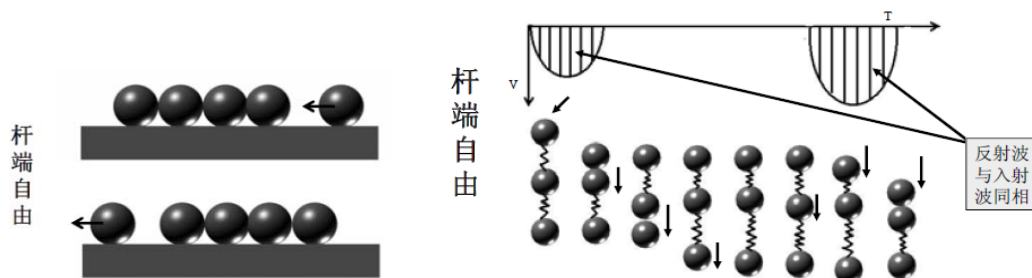
3、当桩界面上下段的波阻抗相差越大时, 反射系数越大, 所测到的反射波也越明显, 由此作为判断波阻抗变化程度的依据。

当桩底为自由端 (桩底悬空、沉渣太厚)

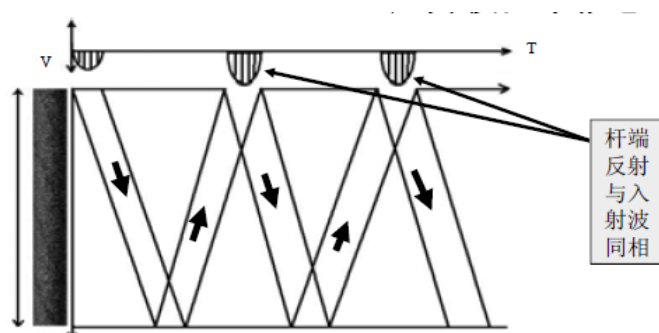


质点运动示意图

1、一维连续杆，杆端自由

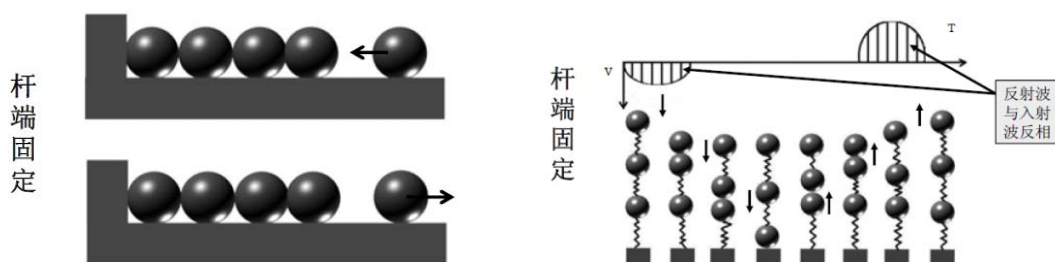
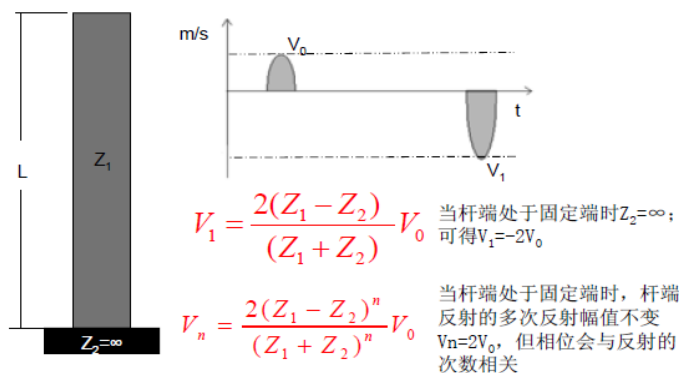


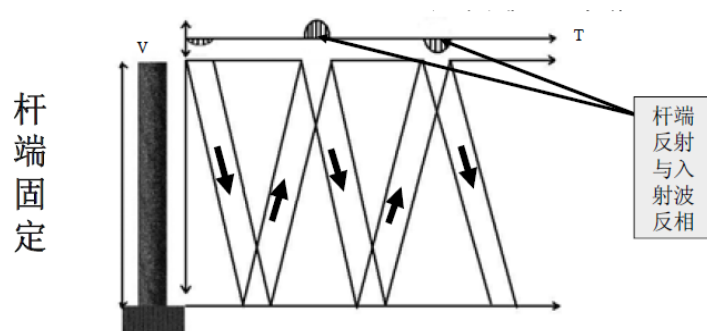
2、当桩身均匀，而桩端自由时应力波示意图



杆件的质量和完整性都无变化，波阻抗不变。此时，杆件中各界面 $n=1$ ， $F=0$ ， $T=1$ ，即无反射波，全部应力波均透射过界面传至下段，当应力波传播至杆端时 $Z_2=0$ ， $V_R=2V_I$ 得到同相的杆端反射。

3、当杆端固定时（类似于桩底嵌入坚硬的岩石）





杆件的质量和完整性都无变化，波阻抗不变。此时，杆件中各界面 $n=1$ ， $F=0$ ， $T=1$ ，即无反射波，全部应力波均透射过界面传至下段，当应力波传播至杆端时 $Z_2=\infty$ ， $V_R=-2V_I$ 得到反相的杆端反射。

小结：

- 1、当杆端处于自由端时，杆端一次、二次乃至多次反射波速度信号幅值为入射波速度信号幅值的 2 倍，并且相位是同相的。
- 2、当杆端处于固定端时，杆端一次反射波速度信号幅值为入射波速度信号幅值的 2 倍，相位是反相的；杆端的二次乃至多次反射波速度信号幅值为入射波速度信号幅值的 2 倍，相位与反射次数有关，奇数次反射波速度信号相位与入射波速度信号相位反相，偶数次反射波速度信号相位与入射波速度信号相位同相。

例题：某方桩的密度为 2450kg/m^3 ，桩长 20m，横截面尺寸为 $450\text{mm}\times 450\text{mm}$ ，实测波速为 $C=4000\text{m/s}$ ，假定桩身材料均匀请计算

- (1) 求桩身阻抗；
- (2) 弹性模量；

(3) 如已知入射波幅值为 4MM/S ，缺陷位置反射波幅值为 2.4mm/s ，试从理论上求缺陷位置的等效面积？

答：反射系数 $R=(n-1)/(n+1)$

$$R=2.4/4 \quad n=4=Z_1/Z_2=A_1/A_2$$

$$A_2=A_1/4=50265\text{mm}^2 \quad \sqrt{50265}=224\text{mm}$$

反射系数的含义是什么？

$$\text{假如 } n=2, R=?$$

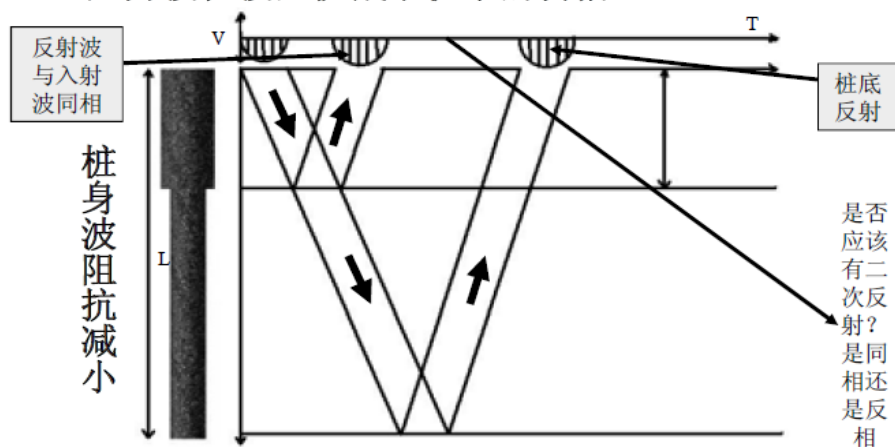
$$n=5/4, R=? \quad 0.11$$

$$n=1, R=?$$

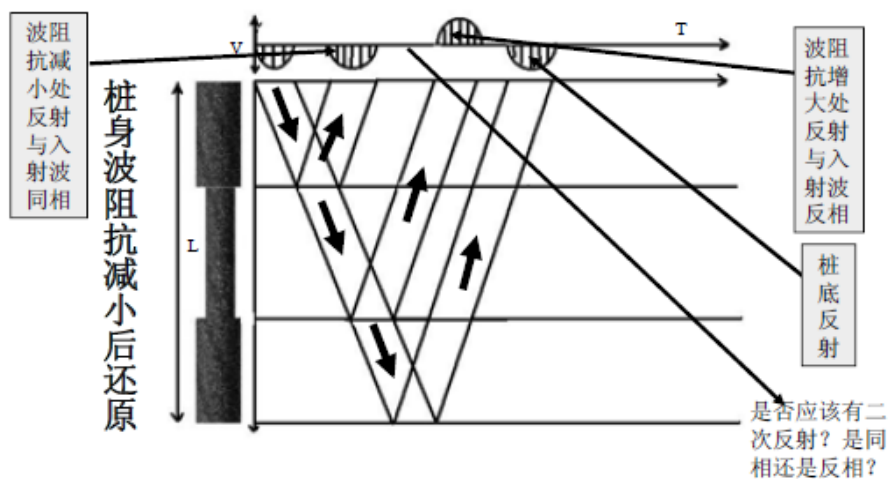
$$n=0.8, R=?$$

八、应力波传播现象举例

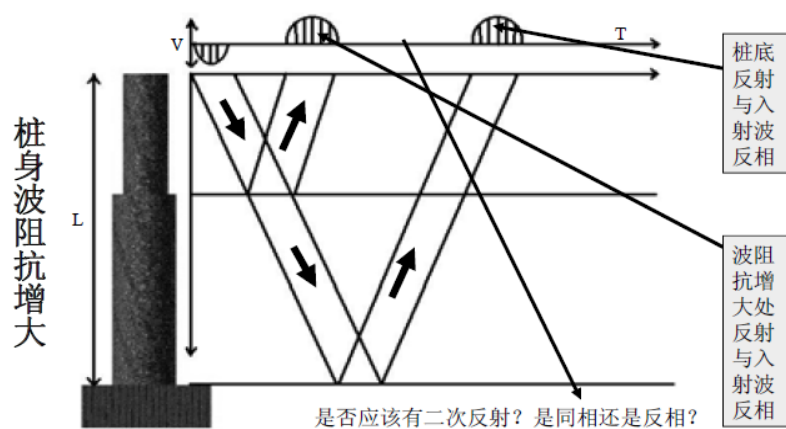
应力波在波阻抗减小桩中的传播

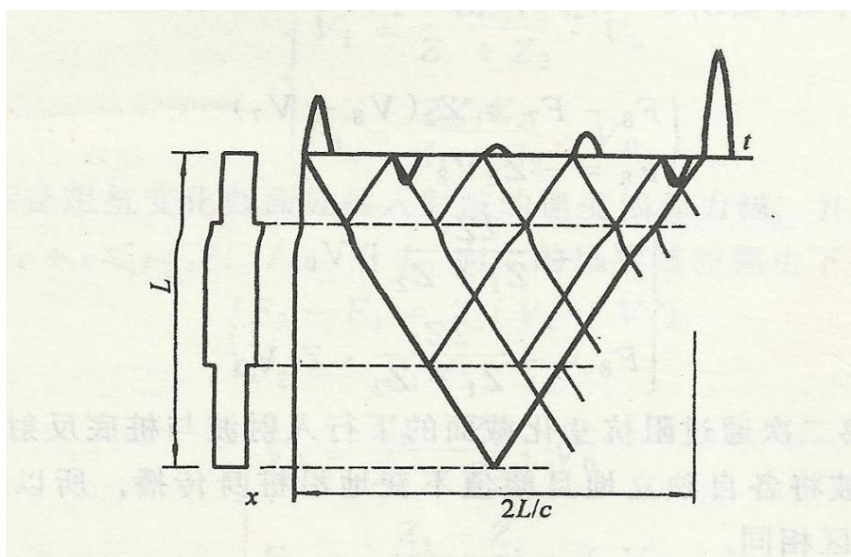
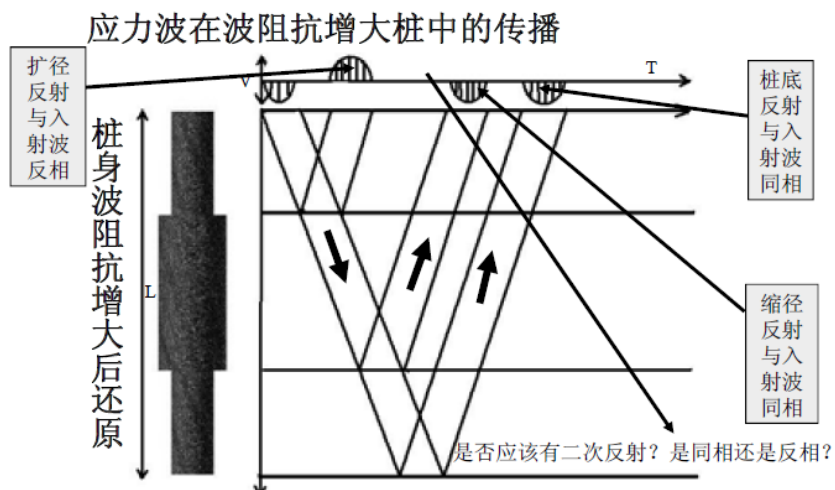


应力波在波阻抗减小桩中的传播



应力波在波阻抗增大桩中的传播



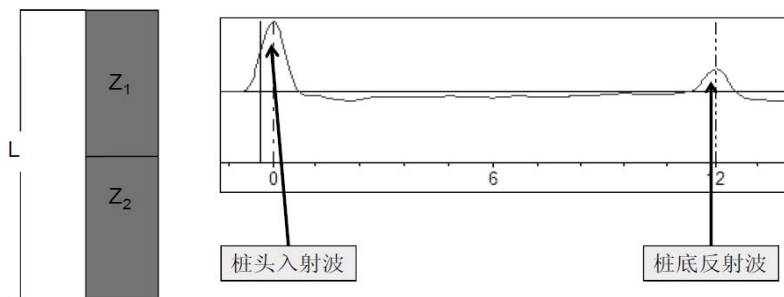


上图是波在两个阻抗变化截面（扩径）自由桩中的特征线传播图示。

为满足反射波法的工程实用性，不可能要求都去采用上面介绍的特征线法进行图解和计算，但仅知道“缺陷处有同向反射且反射波幅愈高缺陷就愈严重”或者“强土阻力将引起负向反射”是错误的。

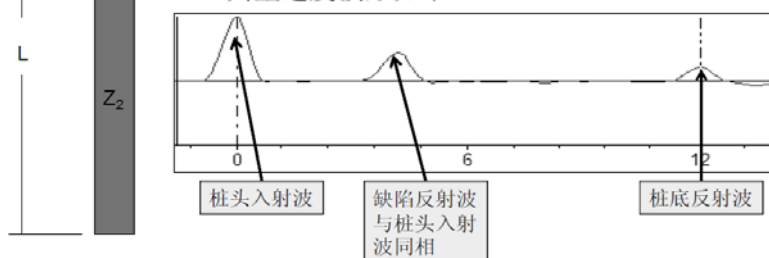
① 当 $Z_1 \approx Z_2$ 时，表示桩身截面均匀，无缺陷，无缺陷反射。

典型速度波形如下：



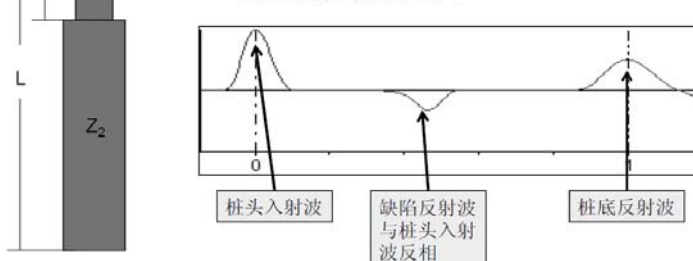
② 当 $Z_1 > Z_2$ 时，表示在桩身相应位置存在波阻抗减小（如：截面缩小或砼质量较差等缺陷），反射波速度信号与入射波速度信号相位一致。

典型速度波形如下：

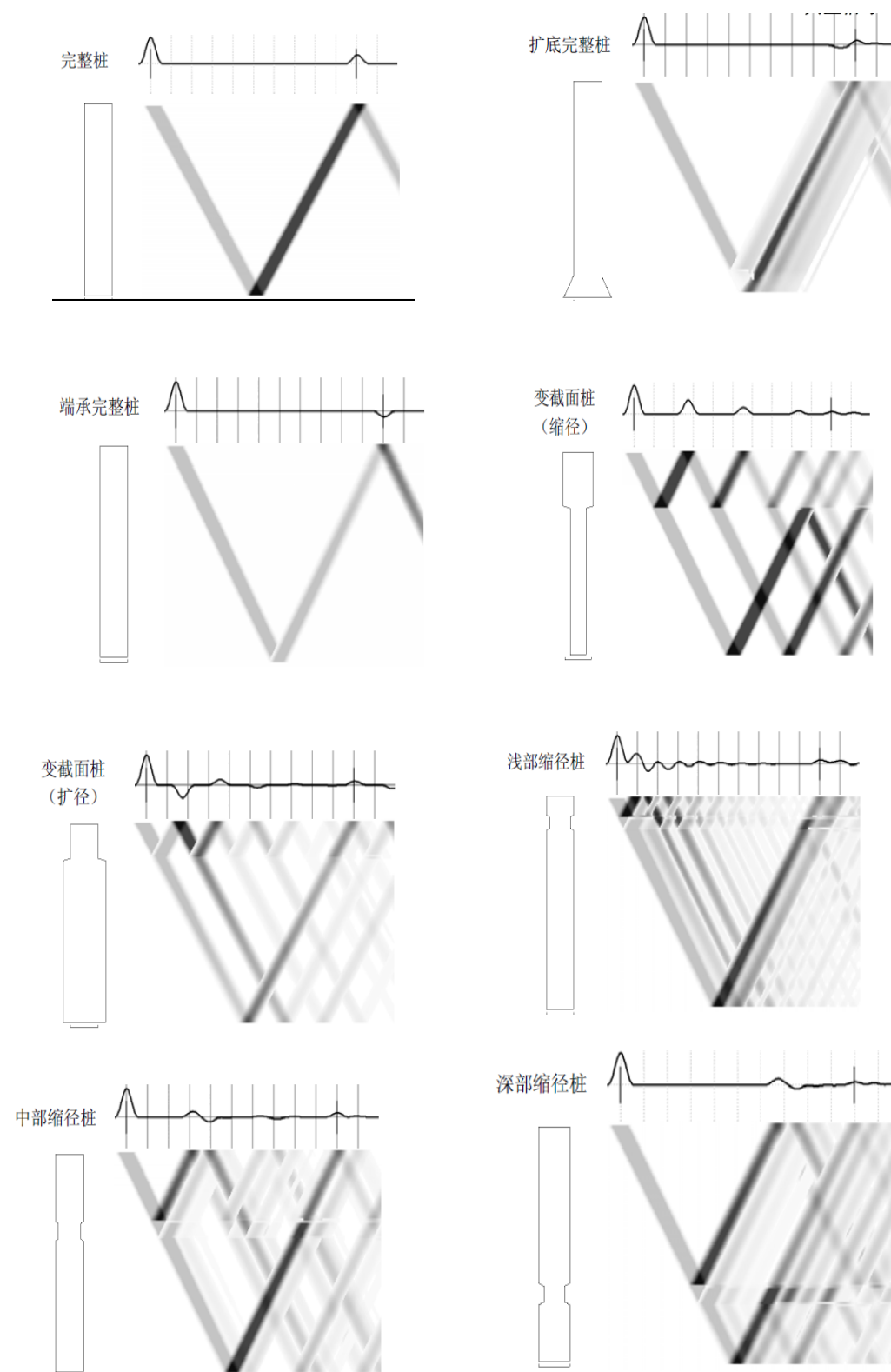


③ 当 $Z_1 < Z_2$ 时，表示在桩身相应位置存在波阻抗增大（如：扩径等），反射波速度信号与入射波速度信号相位相反。

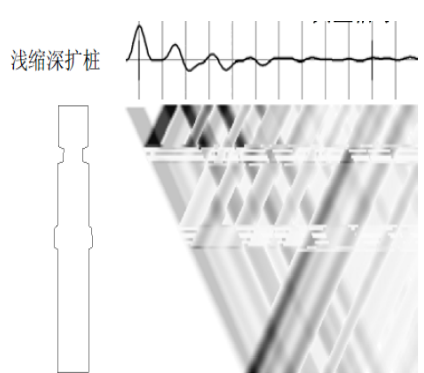
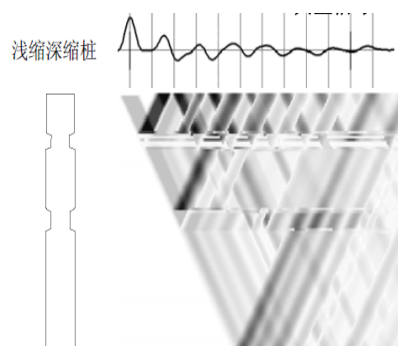
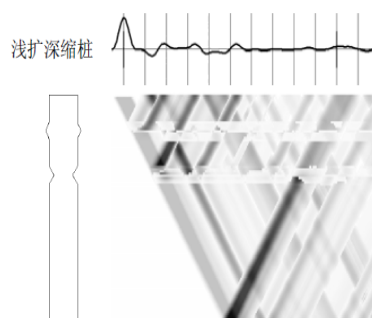
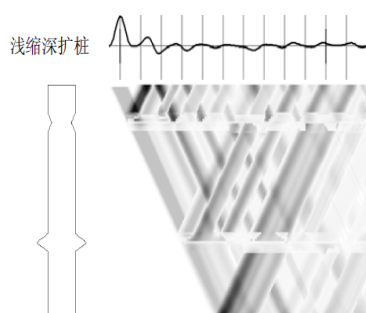
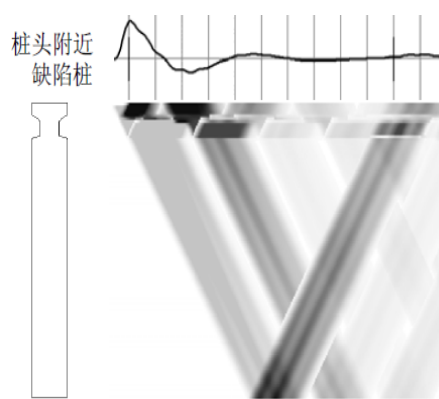
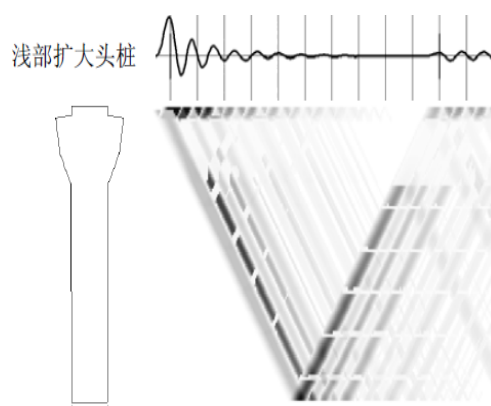
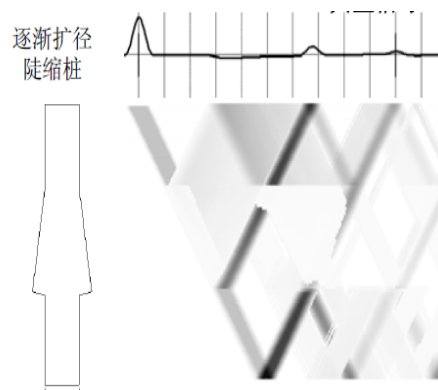
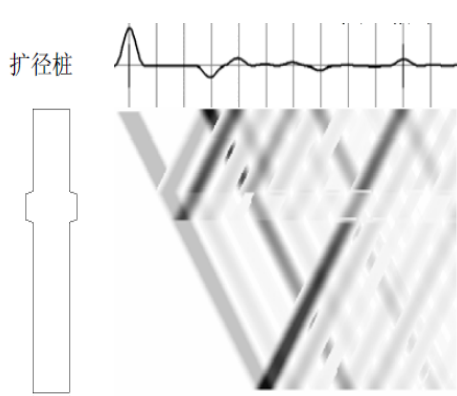
典型速度波形如下：



九、常见的几种理论波形



在实际测试中，由于桩周土的存在会使波动能量有所损耗，同样程度的缺陷，位置越深的反射波峰值看上去会越小，处于硬土中的缺陷反射，会比处于软土中的缺陷反射看上去小。因此在判定时应足够的警惕。

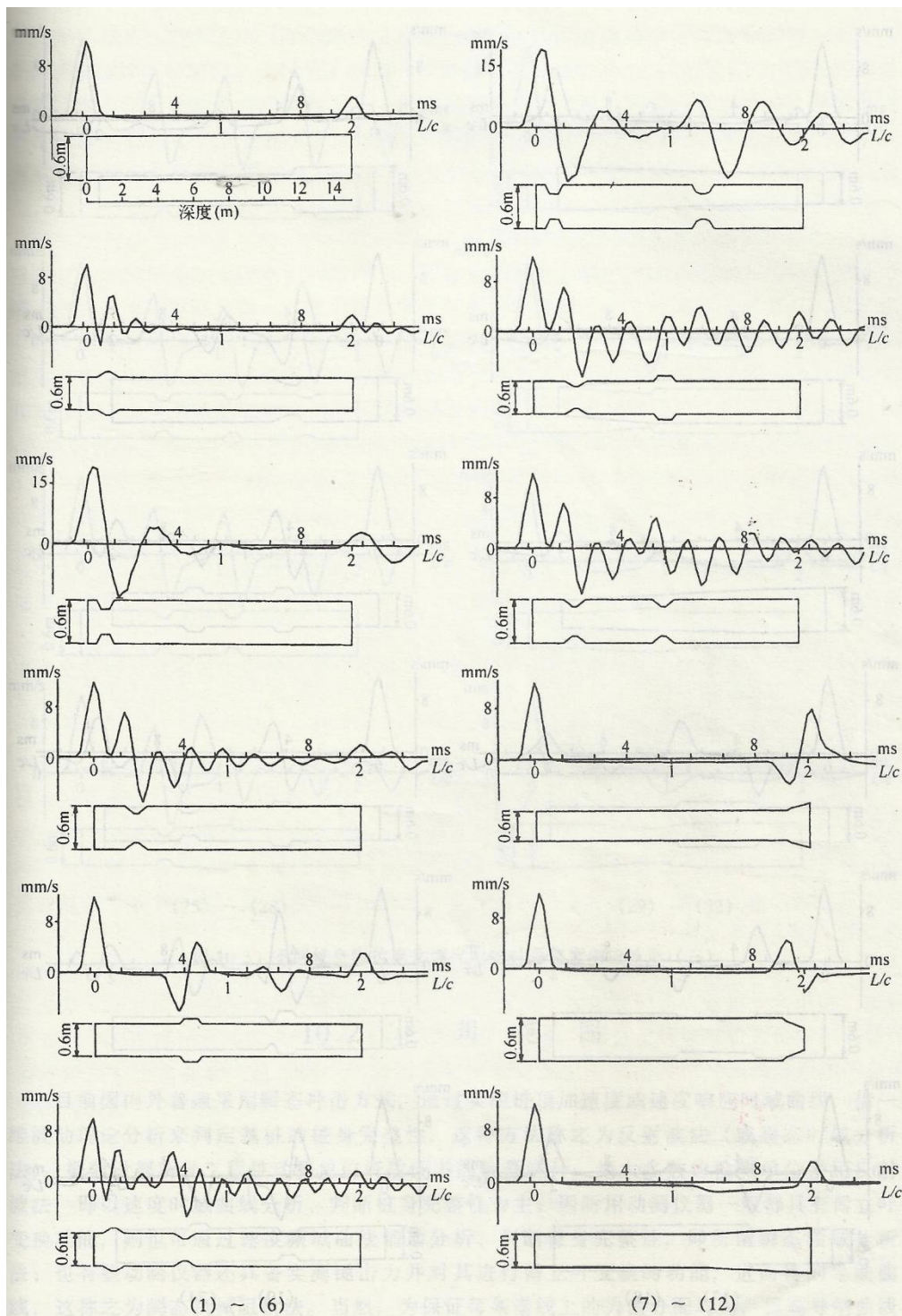


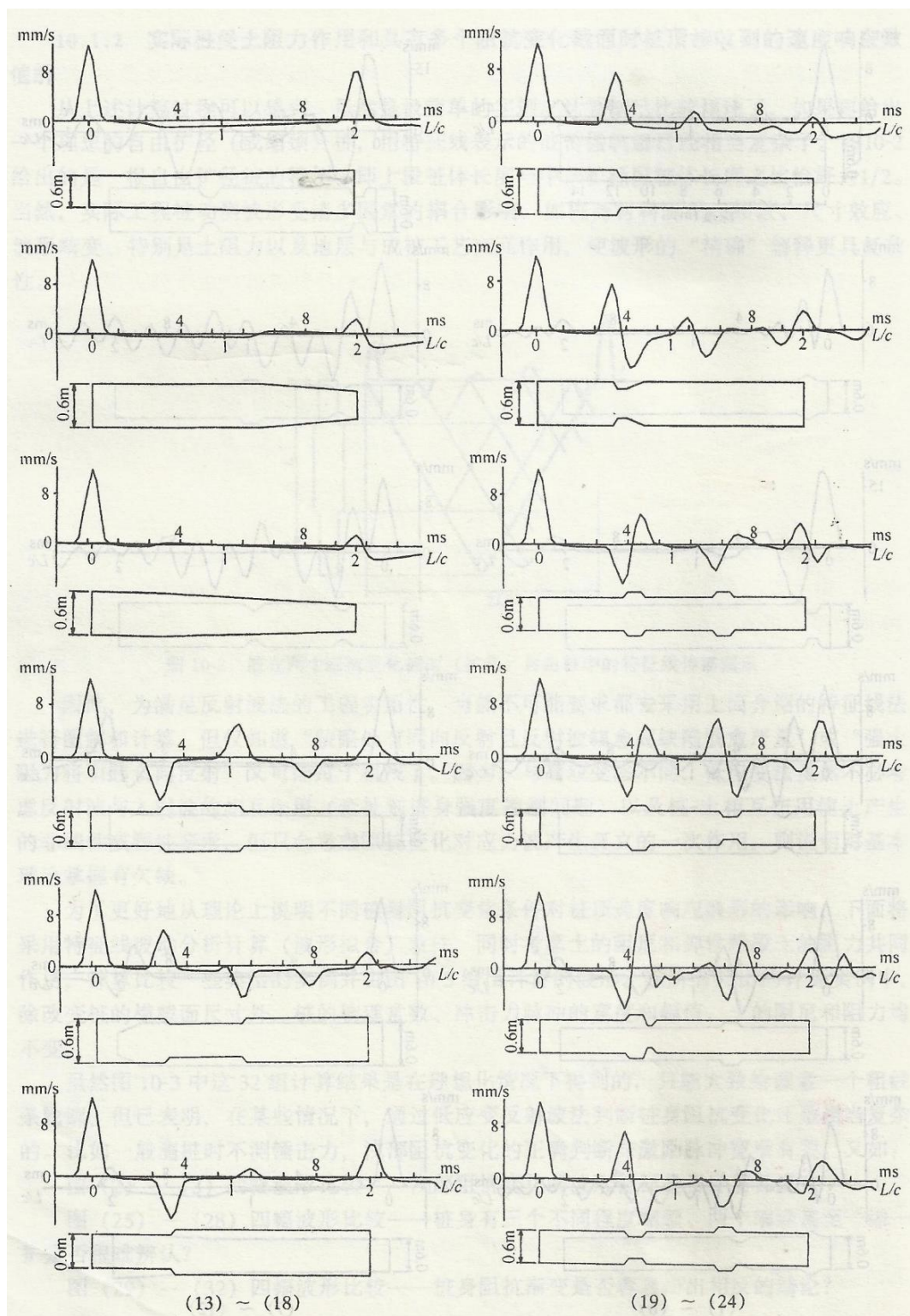
下面 32 组计算结果是在理想化情况下等到的。在某些情况下, 通过低应变反射波法判断桩身阻抗变化还是相当复杂的。

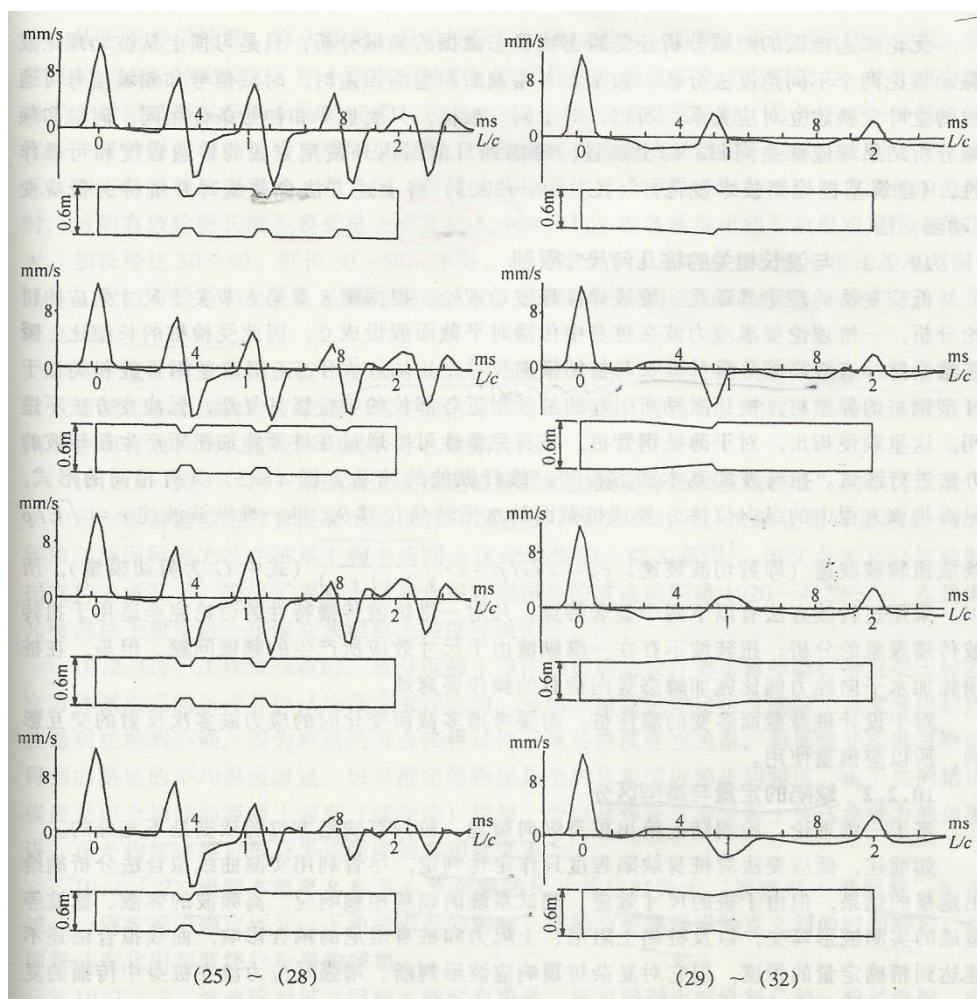
图 2-3 两幅波形比较-----浅部阻抗变化的波形特征很容易弄反。

图 25-28 四幅波形比较-----桩身有 3 个不同程度的缩颈、两个缩颈甚至一缩一扩就很难辨认。

图 29-32 四幅波形比较-----桩身阻抗渐变很容易得出相反的结论。







十、反射波阻抗类型识别的几个难点

前面已经讲过，桩身存在阻抗差异界面的情况下会发生波反射，低阻抗反射与入射波同极性，高阻抗反射与入射波极性相反。

在某些情况下，通过反射波来识别阻抗类别会遇到困难：

1、在阻抗界面较浅（小于桩长的一半）的情况下，通常在桩底之前会记录到该阻抗截面的二次反射。高阻抗（ $n < 1$ ）的二次反射表现为低阻抗反射（ $n > 1$ ），低阻抗二次反射依然表现为低阻抗反射。这种情况下，很容易将高阻抗二次反射的特征识别为缺陷，造成误判，尤其对于扩径桩，可能影响到其完整性分类。

2、浅部缺陷的多次反射容易误判为缺陷。

这种情况易出现在钻孔灌注桩中，与施工工艺有关。桩基规范（JGJ94-2008）在钻孔灌注桩施工工艺规定中（6.3.5 条）规定“泥浆护壁成孔时，宜采用孔口护筒”，“护筒内径应大于钻头直径 100mm”，护筒深度 1.0-1.5m。如果护筒部分为桩身的一部分，则自然形成低阻抗反射，且容易形成多次反射。

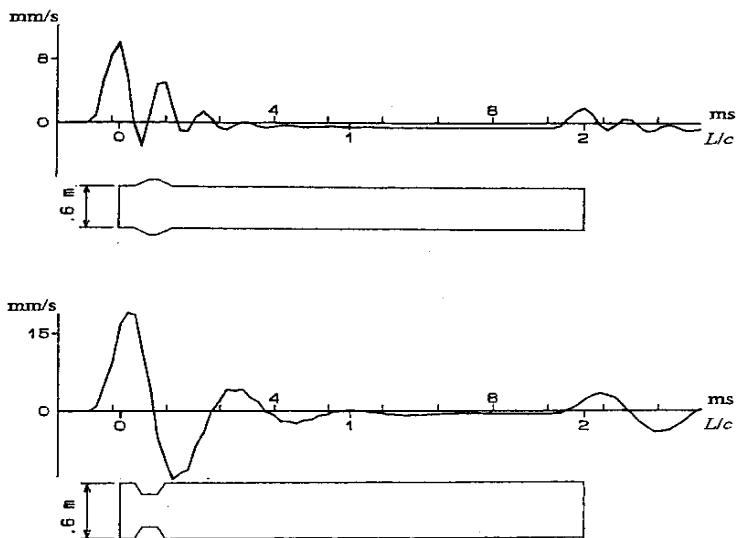
3、在浅部多阻抗界面的情况下，多次反射会发生叠加而使反射波变得复杂化，因此第一个阻抗截面的反射可以首先确认阻抗类型，其后的反射如果不能排除多次反射特征，则其阻抗类型将很难

准确确定。JGJ106 规范规定：当不能识别桩身浅部阻抗变化趋势时，应在测量桩顶速度响应的同时测量锤击力，根据实测力和速度信号起始峰的比例诧异大小判断桩身浅部阻抗变化程度。

等间隔的反射特征：浅部缺陷往往能够形成多次反射，除第 1 个反射特征能够明确阻抗类型外，其后的反射是否低阻抗反射需仔细甄别。

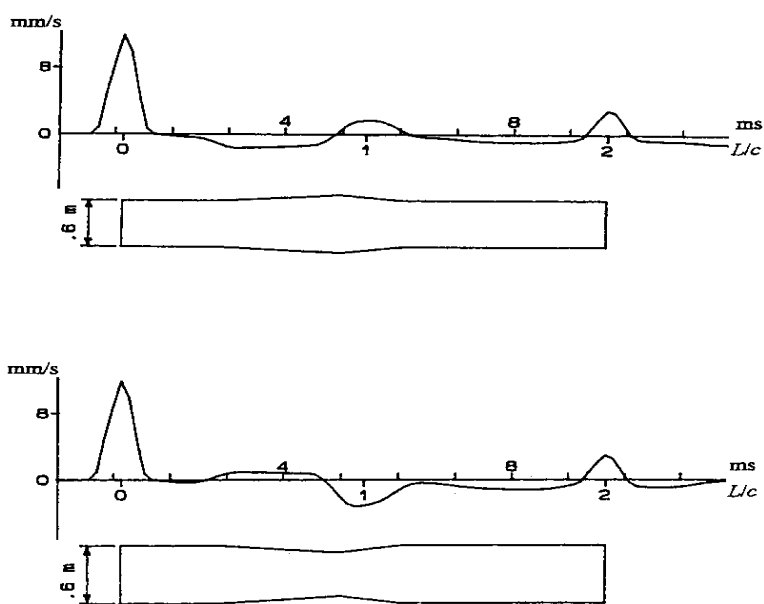
4、脉冲宽度影响浅部阻抗变化的信号特征（下面 2 个图中的缺陷不好识别，是因脉冲宽度大、测试盲区大所致），为了提高浅部缺陷的识别，应使用窄脉冲（硬质材料激振、硬质或不加锤垫）。

检测盲区：设脉冲宽度 δ ，纵波波速 V ，则反射波法测试盲区为 $\delta \times V/4$ 。



5、渐变的阻抗往往不立即产生明显的反射，容易导致对阻抗类型判断的错误，阻抗变化位置也不容易确定（下图）。

这种情况下应注意信号的不明下拉和上抬，并尽可能使激振方式垂直。渐变信号中，桩径逐渐由大变小的可能性更多些。



第三章 低应变法检测实践

第一节 仪器设备

一、检测仪器的性能指标应满足规范的要求

1、仪器的组成

信号采集仪器

检测仪器的主要技术性能指标应符合《基桩动测仪》JG/T 3055 的有关规定，应满足增益高、噪声低、频带宽的要求；并具备数据采集、储存、显示、计算和处理分析功能。

2、激振设备

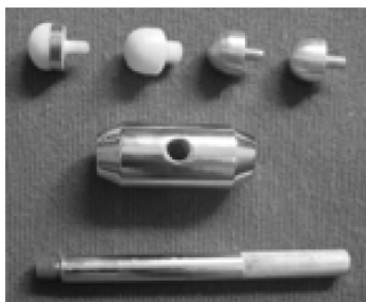
手锤和力棒，电火花震源及超磁震源（多用于声波 CT 检测桩身缺陷的空间分布）。

锤头或锤垫：材料的软硬程度影响着锤击脉冲的频谱形态和力脉冲的作用时间。硬质材料高频成分丰富、软质材料低频成分丰富。高频成分丰富利于提高信号的浅分辨率，而低频成分丰富，可提高测试深度。由硬到软：钢-铝-尼龙-硬塑料-聚四氟乙烯-硬橡胶，根据要获得的脉冲频谱成分试验选择所需要的锤头或锤垫，另应兼顾桩径的大小，以接近或满足杆件假设的理论条件。

力锤可装有力传感器；瞬态激振操作应通过现场试验选择不同材质的锤头或锤垫，以获得低频宽脉冲或高频窄脉冲。除大直径桩外，冲击脉冲中的有效高频分量可选择不超过 2000Hz，（钟形力脉冲宽度为 1ms,对应的高频截止分量约为 2000Hz）。

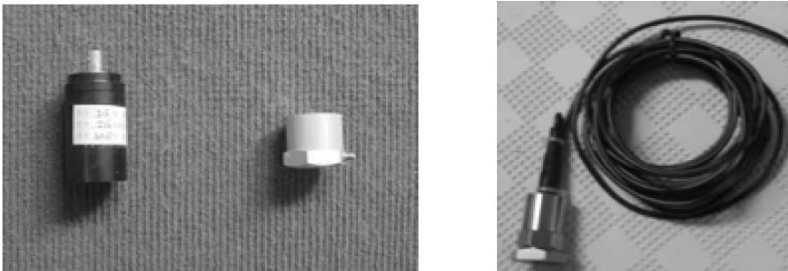
目前激振设备普遍使用的是力锤、力棒，其锤头或锤垫多选用工程塑料、高强尼龙、铝、铜、铁、橡皮垫的材料，锤的质量为几百克至几十千克不等。一般金属锤能激发窄脉冲，塑料、尼龙锤激发宽脉冲。

力锤、力棒、重锤、塑料棒等



3、传感器

1) 优先选用自振频率较高的压电式加速度传感器。



高阻尼短
共振速度
传感器

低应变电
荷型加速
度传感器

低应变压
电型加速
度传感器

(1) 速度传感器

在低频段的幅频特性和相频特性较差，在信号采集过程中，因激振激发其安装谐振频率，而产生寄生振荡，容易采集到具有振荡的波形曲线。

(2) 加速度传感器

同速度计相比，加速度传感器无论是在频响特性还是输出特性方面均具有巨大优势，并且它还具有高灵敏度的优点，因此用高灵敏度加速度计测试所采集到的波形曲线，没有振荡，缺陷反应明显。所以在对基桩进行低应变反射波法测试时选用高灵敏度加速度计检测。

2) 对传感器的要求

- (1) 传感器的设定值(如仪器需要)应按照计量检定结果设定。
- (2) 应尽量选用自振频率较高的加速度传感器，加速度计幅频线性段的高限不宜小于 5kHz 。
- (3) 高频窄脉冲冲击响应测量不宜使用速度传感器。

3) 传感器对比

	速度传感器	加速度传感器
幅频特性	差	好
相频特性	差	好
灵敏度	低	高
使用情况	容易采集到具有振荡的波形 没有振荡，缺陷反应明显曲线， 对浅层缺陷反应不是很明显	没有振荡，缺陷反应明显

传感器必需经计量部门检定合格，并在仪器里输入正确的灵敏度系数，方可使用。更换传感器时不应忘记修改灵敏度系数。检定证书应认真阅读。

4、耦合剂

应有利于波的传递，可用工业黄油、较柔软的橡皮泥等。（有类似滤波的作用）

二、目前国内使用的主要仪器设备（举例）



1、美国生产的桩基完整性测试仪 PIT-V PIT-VV PIT-FV

【产品性能】型号： PIT-V 型

产地： 美国

用途： 检测各种灌注桩和打入桩的桩身完整性，判定桩身缺陷的程度及位置。 PIT-W 只测速度。 PIT-FV 可测力和速度，也可测两个加速度。

概述：

桩身完整性检测仪 PIT 采用了低应变法（也称反射波法、脉冲回波法或瞬态响应法）来检测桩身的完整性。PIT 适用于各种灌注桩及预制桩等。它可以检测桩身中存在潜在危险的缺陷（如裂缝、缩径、夹泥、空洞等），并且在一定条件下可以测定基桩的桩长，还可以采用双速度测试法对既有基础下的基桩（如支撑桥梁或高楼）进行检测。用 PIT 检测时不需要预先计划和埋管，而且现场检测速度快、使用简单，一个人就能操作。由于这些优点，使得对现场全部基桩的完整性进行检测变得既经济又可行。实际中将一个加速度传感器安装在桩顶平面或桩身侧面，负责接收手锤敲击产生的应力波信号。当桩身阻抗变化时，就会产生的早反射波（ $2L/C$ 之前）信号（或桩底反射波信号）。根据早反射波的相位、到达时间和幅值判定缺陷的性质、位置及程度。实测信号在现场利用 PIT 就可以进行处理计算，或者传输到计算机用 PIT-W 软件做进一步分析。PIT 采用易于操作的触摸屏幕。内置充电电池可以工作一整天。

技术参数：

PIT 主机技术指标

物理参数尺寸：75×175×235 (mm)

重量：2.2 kg

背光，半反射式 VGA 显示屏，适合在各种光照条件下使用

工作温度范围：0~40℃， - 存储温度范围：-20~65℃

便携式仪器手提箱内置电池（可连续使用 8 个小时）

PIT 锤技术指标 -

锤头直径 手锤 力锤 38.1mm 0.5kg 0.5kg 50.8mm 1.4kg 1.4kg 76.2mm 3.6kg 4.1kg - 力锤装有一个 5mV/g 的加速度传感器

PIT 加速度传感器技术指标

- 大小：20×20×60 (mm)
- 工作温度范围：-50~120℃
- 电路：集成阻抗转换电子装置标称
- 灵敏度：50mV/g
- 加速度范围：±100g
- 冲击极限：30,000 g
- 频率范围：0.7~9000 Hz
- 幅值线性：<±1%
- 共振频率：>40 kHz
- 标称时间常数：>0.5 秒。

2、荷兰生产的 IT 桩基完整性测试仪



设备型号：TNO SIT-A

设备名称：桩基完整性测试仪

生产厂商：荷兰

用途：

桩基完整性测试（SIT）是一种快速、经济的检测已施工基础桩的方法。SIT 一般用来确定桩底，但也可以测试桩的缺陷，例如：裂缝、夹土以及预制桩、灌注桩的直径改变。这种方法也被称为低应力测试法。

特点：

SIT 操作过程

在开始 SIT 测试之前，确保桩头干净，易接触，无破损，无残滞水。并不需要光滑的表面。最好在试验前，混凝土有一周以上的龄期。

在测试过程中，用一个特制手锤敲击桩头，这将产生一个压力波发送到桩身。桩的中断处和桩底将向上反射应力波。由于锤的冲击应力波及其反射造成的桩头位移，将由安装在桩头的高灵敏度加速度计测得。加速信号被转换为速度，以时间的函数呈现在屏幕上。

对每根桩，FPDS 系统需要进行三个连续的整体性测试。三个接近相同的测量结构呈现在屏幕上，以保证结果准确。所有结果都被自动存储，用来作测试报表。

声波反射法测试的局限性

--桩底的反射并不是经常能够得到。桩身的摩擦减少了应力波的能量。在非常硬的粘土中，穿透长度交被限制在 7 米。在非常软的土中，80 米的桩长都可以被检测。

--检测段与段之间连接不牢的分段桩，测试结果将不会很可靠。带有桩帽的桩及其他不连续的桩。一般不适合作这种测试。

--声波法测试交不会给出任何承载能力的结果。为获得承载能力，用动力荷载测技术指标：

早期就可以发现缺陷

能够测大概的桩长

个人就可以测试任何连续的桩

快速、经济，每天可测 100~300 根桩

将对现场的施工造成最小影响。

3、武汉岩海公司生产的 RS-1616K 桩基动测仪



设备型号: RS-1616K(PLUS)

设备名称: 桩基动测仪

生产厂商: 武汉 岩海公司

高应变、低应变(瞬态)测桩

特点:

- 携带方便, 实现场地内漫游
- 电性能指标高, 机械故障率低
- 即现速度、力曲线和承载力与打击力
- 即现缺陷位置, 完整性判断一目了然
- 操作简单合理, 10-20 分钟保证学会
- 高应变实时监控大于 130 锤/分钟存取信号
- 任选 RS 模式和 PDA 模式从事高应变检测
- 自动实现连续采集、叠加、平衡调节功能
- 兼容速度计和国产或进口内装式加速度计
- 内置镍氢高能充电电池, 连续作业 > 6 小时
- 采用最新光电耦合旋钮控制, 全汉化菜单操作

技术指标:

- 采样间隔 10~65535 μ s 连续可调
- 16 位 A/D、1~100 倍浮点、一级定点放大
- 内置 486 工控机、16M 固态电子盘
- 彩色 640 $\times$ 200 液晶屏、采用光电耦合旋钮和四个热键共同控制

体积: 270 $\times$ 255 $\times$ 115mm 重量: 4kg

4、深圳市深博瑞仪器仪表有限公司反射波法桩基完整性检测分析仪



KON-PIT(N)反射波法桩基完整性检测分析仪

型号：KON—PIT（N） 产品用途： 该产品利用反射波（低应变）法检测混凝土基桩的桩身完整性，推定桩身缺陷的程度及

其在桩身中的位置，也可对基桩的有效桩长进行校核。主机屏幕 彩色液晶

系统噪声电压（mV） ≤ 2

浮点放大倍数 100

采样时间间隔（ μs ） 从 2.0 至 512.0

放大器（浮点）增益（dB） ≤ 64

A/D 分辨率（bit） 16

频率响应

（幅频误差 $\leq 10\%$ ） 加速度测量频率范围 Hz 2~8000

速度测量频率范围 Hz 10~1000

幅值非线性度 $\leq 10\%$

时间示值误差 $\leq 1\%$

增益误差 $\leq 1\text{ dB}$

采样长度 4k 采样点

系统动态范围 dB ≥ 66

系统参考灵敏度 加速度传感器： 其不确定度（ $k=3$ ）为 3%

速度传感器： 其不确定度（ $k=3$ ）为 5%

通讯 并口及 USB 口

供电方式 外部：AC220V,DC12V

内部：12V 可充电锂离子电池，连续工作 5 小时以上

温度适应性 $-10\sim+40^{\circ}\text{C}$

体积：mm $\times$ mm $\times$ mm 250 $\times$ 200 $\times$ 100

重量：kg 1.8

5、中科院武汉岩土力学所的 RSM-24FD 基桩低应变检测仪



- 1. 仪器做工精细、采用专业机箱
 - 2. 操作系统采用 WINDOWS，界面直观、操作方便
 - 3. 应变电路采用自动调平衡功能，数据采集方便准确
 - 4. 适用于多种类型传感器，功能可扩展
 - 5. 具备浮点放大功能，信噪比强、波形不失真
 - 6. 数据实现 USB 口传输、U 盘储存卡都适用
 - 7. 现场同时可分析时域、频域信号分析结果一目了然
 - 8. 现场可接打印机，结果当场可以输出
- 标准配置：**

序号	名 称	规格	数量
1	RSM-24FD/24FD(N)采集仪		1 台
2	电源适配器		1 个
3	高、低应变测试采集及分析处理软件		1 套

性能指标：

型号	RSM-24FD
主控形式	分体机（现场须配笔记本电脑）
主控系统	笔记本电脑
显示方式	笔记本电脑显示屏
操作方式	笔记本电脑鼠标键盘
存储模式	笔记本电脑硬盘
操作系统	Windows
采样间隔	10μs～65536μs 连续可调
记录长度	0.5k、1k、2k、4k、8k 五档可调
放大倍数	1～256 倍
A/D 转换精度	16 位
浮点放大倍数	8 倍
通道数	独立 4 道
带宽	10Hz～12000Hz
触发方式	通道、外、内触发等九种模式可选
供电模式	交流电：外置镍氢电池≥12 小时
工作温度	-5℃～+40℃
体积	28×25×8cm ³
重量	2.2kg

6、北京智博联的 ZBL-P810 桩基动测仪



ZBL-P8100 桩基动测仪真 24 位 A/D 数据采集

应用领域：利用反射波法检测桩基完整性，判定桩身缺陷的程度及位置。可用于测试灌注桩和打入桩，也可以用于顶面暴露的结构体（如桥墩等）的测试。

防水仪器箱、系统高保真设计，确保原始采集波形不失真； 2、真 24 位 A/D 数据采集，测试波形更真实，避免了浮点放大导致的噪音偏大和信号失真。

7、南京同科的 TK-PDS 桩基动态分析系统



A、系统的性能：

模拟通道：2 路输入（低应变 1-2 个 ICP 接口）；

动态范围：16 位 A/D；

信 噪 比：>80dB；

采样频率：可调，单道最大 100KHz；

信号调理：ICP 调理；

安装接口：通过标准 USB 口与 PC 相连，无须另加电源；

运行系统：中英文 Windows98/NT/ME；

功 耗：低应变系统<2W。

B、系统的配套：

TK—PDS 选配的传感器与美国 PDI 公司生产的 P.I.T 桩基检测仪、徐州建科技术有限公司研制的 PDS 桩基检测仪等系统兼容，确保采集信号的真实。

C、系统的计量检定：

TK-PDS 作为整套系统（含放大器，传感器）由江苏省技术监督桩基动态测量仪器计量站根据中华人民共和国建设部《桩基动态检测仪器计量检定规程》JJG（建设）0003—1996 规定，进行系统计量检定。

(二)、软件的主界面

(三)、系统的安装和启动：

A. 检测采集器：

如果启动程序时，已通过 USB 口接入采集器，程序自动检测采集器的状态后自动进入工作状态；

如果启动程序时未接入采集器，程序中自动弹出“采样设备”菜单项，提醒您接入采集器，而否通过“采样设备”菜单项下的“检测 AD 卡”项目重新检测采集器；当“采样设备”菜单项消失后，程序自动进入工作状态；

如果不接入采集器，程序自动进入演示状态。

B. 进入系统设置：

通常时，您不必进行系统设置。因为程序按照较佳匹配已进行了设置，并且默认。如果有特殊情况时，您可以人工设置，但一定要确保您的 TK—PDS 始终处于最佳状态。

(四)、采集波形：

一般，采集波形前都要打开“新建工程”菜单。首先提示你输入工程名称（可用中文），再输入被测试桩的预估波速和预估桩长，它可以是设计桩长（施工桩长）和经验波速（上限：6000m/s,下限

700m/s),该两项参数输入的正确,工作区会有一个较合适的视窗长度,十分利于你的分析和判断;如果不清楚,可输入-1,表示默认桩长 30m 和波速 3500m/s(以后拖动视窗滑块再调整)。

提示:若预估波速为 3500m/s,预估桩长分为两类时,系统自动默认有关参数如下:

预估桩长 采样频率 采样长度 预采点数

小于或等于 30 m 50KHz 1024 点 64 点

大于 30m 小于或等于 60m 25KHz 1024 点 64 点

A. 进入采样:

将配套传感器通过 30 米电缆线接入采集器 A1 端口。单击按钮、或用鼠标左键双击工作区或用快捷键 F4 激活采样功能,用鼠标右键向下切换当前道或用 $\wedge$ / $\vee$ 光标键来向上\下切换当前道。

B. 存盘:

单击按钮、或用快捷键 CTRL+S 激活存盘功能,存盘分为采样存盘和打印存盘。程序会根据数据类型,自动调用相应的存盘方式。采样存盘,在新建的工程目录中,该功能可自动按数字序列排序存入波形,也可以人工输入记录号后存入波形。

8、北京建研院 FEI-C5、BETC 系列桩基动测仪



BETC-C6A 桩基动测分析系统集成高、低应变动测于一体,用于检测判定基桩的轴向抗压承载力和桩身结构完整性,监测打桩拉压应力及工艺参数。

系统功能和硬件指标符合行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ106-2003 和建筑工业产品标准《基桩动测仪》JGJ/T3055-1999。

多年来, BETC(原 FEI)系列仪器历经多次改型,这次升级为 BETC-C6A 实现了以下重大改进:

完善了高应变自由落锤安装加速度计的测力方式(已获得国家发明专利,专利号: 200710122947X),强化了后处理软件的功能, 16 位 A/D 采样频率提高到 200kHz,数据传输使用 USB 接口,使用外置高能锂电池,现场更换电池更为方便。

9、主要仪器的操作（举例）

1)、型号：IT RS-232

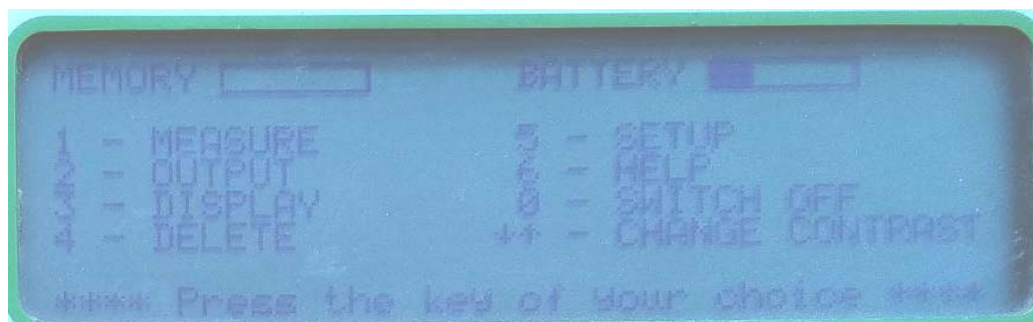
生产厂家：荷兰 IFCO

仪器图片：

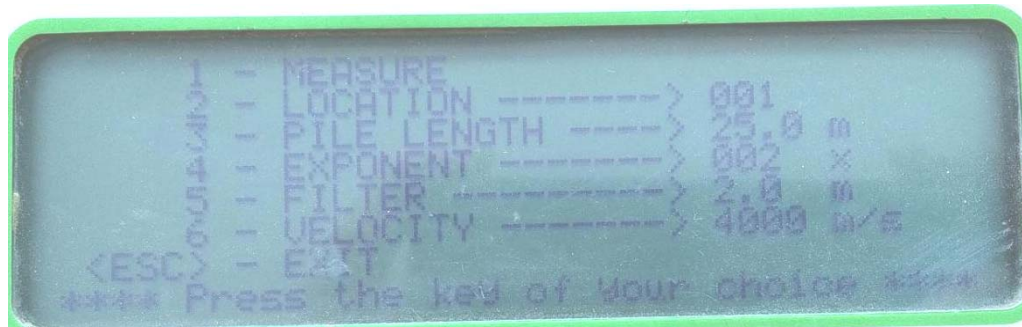


该仪器的使用：

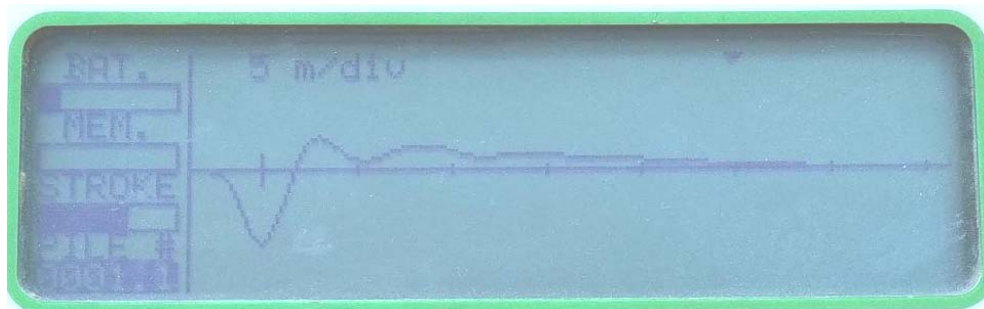
(1)、按键 ON/CLR 开机，进入主界面：



(2)、选择 1 进行工程位置（相当于工程名称，该仪器仅支持数字）、桩长、波速等参数设置：



(3)、选择 1 进行信号采集，对采集到的信号满意，则输入桩号，按 Enter 键保存信号，保存后仪器保持在待采样界面，直接进行下一根桩的采样即可。



(4)、所有信号采集完毕后，按 Esc 退回到主界面，按 0 关机。回到单位，连接好数据线，在主界面选择 2 – OUTPUT 可将信号导入电脑进行分析。

2)、型号：PIT-X

生产厂家：美国 PDI

仪器图片：



该仪器的使用：

(1)、双击桌面 PIT 图标进入主界面。



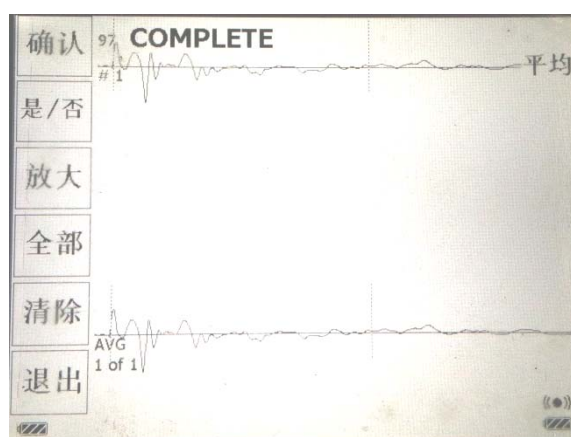
(2)、点击工程名称设置工程名，点击力锤图框，进行参数设置：

WS [m/s] 3600	LE [m] 29.00	AR [cm²] 1600.0
	AC [g/V] 18.2	AG 8 X
#BL 1	ESC	OK

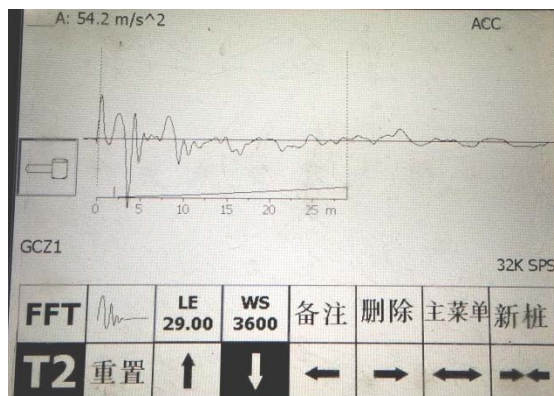
(3)、参数设置完毕点击 OK，进行信息确认，其中采样频率值得注意，128k 的频率仅能采集到 11.16m 桩长的信号，应合理选择采样频率。

桩号	GCZ1	-	+
备注			
北 西 中 东 南			
工程名称	GSGYYQ		
采样频率	128K->max LE 11.16 m		
桩长	29.00 m	主菜单	退出 确认

(4)、点击确认即可进行信号采集。



(5)、如对采集的信号不满意，则点击清除重新采集，对采集到的信号满意后，点击确认，可以进行简单分析，点击新桩进行下一根桩的检测。

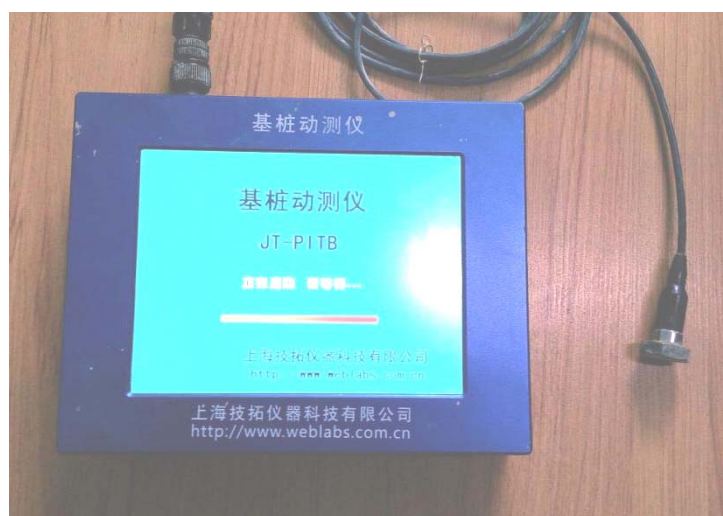


(6)、在主界面点击文档图框，可浏览历史信号，可将数据导出到 U 盘而后在电脑上进一步分析。

3)、型号：JT-PITB

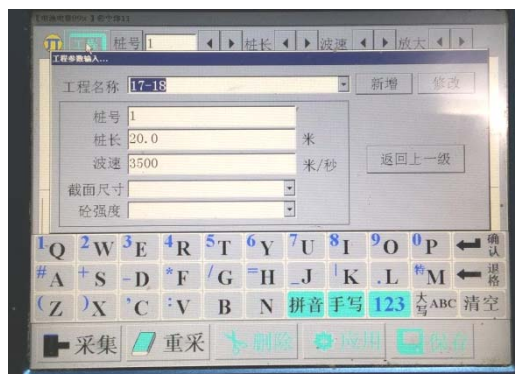
生产厂家：上海技拓仪器科技有限公司

仪器图片：

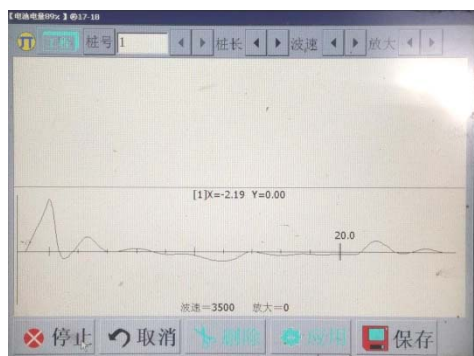


该仪器的使用：

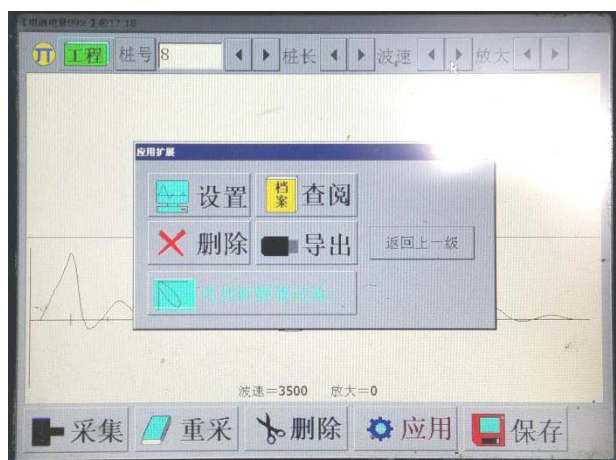
(1)、点击左上角的【工程】图标进行工程参数输入，输入工程名称、桩长、波速，桩号可以后输。



(2)、点击左下角的【采集】图标进行信号采集，该仪器信号采集规则为不限次数，当采集到满意信号后点击【停止】，然后点击【保存】。若对采集的信号不满意，则点击【取消】重新采集。



(3)、将 U 盘插在 USB 接口，点击右下角【应用】图标，点击【导出】即可将采集到的信号导出到电脑进行分析。



第二节 低应变法检测的基本规定

一、低应变检测数量应符合国家相关行业技术规范或江苏省的《建筑地基基础检测规程》（DGJ32/TJ142-2012）。

二、试样必须源自受检的地基基础工程，并采用见证的形式确定试样。试样应符合相关检测方法的技术要求。建设部 141 号文中明确，委托检测的单位和个人应当对试样的真实性负责。由于地基基础工程的特殊性，地基基础的工程质量除和试样的个体的质量有关外，还与工程地质条件，承载性状、类型、基础，上部结构的形式等参数，以及施工工艺、施工过程的质量控制、施工质量的均质性、施工方法的可靠性等因素密切相关。所以有必要明确建设（监理）、施工等各方在试样的选取、确认等过程中的责任。试样的施工桩长、桩顶高程及桩顶混凝土质量、截面尺寸等参数应与工程设计相同。

三、对地基基础的验收检测，试样数量应按下列原则确定：

1、按单位工程计算，为设计提供依据的试样数量不计入验收检测的抽检总数。

2、单位工程相同条件的地基基础作为一个抽检批次。相同条件是指相近的地质条件，相同的地基类型、规格、设计要求、施工工艺等。

3、具体的抽检数量遵循各种检测方法的规定。

四、验收检测的试样位置应在施工完成后随机确定，并应均匀分布。验收是还应考虑下列因素：

- 1 施工质量有疑问的桩；
- 2 局部地基条件出现异常的桩；
- 3 承载力验收检测时部分选择完整性检测中判定的Ⅲ类桩；
- 4 设计方认为重要的桩；
- 5 施工工艺不同的桩；

主要考虑桩位的代表性，要能反映工程施工的质量。当采用两种或两种以上检测方法时，也可根据前一种的检测方法的检测结果来确定后一种检测方法的检测位置。桩位要考虑试验的可操作性，也要考虑试样的龄期、强度、环境、检测设备安装条件等。

五、地基检测使用的计量器具均应在检定（校准、验证）的有效期内，且设备完好、性能符合相应检测方法的技术要求，所用的检测仪器设备进行唯一性编号，并在设备上标识。（张贴绿色标签）。地基基础现场检测是流动性的，应加强对流动性检测设备的管理，出入库的管理。地基基础检测的设备应唯一，在档案管理、计量检定（校准、验证）证书、仪器设备的使用（维护、保养、停用）、原始记录、检测报告等各个环节中反映一致。大型设备表面有检测机构的标志。

六、检测机构应充分估计自然环境、外界干扰等因素对现场连续检测的影响，采取有效应对措施，确保仪器设备和现场检测正常。

七、静载荷试验桩在静载荷试验前、后均应进行低应变桩身质量检测。

八、基桩、复合地基增强体低应变检测

1、低应变检测从成桩到开始的间隙时间，受检桩桩身混凝土强度不得低于设计强度等级的 70%，或预留立方体试块强度不得小于 15MPa。间隙时间应从成桩结束后，基桩真正处于静止状态，桩周土不受外界振动或挤土效应影响时起算。近年来，预制桩（含钢桩、载体桩等）大量使用。其在施工成桩后的检测时间，应考虑挤土效应、土层重新固结、多层土的共同影响，间隙时间应取相应土层的有效时间。

2、江苏省的《建筑地基基础检测规程》（DGJ32/TJ142-2012）要求低应变检测评价混凝土灌注桩桩身完整性时应符合下列规定：

（1）、采用低应变法，抽检数量不应少于同条件下总桩数的 50%，（JGJ106-2003 规定是 30%）且不得少于 20 根，（JGJ106-2003 规定是 10 根）每个承台抽检数不得少于 1 根。对柱下四桩或四桩以上承台的工程，抽检数量还不应少于相应桩数的 50%。对地基基础设计等级为甲级和地质条件较为复杂的乙级桩基工程，应适当增加抽检比例。（有的地区是 100%检测）。

（2）、对于直径不小于 800mm 的混凝土灌注桩，应增加钻芯法或声波透射法，抽检数量不应少于总桩数的 10%，且不得少于 10 根。

3、江苏省的《建筑地基基础检测规程》（DGJ32/TJ142-2012）要求低应变检测评价预制桩桩身完整性时应符合下列规定：

抽检数量不应少于同条件下总桩数的 30%，且不得少于 20 根，每个承台抽检数不得少于 1 根。对柱下四桩或四桩以上承台的工程，抽检数量还不应少于相应桩数的 30%。对于多节预制桩，采用高应变法的抽检数量不应少于总桩数的 10%，且不得少于 10 根。对多节预制桩，接头质量缺陷是较常见的问题。在无可靠验证对比资料和经验时，低应变法对不同形式的接头质量判定尺度较难掌握。所以，当对预制桩的接头质量有怀疑时，宜采用低应变法与高应变法或孔内摄像相结合的方式检测。

4、JGJ106-2014 对基桩完整性检测数量的规定如下：

桩身完整性检测方法的选择应符合规范 3.1.1 条的规定，当一种方法不能全面评判基桩完整性时，应采用两种或多种检测方法，检测数量应符合下列规定：

1 每个承台检测桩数不得少于 1 根。

2 设计等级为甲级，或地质条件复杂、成桩质量可靠性较低的灌注桩，检测数量不应少于总桩数的 30%，且不得少于 20 根；其他桩基工程，检测数量不应少于总桩数的 20%，且不得少于 10 根。每个柱下承台检测桩数不应少于 1 根。

3 大直径嵌岩灌注桩或设计等级为甲级的大直径灌注桩，应在上述两款规定的检测桩数范围内，采用声波透射法或钻芯法进行检测，检测数量不少于总桩数的 10%。

4 当符合第 3.2.6 条第 1~4 款规定的桩数较多，或为了全面了解整个工程基桩的桩身完整性情况时，应适当增加检测数量。

关于扩大检测与验证检测的规定：

1、当发现有 III、IV 类桩存在，且检测数量覆盖的范围不能为补强或设计变更方案提供可靠依据时，宜采用原检测方法，在未测桩中继续扩大检测。

2、当采用的检测方法不能满足工程需要或对检测结果有怀疑时，应进行验证检测：

采用静载荷、高应变、钻芯法、开挖、孔内摄像等方法验证低应变法的检测结果；

5、桩身完整性的检测结果应给出每根桩的桩身完整性类别。桩身完整性分类应符合表 3-1 的规定：

桩身完整性分类表

表3-1

桩身完整性类别	分类原则
I 类桩	桩身完整
II 类桩	桩身有轻微缺陷，不会影响桩身结构承载力的正常发挥
III类桩	桩身有明显缺陷，对桩身结构承载力有影响
IV类桩	桩身存在严重缺陷

对于桩身的完整性，其 I、II、III、IV 类桩一般理解如下：

- 1)、I、II 类桩满足或基本满足设计要求。
 - 2)、对 III 类桩，应采取其他方法进一步确定桩身缺陷对桩身结构承载性能的影响程度，根据验证结果进行工程处理。
 - 3)、IV 类桩不满足设计要求，应进行工程处理。“工程处理”包括以下内容：补强、补桩、设计变更或由原设计单位复核是否可满足结构安全和使用功能要求。
 - 4)、检测时实测桩长小于施工记录桩长，有两种情况：一种是桩端未进入设计要求的持力层或进入持力层的深度不满足设计要求，直接影响桩的承载力；另一种情况是桩端按设计要求进入了持力层，基本不影响桩的承载力。不论哪种情况，按桩身完整性定义中连续性的涵义，显然均应判为 IV 类桩。
 - 5)、仅依据信号特征判定桩身完整性时不够的，需要检测分析人员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、施工情况等综合分析判定。
 - 6)、低应变测不到桩底反射信号的情形受多种因素的影响：软土地区的超长桩、桩周土约束很大，应力波衰减很快、桩身阻抗与持力层阻抗匹配良好、桩身截面阻抗显著突变或沿桩长渐变、预制桩接头缝隙影响。桩的有效检测长度主要受桩土刚度比大小的制约。低应变方法只可用于查明有效检测长度范围内是否存在缺陷。
 - 7)、对于实测信号复杂、无规律，无法对其进行准确评价，桩身截面渐变或多变，且变化幅度较大的混凝土灌注桩允许使用无法判定的结果，建议使用其他可靠的方法进行检测的结论。
- 5、复合地基中的竖向增强体的施工质量检测，采用钻芯法、标准灌入试验、圆锥动力触探试验等方法，采用如水泥粉煤灰碎石桩等有高粘结强度增强体时，还应进行桩身完整性检测，抽检数量不应少于总桩数的 5%，且不得少于 10 根。

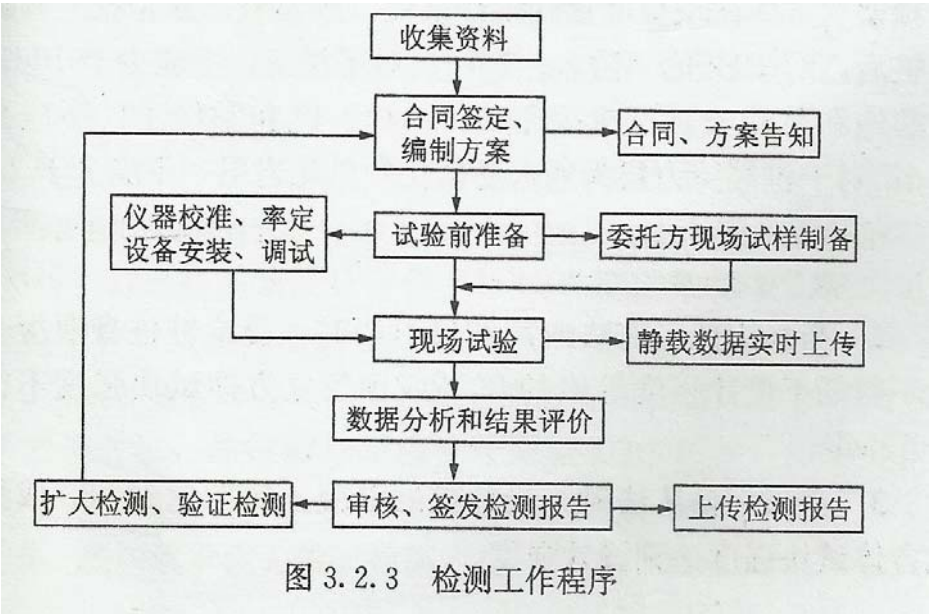
十、检测记录与报告

- 1、地基基础检测原始记录应能再现检测过程，并有试验、复核人员及时签字确认。
- 2、检测原始记录不得随意修改。检测中发现检测数据异常时，现场检测人员应查明原因。
- 3、检测报告应根据原始记录出具，结论准确，用词。检测报告的信息不得超过原始记录的信息范围。
- 4、检测报告除应符合《建设工程质量检测规程》（DGJ32/J21）的规定外，还应包含下列内容：
 - 1)、委托方名称，工程名称、工程地点，建设、勘察、设计、监理和施工单位，基础类型，设计要求，检测目的，检测依据，检测数量，检测日期等。
 - 2)、主要岩土工程勘察资料。
 - 3)、检测点或受检桩的编号、位置和相关施工记录。
 - 4)、主要检测仪器设备。
 - 5)、检测方法。
 - 6)、实测与计算分析曲线、表格和检测数据汇总结果。
 - 7)、桩身波速取值。
 - 8)、桩身完整性描述、缺陷位置及桩身完整性类别。
 - 9)、信号时段所对应的桩身长度标尺、指数或线性放大的范围及倍数。
 - 10)、检测过程中的异常情况描述。
 - 11)、检测结论。
 - 12)、必要的说明和建议。
- 5、地基基础检测报告应当按年度统一编号，编号应连续，符合《建设工程质量检测规程》（DGJ32/J21）的相关规定。

第三节 现场检测

一、检测流程

- 1、检测机构在检测前应进行资料收集和分析
- 至少包括以下内容：
- 1)、岩土工程地质勘察资料（地质柱状图）、地基基础设计图纸、施工记录；了解施工工艺及施工过程中出现的异常情况。
- 2)、确认委托方的具体要求和检测目的。
- 3)、分析拟采用检测方法的可行性。
- 2、检测单位在检测前应将检测方案（包含检测方法、检测数量、检测日期、工期和拟检测的桩号位置）和检测合同通过监管系统告知工程所在地监管部门。
- 检测方案应包含工程概况、检测方法、设计参数、依据的规范标准、抽检方案（数量）、时间进度、设备和人工配制等内容。同时还应明确需要委托方配合的现场试样的制备（含桩头的开挖、加固、处理等）。检测机构作为技术服务方，应该编制检测方案。在实际检测过程中，由于不可预知的原因，如委托要求的变化、事前调查情况与实际不符，或在现场检测尚未完毕就已发现质量问题而需要进一步排查等，都可能使原检测方案中的抽检数量、受检桩桩位、检测方法等发生变化。检测方案允许根据实际情况动态调整。
- 3、检测工作的程序应按下图进行。



- 4、地基基础工程检测合同、检测方案、检测报告、原始记录等应建档保管。
- 一般按项目归档，内容有：目录、检测合同、任务单、检测方案、选桩表、现场原始记录、现场联系单、过程控制记录、检测报告的送审稿、校对审核记录、留存报告、产品交付单、电子档记录（光盘）桩位图、地质资料、施工记录，建设方合同外的要求（如要提前检测的要求、增加检测数量的要求等）

二、现场检测的基本要求

1、受检桩应符合下列规定：

- (1) 当采用低应变法检测时，受检桩混凝土强度至少达到设计强度的 70%，且不应低于 15MPa。
- (2) 桩头的材质、强度应与桩身等同、桩头截面尺寸不宜与桩身有明显差异。
- (3) 桩顶面应平整、密实、并与桩轴线基本垂直。

桩头处理



2、测试参数设定应符合下列规定：

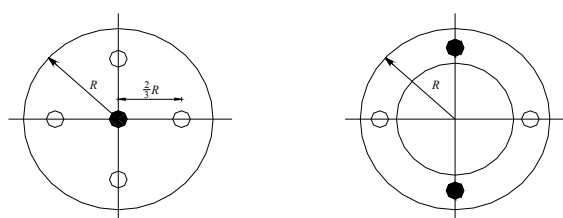
- (1)、时域信号分析的时间段长度应在 $2L/c$ 时刻后延续不少于 5ms；
- (2)、设定桩长应为桩顶测点至桩底的施工桩长，设定桩身截面积应为施工截面积。
- (3)、桩身波速可根据本地区同类型桩的测试值初步设定。
- (4)、采样时间间隔或采样频率应根据桩长、预设桩身波速和频域分辨率合理选择；时域信号采样点数不宜少于 1024 点。
- (5)、传感器的设定值应按计量检定或校准结果设定。

对于时域信号，采样频率越高，则采集的数字信号越接近模拟信号，越有利于缺陷位置的准确判断，一般应在保证测得完整信号（时段 $2L/c+5ms$ ，1024 个采样点）的前提下，选用较高的采样频率或较小的采样时间间隔。

3、测量传感器安装和激振操作应符合下列规定：

- (1) 根据桩径大小，桩心对称布置 2~4 个安装传感器的检测点：实心桩的激振点应选择在桩中心，检测点宜在距桩中心 $2/3$ 半径处；空心桩的激振点和检测点宜为桩壁厚的 $1/2$ 处，激振点和检测点与桩中心连线形成的夹角宜为 90° 。

传感器的安装位置和激振点应避开钢筋笼的主筋影响，两者宜在同一水平面上，并保持合适的距离。其目的是减少外露钢筋对测试产生干扰信号。若外露主筋过长而影响正常测试时，应将其割短。



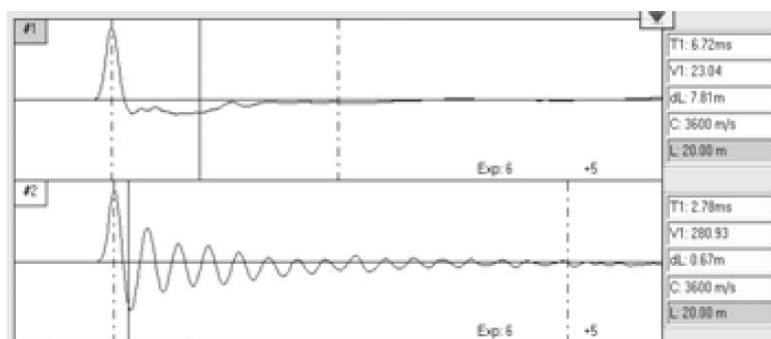
传感器和激振点位置示意图

激振方向应与桩轴线方向平行。当预制桩、预应力管桩等桩顶高于地面很多，或灌注桩桩顶部分桩身截面不规则，或桩顶与承台等其他结构相连而不具备传感器安装条件时，可将测量传感器安装在桩顶以下的桩侧表面，且宜远离桩顶。

传感器安装应与桩顶面垂直；用耦合剂粘结时，应具有足够的粘结强度。传感器用耦合剂粘结时，粘结层应尽量可能薄，必要时可采用冲击打孔安装方式。

下面是某桩在传感器是否与桩面藕合良好前后分别测试的波形：

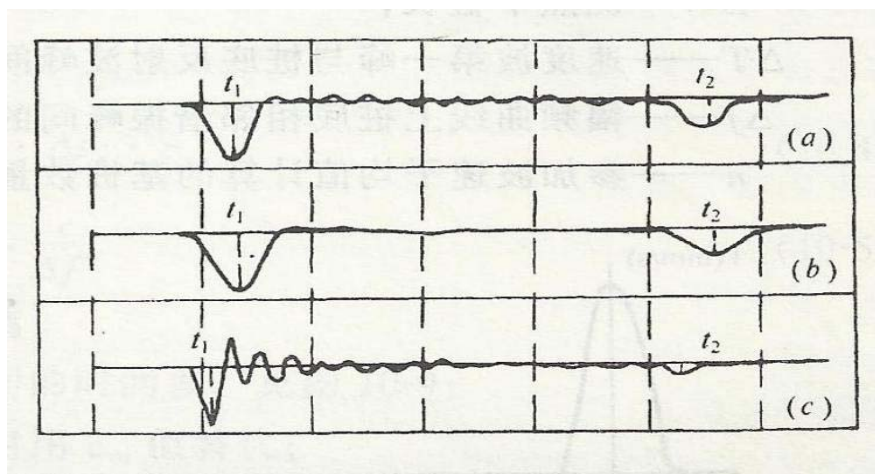
桩1



传感器安装牢固，测试效果好

传感器安装不好，测试效果有震荡衰减干扰信号

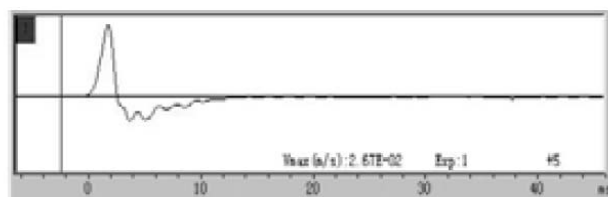
应通过现场敲击试验，选择合适重量的激振力锤和锤垫，宜用宽脉冲获取桩底或桩身下部缺陷反射信号，宜用窄脉冲获取桩身上部缺陷反射信号。通过改变锤的重量和锤头材料，可改变冲击入射波的脉冲宽度及频率成分。锤头质量较大或刚度较小时，冲击入射波脉冲较宽，以低频成分为主。当冲击力大小相同时，其能量较大，应力波衰减较慢，适合于获得长桩桩底信号或下部缺陷的识别。锤头较轻或刚度较大时，冲击入射波脉冲较窄，含高频成分较多，较适宜于桩身浅部缺陷的识别及定位。参考下图：



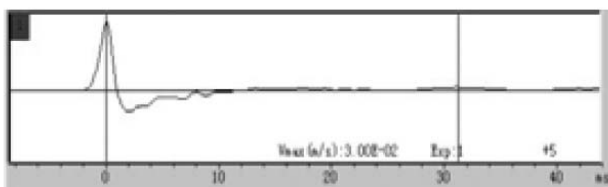
不同锤头作用下的时域波形（400×400mm）方桩

(a) 手锤 (b) 带尼龙头力锤 (c) 细金属杆

下面是一根桩长为 65.5 米，桩径 1500 的钻孔灌注桩在采用不同锤重的锤激振下测试的波形



采用30斤重的锤激振下测试的波形，从波形上看，锤击频率偏高，能量明显偏弱，能量在桩身中的衰减较快，且桩底信号不是很明显



桩头垫象皮垫采用65斤重的锤激振下测试的波形，从波形上看，锤击频率选择较好，能量选择适中，能量在桩身中的衰减较慢，且桩底信号很明显

(2) 当桩径较大或桩上部横截面尺寸不规则时，除按上款在规定的激振点和检测点位置采集信号外，尚应根据实测信号特征，适当改变激振点和检测点的位置采集信号。

3、信号采集和筛选应符合下列规定：

实测信号不应失真和产生零漂，信号幅值不应大于测量系统的量程。

每个检测点记录的有效信号数不宜少于 3 个。

当不同检测点及多次实测信号一致性较差时应分析原因，增加检测点数量。

应根据实测信号反映的桩身完整性情况，确定采取变换激振点位置和增加检测点数量的方式再次测试，或结束测试。

对在同一根桩上采集的若干测试信号的形态、特征进行相似性比较，是低应变检测信号采集和筛选的重要环节。每个检测点的有效信号数量不宜少于 3 个，并进行叠加、平均，提高信噪比。应合理选择测试系统的量程范围，特别是传感器的量程范围，避免信号波峰被削波。为了能对室内信

号分析发现的异常提供必要的比较或解释依据，在检测过程中，不仅要记录激振操作、传感器和激振点布置等某一条件改变进行记录，也要记录桩头外观尺寸和混凝土质量的异常情况。

对低应变信号的质量要求主要是：

- (1) 一致性，
- (2) 靠近基线，无零漂。轻微零漂可通过软件处理。
- (3) 曲线基本光滑，无明显毛刺和外界高频干扰。
- (4) 尽可能使桩底反射可辨认。

三、现场检测步骤

现场采用反射波法对基桩的完整性进行检测，分以下几个步骤：

1、现场查看及资料收集

检测人员进行测试联系的过程中首先要了解该工程的概貌，内容包括建筑物的类型、桩基础的种类、设计指标、地质情况、施工队的素质和工作作风以及甲方现场管理人员、监理人员的情况等。检测工作开始以前，应借阅基础设计图纸及有关设计资料、有效的地质勘察报告、桩基础的施工记录、甲方现场管理人员、监理人员的现场工作日志等。

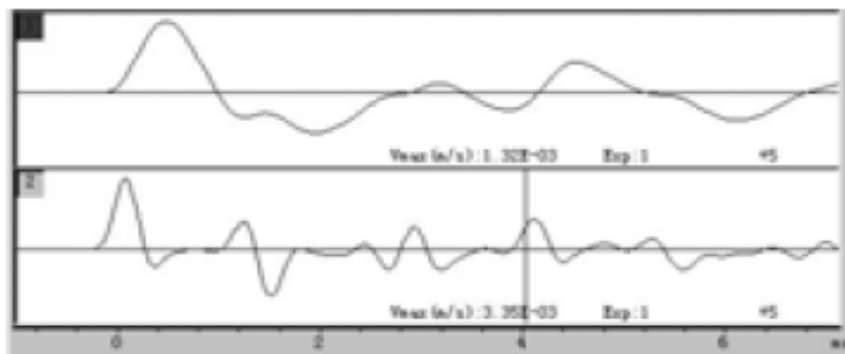
2、桩位的选择及桩顶测试面处理

测试工作的负责人应会同设计者、甲方人员及监理人员，参考现施工记录和工作日志，选择被检测桩的桩位。（有些地区检测桩位由设计、监理、甲方确定以后报当地质监站备案，桩位不能随便改变。如选桩表）为了确保检测信号能有效、清楚地反映桩基的完整性，测试前应考察桩身混凝土的龄期，使之具备足够的强度，混凝土龄期应大于 10 天，地下水位较高时还应延长；桩头应予以处理，要求将桩头的浮浆予以清除，还应注意不能将桩身劈裂，留下隐性裂缝，桩头的破碎部分应彻底清除，桩头面应成完整的水平面。如此就可避免检测过程中产生虚假的信号，以防止影响正确的评判结果。

3、安装传感器

1) 首先要正确选择传感器

下面是在一模型桩上进行的加速度计采集波形的比对。此桩为预制方桩，桩长 8 米，桩身平均波速 3968m/s，在 2.16 米处缩颈，5.65 米处缩颈，速度计及加速度计同时安装在桩头上，采用同一种锤的同一次锤击分别采集



对波形进行分析可以看到，速度计采集的波形无法判断缺陷的性质及位置，而加速度计采集的波形可以准确的判断缺陷的性质及位置。

2)、为了确保测试成果的客观性，传感器的安装应考虑两个方面的影响。

1 传感器的安装位置及方向

由于弹性反射波法是建立在一维纵向振动波动理论的基础上，传感器的轴线与桩身的纵轴线是否平行是至关重要的，否则，入射波与反射波之间将产生夹角（相位差），二维效应将难以克服。由实践可知，传感器的安放点应距桩心沿半径方向约 $2/3R$ （半径）处，这样将得到最小的反冲信号的出现，有利于浅部缺陷的评判，且对于较大直径的桩测点应不小于 2 个，每个测点至少要有三个锤击点。另外检测点与锤击点应足够的距离以消除二维效应。

2 传感器与桩顶面的耦合

耦合剂的选择：以传感器越贴近桩面，与桩面之间接触刚度越大，传递特性越好，测试信号越接近桩面的质点振动为原则。耦合剂通常有以下几种：

（1） 粘性好的黄油或凡士林：经济使用；注意：黄油或凡士林有浓度稀和浓度稠之分，要求采用浓度稠的黄油或凡士林，现场最好采用黄油，测试效果好。

（2） 粘性好弹性差的橡皮泥：实测曲线容易产生震荡。

（3） 口香糖：加工后使用。

（4） 石膏：它的耦合效果好；因其凝固时间长，测试效率低，故现场很少使用。

实践证明一般情况下采用黄油作为耦合剂，测试效果较好。对稠度太低的黄油、油性橡皮泥、粘性低的口香糖、颗粒粗的粘土以及调得过于干或过稀的石膏均不能使用。

4、选择合适的力锤

在结构动态分析诊断中，力锤的重量、形状以及锤头的材料质地等对测试结果都将产生重大的影响。桩基检测中，力锤主要用来产生桩头力信号的首脉冲。力锤的重量一般为 $1\sim 1.2\text{kg}$ ，力锤手柄不宜太长，以避免强烈的手震感，更重要的是确保力锤下落到桩顶时，锤头与桩顶面垂直。力锤头部的材料不同，会对首脉冲的宽度产生影响。实践表明，钢锤产生的脉冲信号尖而高，可获得较精确的桩顶入射波的起始点，对判定桩身浅部缺陷也较有利，其缺陷是较易激励出许多含有高频成分的表面波，四氟乙烯塑料锤激励出的信号较适中，但传递的能量较小，深（长）桩的桩底反射较弱；尼龙锤的激励信号较四氟乙烯塑料锤要尖一些，也易产生少许高频成分，应视现场桩的长度、混凝土强度以及缺陷深度而选择不同的锤型。笔者在实践中还尝试了力棒，材质为 45#钢，力棒较之力锤有其独特的优点，它有激励能量大，力作用线易于控制，且不受桩头上部钢筋笼的困扰。北京铁道研究院的一篇论文中，也曾阐述过力棒较之力锤在桩基检测中有许多优越之处。

5、信号曲线的初判及存盘

现场检测人员一般很难做到对桩身的完整性进行较为精确的判定，每根基桩均应检测 2 组或 2 组以上（6 根以上测试曲线）数据曲线，且各曲线都比较吻合。确认已反映了基桩的客观情况的后方可将它们存盘，以备打印报告时再作细致的分析和评判。对缺陷比较严重，或初判认为曲线不能完全反映桩身的实际情况时，建议多测几个测点、多存几组曲线，以防误判或漏判存有严重缺陷的基桩。

1)、信号初判

(1) 指数放大

作用：在现场信号采集过程中，桩底反射信号不明显的情况经常发生，这是指数放大是非常有用的一种功能。它可以确保在桩头信号不削波的情况下，使桩底部信号得以清晰地呈现出来。但有时指数放得太大，会使波形失真，过分突出了桩深部的缺陷。如果结合原始波形，适当地对波形进行指数放大，作为显示深部缺陷和桩底的一种手段，它还是一种非常有用的功能。

(2) 滤波

作用：滤波是波形分析处理的重要手段之一，是对采集的原始信号进行加工处理，它是为了将测试信号中无用的或次要成分的波滤除掉，使波形更容易分析判断。在实际工作中，多采用低通滤波。而低通滤波频率上限的选择尤为重要，选择过低，容易掩盖浅层缺陷；选择过高，起不到滤波的作用。

(3) 叠加

作用：在现场信号采集过程中，采集的信号信噪比不高、干扰信号较多的情况经常发生，这时叠加平均是非常有用的一种功能。产生干扰信号的原因很多，如：仪器自身的噪声、自然环境中的随机扰动、锤击瞬间由于桩介质密度的非均匀性而产生的杂波等；由于这些干扰信号具有频率、相位、幅值没有规律性的特点，所以可以通过多次采集信号的叠加，使各种干扰信号的算术平均值趋于零，降低干扰信号，提高信号信噪比，是一种非常有效的手段。

(4) 现场测试时应注意观察低应变信号的首脉冲形态

首脉冲的好坏直接影响着对桩身缺陷的评判。理想的首脉冲为半正弦波，且无反冲脉冲现象。要获得此理想的首脉冲可从以下几个方面着手。

- 1)、桩头要破到真实的硬混凝土，桩头部分不得存在松动和裂缝，桩面应平整；
- 2)、传感器的安装位置一定要适合，以获得最小反冲甚至无反冲；
- 3)、传感器的安装质量要高，不以降低其工作频率；
- 4)、敲击时，落锤动作干脆利落，以尽量使首脉冲狭窄且符合半正弦规律

四、低应变检测现场需记录的原始信息量

1、低应变检测现场需携带的资料

任务单、检测方案、选桩表、仪器检定证书、低应变检测原始记录表（受控）、联系单、地质资料（地质柱状图）、桩基施工记录。

2、低应变检测现场原始记录的信息量

计量认证要求每次检测和/或校准的记录应包含足够的信息以保证其能够再现，所有工作应当时予以记录。低应变现场检测的桩数量较多，一般情况下，在现场记录很多内容是不切实际的，一般情况是相同情况的桩可以统一记录，对有异常情况的桩要详细记录。低应变检测需要记录的内容有：

1)、检测桩的状态情况的描述。龄期、强度、桩顶、桩底标高，设计桩径，成桩方式，桩头处理的情况。

- 2)、低应变检测执行的标准、规范。
- 3)、仪器设备的型号、编号、有效日期、完好情况、检测人员姓名、上岗证的情况。
- 4)、检测数据在检测仪器中存储的路径、名称，在回到实验室以后的存储地址、名称路径等。
- 5)、检测环境、天气、振动情况的记录。
- 6)、检测日期、检测时间。
- 7)、检测标高处的桩实际直径。
- 8)、检测点、激振点的位置。
- 9)、激振锤的质量、材料，粘合剂的材料，传感器粘结方式。

10)、在检测过程中异常的情况特别要加以关注记录：如桩顶部位的实际桩径明显与设计不一致的桩，对于预制桩桩顶处理过的情况，正常桩桩顶一般是完好的，如桩顶有破损，有可能桩在成桩的过程中没达到设计标高，桩长比设计桩长短了，要关注施工时桩截除了多少米，还要收集预制桩施工时的配桩情况，对于预应力管桩，还要关注桩洞中是否冒水、水位的情况、冒砂的情况，另外要关注预制桩施工结束后桩顶标高是否有上抬的现象。桩顶是否有挖掘机碰挖到的现象。

· 桩基低应变检测现场记录表 ·

工程名称			
合同编号		依据标准	☐ JGJ106-2003 ☐
仪器编号		仪器状态	使用前: 正常 ☐ 异常 ☐
力锤材质			使用后: 正常 ☐ 异常 ☐
桩头状态	混凝土是否完好: 完好 ☐ 破损 ☐ (本工程中有桩头破损, 应另页逐根桩记录) 桩头是否有扩径、缩径: 扩径 ☐ 缩径 ☐ 无扩(缩)径 ☐ (本工程中有桩头扩(缩)径现象, 应另页逐根桩记录) 桩身是否倾斜: 是 ☐ 否 ☐ (本工程中有桩头倾斜, 应另页逐根桩记录) 桩顶是否已被截过: 是 ☐ 否 ☐ (本工程中有桩头被截过, 应另页逐根桩记录)		
测点附近有无振捣	是否多节桩	是否商品混凝土	
有 ☐ 无 ☐	是 ☐ 否 ☐	是 ☐ 否 ☐	
桩位图	地质报告	桩基资料	
有 ☐ 无 ☐	有 ☐ 无 ☐	有 ☐ 无 ☐	
有关情况 说 明	多节桩接桩情况: 第一节: _____m 第二节: _____m 第三节: _____m 第一节: _____m 第二节: _____m 第三节: _____m 第一节: _____m 第二节: _____m 第三节: _____m 见 证 人		

存盘文件名: _____

测试人: _____ 校核人: _____

第四节 检测数据分析与判定

一、桩身波速平均值的确定应符合下列规定：

1、当桩长已知、桩底反射信号明确时，应在地基条件、桩型、成桩工艺相同的基桩中，选取不少于 5 根 I 类桩身波速计算值按下式计算其平均值：

$$c_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i$$

$$c_i = \frac{2000L}{\Delta T}$$

式中， c_m ——桩身波速的平均值（m/s）；

c_i ——第 i 根受检桩的桩身波速计算值（m/s），应满足 $|c_i - c_m|/c_m \leq 5\%$

L ——测点下桩长（m）；

ΔT ——速度波第一峰与桩底反射波峰间的时间差（ms）；

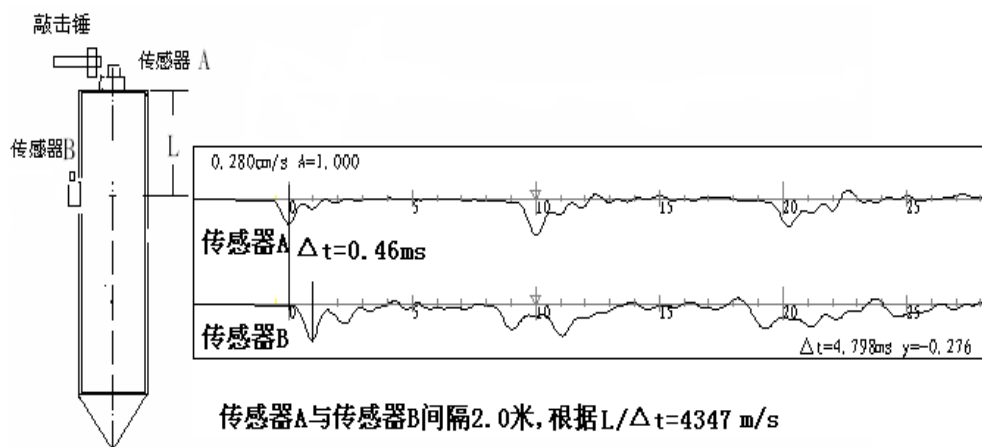
Δf ——幅频曲线上桩底相邻谐振峰间的频差（HZ）；

n ——参加波速平均值计算的基桩数量（ $n \geq 5$ ）。

存在的问题：纵波的弥散效应，会使波速值产生离散，故参加统计的桩基本条件应尽可能一致。

2、当无法按上款确定时，波速平均值可根据本地区相同桩型及成桩工艺的其他桩基工程的测试取值，并结合桩身混凝土的骨料品种和强度等级综合确定。

3、当桩身具备沿桩长方向间隔一可测量的距离时，应安置 2 个传感器，通过 2 个传感器的响应时差计算该桩段的波速值，以该值代表整根桩的桩身波速值。这一可测量的距离不宜小于 2m。取不少于 5 根同样方式获取的桩身波速值，按照（6-1）计算出 C_m 。



本方法确定桩身缺陷的位置是有误差的，原因是：缺陷位置处 Δt_x 存在读数误差；采样点数有限时，采样时间间隔的误差；波速确定的方式及用抽样所得平均值 c_m 替代某具体桩身段波速带来的误差。其中，波速带来的缺陷位置误差 $\Delta x = x \cdot \Delta c / c$ （ $\Delta c / c$ 为波速相对误差）影响最大，如波速相对误差为 5%，缺陷位置为 10m 时，则误差有 0.5m；缺陷位置为 20m 时，则误差有 1.0m。

还存在另一种误差，即锤击后应力波主要以纵波形式直接沿桩身向下传播，同时在桩顶又主要以表面波和剪切波的形式沿径向传播。因激振点与传感器安装点有一定的距离，接收点测到的入射峰总比激振点处滞后，对于大直径桩，这种尺寸效应更明显一些。

例题：

地质条件、设计桩型、成桩工艺相同的10根桩，完整性类别均为为 I 类，桩身波速分别为3800m/s、3600m/s、3700m/s、3950m/s、3900m/s、4000m/s、3750m/s、4050m/s、3900m/s、3950m/s，请计算桩身波速平均值。

答：“3600m/s”与平均值的相对差值超过 5%，即此时 $|C-C_m|/C_m>5\%$ ，不满足统计要求，其余 9 根桩的平均波速为： $C_m=35000/9=3889\text{m/s}$

二、 桩身缺陷位置的确定

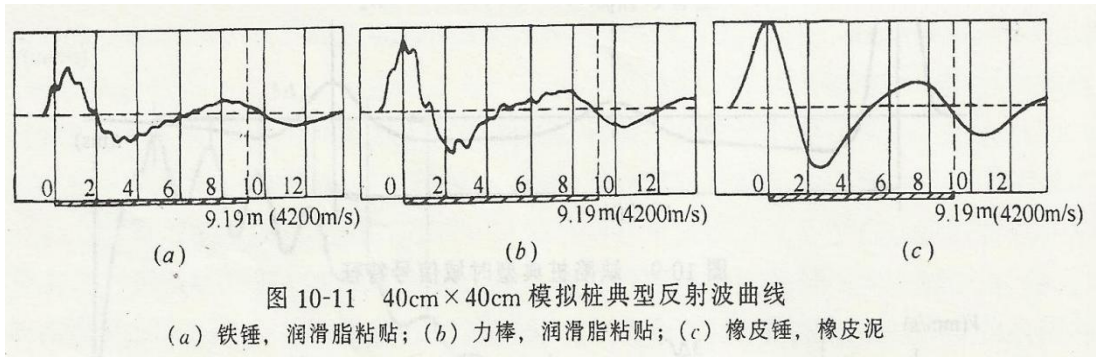
1、桩身缺陷位置按下列计算公式确定

$$x=\frac{1}{2000}\cdot\Delta t_x\cdot c\cdots\cdots(15.4.2-1)$$

- 式中 x ——桩身缺陷至传感器安装点的距离 (m)；
- Δt_x ——速度波第一峰与缺陷反射波峰间的时间差 (ms)；
- c ——受检桩的桩身波速 (m/s)，无法确定时用 c_m 值替代；

对桩型及施工工艺相同的一批桩，当按上式对受检桩的桩长进行估算核验时，若估算桩长明显短于设计桩长且有可靠施工资料或其他方法验证其结果时，受检桩应判定为 IV 类桩。

从工程使用角度讲，浅部缺陷对工程的安全性最关键也最容易处理，而从测试原理上讲，浅部严重缺陷的发现比深部缺陷容易，所以能够找到浅部缺陷才是解决桩质量问题的关键。



三、 桩身完整性判定

1、桩身完整性类别应参照下表所列实测时域或幅频信号特征，并结合缺陷出现的深度、测试信号衰减特性以及设计桩型、地质条件、施工情况的规定，综合分析判定。

表 6-2 桩身完整性判定

类别	时域信号特征
I	2L/c 时刻前无缺陷反射波，有桩底反射波
II	2L/c 时刻前出现轻微缺陷反射波，有桩底反射波
III	有明显缺陷反射波，其他特征介于 II 类和 IV 类之间
IV	无桩底反射波，2L/c 时刻前出现严重缺陷反射波或周期性反射波；或因桩身浅部严重缺陷使波形呈现低频大振幅衰减振动

注：1)、对同一场地、地质条件相近、桩型和成桩工艺相同的基桩，因桩端部分桩身阻抗与持力层相匹配导致实测信号无桩底反射波时，可参照本场地同条件下有桩底反射波的其他桩实测信号判定桩身完整性类别。

2)、因软土地区的超长桩或桩身阻抗与持力层阻抗匹配良好或桩身截面多变、渐变或预制桩接头缝隙影响等因素导致实测信号无桩底反射信号时，应以实测信号中 2L/c 时刻前的特征为重点，设别设定桩长范围是否存在缺陷，并结合经验，参照本场地和本地区的相似情况综合分析判定。

3)、灌注桩中出现的对设计条件有利的扩径，不应判为缺陷。

2、JGJ106-2014 规范的 8.4.4 条规定了 4 种情况，采用时域信号分析判定桩身完整性类别时应结合成桩工艺和地基条件加以区分：

1 混凝土灌注桩桩身截面渐变后恢复至原桩径并在该阻抗突变处的反射，或扩径突变处的一次和二次反射；

2 桩侧局部强土阻力引起的混凝土预制桩负向反射及其二次反射；

3 采用部分挤土方式成桩的大直径开口预应力管桩，桩孔内土芯闭塞部位的负向反射及其二次反射；

4 纵向尺寸效应使混凝土桩桩身阻抗突变处的反射波幅值降低。

三、当按 JGJ106 规范第 8.3.3 条款的规定操作不能识别桩身浅部阻抗变化趋势时，应在测量桩顶速度响应的同时测量锤击力，根据实测力和速度信号起始峰的比例差异大小判断桩身浅部阻抗变化程度。这是 2014 版新规范增加的内容。

第五节 低应变检测应注意的问题

一、超声波、高应变、低应变的波速比较

桩基检测时，常常会遇到对同一根桩用不同检测方法测得的波速各不相同。例如，声波透射法测得的波速高于高、低应变法，主要是由于用于测桩的超声波频率高（>20kHz）；另外，高、低应变法把桩当成一维杆，忽略应力波传播过程的横向惯性效应，而声波透射法是三维空间模型，比一维杆假定的波速高。低应变法测得的波速又较高应变法的波速高，是由于后者的应力水平高，应变幅度大，使局部混凝土进入塑性状态，导致波速偏低。

结论：超声波波速>低应变波速>高应变波速

二、桩身完整性类别判定

完整性指标包括：截面尺寸、材料密实性、桩身连续性。

反射波法对桩身完整性指标判定依据的是桩身截面阻抗的变化特征，而桩身截面阻抗=密度*速度*截面尺寸，故缺陷应该是反映桩身阻抗变低的反射特征，且有可能是几种指标整体变差的综合反映。

三个完整性指标的判定方法：

截面尺寸的判断：低/高阻抗反射+缩/扩径的判断

材料密实性判断：低/高阻抗反射+混凝土不均匀的判断

桩身连续性判断：低阻抗反射+桩身的局部或整体断面判断

可见，桩身完整性的判断=客观的信号+主观的判断，故反射波法检测结果分析判定的准确性与操作人员的技术水平和实践经验有很大关系。

对于信号中缺陷程度的判断尽管可依据反射特征的轻微、明显程度来酌定，但同样的缺陷在不同的地质情况、不同的深度条件下，反射强度也会存在差别，故在掌握资料不完整和分析经验不足的情况下，对于缺陷程度的判断带有一定的人为成分。

为了提高主观判定的准确性，分析时应该搜集诸如：桩的类型、尺寸、标高、施工工艺、地质概况、设计参数、桩身混凝土参数、施工过程及异常情况记录等信息。

三、低阻抗反射是否都为缺陷？

答案是否定的。时域法分类标准中强调缺陷反射的程度，故缺陷反射的确认很重要，但并非所有的低阻抗反射均定性为缺陷反射（如预制打入桩的接缝、灌注桩的逐渐扩径再缩回原桩径的变截面、地层硬夹层影响等），应结合成桩工艺和地质条件综合分析判定反射波的类型。另外一种情况就是浅部扩径的二次反射及浅部缺陷的多次反射会表现为低阻抗反射。但即使存在这种反射特征，在缺陷判定时也应该慎重，以防漏判。

四、信号分析时应注意的问题

除了传感器的安装、激振、桩身的阻抗变化等因素会影响信号的形态，影响信号的因素还有下列几个因素：

(1) 应力波传播过程中衰减的影响

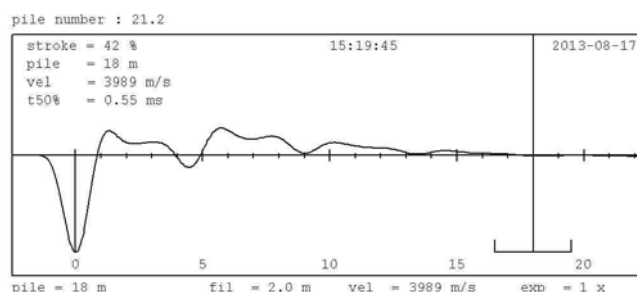
- a 桩身能量衰减：跟桩的横截面尺寸相关
- b 吸收衰减：跟桩身材料和桩周土性质相关
- c 桩身完整性带来的衰减

(2) 桩周土对信号的影响

- a 吸收应力波能量，使应力波衰减，有效测试深度减小。
- b 使桩身缺陷反射幅值减小。
- c 桩周土的变化在应力波中也有反映，从而干扰对桩身完整性的判断。
- d 土的动阻力会导致信号幅度衰减，静阻力导致实测波形向下漂移。

1、对于完整桩和明显缺陷桩，从时域信号反映的信息中分析判定较简单直观，而多缺陷桩或渐变缺陷桩的信号则复杂些，有的信号的确是因施工质量缺陷产生的，但也有是因设计构造或成桩工艺本身局限导致的不连续断面产生的，例如预制打入桩的接缝、灌注桩的逐渐扩径再缩为原桩径的变截面、地层硬夹层影响等。因此在分析测试信号时，应仔细分清哪些是缺陷波，哪些是因桩身构造、成桩工艺、土层影响造成的类似缺陷信号特征。

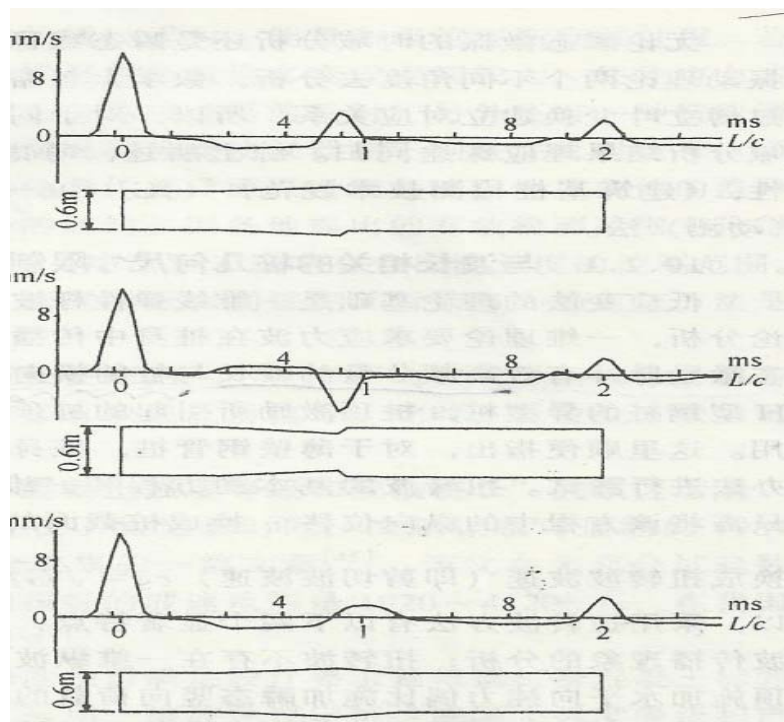
下图：预应力管桩桩 桩径 400mm 桩长 18m，上部 8m 土层为淤泥，接桩处反应强烈、承载力满足设计要求



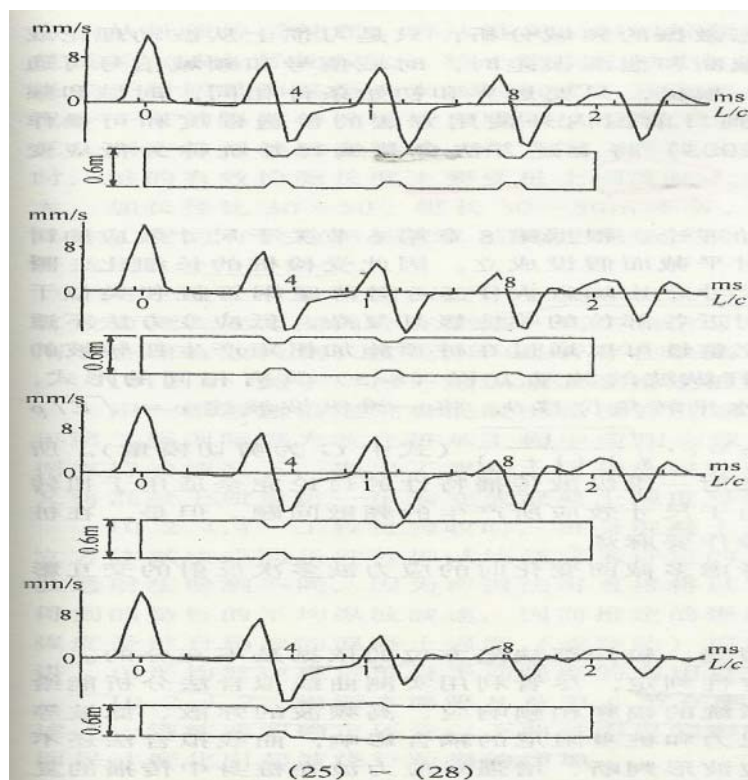
根据测试信号幅值大小可以对缺陷程度进行判断。缺陷程度除受缺陷本身大小影响外，还受桩周土阻尼大小及缺陷所处的深度位置影响，相同程度的缺陷因桩周土岩性不同或缺陷埋深不同，在测试信号中的幅值可能会大小各异。当缺陷十分明显时，应仔细对照设计桩型、地质条件、施工情况进行综合分析，判断是Ⅲ类桩还是Ⅳ类桩。不仅如此，还应结合基础和上部结构形式对桩的承载安全性要求，考虑桩身承载力不足引发桩身结构破坏的可能性，确定缺陷程度，不宜仅依赖实测曲线。

2、对于混凝土灌注桩，应区分桩身截面渐变后恢复至原桩径并在该阻抗突变处的一次反射与扩径突变处的二次反射；或当桩身存在不止一个阻抗变化截面（包括桩身某一范围阻抗渐变的情况）时，都应结合施工工艺和地质条件综合分析判定受检桩的完整性类别。

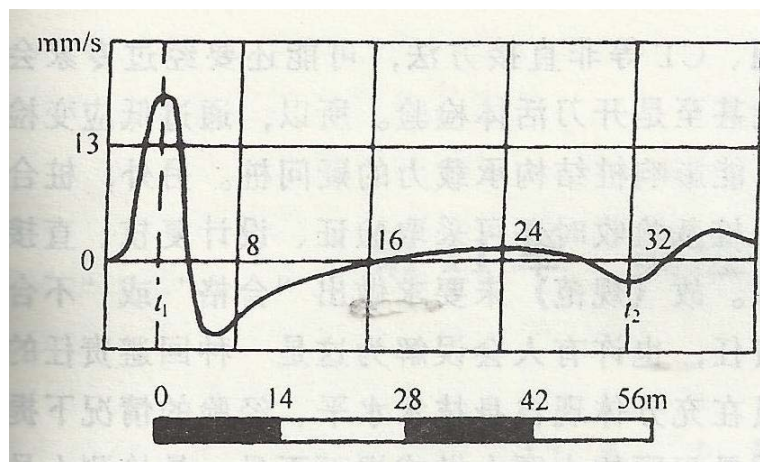
当灌注桩桩身截面（阻抗）渐变或突变，往往在阻抗突变处的一次反射或二次反射主要表现为类似明显扩径、严重缺陷或断桩的相反情形，容易造成误判。如下图：



3、对当桩身存在不止一个阻抗变化截面（包括桩身某一范围阻抗渐变的情况）时，由于各阻抗变化截面的一次反射和多次反射波相互叠加，除距桩顶第一阻抗变化截面的一次反射能辨认外，其后的反射信号可能变得十分复杂，难于分析判断。如下图：



4、对于嵌岩桩，桩底反射信号为单一反射波且与锤击脉冲信号同向时，应采取其他方法核验桩底岩情况。



图：嵌岩桩实测波形

嵌岩桩的桩底沉渣和桩端持力层是否为软弱层、溶洞等是直接关系到该桩能否安全使用的关键因素。虽然本方法不能确定桩底情况，但理论上可以将嵌岩桩桩端视为杆件的固定端，并根据桩底反射波的相位判断桩端端承效果，也可通过导纳值、动刚度的相对高低提供辅助分析。采用本方法判定桩端嵌固效果差时，应采用静载荷或钻芯法等其他检测方法核验桩底嵌岩情况，确保基桩使用安全。换言之，当桩端反射与入射波反向时，则可判断桩底沉渣较少，嵌岩情况良好。

5、如何判断是桩周土对波形是否带来影响？

1) 阅读地质勘察报告，了解场地内是否存在性质相差较大的软硬土层交界的现象。假如存在，应力波就有可能在软硬土层的分界处出现与桩顶入射波同向或反向的反射。

2) 一般情况下，土层对波形的影响不会单独对某一根桩而是会对位于该地质条件中的一批桩造成影响。因此，当一批工程桩同时在某个深度位置出现类似反射信号时，应考虑土层的影响因素。

3) 桩周土在波形中的反映

当桩进入软夹层 2，由于土阻力相对减小，在实测曲线上将产生一个与入射波同相位的土阻力波，类似于桩身阻抗降低的反射信号。

当桩进入硬土层时，由于土阻力相对增大，在实测曲线上将产生一个与入射波反相位的土阻力波，类似于桩身波阻抗增大的反射信号。

当桩周相邻土层土阻力变化越大，在实测曲线上产生的反射信号越强。

6、滤波：应尽可能通过震源和激振方式的调整滤除干扰波，数字滤波对信号频谱的改造作用可能影响到分析结果，不建议过分使用。

7、桩身缺陷是否影响桩身结构承载力是确定Ⅲ、Ⅳ类桩的主要因素。桩身结构承载力包括抗压、抗拔、水平承载力，通常桩身浅部缺陷（如 10D 以内或上半桩身）对抗压、抗拔、水平承载力均有

影响，中、深部缺陷主要影响桩的抗压承载力，考虑到上述因素，对于”有明显缺陷反射”的Ⅲ类桩，可采取验证、设计复核的办法，以确定是否进行补强或让步验收。对于桩的完整性检测，规范未要求进行“合格”或“不合格”评定，仅进行完整性分类即可。

五、对于低阻抗反射定性为缩颈缺陷时应考虑桩基规范（JGJ94-2008）对于桩径允许偏差的规定

当采用开挖验证的方法校核灌注桩缩径缺陷时，应参照规范的允许偏差来评价完整性。如果灌注桩信号有低阻抗反射，但该反射位置的实际桩径满足规范（或设计）要求，则该低阻抗反射就不能判定为缩径缺陷。

成孔方法	桩径允许偏差（mm）
泥浆护壁钻、挖、冲孔桩	±50
锤击（振动）沉管、振动冲击沉管成孔	-20
螺旋钻、机动洛阳铲干作业成孔	-20
人工挖孔采用现浇混凝土护壁	±50
人工挖孔采用钢护筒护壁	±20

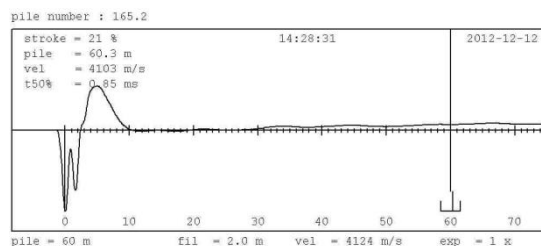
第六节 低应变检测的局限性

- 一、低应变检测对薄壁钢管桩和类似于 H 型钢桩的异型桩，本方法不适用。
- 二、本方法对桩身缺陷程度只作定性判定，尽管利用实测曲线拟合法分析能给出定量的结果，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，曲线拟合法还不能达到精确定量的程度。所以，低应变动测法根据阻抗的变小既不能判断缺陷的具体类型，也不能对桩身缺陷程度作定量判定。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。
- 三、由于受桩型（如截面多变）、地质条件、激振方式、桩的尺寸效应、桩身材料阻尼等因素的影响，桩过长（或长径比较大）或桩身截面阻抗多变或变幅较大引起的应力波多次反射，往往测不到桩底反射或正确判断桩底反射位置，从而无法评价整根桩的完整性。
- 四、基于一维理论，检测结论给出桩身竖向裂缝、较深部位缺陷方位的依据是不充分的。
- 五、由于传感器接收点和激振点之间的距离（管桩为圆心角对应的弧长）不同，将造成接收速度响应的滞后，导致所测一维纵波波速比真实的偏高，或缺陷定位偏浅。这对较大直径桩仅采用时域波形分析时无法避免。

六、对于预应力管桩低应变检测无法分辨接桩位置附近的缺陷、易误认为是焊接（或连接机械螺纹）引起的反射信号。

七、对于预应力管桩当有多个缺陷时，只能检测到第一个较严重缺陷，以下的情况难以识别。

八、大振幅的低频宽幅大摆动波形是浅部严重缺陷桩的共性，而用窄脉冲能否有效判断浅部缺陷的位置，要看浅部缺陷的严重和深浅程度以及桩的横向尺寸，没有发现不了的浅部严重缺陷，但存在浅部缺陷的定位问题。下图：为浅部严重缺陷桩的实测曲线。



九、低应变法应用的限制条件

1、与波长相关的几何尺寸限制

1) 桩径 (D) 桩长 (L) 与应力波波长 (λ) 的限定关系，一维线弹性杆波动理论有如下假设：

$$L > \lambda > D$$

实际应用时： $L/D > 5$ ， $\lambda/D > 5$

2) 检测盲区

设脉冲宽度 δ ，纵波波速 V ，则反射波法测试盲区为 $\delta \times V/4$ 。

深部盲区：反射波可返回的极限深度。

2、缺陷的定量与类型区分不能单纯依赖低应变法

1) 单一方法尚不能准确定量；

2) 缺陷类型只能依据反射系数区分阻抗的变化趋势（变大或变小），多数情况下仅根据反射信号不能准确定性，少数规律性缺陷可定性（如 CFG 桩清槽时碰断，预制桩接桩位置、已知的工艺性扩缩径等）

3) 跟大多数物探方法一样，检测得到的是异常的信号特征，具体缺陷类型，通常情况下需要进一步验证。

4) 检测规范对检测结果的判定没有要求区分缺陷类型，可结合地质、工艺、施工情况综合分析，或采取钻芯、静载试验等方法进行补充检测验证。

3、最大有效检测深度

江苏省《建筑地基基础检测规程》的条文说明里面有这段话：

若桩过长（含长径比较大）或灌注桩桩身阻抗多变且变化幅度较大或预制桩存在接桩缝隙等情况时，往往应力波尚未传到桩底，其能量已完全衰减或提前反射，测不到桩底反射信号。此时，尽管无法对整根桩的完整性作出评价，但若被测桩桩长范围内存在缺陷，则实测信号中必有缺陷反射信号，低应变法仍可用于查明被测桩桩长范围内是否存在缺陷。可以这样理解：只要桩长在有效测试范围内，哪怕没有看见桩底反射，仍可以检测桩身是否存在缺陷。

4、不能用低应变波速推定桩身混凝土强度和校核桩长

1) 平均波速只对应平均强度，且没有唯一、定量的关系公式。

2) 激振点与传感器安装点之间是有距离的，传感器测到的峰值时刻比激振点实际的峰值时间有滞后，因此按峰值反射确定的波速会偏高（ $c=2L/t$, 实测 t 偏小）。反之，就算已知正确的波速，由于实测的 T 偏小，推算出来的缺陷深度也会比实际偏小。

3) 当已知长度的桩存在变截面时，由于波的绕射使 T 变长，从而算出的波速会偏低。

4) 当桩身存在多处缺陷、低阻抗时，波的衰减、弥散、绕射等会使算出来的波速偏低。

5、低应变法应用于复合地基竖向增强体检测时有一定的前提条件。

1) 增强体类型：柔性桩（砂桩、碎石桩）、半刚性桩（夯实水泥土桩、搅拌桩、旋喷桩）、刚性桩（CFG 桩）。

2) JGJ106-2014 规定可测桩身强度不应低于 15MPa（设计规范 GB50007-2011 规定的混凝土强度等级不低于 C20，70%强度接近 15MPa，因此设计强度应不宜于 C20），桩型仅限混凝土桩和 CFG 桩（JGJ79-2012 及验收规范 GB50202-2018 也有具体规定）。

当我们通过积累更多的对比资料和经验，可能会发现对机理的认知还相当肤浅，有一些失败的检测案例说明我们可能夸大了动测法的一些功能。其实不光是低应变反射波法，任何一种检测方法都有其局限性，即便是几种检测方法的搭配组合，也未必能在基桩质量检测工作中解决所有问题，只能将各种检测方法组合起来运用，取长补短，以提高我们对桩基质量判断的准确性。

例题：低应变法的理论基础以一维线弹性杆件模型为依据。据此请选择下列哪种桩型不宜使用低应变法进行桩身完整性检测_____。

A 桩径 800mm，桩长 10m； B 桩径 42mm，桩长 2.5m；

C 桩径 1000mm，桩长 4.5m； D 桩径 600mm，桩长 6m。

答案：C

例题：只考虑各地区地质条件差异时，桩的有效检测桩长受（ C ）大小的制约。

A 桩的长径比； B 桩周土刚度；

C 桩土刚度比； D 桩周土阻尼

例题：对于时域信号，采样频率越高，则采集的数字信号越接近模拟信号，越有利于缺陷位置的准确判断。一般应在保证测得完整信号的前提下，选用较高的采样频率。若要兼顾频域分辨率，则按采样定理适当（ B ）或（ D ）。

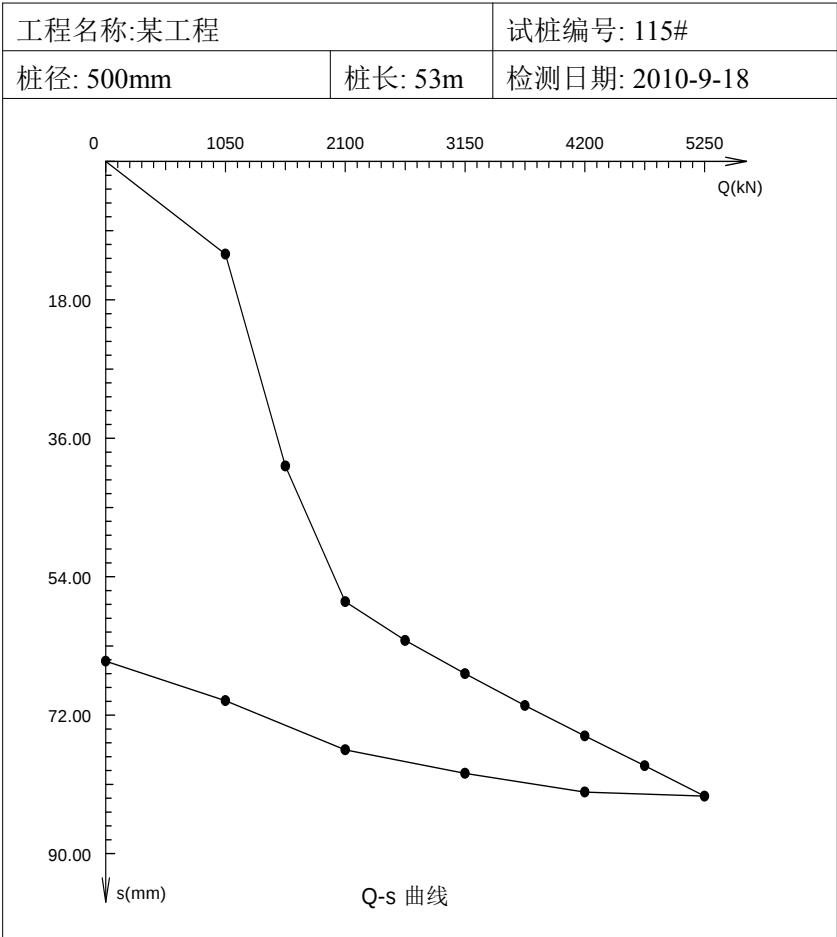
A 提高采样频率； B 降低采样频率；

C 增加采样点数； D 减少采样点数；

第四章 工程实例

实例一、

某工程设计桩径 500mm，设计桩长 48m，预应力管桩 PHC-A-500-125-C80,设计单桩竖向抗压承载力极限值 5250kN，4 节接桩。对 3 根工程桩进行静载荷试验，下图是其中一根桩的 Q-s 曲线。

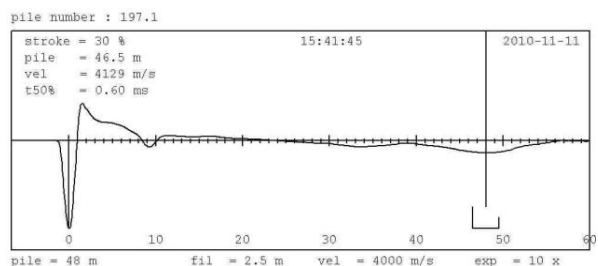
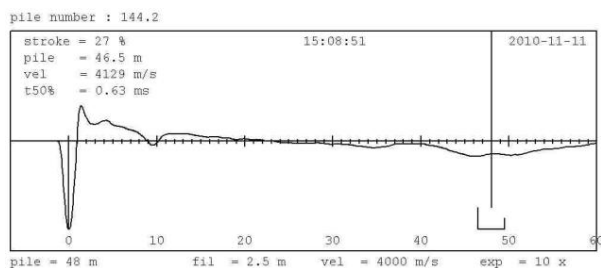


基坑开挖后进行了 100%低应变桩身完整性检测，共 237 根工程桩中有近 30%的桩存在接桩有严重缺陷，而且大部分缺陷桩集中在一个区域内。建设方委托上海的一家公司对其中的 41 根桩进行了孔内摄像检测，以下是部分桩的成像结果。

序号	桩号	测试深度 (m)	缺陷深度 (m)	缺陷性质	缺陷大小		检测深度内桩身完整性类别	缺陷描述
					最小值 (cm)	最大值 (cm)		
8	144	11.0	10.0	接桩脱开	1.0	2.2	III	夹泥并流动，无错位，明显缺陷
14	157	12.0	11.0	接桩脱开	1.0	1.5	III	夹泥并流动，无错位，明显缺陷
15	158	12.0	11.0	接桩脱开	1.5	2.0	III	夹泥并流动，无错位，明显缺陷
16	160	14.0	12.4	接桩脱开	1.5	2.5	III	夹泥并流动，无错位，明显缺陷
17	161	12.0	10.8	孔壁破损	0	0	III	混凝土轻度缺损
			11.0	接桩脱开	1.0	1.0		夹泥并流动，无错位，明显缺陷
18	162	11.0	10.0	接桩脱开	1.5	2.0	III	夹泥并流动，无错位，明显缺陷
19	163	11.0	9.7	接桩脱开	0.5	1.0	III	夹泥并流动，无错位，明显缺陷
20	164	9.0	7.9	混凝土破损	0	0	III	接桩不密实，接桩处混凝土局部缺损，明显缺陷
21	166	11.0	10.0	接桩脱开	0	0.5	III	夹泥并流动，无错位，明显缺陷
22	170	11.0	8.2	接桩脱开	1.0	1.5	III	夹泥并流动，无错位，明显缺陷
23	173	11.0	10.0	接桩脱开	0.5	0.5	III	夹泥并流动，无错位，明显缺陷
24	174	6.4	无	无	0	0	I	检测深度内无接桩，完整
25	176	12.0	11.0	接桩脱开	1.0	1.5	III	夹泥并流动，无错位，明显缺陷

原计划处理的方案是：基坑开挖好以后静压桩机对所有的缺陷桩重新压一遍，再灌芯处理。由于基坑深，静压机下不去，另外由于场地限制，无法对所有的缺陷桩进行复压。后改为对所有缺陷桩进行高压注浆，再进行低应变检测，另抽取最严重的 3 根桩进行静载荷试验。

下图是工程桩基础中的 144#，197#工程桩低应变检测，发现 10 米接桩处存在严重缺陷（见低应变曲线）

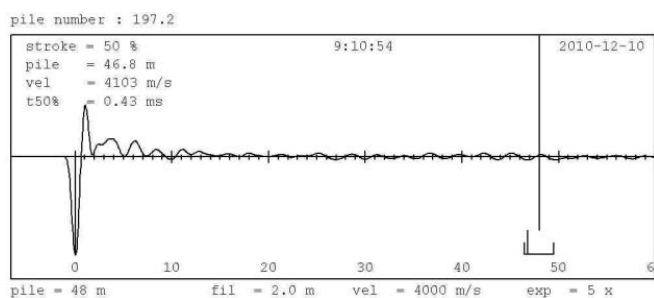
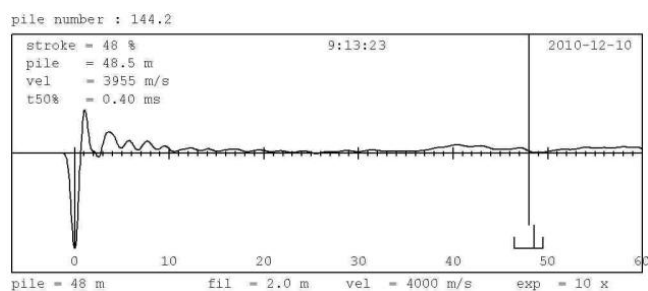


孔内摄像的检测结果是：

144#桩：接桩脱开，最小值为 1.0cm，最大值为 2.2cm；

197#桩：接桩脱开，最小值为 3.0cm，最大值为 3.0cm；

下图是采用了在桩芯内高压注浆方法进行处理后，又对其进行了低应变检测的实测缺陷（见低应变曲线）



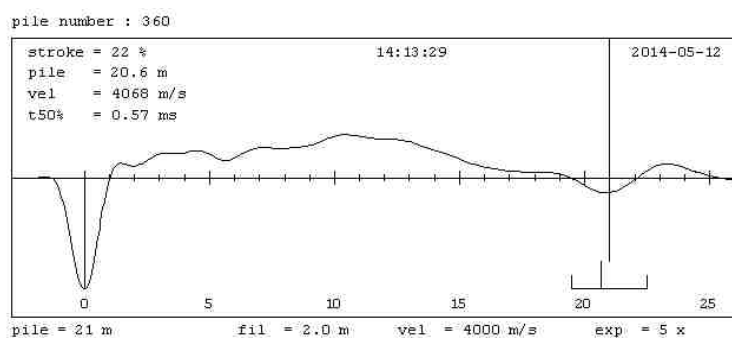
检测结果：144#桩处理效果较好，未见缺陷； 197#桩处理后较先前有较大改观。静载荷试验正常。

实例二：

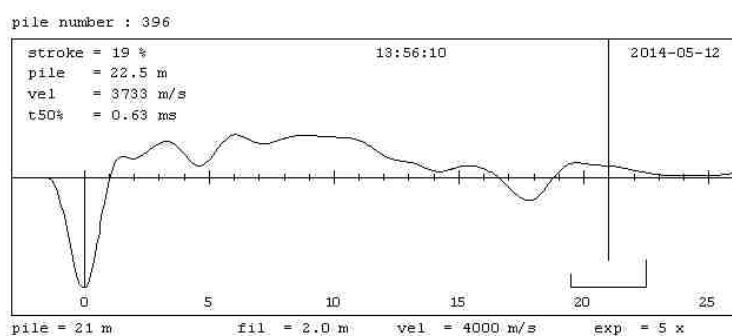
某工程采用直径 600 的钻孔灌注桩，设计桩长 21 米，混凝土强度等级为 C30,地质资料如下图。

层号	土层名称	层底埋深	钻孔灌注桩 (kPa)	
			极限侧阻力标准值 q_{sik}	极限端阻力标准值 q_{pk}
①	表土	0.80-4.30m		
②	粘土夹粉质粘土	5.00-6.00m	70	
③	粉质粘土夹粉土	6.90-9.10	42	
④	粉土	11.10-12.60m	55	
⑤	粉砂	16.20-17.80m	62	800
⑥	粉砂夹粉土	20.00-32.50m	58	800
⑦	粉质粘土	38.60-41.90m	52	400
⑧	粉质粘土		78	900

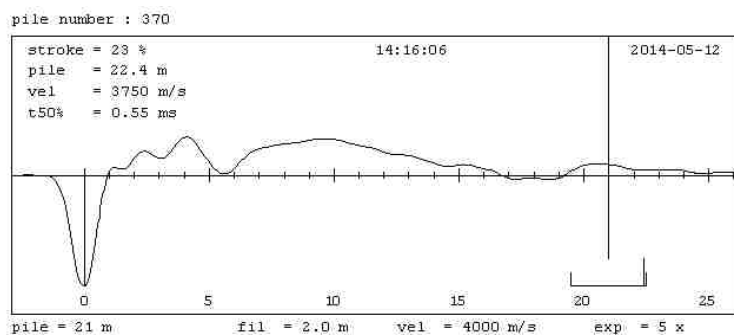
下面是本工程实测的低应变曲线。



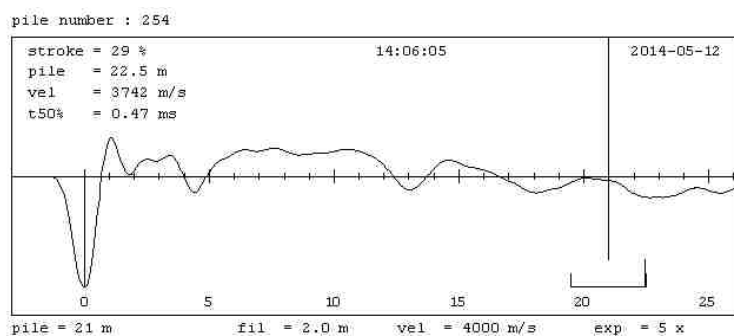
360#为完整桩



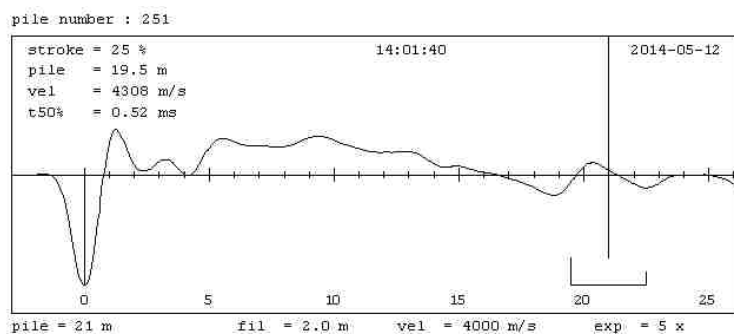
394#根据平均波速计算实测有效桩长为 18 米，少于设计桩长，应判为严重缺陷桩



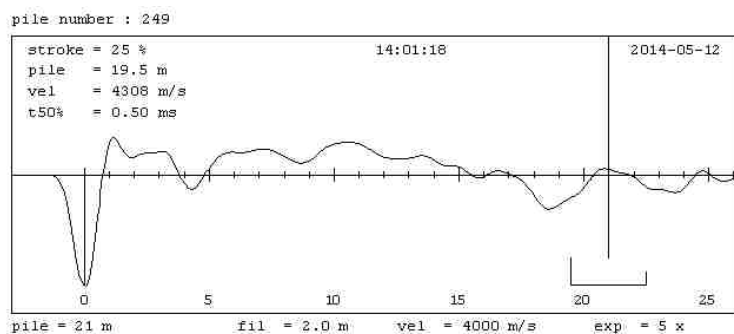
370#根据平均波速计算实测有效桩长为 17-18 米，少于设计桩长，应判为严重缺陷桩，而且桩底反射有 2 个波峰，底部有比较厚的沉渣



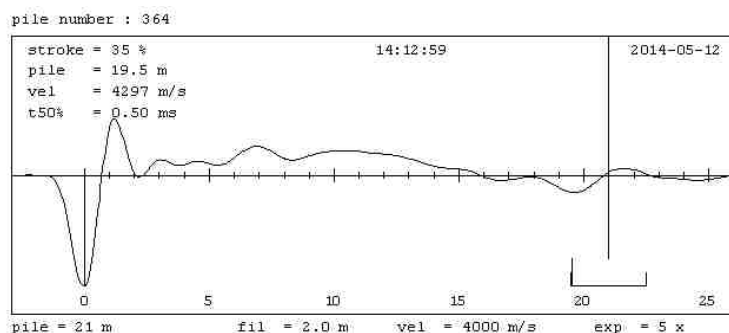
254#桩 13 米处应为扩径后变为正常直径后的反映，18 米处应为 5 米处阻抗变化的 2 次反射，桩底应判在 22.5 米处，波速降低。该桩判为完整桩。



253#桩 19 米处严重缺陷，



249#桩与 253#桩一样，检测有效桩长 18.5 米少于设计桩长，应判为严重缺陷桩。



364#桩以 4000m/s 的平均波速算有效桩长为 20 米，比设计要求少了 1 米，在 5% 的误差范围内。上述 7 根桩在桩顶下 4-6 米的位置普遍存在“缺陷”反射特征，因上部 4-5 米为硬塑的粉质粘土层，往下就变为较软弱的粉质粘土夹粉土、粉土层，在曲线上反映为“缺陷波”的特征。在桩身完整性判断时不能一味的以曲线来判断，应结合地质资料、桩基施工工艺、承载性状、缺陷深度等综合判断。一般普遍存在的“缺陷”就不太会是缺陷，在桩基工程中存在问题的桩毕竟还是占少数。

实例三：一些实测信号

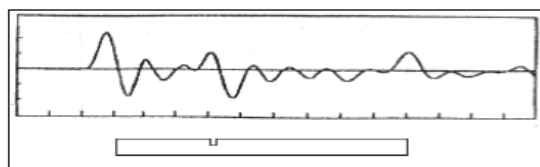
桩型：预制方桩

桩长：12—14米

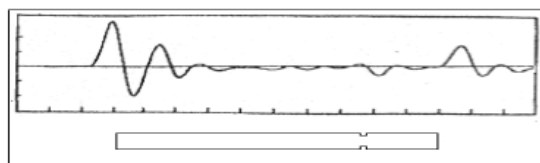
桩径：0.35×0.35米

缺陷：扩径、缩径、离析

特点：缺陷固定不变，预制方桩埋入土中



12米，4.2米处
局部断



14米，10米处
轻度缩径

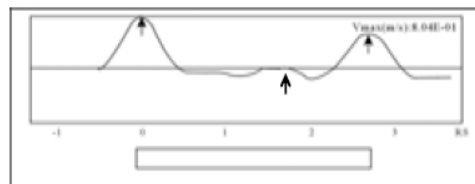
桩型：预制管桩

桩长：5.8米

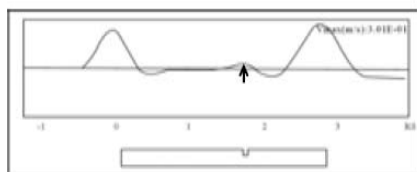
桩径：0.35米

缺陷位置：3.5米

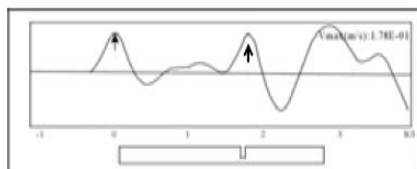
特点：裂纹面不断增大



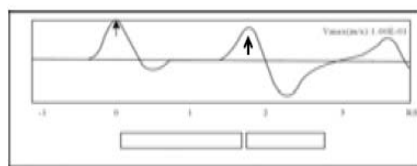
3.5m处表面存在裂纹



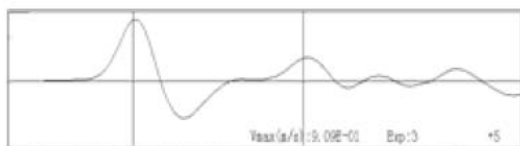
3.5m处1/3截面裂缝



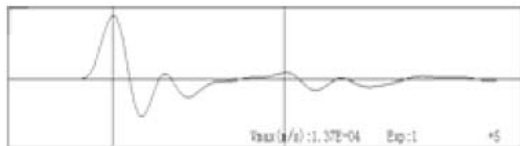
3.5m处2/3截面裂缝



3.5m处全断



172#桩：距桩顶2.8m处缩径，直径为桩径的3/5



174#桩：距桩顶2.8m处缩径，直径为桩径的3/5



左边为
172#桩

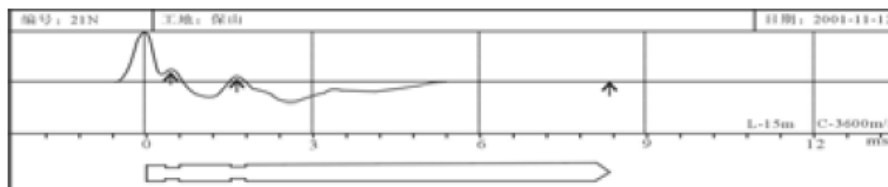
右边为
174#桩

桩型：钻孔灌注桩

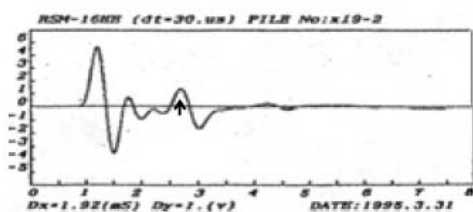
桩长：15米

桩径：0.42米

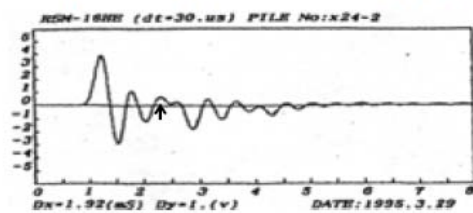
波速：3600米/秒



距桩顶0.9m处轻度缩径，距桩顶3m处严重缩径



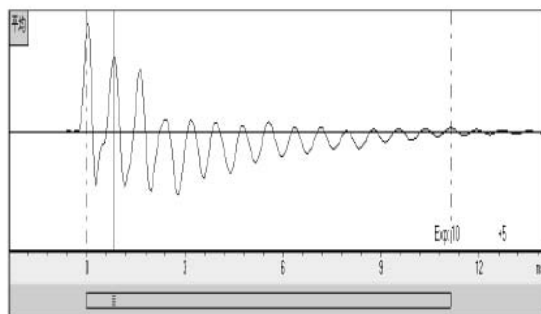
19#桩，桩长15m，4.3m处空洞



24#桩，桩长13.9m，4m处松散

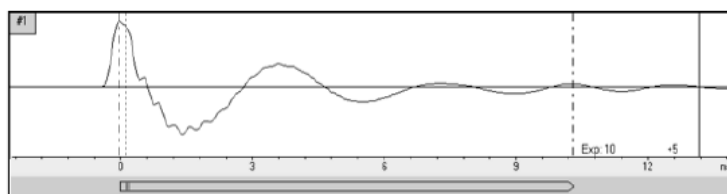


桩径：0.4米



3-11#桩，桩长18m，1.3m处断裂

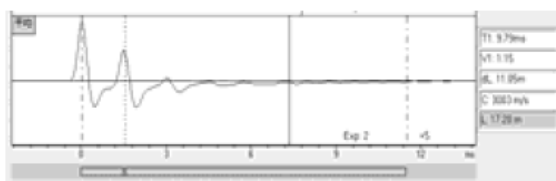




14-11#桩，桩长20m，0.3m
处夹泥



桩型：挖孔桩

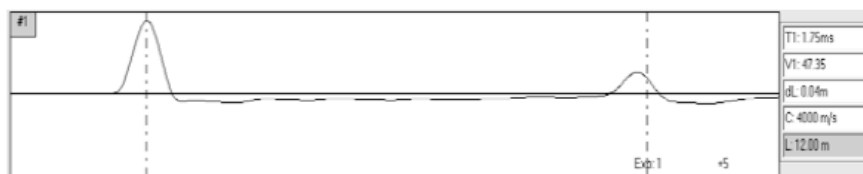


桩长17.2m，3m处严重缩径



开挖验证：2.7米处
缩径，2/3面积无混
凝土

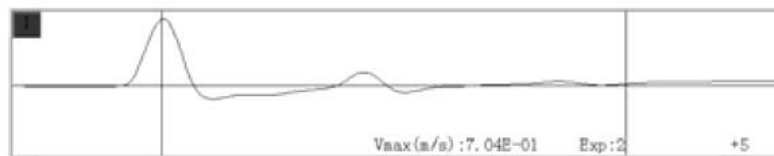
a、完整桩



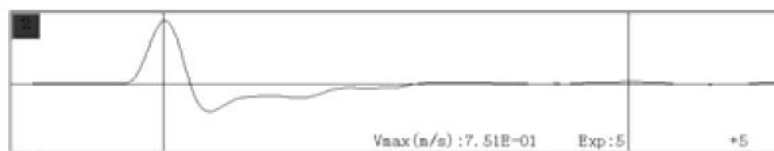
摩擦桩，桩底同向反射



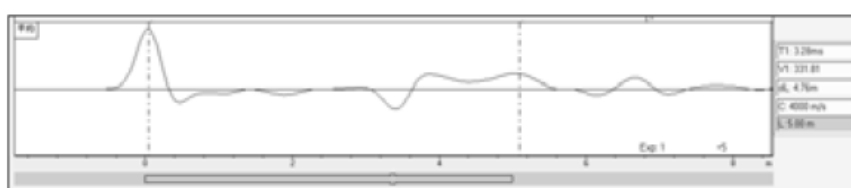
桩长33米，完整端承桩，桩底反向反射



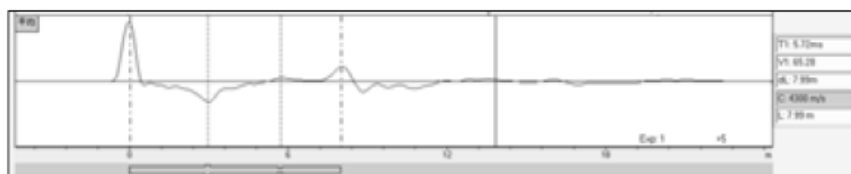
注浆前实测波形



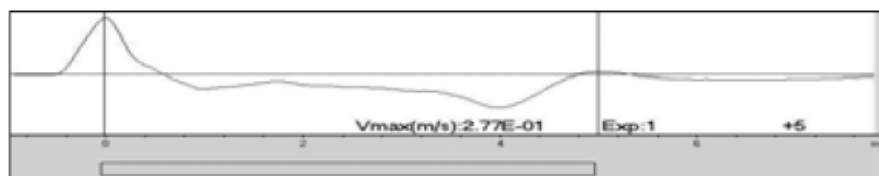
注浆后实测波形



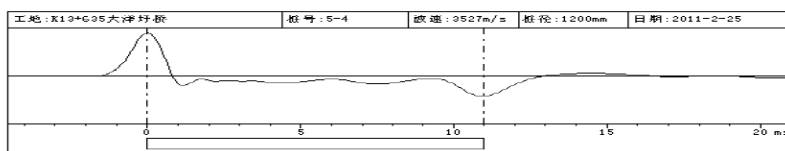
桩长5米，3.4米左右处明显扩径，可见二次同相反射



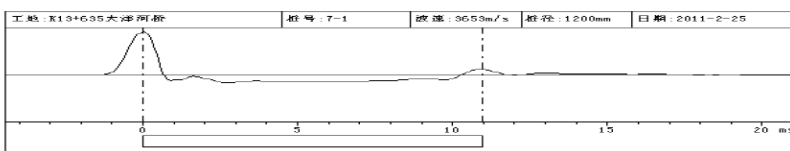
桩长8米，2.8米左右处明显扩径，可见二次同相反射



桩长9.6米，7.8米入岩，嵌岩深度1.8米

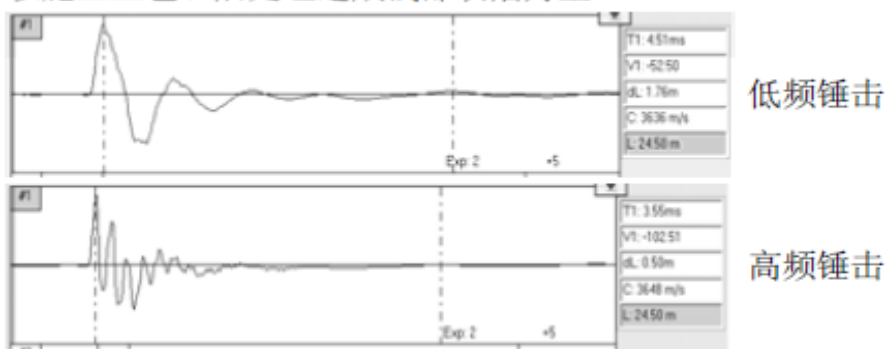


桩底嵌岩良好

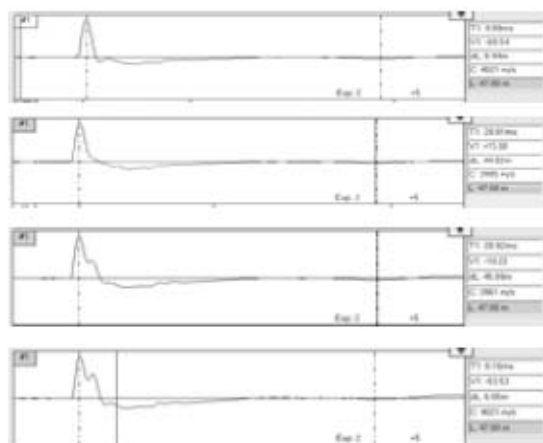


桩底有沉渣

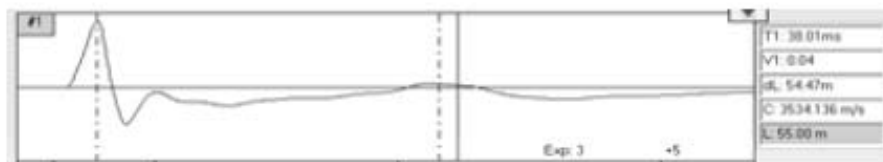
以施工工艺、后处理造成浅部缺陷为主



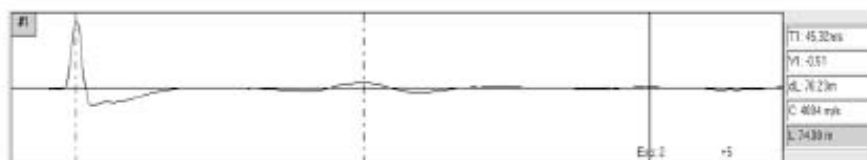
CFG桩浅部裂纹，锯桩头用力过大造成



左边4个波形是
同一根桩在四
个不同的测试
点得到的信号



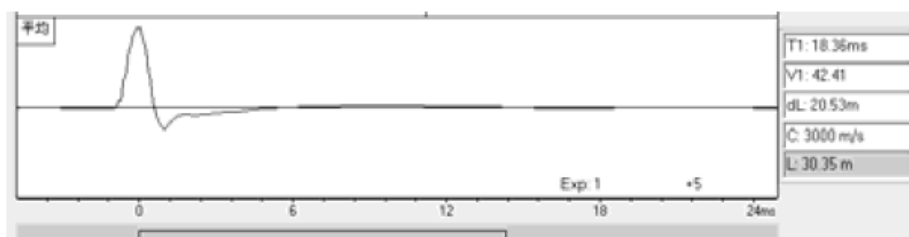
桩长55m，摩擦桩，波速3534m/s
采用14公斤铁头力棒在橡胶垫上锤击测试



桩长72m，波速4000m/s，采用大塑料棒锤击

管桩为什么经常找不到桩底？

L/D较大（应力波损失多）；
管状结构（应力波损失多）；
桩底土的性质发生了改变（桩底土波阻抗增大，减小了与桩身的波阻抗的差距）



土塞效应使桩底阻抗增大，桩底反射更加难以识别