

DB

浙江省工程建设标准

DB 33/T1127-2016

基桩完整性检测技术规程

Technical Specification for integrity testing of foundation piles

浙江省标准《基桩完整性检测技术规程》编制组

二〇一六年八月

浙江省工程建设标准

基桩完整性检测技术规程

Technical Specification for integrity testing of foundation piles

DB 33/T 1127 -2016

主编单位：浙江省建筑设计研究院

浙江大学建筑工程学院

批准单位：浙江省住房和城乡建设厅

施行日期：2017年1月1日

前 言

根据浙江省住房和城乡建设厅《关于确定 2014 年浙江省工程建设标准修订计划的通知》（建设发[2014]276 号文件）的要求，由浙江省建筑设计研究院会同省内有关高校、科研、设计、勘察、质量检测等单位，对《基桩低应变动力检测技术规程》DBJ 10-4-98 进行了修订。修订后的规程保留了原规程中的反射波法和超声波法（声波透射法），删除了机械阻抗法和球击法，新增了高应变法、钻芯法、孔中摄像法、旁孔透射波法等基桩完整性检测方法，同时将修订后的规程更名为《基桩完整性检测技术规程》。规程修编过程中，编制组进行了广泛深入的调查研究，总结了国内外已有科研成果和工程实践经验，经多方面征求意见、反复讨论和修改，最终经审查定稿。

修订后的规程共分 9 章，内容包括：总则、术语和符号、基本规定、低应变反射波法、钻芯法、声波透射法、高应变法、孔中摄像法、旁孔透射波法及相关附录与条文说明。

本规程修订的主要技术内容是：

- 1、新增钻芯法、高应变法、孔中摄像法、旁孔透射波法等 4 种基桩完整性检测方法，对上述 4 种基桩完整性检测方法的适用范围、仪器设备、现场检测、测试数据分析与判定等作了具体规定；
- 2、进一步明确各种检测方法的适用范围，规定本规程所列方法仅适用于基桩完整性检测，不适用于基桩承载力检测和评估；
- 3、根据工程实际应用情况，取消原规程中的机械阻抗法和球击法；
- 4、补充针对不同桩型和可能出现的不同缺陷类型等具体情况，选择具体检测方法的原则要求；补充针对复杂情况需采用两种或两种以上检测方法进行相互比对和验证的相关要求；
- 5、原规程中的反射波法改称为低应变反射波法；补充、修改针对打入式预制桩的相关检测要求，补充针对预制空心桩考虑土塞效应影响的相关要求；
- 6、原规程中的超声波法改称为声波透射法；补充、修改声波透射法现场测试、异常数据剔除、数据分析与判定的相关要求；
- 7、修订后的规程名称更名为《基桩完整性检测技术规程》。

本规程由浙江省住房和城乡建设厅负责管理，由浙江省建筑设计研究院负责解释。在执行过程中，如有意见或建议，请寄交：浙江省建筑设计研究院总工程师办公室、浙江省工程建设标准《基桩完整性检测技术规程》管理组（地址：杭州市安吉路 18 号，邮编 310006，邮箱：anjil8@126.com）。

主编单位：浙江省建筑设计研究院

浙江大学建筑工程学院

参编单位：浙江省地球物理技术应用研究所

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司

浙江省建筑科学设计研究院有限公司

杭州市建筑工程质量检测中心有限公司

浙江省工程勘察院

浙江大学建筑设计研究院有限公司

温州市勘察测绘研究院

浙江有色地球物理技术应用研究院

台州市建设工程质量检测中心

主要起草人：杨学林 王奎华 赵竹占 陈文华 姬美秀 周宏伟 楼国长
肖志斌 袁曙辉 张建华 金唤中 周平槐 张永永

主要审查人：陈云敏 益德清 赵宇宏 叶军献 倪士坎 楼新涛
李宏伟 徐和财 王建民 吴慧明 卢建平

目 次

1	总则.....	1
2	术语和符号.....	2
2.1	术语.....	2
2.2	符号.....	2
3	基本规定.....	5
3.1	一般规定.....	5
3.2	检测方法的选择和检测数量.....	5
3.3	验证与扩大检测.....	6
3.4	检测结果评价和检测报告.....	6
4	低应变反射波法.....	8
4.1	一般规定.....	8
4.2	仪器设备.....	8
4.3	现场检测.....	8
4.4	检测数据分析与判定.....	9
5	钻芯法.....	11
5.1	一般规定.....	11
5.2	仪器设备.....	11
5.3	现场钻芯与记录.....	11
5.4	芯样试件截取和加工.....	12
5.5	芯样试件抗压强度试验.....	12
5.6	检测数据分析与判定.....	12
6	声波透射法.....	16
6.1	一般规定.....	16
6.2	仪器设备.....	16
6.3	声测管的埋设.....	16
6.4	现场检测.....	17
6.5	检测数据分析与判定.....	18
7	高应变法.....	24
7.1	一般规定.....	24
7.2	仪器设备.....	24
7.3	现场检测.....	24
7.4	检测数据分析与判定.....	25
8	孔中摄像法.....	28
8.1	一般规定.....	28
8.2	仪器设备.....	28
8.3	现场检测.....	28
8.4	检测数据分析与判定.....	28
9	旁孔透射波法.....	30
9.1	一般规定.....	30
9.2	仪器设备.....	30
9.3	现场检测.....	30
9.4	检测数据分析与判定.....	31
附录 A	钻芯法检测记录表.....	32

附录 B 芯样试件加工、测量和技术要求	33
附录 C 混凝土桩桩头处理	34
本规程用词说明	35
引用标准名录	36
附：条文说明	37

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms and Symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols.....	2
3	Basic Requirements.....	5
3.1	General Requirements	5
3.2	Selection of Test methods and Number of Test Piles	5
3.3	Verification and Extended Tests	6
3.4	Test Results Assessment and Report.....	6
4	Low-strain Reflected Wave Test	8
4.1	General Requirements	8
4.2	Equipments.....	8
4.3	Field Test.....	8
4.4	Test Data Interpretation.....	9
5	Core Drilling Method.....	11
5.1	General Requirements	11
5.2	Equipments.....	11
5.3	Drill core and Record	11
5.4	Interception and Processing of Core Sample	12
5.5	Compressive Strength Testing of Core Specimen.....	12
5.6	Test Data Interpretation.....	12
6	Cross-hole Sonic Logging.....	16
6.1	General Requirements	16
6.2	Equipments.....	16
6.3	Installaion of Access Tubes	16
6.4	Field Test.....	17
6.5	Test Data Interpretation.....	18
7	High-strain Dynamic Test	24
7.1	General Requirements	24
7.2	Equipments.....	24
7.3	Field Test.....	24
7.4	Test Data Interpretation.....	25
8	Pile-hole Photography Method	28
8.1	General Requirements	28
8.2	Equipments.....	28
8.3	Field Test.....	28
8.4	Test Data Interpretation.....	28
9	Parallel Seismic Test	30
9.1	General Requirements	30
9.2	Equipments.....	30
9.3	Field Test.....	30
9.4	Test Data Interpretation.....	31

Appendix A	Record Table of Core Drilling Test.....	32
Appendix B	Processing, Measurement and Requirement of Core Specimens.....	33
Appendix C	Treatment of Concrete Pile Head.....	34
	Explanation of Wording in This Specification	35
	List of Quoted Standards.....	36
Addition:	Explanation of Provisions	37

1 总则

- 1.0.1** 为规范基桩完整性检测技术的应用，做到安全适用、技术先进、数据准确、评价正确，为设计、施工和验收提供可靠依据，结合我省实践经验，制定本规程。
- 1.0.2** 本规程适用于浙江省内建筑和市政基础设施工程基桩的完整性检测与评价。
- 1.0.3** 基桩完整性检测应根据本规程所列各种检测方法的技术特点和适用范围，结合工程地质条件、基桩桩型、施工工艺及施工质量可靠性等因素，合理选择检测方法。
- 1.0.4** 基桩完整性检测除应符合本规程规定外，尚应符合国家及浙江省现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 基桩 foundation pile

桩基础中的单桩。

2.1.2 桩身完整性 pile integrity

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定性指标。

2.1.3 桩身缺陷 pile defects

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、缩颈、夹泥（杂物）、空洞、蜂窝、松散等现象的统称。

2.1.4 钻芯法 core drilling method

用钻机钻取芯样以检测桩长、桩身缺陷、桩底沉渣厚度以及桩身混凝土的强度、密实性和连续性，判定或鉴别桩端岩土性状的方法。

2.1.5 低应变反射波法 low-strain reflected wave test

采用低能量瞬态激振方式在桩顶激振，实测桩顶部的速度时程曲线，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。

2.1.6 高应变法 high-strain dynamic test

用重锤冲击桩顶，实测桩顶部的速度和力时程曲线，通过波动理论分析，对桩身完整性进行判定的检测方法。

2.1.7 声波透射法 cross-hole sonic logging

在预埋声测管之间发射并接收声波，通过实测声波在混凝土介质中传播的声时、频率和波幅衰减等声学参数的相对变化，对桩身完整性进行检测的方法。

2.1.8 孔中摄像法 pile-hole photography method

沿桩身孔道采用摄像技术对孔壁进行拍摄或照相，观察和识别桩身缺陷及其位置、形式、程度的检测方法。

2.1.9 旁孔透射波法 parallel seismic test

通过在桩顶或承台顶部激振，同时在桩侧附近与桩身轴线平行的钻孔中测量激振脉冲的初至时间和幅度沿孔深的变化情况，从而分析得到桩长和桩身完整性的检测方法。

2.2 符号

2.2.1 抗力和材料性能

c ——桩身一维纵向应力波传播速度（简称桩身波速）；

E ——桩身材料弹性模量；

f_{cor} ——混凝土芯样试件抗压强度；

R_x ——缺陷以上部位土阻力的估计值；

V_c ——桩端范围内桩周土的平均纵波波速；

V_m ——桩身混凝土的纵波波速；

v_t ——声测管材料波速；

v_w ——水的声速；

Z ——桩身截面力学阻抗；

ρ ——桩身材料质量密度。

2.2.2 作用与作用效应

F ——锤击力；

P ——芯样抗压试验测得的破坏荷载；

V ——桩身质点运动速度；

2.2.3 几何参数

D ——桩身直径；

A ——桩身截面积；

D_x ——桩顶在桩端平面投影位置与测试孔之间的水平距离；

d ——芯样试件的平均直径；

d_1 ——声测管外径；

d_2 ——声测管内径；

d' ——换能器外径；

H ——芯样试件的高度；

H_g ——首波到达时间-深度曲线拐点对应的深度；

H_p ——桩身长度；

L ——测点下桩长；

l ——率定时换能器表面净距离；

l' ——检测剖面两声测管的外壁间净距离；

x ——传感器安装点至桩身缺陷的距离；

z ——声测线深度。

2.2.4 计算系数

β ——高应变法桩身完整性系数；

λ ——样本中不同统计个数对应的系数；

2.2.5 其他

A_c ——某检测剖面波幅异常判断的临界值；

A_m ——某检测剖面各声测线的波幅平均值；

A_p ——检测剖面声测线的波幅值；

a ——声测线信号首波峰值；

a_0 ——零分贝信号峰值电压；

C_v ——变异系数；

f ——频率、声波信号主频；

n ——数目、样本数量；

PSD ——声时-深度曲线上相邻两点连线的斜率与声时差的乘积；

s_x ——标准差；

T ——信号周期；

t' ——声测管及耦合水层声时修正值；

t_0 ——仪器系统延迟时间；

t_1 ——速度曲线第一峰对应的时刻；

t ——声时；
 t_i ——时间、声时测量值；
 t_x ——缺陷的速度曲线反射峰对应的时刻；
 ΔT ——速度波第一峰与桩底反射波峰间的时间差；
 Δt_x ——速度波第一峰与缺陷反射波峰间的时间差；
 v_0 ——声速异常判断概率统计值；
 V_{01} ——声速异常小值判断值；
 V_{02} ——声速异常大值判断值；
 v_c ——声速异常判断临界值；
 v_L ——声速低限值；
 v_p ——混凝土试件的声速平均值。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 基桩完整性检测前，应进行现场调查和资料收集、制订检测方案，并符合下列规定：

1 现场调查和资料收集工作内容应包括：收集被检测工程的岩土工程勘察资料、桩基设计文件、施工记录，了解施工工艺和施工中出现的异常情况；委托方的具体要求；检测项目现场实施的可行性等。

2 检测方案内容宜包括工程概况、地基条件、桩基设计要求、施工工艺、检测方法和数量、受检桩选取原则、检测进度以及所需的机械或人工配合。

3.1.2 基桩检测所用仪器设备应在检定或校准的有效期内；基桩检测前，应对仪器设备进行检查调试。

3.1.3 基桩检测开始时间应符合下列规定：

1 当采用低应变反射波法、声波透射法和旁孔透射波法时，受检桩混凝土强度不应低于设计强度的 70%，且不低于 15MPa；

2 当采用钻芯法、高应变法时，受检桩的混凝土龄期应达到 28 天，或桩身混凝土强度达到设计强度要求。

3.1.4 验收检测时，桩身完整性检测应在开挖至基底设计标高后进行。

3.1.5 当发现完整性检测数据异常时，应查找原因，重新检测。

3.1.6 当现场操作环境不符合仪器设备使用要求时，应采取有效的防护措施。

3.2 检测方法的选择和检测数量

3.2.1 基桩完整性检测应根据检测目的、检测方法的适应性、桩基的设计条件、成桩工艺等，按表 3.2.1 合理选择检测方法，并宜采用两种或两种以上检测方法进行相互补充、验证。

表 3.2.1 检测目的及检测方法

检测目的	检测方法
检测桩身缺陷及其位置，判定桩身完整性类别	低应变反射波法
检测灌注桩桩长、桩身混凝土强度、桩底沉渣厚度，判定或鉴别桩端持力层岩土性状，判定桩身完整性类别	钻芯法
检测灌注桩桩身缺陷及其位置，判定桩身完整性类别	声波透射法
检测混凝土桩的桩身完整性，判定桩身缺陷的程度及位置	高应变法
检测空心桩的桩身完整性，或对灌注桩钻芯法进行补充检测	孔中摄像法
检测既有建筑物下非嵌岩桩的桩长及桩身完整性	旁孔透射波法

3.2.2 混凝土桩的桩身完整性检测方法选择，应符合第 3.2.1 条的规定；当一种方法不能全面评价基桩完整性时，应采用两种或两种以上的检测方法。检测数量应符合下列规定：

1 建筑桩基设计等级为甲级，或地基条件复杂、成桩质量可靠性较低的灌注桩工程，检测数量不应少于总桩数的 30%，且不应少于 20 根；其它桩基工程，检测数量不应少于总桩数的 20%，且不应少于 10 根。

2 除符合本条上款规定外，每个柱下承台检测桩数不应少于 1 根。

3 除符合本条 1、2 款规定外，直径大于 800mm 的混凝土嵌岩桩应采用声波透射法或

钻芯法进行检测，检测桩数不得少于总桩数 10%，且不得少于 10 根，每个柱下承台不应少于 1 根。直径不大于 800mm 的桩以及直径大于 800mm 的非嵌岩桩，可根据桩径和桩长的大小，结合桩的类型和当地经验采用声波透射法、钻芯法或高应变法进行检测，检测桩数不得少于总桩数 10%，且不得少于 10 根。

3.2.3 当存在下列情况时，应增加检测数量：

- 1 场地地质条件复杂，或存在深厚软弱土层；
- 2 采用挤土桩，且挤土效应明显；
- 3 对桩基施工质量有疑问；
- 4 采用新桩型、新工艺；
- 5 单桩承载要求较高的市政基础设施工程。

3.2.4 桩身完整性检测的受检桩选择，宜符合下列规定：

- 1 施工质量有疑问的桩；
- 2 局部地质条件出现异常的桩；
- 3 设计方认为重要的桩；
- 4 施工工艺不同的桩；
- 5 除本条第 1~2 款指定的受检桩外，宜均匀或随机选择。

3.3 验证与扩大检测

3.3.1 桩身浅部缺陷宜采用开挖验证。

3.3.2 对低应变反射波法检测出桩身或接头存在裂隙的预制桩可采用高应变法验证，预制空心桩或钻孔取芯后的桩可采用孔内摄像法验证。采用孔中摄像法验证检测的比例，对 II 类预应力空心桩宜不小于 10%，对于 III、IV 类预应力空心桩宜不小于 20%。对于其它桩型以能满足验证检测目的为准。

3.3.3 单孔钻芯检测发现桩身混凝土存在质量问题时，宜在同一基桩增加钻孔验证，并根据前、后钻芯结果对受检桩重新评价。

3.3.4 对低应变反射波法检测中不能明确桩身完整性类别的桩或 III、IV 类桩，可根据实际情况采用钻芯法、高应变法、开挖等方法进行验证检测。

3.3.5 当非嵌岩桩桩长超出低应变反射波法的有效桩长范围时，可采用旁孔透射波法进行辅助检测。

3.3.6 当采用低应变反射波法、高应变法和声波透射法检测桩身完整性发现有 III、IV 类桩存在，且检测数量覆盖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，在未检桩中继续扩大检测。当原检测方法为声波透射法时，可改用钻芯法。

3.3.7 当钻芯法检测结果不满足设计要求时，应分析原因并扩大检测。

3.3.8 验证检测或扩大检测采用的方法和检测数量应得到工程建设有关方面的确认。

3.4 检测结果评价和检测报告

3.4.1 桩身完整性检测结果评价，应给出每根受检桩的桩身完整性类别。桩身完整性分类应符合表 3.4.1 的规定，并按本规程第 4 章~第 9 章各检测方法分别规定的技术内容划分。

表 3.4.1 桩身完整性分类表

桩身完整性类别	分类原则
I 类桩	桩身完整
II 类桩	桩身轻微缺陷，不会影响桩身结构承载力的正常发挥

III类桩	桩身明显缺陷，对桩身结构承载力有影响
IV类桩	桩身严重缺陷

3.4.2 检测报告应包括下列内容：

- 1 委托单位名称，工程名称、地点，建设、勘察、设计、监理和施工单位，基础、结构形式，层数，设计要求，检测目的，检测依据，检测数量，检测日期；
- 2 地基条件描述；
- 3 受检桩的桩型、尺寸、桩号、桩位、桩顶标高和其他相关施工记录；
- 4 检测原理、方法，检测仪器设备，检测过程叙述；
- 5 受检桩的检测数据，实测曲线与计算分析曲线、表格和汇总结果；
- 6 与检测内容相应的检测结论。

4 低应变反射波法

4.1 一般规定

4.1.1 本方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。

4.1.2 对桩身截面尺寸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反射波法检测的有效性。

4.2 仪器设备

4.2.1 检测器的主要技术性能指标应符合现行国家行业标准《基桩动测仪》JG/T 3055的有关规定。

4.2.2 激振设备应包括能激发宽脉冲和窄脉冲的力锤和锤垫。

4.3 现场检测

4.3.1 检测前的准备工作应符合下列规定：

- 1 桩身强度应符合本规程第 3.1.3 条第 1 款的规定。
- 2 桩顶面应平整、密实、无浮浆、无残渣，并与桩轴线基本垂直。
- 3 对带有护筒的钻、冲孔灌注桩，应查明并记录护筒直径、长度。
- 4 检测前应现场实测桩头部位的尺寸。

4.3.2 测试参数设定应符合下列规定：

- 1 时域信号记录的时间段长度应在 $2L/c$ 时刻后延续不少于 5ms；
- 2 采样频率宜为 20~100kHz。具体应根据桩长、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 点或总采样时长能满足本条第 1 款的要求。
- 3 桩身波速可根据本地区同类型桩的测试值初步设定。对预制桩宜在打入地下前后的同型号同批次桩中采用现场测试方法对比确定。对土塞高度较高的各类空心桩，应考虑土塞效应对桩身波速的影响，并宜通过现场对比试验方法确定波速。

4 设定桩长应为检测时实际桩顶至桩底的施工桩长，设定桩身截面积应为施工截面积。

4.3.3 测量传感器安装和激振操作应符合下列规定：

1 安装传感器部位的混凝土表面不得凹凸不平且不得有明显裂缝；传感器安装应与桩顶面垂直；用耦合剂粘结时，耦合剂厚度应尽量薄一些，并具有足够的粘结强度。

2 激振点与测量传感器安装位置应避开钢筋笼主筋的影响，且测试时应尽量避免桩头外露钢筋振动的干扰。激振点和传感器安装点距离不宜小于 10cm。

3 激振方向应沿桩轴线方向。

4 激振应采用锤头软、硬程度及重量不同的力锤相结合的方式进行。采用金属锤头时，宜增设锤垫；对于长桩，应采用重量较重而头部较软的力锤或力棒敲击以获取桩底或桩身下部缺陷反射信号，另用较轻且锤头相对较硬的力锤敲击，以获取桩身上部缺陷反射信号。

4.3.4 信号采集和筛选应符合下列规定：

1 根据桩径大小，沿桩中心对称布置 2~4 个安装传感器的检测点；实心桩的其中一个激振点宜选择在桩中心附近，对应的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° （见图 4.3.4）。

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。当桩径大于 800mm 时，激振点不宜少于 2 处；桩径大于等于 1000mm 时激振点不宜少于 3 处。各激振点之间距离不宜小于桩截面半径的二分之一。

3 不同检测点及多次实测时域信号一致性较差时，应分析原因，增加检测点数量。

4 对实测信号反映出桩身存在明显或严重缺陷的桩，激振点和检测点数量宜在本条第 2 款规定基础上适当增加，并应改变二者的相对位置。

5 信号若失真或产生零漂时不得作为判断依据。信号幅值不应超过测试系统的量程。

6 每个检测点记录的有效信号数不宜少于 3 个，并应保证测试信号具有良好重复性。

7 当桩顶速度测试曲线为近似等周期衰减震荡曲线时，应重新处理桩头，确保混凝土密实无裂缝。必要时调整耦合剂，再重新测试。

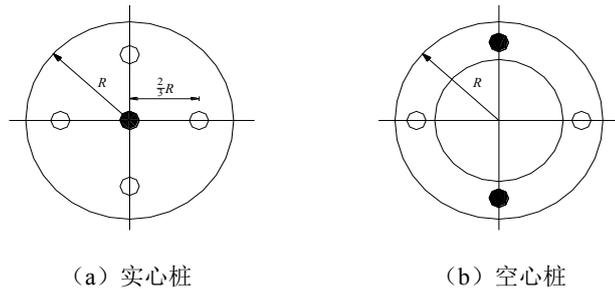


图 4.3.4 传感器安装点、激振（锤击）点布置示意图

○ 传感器安装点 ● 锤击激振点

4.4 检测数据分析与判定

4.4.1 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，在地质条件、设计桩型、成桩工艺相同的基桩中，选取不少于 5 根 I 类桩的桩身波速值按下式计算其平均值：

$$c_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \quad (4.4.1)$$

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值（m/s），且 $|c_i - c_m| / c_m$ 不宜大于 5%；

n ——参加波速平均值计算的基桩数量（ $n \geq 5$ ）。

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实测值，结合桩身混凝土的骨料品种和强度等级综合确定。

3 对于预制桩，宜在打桩过程中做单节桩打入地层前后的波速对比试验来确定波速取值，相同桩型试验桩数应不少于 5 根，波速取所有试验桩波速的平均值。

4.4.2 桩身缺陷位置应按下列公式计算：

$$x = \frac{1}{2000} \cdot \Delta t_x \cdot c \quad (4.4.2)$$

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），无法确定时可采用桩身波速平均值 c_m 值。

4.4.3 桩身完整性类别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、施工情况及当地经验，按本规程表 3.4.1 的规定和表 4.4.3 所列实测时域信号特征进行综合分析判定。判定桩身完整性类别时，应考虑下列因素：

- 1 当由于护筒或其他原因导致桩头尺寸与桩身尺寸明显不一致时，应考虑截面变化处的影响；
- 2 对设计时桩身存在突变截面的桩，应考虑变截面处的反射特征；
- 3 当存在渐变截面情况时，应考虑渐变后截面突变的影响；
- 4 应考虑扩径部位二次同向反射信号的影响；
- 5 应考虑土层软硬交替的影响；
- 6 应考虑大直径管桩土塞顶面的影响。

表 4.4.3 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	2L/c 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现低频大振幅衰减振动，无桩底反射波

注：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阻抗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。

4.4.4 对于嵌岩灌注桩，桩底时域速度反射信号主要为与锤击脉冲同向信号时，应采用钻芯法等方法核验桩端嵌岩情况或采用静载荷试验方法验证其承载力是否满足设计要求。

4.4.5 对多节预制桩在预估接桩深度位置出现异常反射，但又不能判断是否属于正常接桩反射时，可按照本规程第 3.3.2 条和 3.3.4 条进行验证检测。实测信号复杂，无规律，无法对其进行准确评价时，桩身完整性判定宜结合其他检测方法进行。

4.4.6 当按本规程 4.3.3 条第 4 款的规定操作尚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失调情况判断桩身浅部阻抗变化程度。

4.4.7 低应变检测报告应给出桩身完整性检测的实测时域信号曲线，对于判断为 III、IV 类桩的桩应给出不少于三条不同位置的测试曲线。

4.4.8 检测报告除应包括本规程第 3.4.2 条内容外，还应包括：

- 1 桩身波速取值；
- 2 桩身完整性描述、缺陷的位置及桩身完整性类别；
- 3 时域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。

5 钻芯法

5.1 一般规定

5.1.1 本方法适用于检测混凝土灌注桩的桩身混凝土强度、桩身完整性、桩长和桩底沉渣厚度，判定或鉴别桩端持力层岩土性状。

5.1.2 本方法用于检测桩长和桩底沉渣厚度时，桩长径比宜控制在 30 以内。

5.2 仪器设备

5.2.1 钻取芯样宜采用液压操纵的高速钻机，主要技术性能应符合下列规定：

- 1 额定最高转速不低于 790r/min。
- 2 转速调节范围不少于 4 档。
- 3 额定配用压力不低于 1.5MPa。

5.2.2 钻机应配备单动双管钻具以及相应的孔口管、扩孔器、卡簧、扶正稳定器和可捞取松软渣样的钻具；钻杆应顺直，直径不宜小于 50mm。应采用单动双管钻具钻取芯样，严禁采用单动单管钻具钻取芯样。

5.2.3 钻头应根据混凝土设计强度等级选用合适粒度、浓度、胎体硬度的金刚石钻头，且外径不宜小于 100mm。

5.2.4 锯切芯样的锯切机应具有冷却系统和夹紧固定装置。芯样试件端面的补平器和磨平机应满足芯样制作的要求。

5.3 现场钻芯与记录

5.3.1 每根受检桩的钻孔数量、位置及深度应符合下列规定：

1 桩径小于 1.2m 的桩的钻孔数量可为 1~2 个孔，桩径为 1.2~1.6m 的桩的钻孔数量宜为 2 个孔，桩径大于 1.6m 的桩的钻孔数量宜为 3 个孔。

2 当钻芯孔为 1 个时，宜在距桩中心 10~15cm 的位置开孔；当钻芯孔为 2 个或 2 个以上时，开孔位置宜在距桩中心 0.15~0.25 倍桩身直径范围内均匀对称布置。

3 当用于判别桩端持力层性状时，每根受检桩不应少于 1 孔，其钻孔深度应满足设计要求；桩底持力层稳定或已进行超前钻的工程，桩底持力层的钻孔数量和深度可适当减少。

4 对桩长、桩底沉渣、桩端持力层进行验证检测时，受检桩的钻芯孔数宜为 1 孔。

5 当用于对其他方法进行验证检测时，钻孔数量和深度应根据验证要求确定。

5.3.2 钻机设备安装必须周正、稳固、底座水平。钻机立轴中心、天轮中心（天车前沿切点）与孔口中心必须在同一铅垂线上。当桩顶面与钻机底座的垂向距离较大时，应安装孔口管，孔口管应垂直、牢固。钻机在钻芯过程中不应发生倾斜、移位，钻芯孔垂直度偏差不应大于 0.5%。

5.3.3 每回次进尺宜控制在 1.5m 内；钻至桩底时，宜采取适宜的钻芯方法和工艺钻取沉渣并测定沉渣厚度，并采用适宜的方法对桩端持力层岩土性状进行鉴别；当持力层为中、微风化岩石时，宜将桩底 0.5m 左右的混凝土芯样、0.5m 左右的持力层以及沉渣纳入同一回次。

5.3.4 提钻卸取芯样时，应拧卸钻头和扩孔器，严禁敲打卸芯。钻取的芯样应按回次顺序放进芯样盒中；钻机操作人员应按本规程附录 A 附表 A.0.1-1 的格式及时记录钻进情况和钻进异常情况，对芯样质量进行初步描述；检测人员应按本规程附录 A 附表 A.0.1-2 的格式对芯样混凝土、桩底沉渣以及桩端持力层详细编录。

5.3.5 钻芯结束后，截取芯样试件前，应对芯样全貌和现场检测标示牌一起进行拍照，现场检测标示牌应包括工程名称、桩号、桩长、钻芯孔号、孔深、检测单位名称、检测人员、现场见证单位名称、见证人员等基本信息。

5.3.6 当单桩质量评价满足设计要求时，应从钻芯孔孔底往上用水泥浆回灌封闭钻芯孔；否则应封存钻芯孔，留待处理。取样完毕，剩余的芯样应移交委托单位妥善保存。

5.4 芯样试件截取和加工

5.4.1 抗压强度试验混凝土芯样截取应符合下列规定：

1 当桩长小于 10m 时，每孔截取 2 组芯样；当桩长为 10~30m 时，每孔截取 3 组芯样；当桩长大于 30m 时，每孔截取不少于 4 组芯样；

2 芯样应在桩顶设计标高以下开始截取，上部芯样位置距桩顶设计标高不宜大于 1 倍桩径或 2m，下部芯样位置距桩底不宜大于 1 倍桩径或 2m，中间芯样宜等间距截取；

3 缺陷位置能取样时，应截取一组芯样进行混凝土抗压试验；

4 如同一基桩的钻芯孔数大于 1 个，且某一孔在某深度存在缺陷时，应在其他孔的该深度处截取一组芯样进行混凝土抗压试验。

5.4.2 当桩端持力层为中、微风化岩层且岩芯可制作成试件时，应在接近桩底部位 1 倍桩径或 1m 内截取岩石芯样；如遇分层岩性时宜在各层取样。岩石芯样试件加工和测量按附录 B 进行。

5.4.3 每组混凝土芯样应制作 3 个抗压芯样试件，芯样试件的高度与直径之比宜为 1.0。混凝土芯样试件应按附录 B 进行加工和测量。

5.5 芯样试件抗压强度试验

5.5.1 混凝土芯样试件的抗压强度试验应按现行国家标准《普通混凝土力学性能试验方法》GB/T 50081 中圆柱体试件抗压强度试验规定执行。

5.5.2 抗压强度试验中，当发现芯样试件平均直径小于 2 倍试件内混凝土粗骨料最大粒径，且强度值异常时，该试件的强度值不得参与统计平均。

5.5.3 混凝土芯样试件抗压强度应按下列公式计算：

$$f_{\text{cor}} = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (5.5.3)$$

式中： f_{cor} ——混凝土芯样试件抗压强度 (MPa)，精确至 0.1MPa；

P ——芯样试件抗压试验测得的破坏荷载 (N)；

d ——芯样试件的平均直径 (mm)，精确至 0.5mm。

5.5.4 桩底岩芯单轴抗压强度试验以及岩石单轴抗压强度标准值的确定，宜按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 执行。

5.6 检测数据分析与判定

5.6.1 每根受检桩混凝土芯样试件抗压强度的确定应符合下列规定：

1 每组混凝土芯样试件抗压强度检测值应按一组 3 块试件强度值的平均值确定。

2 同一受检桩同一深度部位有二组或二组以上混凝土芯样试件抗压强度检测值时，取其平均值作为该桩该深度处混凝土芯样试件抗压强度检测值；

3 受检桩中不同深度位置的混凝土芯样试件抗压强度检测值中的最小值作为该桩混凝土芯样试件抗压强度检测值。

5.6.2 桩端持力层性状应根据芯样特征、岩石芯样单轴抗压强度试验、动力触探或标准贯入试验结果，进行综合判定或鉴别。

5.6.3 桩身完整性类别应结合钻芯孔数、现场混凝土芯样特征、芯样试件抗压强度试验结果，按本规程表 3.4.1 的规定和表 5.6.3 所列的特征进行综合判定。

表 5.6.3 钻芯法桩身完整性判定表

类别	特征		
	单孔	两孔	三孔
I	混凝土芯样连续、完整、胶结好、芯样侧表面光滑、骨料分布均匀，芯样呈长柱状、断口吻合		
	芯样侧表面仅见少量气孔	局部芯样侧表面有少量气孔、蜂窝麻面、沟槽，但在另一孔同一深度部位的芯样中未出现，否则应判为II类	局部芯样侧表面有少量气孔、蜂窝麻面、沟槽，但三孔同一深度部位的芯样中未同时出现，否则应判为II类
II	混凝土芯样连续、完整、胶结较好，芯样侧表面较光滑，骨料分布基本均匀，芯样呈柱状，端口基本吻合。有下列情况之一：		
	<p>1、局部芯样侧表面有蜂窝麻面、沟槽或较多气孔；</p> <p>2、芯样侧表面蜂窝麻面严重、沟槽连续或局部芯样骨料分布极不均匀，但对应部位的混凝土芯样试件抗压强度检测值满足设计要求，否则应判为III类。</p>	<p>1、芯样侧表面有较多气孔、严重蜂窝麻面、连续沟槽或局部混凝土芯样骨料分布不均匀，但在两孔同一深度部位的芯样中未同时出现；</p> <p>2、芯样侧表面有较多气孔、严重蜂窝麻面、连续沟槽或局部混凝土芯样骨料分布不均匀，且在另一孔同一深度部位的芯样中同时出现，但该深度部位的混凝土芯样试件抗压强度检测值满足设计要求，否则应判为III类；</p> <p>3、任一孔局部混凝土芯样破碎段长度不大于 10cm，且在另一孔同一深度部位的局部混凝土芯样的外观判定完整性类别为 I 类或 II 类，否则应判为III类或IV类。</p>	<p>1、芯样侧表面有较多气孔、严重蜂窝麻面、连续沟槽或局部混凝土芯样骨料分布不均匀，但在三孔同一深度部位的芯样中未同时出现；</p> <p>2、芯样侧表面有较多气孔、严重发蜂窝麻面、连续沟槽或局部混凝土芯样骨料分布不均匀，且在任两孔或三孔同一深度部位的芯样中同时出现，但该深度部位的混凝土芯样试件抗压强度检测值满足设计要求，否则应判为III类；</p> <p>3、任一孔局部混凝土芯样破碎段长度不大于 10cm，且在另两孔同一深度的局部混凝土芯样的外观判定完整性类别为 I 类或 II 类，否则应判为III类或IV类。</p>

(续表 5.6.3)

类别	特征		
	单孔	两孔	三孔
III	大部分混凝土芯样胶结较好, 无松散、夹泥现象。 有下列情况之一:		大部分混凝土芯样胶结较好。有下列情况之一:
	1、芯样不连续、多呈短柱状或块状; 2、局部混凝土芯样破碎段长度不大于 10cm	1、芯样不连续、多呈短柱状或块状; 2、任一孔局部混凝土芯样破碎段长度大于 10cm 但不大于 20cm, 且另一孔的同一深度部位的局部混凝土芯样的外观判定完整性类别为 I 类或 II 类, 否则应判为 IV 类	1、芯样不连续、多呈短柱状或块状; 2、任一孔局部混凝土芯样破碎段长度大于 10cm 但不大于 30cm, 且另两孔的同一深度部位的局部混凝土芯样的外观判定完整性类别为 I 类或 II 类, 否则应判为 IV 类; 3、任一孔局部混凝土芯样松散段长度不大于 10cm, 且另两孔的同一深度部位的局部混凝土芯样的外观判定完整性类别为 I 类或 II 类, 否则应判为 IV 类;
IV	有下列情况之一:		
	1、因混凝土胶结质量差而难以钻进; 2、混凝土芯样任一段松散或夹泥; 3、局部混凝土芯样破碎段长度大于 10cm	1、任一孔因混凝土胶结质量差而难以钻进; 2、混凝土芯样任一段松散或夹泥; 3、任一孔局部混凝土芯样破碎段长度大于 20cm; 4、两孔在同一深度部位的混凝土芯样破碎	1、任一孔因混凝土胶结质量差而难以钻进; 2、混凝土芯样任一段松散或夹泥段长度大于 10cm; 3、任一孔局部混凝土芯样破碎段长度大于 30cm; 4、其中两孔在同一深度部位的混凝土芯样破碎、松散或夹泥

注: 当上一缺陷底部位置标高与下一缺陷顶部位置标高的高差小于 30cm 时, 可认定两缺陷处于同一深度部位。

5.6.4 成桩质量评价应单根受检桩进行。当出现下列情形之一时, 应判定该受检桩不满足设计要求:

- 1 受检桩混凝土芯样试件抗压强度检测值小于混凝土设计强度等级的桩;
- 2 桩长、桩底沉渣厚度不满足设计要求的桩;
- 3 桩底持力层岩土性状(强度)或厚度未达到设计要求的桩。

当桩基设计资料未有具体规定时，应按国家现行标准判定成桩质量。

5.6.5 钻芯孔偏出桩外时，应仅对钻取芯样部分进行评价。

5.6.6 检测报告除应包括本规程第 3.4.2 条内容外，还应包括：

- 1 钻芯取样检测目的，钻芯所用设备及抗压试验设备情况；
- 2 检测桩数、钻孔数量、开孔位置，架空高度、混凝土芯进尺、持力层进尺、总进尺，混凝土试件组数、岩石试件个数、圆锥动力触探或标准贯入试验结果；
- 3 按本规程附录 A 附表 A.0.1-3 的格式编制的每孔柱状图；
- 4 芯样单轴抗压强度试验结果；
- 5 现场芯样彩色照片；
- 6 检测异常情况说明。

6 声波透射法

6.1 一般规定

6.1.1 本方法适用于桩径不小于 600mm 的混凝土灌注桩的桩身完整性检测，判定桩身缺陷的位置、范围和程度。

6.1.2 当出现下列情况之一时，不得采用本方法对整桩的桩身完整性类别进行评价：

- 1 声测管未沿桩身通长配置；
- 2 声测管堵塞导致检测数据不全；
- 3 声测管数量不符合本规程第 6.3.2 条的规定。

6.2 仪器设备

6.2.1 换能器应符合下列规定：

- 1 换能器应采用圆柱状径向换能器，其沿径向振动应无指向性；
- 2 外径应小于声测管内径，有效工作段长度不大于 150mm；
- 3 谐振频率应为 30kHz~60kHz，当接收信号较弱时，宜选用带有前置放大器的接收换能器；
- 4 水密性应满足 1MPa 水压不渗水；对于桩长超过 100m 的超长桩，应选用水密性要求更高的换能器；
- 5 换能器连接导线上应有深度标记，其刻度偏差不应大于 10mm，换能器两端宜安装扶正器。扶正器的尺寸应与声测管内径相适应。

6.2.2 声波检测仪应符合下列规定：

- 1 实时显示和记录接收信号时程曲线以及频率测量或频谱分析；
- 2 最小采样间隔应不大于 0.5 μ s，系统频带宽度应为 1kHz~200kHz，声波幅度测量相对误差应小于 5%，系统最大动态范围不得小于 100dB；
- 3 声波发射脉冲应为阶跃或矩形脉冲，电压幅值应为 200V~1000V；
- 4 首波实时显示；
- 5 自动记录声波发射和接受换能器深度位置。

6.3 声测管的埋设

6.3.1 声测管埋设应符合下列规定：

- 1 声测管内径应大于换能器外径，宜为 45~55mm，壁厚不宜小于 2mm；
- 2 声测管材料应具有足够的径向刚度，声测管材料的温度系数应与混凝土接近；
- 3 声测管应下端封闭，上端加盖、管内无异物，声测管连接处应平顺过渡，并采取有效措施防止水泥浆进入声测管内；
- 4 声测管管口应高出混凝土顶面 100mm 以上，且各声测管管口高度宜一致；
- 5 浇灌混凝土前应将声测管有效固定，每节声测管与钢筋笼之间的连接点不应少于 3 处，声测管之间应相互平行；

6.3.2 声测管应沿钢筋笼内侧呈对称形状均匀布置（见图 6.3.2）并依次编号。声测管的埋设数量应满足下列规定：

- 1 桩径不大于 800mm 时，不得少于 2 根声测管；
- 2 桩径大于 800mm 且不大于 1600mm 时，不得少于 3 根声测管；

- 3 桩径大于 1600mm 且不大于 2500mm 时，不得少于 4 根声测管；
- 4 桩径大于 2500mm 时，宜增加声测管数量。

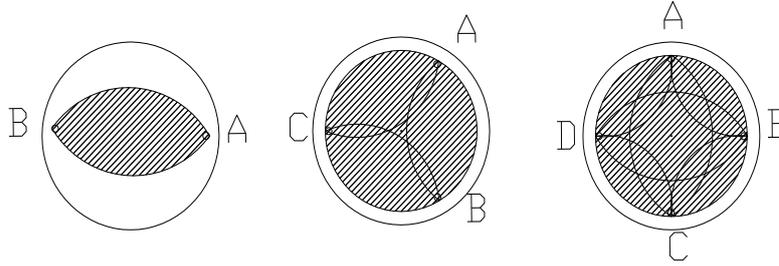


图 6.3.2 声测管埋设示意图

注：检测剖面分组（检测剖面序号为 j ）分别为：2 根管时，AB 剖面（ $j=1$ ）；3 根管时，AB 剖面（ $j=1$ ），BC 剖面（ $j=2$ ），CA 剖面（ $j=3$ ）；4 管时，AB 剖面（ $j=1$ ），BC 剖面（ $j=2$ ），CD 剖面（ $j=3$ ），DA 剖面（ $j=4$ ），AC 剖面（ $j=5$ ），BD 剖面（ $j=6$ ）。

6.4 现场检测

6.4.1 检测前的准备工作应符合下列规定要求：

1 采用率定法确定仪器系统延迟时间，方法是将发射、接受换能器平行置于清水中，逐渐改变点源距离并测量相应声时，记录不少于 4 个点的声时数据并作线性回归的时距曲线。

$$t = t_0 + b \cdot l \quad (6.4.1-1)$$

式中： t ——声时（ μs ）；

t_0 ——仪器系统延迟时间（ μs ）；

b ——直线斜率（ $\mu\text{s}/\text{mm}$ ）；

l ——换能器表面净距离（ mm ）。

2 计算声测管及耦合水层声时修正值。

$$t' = \frac{d_1 - d_2}{v_t} + \frac{d_2 - d'}{v_w} \quad (6.4.1-2)$$

式中： d_1 ——声测管外径（ mm ）；

d_2 ——声测管内径（ mm ）；

d' ——换能器外径（ mm ）；

v_t ——声测管材料波速（ km/s ）；

v_w ——水的声速（ km/s ）；

t' ——声测管及耦合水层声时修正值（ μs ）。

3 在桩顶测量各声测管外壁间径向或最短净距离，测量精度 1mm；

4 检查声测管畅通情况，将各声测管内注满清水。

6.4.2 现场平测与斜测应符合下列规定要求：

1 发射与接收换能器应通过深度标志分别置于两根声测管中；

2 发射和接收换能器应始终保持相同深度或固定高差，其累计相对高差变化值不宜大于 25mm，且当斜测时两个换能器中点连线的水平夹角不应大于 30° 。

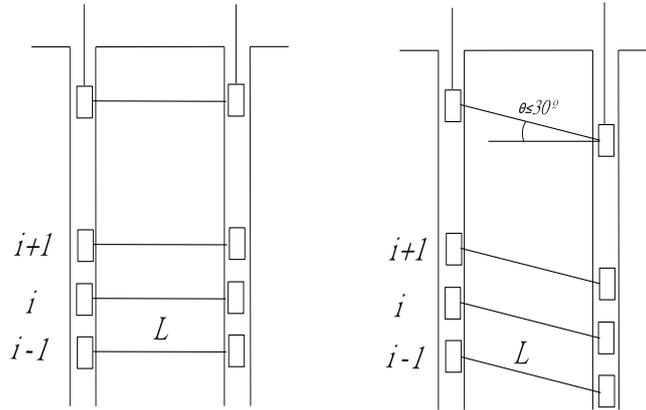


图 6.4.2 平测与斜测示意图

3 声波发射和接收换能器应从桩底向上同步提升，声测线间距不应大于 100mm；提升过程中，应校核换能器的深度和校正换能器的高差，并确保测试波形的稳定性，提升速度不宜大于 0.5m/s；

4 应实时显示、记录每条声测线的信号时程曲线，并读取首波声时、幅值；当需要采用信号主频值作为异常声测线辅助判据时，尚应读取信号的主频值；保存检测数据的同时，应保存波列图信息；

5 同一检测剖面的声测线间距、声波发射电压与仪器设置参数应保持不变。

6.4.2 在桩身质量可疑的声测线附近，应采用增加声测线或采用扇形扫测、交叉扫测、CT 影像技术等方式，进行复测和加密测试，确定缺陷的位置和空间分布范围，排除因声测管耦合不良等非桩身缺陷因素导致的异常声测线。采用扇形扫测时，两个换能器中点连线的水平夹角不应大于 40°。

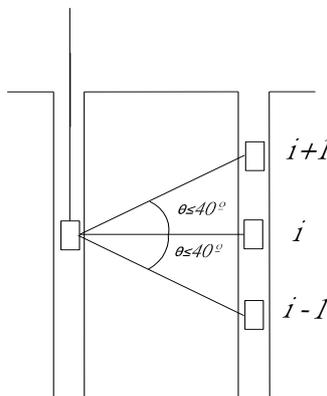


图 6.4.3 扇形扫测示意图

6.5 检测数据分析与判定

6.5.1 当因声测管倾斜导致声速数据有规律的偏高或偏低变化时，应首先对管距进行合理修正，然后对数据进行统计分析。当实测数据明显偏离正常值而又无法进行合理修正时，检测数据不得作为评价桩身完整性的依据。

6.5.2 平测时各测线的声时、声速、波幅与主频，应根据现场检测数据按下列各式计算，并绘制声速-深度曲线和波幅-深度曲线，需要时也可绘制辅助的主频-深度曲线。

$$t_{ci}(j) = t_i(j) - t_0 - t' \quad (6.5.2-1)$$

$$v_i(j) = \frac{l'(j)}{t_{ci}(j)} \quad (6.5.2-2)$$

$$A_{pi}(j) = 20 \lg \frac{a_i(j)}{a_0} \quad (6.5.2-3)$$

$$f_i(j) = \frac{1000}{T_i(j)} \quad (6.5.2-4)$$

式中： i ——声测线编号，应对每个检测剖面自下而上（或自上而下）连续编号；

j ——检测剖面编号，按规程 6.3.2 条规定进行；

$t_{ci}(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线声时(μs)；

$t_i(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线测量值(μs)；

t_0 ——仪器系统延迟时间(μs)；

t' ——声测管及耦合水层声时修正值(μs)；

$l'(j)$ ——第 j 检测剖面两声测管的外壁间净距离 (mm)，当两声测管平行时，可取两声测管管口的外壁间净距离；斜测时， $l'(j)$ 为声波发射与接受换能器各自中点对应的声测管外壁处之间的净距离，可由桩顶面两声测管的外壁间净距离和发射接收换能器的高差计算得到；

$v_i(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线声速 (km/s)；

$A_{pi}(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线的首波幅值 (dB)；

$a_i(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线信号首波峰值 (V)；

a_0 ——零分贝信号幅值 (V)；

$f_i(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线信号主频值(kHz)，也可由信号频谱分析求得；

$T_i(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线信号周期(μs)。

6.5.3 当采用平测或斜测时，第 j 检测剖面的声速异常判断概率统计值应按下列方法确定：

1 将第 j 检测剖面各声测线的声速值 $v_i(j)$ 由大到小依次按以下顺序排列：

$$\begin{aligned} v_1(j) \geq v_2(j) \geq \dots v_k(j) \geq \dots v_{i-1}(j) \geq v_i(j) \geq v_{i+1}(j) \geq \dots \\ v_{n-k}(j) \geq \dots v_{n-1}(j) \geq v_n(j) \end{aligned} \quad (6.5.3-1)$$

式中： $v_i(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线声速， $i=1,2,\dots,n$ ；

n ——第 j 检测剖面检测线总数；

k ——拟去掉的低声速值的数据个数， $k=1,2,\dots,n$ ；

k' ——拟去掉的高声速值的数据个数， $k'=1,2,\dots,n$ ；

2 对逐一去掉的 $v_i(j)$ 中的 k 个最小数值和 k' 个最大数值后的其余数据，按以下公式进行计算：

$$v_{01}(j) = v_m(j) - \lambda \cdot s_x(j) \quad (6.5.3-2)$$

$$v_{02}(j) = v_m(j) + \lambda \cdot s_x(j) \quad (6.5.3-3)$$

$$v_m(j) = \frac{1}{n-k-k'} \sum_{i=k'+1}^{n-k} v_i(j) \quad (6.5.3-4)$$

$$s_x(j) = \sqrt{\frac{1}{n-k-k'-1} \sum_{i=k'+1}^{n-k} (v_i(j) - v_m(j))^2} \quad (6.5.3-5)$$

$$C_v(j) = s_x(j) / v_m(j) \quad (6.5.3-6)$$

式中： $v_{01}(j)$ ——第 j 检测剖面声速异常小值判断值；
 $v_{02}(j)$ ——第 j 检测剖面声速异常大值判断值；
 $v_m(j)$ —— $(n-k-k')$ 个数据的平均值；
 $s_x(j)$ —— $(n-k-k')$ 个数据的标准差；
 $C_v(j)$ —— $(n-k-k')$ 个数据的变异系数；
 λ ——由表 6.5.3 得的与 $(n-k-k')$ 相对应的系数。

3 按照 $k=0$ 、 $k'=0$ 、 $k=1$ 、 $k'=1$ 、 $k=2$ 、 $k'=2$ ，……的顺序，将参加统计的数列的最小数据 $v_{n-k}(j)$ 与异常小值判断值 $v_{01}(j)$ 进行比较，当 $v_{n-k}(j)$ 小于等于 $v_{01}(j)$ 时剔除最小数据；将最大数据 $v_{k'+1}(j)$ 与异常大值判断值 $v_{02}(j)$ 进行比较，当 $v_{k'+1}(j)$ 大于等于 $v_{02}(j)$ 时剔除最大数据；每次剔除一个数据，对剩余数据构成的数列，重复式 (6.5.3-2) ~ (6.5.3-5) 的计算步骤，直至下列两式成立：

$$v_{n-k}(j) > v_{01}(j) \quad (6.5.3-7)$$

$$v_{k'+1}(j) < v_{02}(j) \quad (6.5.3-8)$$

表 6.5.3 统计数据个数与对应的 λ 值

$n-k-k'$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	20
λ	1.28	1.33	1.38	1.43	1.47	1.50	1.53	1.56	1.59	1.64
$n-k-k'$	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
$n-k-k'$	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
$n-k-k'$	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
$n-k-k'$	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
$n-k-k'$	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145
λ	2.33	2.34	2.36	2.38	2.39	2.41	2.42	2.43	2.45	2.46
$n-k-k'$	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
$n-k-k'$	300	320	340	360	380	400	420	440	470	500
λ	2.72	2.74	2.76	2.77	2.79	2.81	2.82	2.84	2.86	2.88
$n-k-k'$	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
λ	2.91	2.94	2.96	2.98	3.00	3.02	3.04	3.06	3.08	3.09
$n-k-k'$	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000
λ	3.12	3.14	3.17	3.19	3.21	3.23	3.24	3.26	3.28	3.29

4 第 j 检测剖面声速异常判断概率统计值，应按下式计算：

$$v_0(j) = \begin{cases} v_m(j)(1-0.015\lambda) & \text{当 } C_v(j) < 0.015 \text{ 时} \\ v_{01}(j) & \text{当 } 0.015 \leq C_v(j) \leq 0.045 \text{ 时} \\ v_m(j)(1-0.045\lambda) & \text{当 } C_v(j) > 0.045 \text{ 时} \end{cases} \quad (6.5.3-9)$$

式中： $v_0(j)$ ——第 j 检测剖面声速异常判断概率统计值。

6.5.4 受检桩的声速异常判断临界值，应按下列方法确定：

1 结合预留同条件试件或钻芯法获取的芯样试件的抗压强度与声速对比试验，分别确定桩身混凝土的声速低限值 v_L 和混凝土试件的声速平均值 v_p 。若无抗压强度与声波对比试验数据，则取同场地同桩型声速无异常的不少于 3 根桩所有检测剖面的桩身混凝土声速最低值的平均值为声速低限值 v_L ，取各剖面平均值的平均值作为桩身混凝土声速的平均值 v_p 。

2 当 $v_0(j)$ 大于 v_L 且小于 v_p 时，

$$v_c(j) = v_0(j) \quad (6.5.4)$$

式中： $v_c(j)$ ——第 j 检测剖面声速异常判断临界值；

$v_0(j)$ ——第 j 检测剖面声速异常判断概率统计值。

3 当 $v_0(j)$ 小于等于 v_L 或 $v_0(j)$ 大于等于 v_p 时，应分析原因；第 j 检测剖面的声速异常判断临界值可按下列情况的声速异常判断临界值综合确定：

- 1) 同一根桩的其他检测剖面的声速异常判断临界值；
- 2) 与受检桩属同一工程、相同桩型且混凝土质量较稳定的其他桩的声速异常判断临界值。

4 对只有单个检测剖面的桩，其声速异常判断临界值等于检测剖面声速异常判断临界值；对具有三个及三个以上检测剖面的桩，应取各个检测剖面声速异常判断临界值的算术平均值，作为该桩各声测线的声速异常判断临界值。

6.5.5 声速 $v_i(j)$ 异常应按下列式判定：

$$v_i(j) \leq v_c \quad (6.5.5)$$

6.5.6 波幅异常判断的临界值，应按下列公式计算：

$$A_m(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_{pi}(j) \quad (6.5.6-1)$$

$$A_c(j) = A_m(j) - 6 \quad (6.5.6-2)$$

波幅 $A_{pi}(j)$ 异常应按下列式判定：

$$A_{pi}(j) < A_c(j) \quad (6.5.6-3)$$

式中： $A_m(j)$ ——第 j 检测剖面各声测线的波幅平均值（dB）；

$A_{pi}(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线的波幅值（dB）；

$A_c(j)$ ——第 j 检测剖面波幅异常判断的临界值（dB）；

n ——第 j 检测剖面的声测线总数。

6.5.7 当采用信号主频值作为辅助异常声测线判据时，主频—深度曲线上主频值明显降低的声测线可判定为异常。

6.5.8 采用斜率法作为辅助异常声测线判据时，声时—深度曲线上相邻两点的斜率与声时差的乘积 PSD 值应按下列公式计算。当 PSD 在某深度处突变时，宜结合波幅变化情况进行异常声测线判定。

$$PSD(j,i) = \frac{[t_{ci}(j) - t_{ci-1}(j)]^2}{z_i - z_{i-1}} \quad (6.5.8)$$

式中： PSD ——声时-深度曲线上相邻两点的斜率与声时差的乘积（ $\mu s^2/m$ ）；

$t_{ci}(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线声时(μs)；

$t_{ci-1}(j)$ ——第 j 检测剖面第 $i-1$ 声测线声时(μs)；

z_i ——第 i 声测线深度（ m ）；

z_{i-1} ——第 $i-1$ 声测线深度（ m ）；

6.5.9 桩身缺陷的空间分布范围，可根据下列情况判定：

- 1 桩身同一深度上各检测剖面桩身缺陷的分布；
- 2 复测和加密测试的结果。

6.5.10 桩身完整性类别应结合桩身缺陷处声测线的声学特征、缺陷的空间分布范围，按本规程表 3.4.1 和表 6.5.10 所列特征进行综合判定。

表 6.5.10 桩身完整性判定

类别	特 征
I	所有声测线声学参数无异常，接收波形正常； 存在声学参数轻微异常、波形轻微畸变的异常声测线，异常声测线在任一检测剖面的任一区段内纵向不连续分布，且在任一深度横向分布的数量小于检测剖面数量的 50%。
II	存在声学参数轻微异常、波形轻微畸变的异常声测线，异常声测线在一个或多个检测剖面的一个或多个区段内纵向连续分布，或在一个或多个深度横向分布的数量大于或等于检测剖面数量的 50%； 存在声学参数明显异常、波形明显畸变的异常声测线，异常声测线在任一检测剖面的任一区段内纵向不连续分布，且在任一深度横向分布的数量小于检测剖面数量的 50%。
III	存在声学参数明显异常、波形明显畸变的异常声测线，异常声测线在一个或多个检测剖面的一个或多个区段内纵向连续分布，但在任一深度横向分布的数量小于检测剖面数量的 50%； 存在声学参数明显异常、波形明显畸变的异常声测线，异常声测线在任一检测剖面的任一区段内纵向不连续分布，但在一个或多个深度横向分布的数量大于或等于检测剖面数量的 50%； 存在声学参数严重异常、波形严重畸变或声速低于低限值的异常声测线，异常声测线在任一检测剖面的任一区段内纵向不连续分布，且在任一深度横向分布的数量小于检测剖面数量的 50%。
IV	存在声学参数明显异常、波形明显畸变的异常声测线，异常声测线在一个或多个检测剖面的一个或多个区段内纵向连续分布，且在一个或多个深度横向分布的数量大于或等于检测剖面数量的 50%； 存在声学参数严重异常、波形严重畸变或声速低于低限值的异常声测线，异常声测线在一个或多个检测剖面的一个或多个区段内纵向连续分布，或在一个或多个深度横向分布的数量大于或等于检测剖面数量的 50%。

注：1 完整性类别由IV类往 I 类依次判定。

2 对于只有一个检测剖面的受检桩，桩身完整性判定应按该检测剖面代表桩全部横截面的情况对待。

6.5.11 检测报告除应包括本规程 3.4.2 的要求内容外，还应包括：

- 1 声测管布置图及声测剖面编号；

- 2 受检桩每个检测剖面声速-深度曲线、波幅-深度曲线，并将相应判据临界值所对应的标志线绘制于同一个坐标系；
- 3 用主频值或 PSD 值进行辅助分析判定时，应绘制相应的主频-深度曲线、PSD 曲线；
- 4 各检测剖面实测波列图；
- 5 对加密测试、扇形扫测的有关情况说明；
- 6 当对管距进行修正时，应注明进行管距修正的范围及方法。

7 高应变法

7.1 一般规定

- 7.1.1 本方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。
- 7.1.2 受检桩桩头应完整，桩顶面应平整，桩头中轴线与桩身上部的中轴线应重合，桩顶高度应满足安装锤击装置和传感器的要求。
- 7.1.3 在检测前，对不能承受锤击力的桩头应进行加固处理。混凝土桩的桩头处理应符合本规程附录 C 的规定。

7.2 仪器设备

- 7.2.1 检测仪器的主要技术性能指标不应低于现行行业标准《桩基动测仪》JG/T 3055 规定的 2 级标准，且应具有现场显示、保存实测力与加速度信号和信号处理与分析的功能。
- 7.2.2 检测的专用锤击设备应具有稳固的导向装置。重锤应形状对称、材质均匀，高径(宽)比不得小于 1。锤的重量应能使实测信号有明显的桩底反射波出现。

7.3 现场检测

- 7.3.1 现场检测的锤击装置架立应垂直稳固；桩头顶面应设置锤垫，锤垫可采用 10mm~30mm 厚的木板、胶合板或细砂等材料。
- 7.3.2 桩顶附近速度响应可采用对称安装在桩顶下桩侧表面的加速度传感器测量；锤击力可采用对称安装在桩顶下桩侧表面的应变传感器测量。
- 7.3.3 加速度传感器和应变传感器的安装应符合下列规定：
 - 1 加速度传感器和应变传感器，宜分别对称安装在距桩顶不小于 2 倍的桩径或边长的桩侧表面处；对于大直径桩，传感器与桩顶之间的距离可适当减小，但不得小于 1 倍的桩径或边长；传感器安装面处横截面尺寸应与原桩身横截面尺寸基本相同，传感器不得安装在桩身阻抗突变处附近。
 - 2 传感器安装面的材质应均匀、密实，表面应平整。
 - 3 加速度传感器与应变传感器的中心连线应与桩头中轴线垂直；同侧的加速度传感器与应变传感器的水平距离不宜大于 80mm。
 - 4 安装传感器的螺栓钻孔应与桩侧表面垂直；安装完毕后的传感器应紧贴桩身表面，传感器的敏感轴应与桩中心轴平行；锤击时传感器不得产生松动。
 - 5 安装应变传感器时，应对其初始应变值进行监视，初始应变值应在仪器规定的范围内。
- 7.3.4 测试参数设定应符合下列规定：
 - 1 采样时间间隔宜为 50 μ s~200 μ s，信号采样点数不宜少于 1024 点；
 - 2 传感器的设定值应按计量检定或校准结果设定；
 - 3 测点处的桩横截面尺寸应按实际测量确定；
 - 4 测点以下桩长和横截面积可采用设计文件或施工记录提供的数据作为设定值；
 - 5 桩身材料质量密度应按表 7.3.4 取值；

表 7.3.4 桩身材料质量密度 ($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$)

混凝土灌注桩	混凝土预制桩	离心管桩	钢桩
2.40	2.45~2.50	2.55~2.60	7.85

6 桩身平均波速可结合本地经验或同场地同类型已检桩的平均波速初步设定，现场检测完成后应按本规程第 7.4.1 条进行调整；

7 桩身材料弹性模量应按下式计算：

$$E = \rho \cdot c^2 \quad (7.3.4)$$

式中：E——桩身材料弹性模量 (kPa)；
c——桩身应力波传播速度 (m/s)；
 ρ ——桩身材料质量密度 ($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$)。

7.3.5 现场检测应符合下列规定：

- 1 检测时测试系统应处于正常状态，并合理设定有关参数；
- 2 采用自由落锤为锤击设备时，应符合重锤低击原则，最大锤击落距不宜大于 2.5m；
- 3 现场采集的有效锤击信号应根据桩顶最大锤击力、测点最大动位移、桩身最大锤击拉应力、桩身最大锤击压应力、桩身和桩底反射波信息充分性、缺陷程度及其发展情况等综合确定；每根受检桩的有效锤击次数不应少于 2 击；
- 4 出现测试波形紊乱，应分析原因；桩身的缺陷程度加剧，应停止检测。

7.3.6 出现下列情况之一时，其信号不得作为有效锤击信号和桩身完整性分析计算的依据：

- 1 传感器安装处混凝土开裂或出现严重塑性变形使力曲线最终未归零；
- 2 严重锤击偏心，桩头浅部一侧力信号呈现严重的受拉特征；
- 3 信号采集后发现传感器已有松动或损坏现象；
- 4 四通道测试数据不全。

7.4 检测数据分析与判定

7.4.1 桩底反射明显时，桩身波速可根据速度波第一峰起升沿的起点到速度反射峰起升或下降沿的起点之间的时差与已知测点下桩长值确定 (图 7.4.1)；桩底反射信号不明显时，可根据桩长、混凝土波速的合理取值范围以及邻近桩的桩身波速值综合确定。

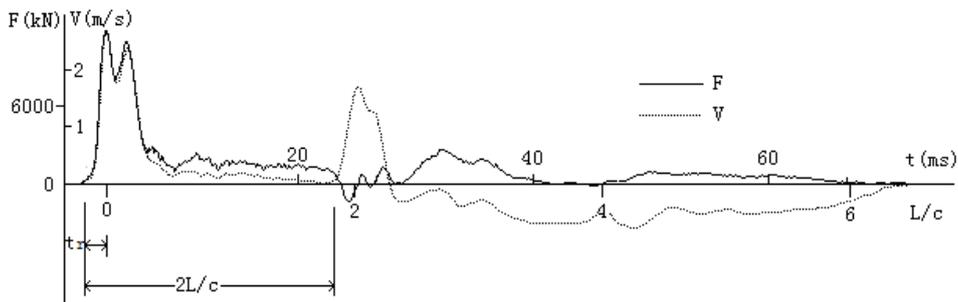


图 7.4.1 桩身波速的确定

7.4.2 当测点处原设定波速随调整后的桩身波速改变时，相应的桩身材料弹性模量应按式 (7.3.4) 重新计算后设置。

7.4.3 力和速度信号第一峰起始段不成比例时，应分析原因，不得对实测力或速度信号进行调整。

7.4.4 桩身完整性分析应结合工程地质条件、设计参数、施工工艺和施工记录，对实测曲

线特征、连续锤击时缺陷的扩大或逐步闭合情况、桩身缺陷程度与位置进行定性判别。

7.4.5 桩身完整性的定量判定可采用下列方法进行：

1 采用实测曲线拟合法判定时，拟合所采用的桩、土参数的物理力学概念应明确，桩和土的力学模型应能分别反映桩和土的实际力学性状，模型参数的取值范围应能限定；拟合分析选用的参数应在岩土工程的合理范围内；根据桩的成桩工艺，拟合时可采用桩身阻抗拟合或桩身裂隙以及混凝土预制桩的接桩缝隙拟合；

2 等横截面桩且缺陷深度 x 以上部位的土阻力 R_x 未出现卸载回弹时，桩身完整性系数 β 和桩身缺陷位置 x 应分别按下列公式计算，桩身完整性可按表 7.4.5 并结合经验判定。

$$\beta = \frac{F(t_1) + F(t_x) + Z \cdot [V(t_1) - V(t_x)] - 2R_x}{F(t_1) - F(t_x) + Z \cdot [V(t_1) + V(t_x)]} \quad (7.4.5-1)$$

$$x = c \cdot \frac{t_x - t_1}{2000} \quad (7.4.5-2)$$

式中： β ——桩身完整性系数，其值为缺陷 x 处桩身截面阻抗与 x 以上桩身截面阻抗的比值；

x ——传感器安装点至桩身缺陷的距离（m）；

t_1 ——速度曲线第一峰对应的时刻（ms）；

t_x ——缺陷的速度曲线反射峰对应的时刻（ms）；

$F(t_1)$ —— t_1 时刻对应的锤击力（kN）；

$F(t_x)$ —— t_x 时刻对应的力值（kN）；

Z ——桩身横截面力学阻抗（kN·s/m）；

$V(t_1)$ —— t_1 时刻的桩身质点运动速度（m/s）；

$V(t_x)$ —— t_x 时刻的桩身质点运动速度（m/s）；

R_x ——缺陷以上部位土阻力的估计值，等于缺陷反射波起始点的力与速度乘以桩身截面力学阻抗之差值（图 7.4.5）。

表 7.4.5 桩身完整性判定

类别	β 值
I	$\beta=1.0$
II	$0.8 \leq \beta < 1.0$
III	$0.6 \leq \beta < 0.8$
IV	$\beta < 0.6$

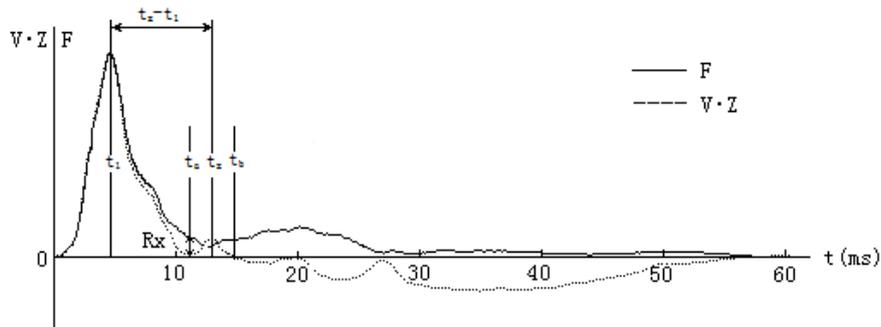


图 7.4.5 桩身完整性系数计算

7.4.6 出现下列情况之一时，宜按工程地质条件、设计参数、施工工艺和施工记录，结合实测曲线拟合法或其他检测方法综合判定桩身完整性：

- 1 混凝土灌注桩桩身横截面渐变或多变；
- 2 桩身有扩径或存在多处缺陷；
- 3 测点下第一缺陷深度 x 以上部位的土阻力 R_x 出现卸载回弹；

- 4 嵌岩桩桩底速度波同向反射强烈，且在时间 $2L/c$ 后无明显端阻力波反射；
 - 5 力和速度曲线在第一峰附近不成比例，桩身浅部有缺陷；
 - 6 锤击力波上升缓慢。
- 7.4.7 检测报告应包括本规程第 3.4.2 条规定的内容外，还应包括下列内容：
- 1 实测的力与速度信号曲线；
 - 2 计算中实际采用的桩身波速值；
 - 3 桩顶下传感器安装处的测点深度；
 - 4 实测曲线拟合法所选用的各单元桩和土的模型参数、拟合曲线；
 - 5 桩身完整性分析及判定结果。

8 孔中摄像法

8.1 一般规定

8.1.1 本方法主要适用于检测空心桩的桩身完整性，判定桩身缺陷的程度及位置，对灌注桩有取芯钻孔时也可采用本方法进行检测。

8.1.2 本方法宜在桩孔内无水条件下进行检测。当孔内有水时，水的透明度应满足检测要求。

8.1.3 本方法宜作为其他完整性检测方法的辅助检测手段。

8.2 仪器设备

8.2.1 用于孔中摄像法检测的仪器采用的视频端的成像分辨率宜不低于 1024×768 像素，应具有彩色显示功能，成像应清晰。

8.2.2 检测仪器应带有深度记录功能和摄像头定位装置，摄像头应具有焦距调整功能。

8.3 现场检测

8.3.1 抽样检测时，应优先选择下列基桩：

- 1 沉桩过程中出现异常的桩；
- 2 施工过程中发生明显水平移位或上浮的桩；
- 3 各种原因导致的桩身出现非正常明显倾斜的桩；
- 4 低应变反射波法或其他检测方法检测发现有缺陷，需进一步明确缺陷性质和程度的桩；
- 5 钻芯法检测出现争议或钻芯结果不能明确判定的桩。

8.3.2 检测前应对受检桩进行孔内清理。无水条件下检测时，应排除孔中积水至检测深度以下不少于 1m；水中检测时，应清除孔中杂物至检测深度以下不少于 1.5m，孔中积水应保证有足够的透明度。

8.3.3 现场检测应符合下列规定：

- 1 检测宜在清孔深度范围内全程检测，对其他方法检测时有疑问的范围应重点检测；
- 2 检测过程中应全面、清晰地记录桩孔内壁混凝土的图像，检测时可采取拍摄静态照片也可采用拍摄连续视频的方式进行。采用连续视频方式时，摄像头移动速度应缓慢以保证视频图像质量。

8.4 检测数据分析与判定

8.4.1 桩身缺陷应根据静态照片和视频图像并结合低应变等其他方法的检测结果综合判定。

8.4.2 缺陷的描述，应包括缺陷的类型、深度、延伸长度、宽度、分布方位等，对裂缝类缺陷还应重点描述倾斜角度、裂缝张开或闭合情况等信息。桩身缺陷深度信息宜以本方法检测结果为准。

8.4.3 桩身完整性类别应结合缺陷出现的深度、程度、成桩工艺、地质条件、施工情况，按本规程表 3.4.1 的规定和表 8.4.3 综合确定。

表 8.4.3 桩身完整性判定

类别	照片或视频图像特征
I	检测深度范围内无缺陷，其他方法检测时也未发现缺陷。
II	仅存在局部闭合性的横向裂纹而无其他明显缺陷，基本不影响桩身承载能力的。
III	有明显可见的横向张开性裂纹，或存在其他较明显的缺陷，已明显影响桩身承载能力的。
IV	存在贯穿全截面的横向张开性裂缝，或存在较明显竖向或倾斜裂缝，或存在桩身错位性断裂以及混凝土部分或全断面碎裂等情况，已严重影响桩身承载能力的。

注：已经过钻芯法检测的桩，尚应结合钻芯法检测结果综合判定桩身完整性。

8.4.4 检测报告除应符合本规程第 3.4.2 条规定外，尚应包括下列内容：

- 1 其他方法检测情况的描述，检测现场情况等；
- 2 缺陷的类型、位置、范围和程度；
- 3 能反映桩身完整性情况的彩色照片。

9 旁孔透射波法

9.1 一般规定

9.1.1 本方法适用于检测既有建筑物下非嵌岩桩的桩长及桩身完整性。当检测现场采用其他方法不具备检测条件时，也可采用本方法进行检测。

9.1.2 当非嵌岩桩桩长超出低应变反射波法的有效范围时，可采用本方法进行辅助检测。

9.2 仪器设备

9.2.1 测试系统应包括钢索、信号线、测绳三合一的专用铠甲电缆线、井中三分量传感器、波形显示记录器、数字记录器和其他专用附件。

9.2.2 钢索、信号线、测绳三合一的专用铠甲电缆线应符合下列要求：

- 1 可检测深度不宜小于 100m，深度分辨率不大于 10mm。
- 2 耐水压不小于 1MPa。

9.2.3 井中三分量传感器应符合下列要求：

- 1 自然频率范围宜为 10 Hz~100 Hz；
- 2 灵敏度不宜小于 250mV/(cm·s⁻¹)；
- 3 阻尼系数宜为 0.65~0.70；
- 4 惯性系数不宜大于 0.2%。

9.2.4 检测仪器应符合下列要求：

- 1 放大器通频带应满足所采集信号的频率范围要求，系统 A/D 转换器分辨率不宜小于 12bit，并满足宽动态范围的信号记录要求；
- 2 最小采样间隔不宜大于 10μs；
- 3 采样长度应满足距离震源最远的通道采集信号长度的需要；
- 4 系统的触发误差、放大器相位误差不应大于 5 个采样间隔，累计误差不应大于 8 个采样间隔。

9.3 现场检测

9.3.1 测试孔布置应符合下列规定：

1 测试孔宜设置在距基桩外侧边缘不大于 1.0m 的土中，且测试孔中心线应平行于桩身中心线，即测试孔与受检桩之间的水平距离沿桩的纵向保持不变；

2 测试孔宜采用液压操纵的钻机打设，并配置适宜的水泵、扶正稳定器的钻具，钻头外径宜不小于 100mm；

3 测试孔深度宜达到受检桩设计桩底标高以下 5m，垂直度偏差不应大于 0.5%。

9.3.2 测试管埋设应符合下列规定：

1 测试管内径应大于井中检波器外径；

2 测试管应有足够的刚度，宜采用内径不小于 50mm 的专用测斜管；

3 测试管导槽方向应对准受检桩的桩身轴线，下端封闭，上端加盖，管内无异物，测试管连接处应平顺过渡，管口高出地面（或水面）不宜小于 500mm；

4 测试管与孔壁之间应回填密实；

5 测试前管内应注满清水；

6 当测试孔深度大于 30m 时，应进行垂直度测量，测量误差不应大于 0.01°。

9.3.3 现场检测应符合下列规定：

- 1 传感器应放至测试管底部，从下往上测试；
- 2 应在桩顶或承台面激发信号；
- 3 测点间距不应大于 500mm，桩底部位宜适当加密，间距不宜大于 200mm；
- 4 在全孔采样中应每 10 个记录点观察一次各道波列，如发现初至时间后延点，测点间距应适当加密。

9.4 检测数据分析与判定

9.4.1 受检桩的桩底埋深 H_p ，可按下列公式判定：

$$H_p = \begin{cases} H_g & (D_x \leq 1\text{m}) \\ H_g - \frac{D_x \cdot V_c}{\sqrt{V_m^2 - V_c^2}} & (D_x > 1\text{m}) \end{cases} \quad (9.4.1)$$

式中： H_g ——首波到达时间-深度曲线拐点对应的深度（m）；
 D_x ——桩顶在桩端平面投影位置与测试孔之间的水平距离（m）；
 V_m ——桩身混凝土的纵波波速（m/s）；
 V_c ——桩端土的平均纵波波速（m/s），宜根据现场土层波速测试结果确定，无条件实测时，也可参照表 9.4.1 取值。

表 9.4.1 土的纵波波速参照表

土的名称	淤泥质粘土	粉质粘土、粘土	粉细砂、砾砂	砾石层
纵波波速(m/s)	1500-1600	1500-2000	1700-2100	1800-2500

9.4.2 桩身完整性类别应根据波列图斜率变化、首波及波幅异常部位，并结合地质条件、桩型、成桩工艺等情况，按本规程 3.4.1 和表 9.4.2 进行综合判定。

表 9.4.2 桩身完整性判定

类别	时域波形特征	时域波幅特征
I、II	波列图中各测点首波波列图的斜率规则或基本规则，出现个别测各首波轻微延时，桩底波列拐点明显	波列图中各测点波列图首波幅值对称或基本对称，幅值正常或出现个别测点首波幅值略有降低
III	首波初至时间与波幅有明显异常，其他特征介于（I、II类）与IV类之间	
IV	波列图中各测点首波波列图斜率在某处有严重畸变，出现整段测点首波明显延时，桩底波列拐点不明显	波列图中测点波列图在某处首波幅值变化明显，首波幅值存在突变

9.4.3 检测报告除应包括本规程第 3.4.2 条规定外，尚应包括下列内容：

- 1 受检桩桩位与测试孔位位置图；
- 2 受检桩透射波波形-深度波列图；
- 3 当测试孔深度大于 30m 时，应提供测试孔垂直度测量结果。

附录 A 钻芯法检测记录表

A.0.1 钻芯法检测的现场操作记录和芯样编录应分别按附表 A.0.1-1、A.0.1-2 的格式记录；检测芯样综合柱状图应按附表 A.0.1-3 的格式记录和描述。

附表 A.0.1-1 钻芯法检测现场操作记录表

桩号		孔号			工程名称			
时间		钻进 (m)			芯样 编号	芯样长度 (m)	残留 芯样	芯样初步描述及 异常情况记录
自	至	自	至	计				
检测日期					机长:	记录:		页次:

附表 A.0.1-2 钻芯法检测芯样编录表

工程名称				日期		
桩号/钻芯孔号		桩径		混凝土设计强度等级		
项目	分段 (层) 深度 (m)	芯样描述			取样编号 取样深度	备注
桩身混凝土		混凝土钻进深度, 芯样连续性、完整性、胶结情况、表面光滑情况、断口吻合程度、混凝土芯是否为柱状、骨料大小分布情况, 以及气孔、空洞、蜂窝麻面、沟槽、破碎、夹泥、松散的情况				
桩底沉渣		桩端混凝土与持力层接触情况、沉渣厚度				
持力层		持力层钻进深度, 岩土名称、芯样颜色、结构构造、裂隙发育程度、坚硬及风化程度; 分层岩层应分层描述			(强风化或土层时的动力触探或标贯结果)	

检测单位:

记录员:

检测人员:

附表 A.0.1-3 钻芯法检测芯样综合柱状图

桩号 / 孔号		混凝土设计强度等级			桩顶标高		开孔时间	
施工桩长		设计桩径			钻孔深度		终孔时间	
层序号	层底标高 (m)	层底深度 (m)	分层厚度 (m)	混凝土/岩土芯 柱状图 (比例尺)	桩身混凝土、持力层 描述	序号 芯样强度 深度(m)	备注	
				□ □ □				

注: □ 代表芯样试件取样位置。

编制:

校核:

附录 B 芯样试件加工、测量和技术要求

B.0.1 芯样加工时应将芯样固定，锯切平面垂直于芯样轴线。锯切过程中应淋水冷却金刚石圆锯片。

B.0.2 锯切后的芯样试件，当试件不能满足平整度及垂直度要求时，应选用下列方法进行端面加工：

- 1 在磨平机上磨平端面；
- 2 用环氧胶泥或聚合物水泥砂浆（或水泥净浆）补平端面；
- 3 设计抗压强度低于 C40 的芯样试件可采用水泥砂浆（或水泥净浆）补平，补平层厚度不宜大于 5mm，也可采用硫磺胶泥补平，补平层厚度不宜大于 1.5mm；
- 4 补平层应与芯样结合牢固，受压时补平层与芯样的结合面不得提前破坏。

B.0.3 试验前，应对芯样试件的几何尺寸做下列测量：

- 1 平均直径：在相互垂直的两个位置上，用游标卡尺测量芯样表观直径偏小的部位的直径，取其两次测量的算术平均值，精确至 0.5mm；
- 2 芯样高度：用钢卷尺或钢板尺进行测量，精确至 1mm；
- 3 垂直度：用游标量角器测量两个端面与母线的夹角，精确至 0.1°；
- 4 平整度：用钢板尺或角尺紧靠在芯样端面上，一面转动钢板尺，一面用塞尺测量与芯样端面之间的缝隙。

B.0.4 芯样试件出现下列情况时，不得用作抗压或单轴抗压强度试验：

- 1 试件有裂缝或有其他较大缺陷时；
- 2 混凝土芯样试件内含有钢筋时；
- 3 混凝土芯样试件的实际高度小于 0.95d 或大于 1.05d 时（d 为芯样试件平均直径）；
- 4 沿试件高度的任一直径与平均直径相差大于 2mm 时；
- 5 试件端面的不平整度在 100mm 长度内大于 0.1mm 时；
- 6 试件端面与轴线的不垂直度大于 2°时；
- 7 芯样试件平均直径小于 2 倍表观混凝土粗骨料最大粒径时；
- 8 岩石芯样试件高度小于 2.0d 或大于 2.5d 时。

附录 C 混凝土桩桩头处理

- C.0.1** 混凝土桩应先凿去桩顶部的破碎层以及软弱或不密实的混凝土。
- C.0.2** 桩头顶面应平整，桩头中轴线与桩身上部的中轴线应重合。
- C.0.3** 桩头主筋应全部直通至桩顶混凝土保护层之下，各主筋应在同一高度上。
- C.0.4** 距桩顶 1 倍桩径范围内，宜用厚度为 3mm~5mm 的钢板围裹或距桩顶 1.5 倍桩径范围内设置箍筋，间距不宜大于 100mm。桩顶应设置钢筋网片 2 层，间距 60mm~100mm。
- C.0.5** 桩头混凝土强度等级宜比桩身混凝土提高 1 级~2 级，且不得低于 C30。
- C.0.6** 桩头传感器安装面处横截面尺寸应与原桩身横截面尺寸基本相同。
- C.0.7** 桩顶应用水平尺找平。
- C.0.8** 桩头侧面拟安装传感器处，应当保持足够平整度，并满足传感器安装要求。

本规程用词说明

- 1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：
 - 1) 表示很严格，非这样做不可的：
正面词采用“必须”；反面词采用“严禁”。
 - 2) 表示严格，正常情况下均应这样做的：
正面词采用“应”；反面词采用“不应”或“不得”。
 - 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：
正面词采用“宜”；反面词采用“不宜”；
 - 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。
- 2 条文中指明应按其他有关标准、规范执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1 国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007
- 2 国家行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94
- 3 国家行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106
- 4 国家标准《基桩动测仪》JG/T 3055
- 5 国家标准《建筑地基基础工程施工质量验收规范》GB 50202
- 6 国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081
- 7 浙江省标准《建筑地基基础设计规范》DB 33/1001

浙江省工程建设标准

基桩完整性检测技术规程

DB 33/T1127-2016

条文说明

修订说明

浙江省工程建设标准《基桩完整性检测技术规程》DB 33/T 1127-2016，经浙江省住房和城乡建设厅批准发布。本规程是在浙江省标准《基桩低应变动力检测技术规程》DBJ 10-4-98 的基础上修订而成的。上一版标准的主编单位是浙江省建筑设计研究院和浙江大学土木系，参编单位是电力部华东勘测设计研究院、浙江省地球物理技术应用研究所、浙江省建筑科学设计研究院、杭州市建筑工程质量监督站，主要起草人是益德清、陈龙珠、杨学林、赵竹占、陈达力、周宏伟、李挺。

本规程修订的主要技术内容是：

1、新增高应变法、钻芯法、孔中摄像法、旁孔透射波法等 4 种基桩完整性检测方法，对上述 4 种基桩完整性检测方法的适用范围、仪器设备、现场检测、测试数据分析与评定等作了具体规定。十多年来，随着基桩检测技术的发展，新型检测技术如孔内摄像法、旁孔透射波法等基桩完整性检测方法得到广泛应用；另一方面，基桩完整性检测经常需要采用多种技术和方法进行相互比对和印证，如与声波透射法、钻芯法等检测结果进行比对分析和相互印证，以提高基桩完整性检测的可靠性，确保桩基工程质量。因此，本次修订新增了目前工程中应用较为成熟的上述 4 种检测方法。

2、进一步明确各种检测方法的使用范围，规定本规程所列方法仅适用于基桩完整性检测，不适用于基桩承载力检测和评估；

3、鉴于原规程中的机械阻抗法和球击法目前在实际工程中很少采用，本次修订取消了机械阻抗法和球击法这两种检测方法；

4、补充针对不同桩型和可能出现的不同缺陷类型等具体情况，选择具体检测方法的原则要求；补充针对复杂情况需采用两种或两种以上检测方法进行相互比对和印证的相关要求；

5、原规程中的反射波法改称为低应变发射波法；补充、修改针对打入式预制桩的相关检测要求，补充针对预制空心桩考虑土塞效应影响的相关要求；

6、原规程中的超声波法改称为声波透射法；补充、修改声波透射法现场测试、异常数据剔除、数据分析与评定的相关要求；

7、修订后规程名称更名为《基桩完整性检测技术规程》。原规程所列检测方法除可用于基桩完整性检测外，有的检测方法尚可用于基于动-静试验对比资料基础上的基桩承载力推算，本次修订后的规程所列方法均仅适用于基桩完整性检测，不再用于基桩承载力检测和评估，故修订后的规程名称更名为《基桩完整性检测技术规程》。

本次修订过程中，编制组多次组织召开专题研讨会，对我省基桩完整性检测现状进行了调查研究，对《基桩低应变动力检测技术规程》DBJ 10-4-98 实施以来的实践经验、出现的问题进行了总结，同时参考了国内外的先进检测技术、方法标准，通过调研、征求意见，对增加和修订的内容进行反复讨论、分析、论证，开展专题研究和工程实例检测验证等工作，为本规程修订提供了重要依据。

为便于广大工程检测、设计、施工、监理、科研、学校等单位有关人员在使用本规程时能正确理解和执行条文规定，《基桩完整性检测技术规程》编制组按章、节、条顺序编制了本规程的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了解释和说明，但本条文说明不具备与规程正文同等的法律效力，仅供本规程使用者作为理解和把握条文规定的参考。

目 次

1	总则.....	40
3	基本规定.....	41
3.1	一般规定.....	41
3.2	检测方法的选择和检测数量.....	42
3.3	验证与扩大检测.....	42
3.4	检测结果评价和检测报告.....	42
4	低应变反射波法.....	44
4.1	一般规定.....	44
4.2	仪器设备.....	44
4.3	现场检测.....	45
4.4	检测数据分析与判定.....	46
5	钻芯法.....	50
5.1	一般规定.....	50
5.2	仪器设备.....	50
5.3	现场钻芯与记录.....	50
5.4	芯样试件截取和加工.....	51
5.5	芯样试件抗压强度试验.....	52
5.6	检测数据分析与评定.....	52
6	声波透射法.....	54
6.1	一般规定.....	54
6.2	仪器设备.....	54
6.3	声测管的埋设.....	54
6.4	现场检测.....	54
6.5	检测数据分析与判定.....	55
7	高应变法.....	56
7.1	一般规定.....	56
7.2	仪器设备.....	56
7.3	现场检测.....	58
7.4	检测数据分析与判定.....	60
8	孔中摄像法.....	63
8.1	一般规定.....	63
8.2	仪器设备.....	63
8.3	现场检测.....	63
8.4	检测数据分析与判定.....	63
9	旁孔透射波法.....	65
9.1	一般规定.....	65
9.2	仪器设备.....	65
9.3	现场检测.....	65
9.4	检测数据分析与判定.....	66

1 总则

1.0.1 桩基础是我省工程建设中、特别是沿海软土地基中应用最为广泛的基础形式，近年来，省内还出现了不少新型桩型并得到工程应用。桩基工程涉及地基基础稳定和上部结构安全，其质量好坏与工程地质和水文地质条件、施工设备、施工工艺和水平、地区经验等众多因素有关，且具有隐蔽性高、发现质量隐患难、后期处理成本高等特点，因而桩基工程质量检测长期以来备受建设各方的关注。国家标准《建筑地基基础设计规范》GB50007、国家行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ94、《建筑地基基础工程施工质量验收规范》GB50202 等设计和施工验收规范，均将基桩质量和完整性检测列为强制性要求。

《基桩低应变动力检测技术规程》DBJ 10-4-98 自 1998 年在我省施行以来，对规范和指导我省基桩低应变检测起到了积极作用。近十多年来，基桩检测理论和检测方法得到长足发展，基桩检测的分析技术和实践经验得到丰富和积累，新型检测技术如孔内摄像法、旁孔透射波法等基桩完整性检测方法得到广泛应用；同时，各类异型截面预制空心桩等新型桩基、适用于软土地基超高层建筑和超大跨度结构的超长和超大荷载吨位灌注桩、旋挖扩底灌注桩得到应用，某些大型单项工程和综合体工程，基桩数量达到数千或上万根。因此，在总结实践经验和吸收国内外先进技术的基础上，及时修订规程，使规程能充分反映最新技术成果和浙江地方特色，对提高基桩检测质量、促进基桩检测技术健康发展、确保桩基工程质量具有重要意义。

1.0.2 本条明确了规程的适用范围。根据现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB50007、《建筑地基基础工程施工质量验收规范》GB50202 及浙江省标准《建筑地基基础设计规范》DB33/1001 的有关规定，本规程适用于浙江省内建筑和市政基础设施工程基桩的完整性检测与评价，水利、交通、铁路等工程的基桩完整性检测可参照使用。

本规程所称基桩，主要是指各类混凝土灌注桩、混凝土预制桩（含各类预应力混凝土空心桩）和各类截面形式的钢桩，检测参数也仅限于基桩完整性。本规程所列检测方法一般不适用于水泥搅拌桩、碎石桩、石灰桩等各类柔性或半柔性桩，但对复合地基增强体设计强度等级不小于 C15 的高粘结强度桩（水泥粉煤灰碎石桩），其桩身完整性检测的原理、方法与本规程基桩完整性检测无异，因此可参照本规程执行。

1.0.3 基桩质量受工程地质和水文地质条件、施工设备、施工工艺和水平、地区经验等众多因素影响，而每一种检测技术和方法都有其自身的特点和适用范围，并存在一定的局限性。因此，应根据各种检测目的、检测方法的技术特点和适用范围，并综合考虑上述各种因素合理选择检测方法。对复杂地基条件、新型桩型或对检测结果有疑问的情况，宜采用两种或两种以上的检测技术和方法进行相互比对和印证，以提高基桩完整性检测的可靠性。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 根据基桩检测原则和检测工作的特殊性，本条对调查工作和检测方案提出了具体要求。

调查工作包括：工程名称、地点，建设、勘察、设计、监理和施工单位，基础、结构形式，层数，设计要求，工程地质条件等，并按表 3.1 填写受检桩设计施工概况表。

表 3.1 受检桩设计施工概况表

序号	桩号	桩横截面尺寸	混凝土设计强度等级	设计桩顶标高 (m)	检测时桩顶标高 (m)	施工桩底标高 (m)	施工桩长 (m)	成桩日期	设计桩端持力层	备注

注：本表为受检桩的基本情况，可根据实际情况增加其他相关信息。

根据委托方要求和现场踏勘调查结果，针对基桩完整性具体检测方法，编写检测方案，检测方案内容为一般情况下包括的内容，某些情况下还需要包括桩头开挖、加固、处理方案以及场地道路、供电、照明、水源等要求。有时检测方案还需要与委托方或设计方共同研究制定。

3.1.2 检测所用仪器必须进行定期检定或校准，以保证基桩检测数据的准确可靠性和可追溯性。虽然测试仪器在有效计量检定或校准期之内，但由于基桩检测工作的环境较差，使用期间仍可能由于使用不当或环境恶劣等造成仪器仪表受损或校准因子发生变化。因此，检测前还应加强对测试仪器、配套设备的期间核查，发现问题后应重新检定或校准。

3.1.3 低应变反射波法、声波透射法和旁孔透射波法检测桩身完整性时，相应应力波波速或声速与混凝土强度相关，如混凝土强度过低，相应应力波波速或声速在其中传播衰减加剧，或同一场地由于桩的龄期相差大，声速的变异性增大。高应变测试在桩身产生的应力水平高，若桩身混凝土强度低，有可能引起桩身损伤或破坏。因此，对于低应变反射波法和声波透射法的测试，规定桩身混凝土强度应大于设计强度的 70%，并不低于 15MPa。对高应变法，桩身混凝土强度仍要求达到 28 天或设计强度。

钻芯法检测桩身完整性时，按照行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ106，要求受检桩混凝土龄期达到 28 天或设计强度，主要是按桩身混凝土强度作为桩身完整性的一部分考虑的。

3.1.4 当基础埋深较大时，基坑开挖不当造成土体侧移可能将桩推断，或机械开挖将基桩碰断，因此，本条要求完整性检测应等到开挖至基底标高后进行。

3.1.5 当发现完整性检测结果异常时，应检查是仪器设备故障、人员操作失误还是确实是基桩出现不应有的大面积缺陷，对仪器设备故障、人员操作失误造成的异常，应组织重新检测；对基桩出现的严重缺陷或者共有性问题，采用其它一种或多种方法验证检测。

3.1.6 操作环境要求是按仪器设备对使用温湿度、电压波动、电磁干扰、振动冲击等现场环境条件的适应性规定的。

3.2 检测方法的选择和检测数量

3.2.1 强调检测方法的合理选择搭配，目的是提高检测结果的可靠性和检测过程的可操作性。表 3.2.1 所列的 6 种方法是基桩完整性检测中几乎所有的方法，包括《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106 没有的孔中摄像法和旁孔透射波法，其中中国工程建设协会已颁布《基桩孔内摄像检测技术规程》CECS 253: 2009，福建等省已颁布孔中摄像法地方标准，旁孔透射波法已有物探标准，已应用于在其它方法无法检测的既有建筑下基桩的严重缺陷或摩擦桩的桩长检测。对于冲钻孔、挖孔和沉管灌注桩以及预制桩等桩型，可采用多种甚至全部方法进行检测；对于异型桩、组合型桩，表 3.2.1 中的部分方法就不能完全适用（如高、低应变动测法）。因此在具体选择检测方法时，应根据检测目的、内容和要求，结合各检测方法的适用范围和检测能力，考虑设计、地基条件、施工因素和工程重要性等情况确定，不允许超范围滥用。同时也要兼顾实施中的经济合理性，即在满足正确评价的前提下，做到快速经济。

3.2.2 由于低应变检测中信号采集、存储和分析软件的进步，低应变完整性检测具有方法简单、快捷，费用低廉的特点，目前浙江省建设单位已广泛要求采用低应变反射波法 100% 进行完整性普查，因此有条件的工程宜采用低应变反射波法 100% 普查检测。但同时要求完整性检测必须满足《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106 第 3.3.3 条中 1~4 款的要求。本条采用了《建筑地基基础设计规范》GB 50007 第 10.2.15 条的有关要求。

3.2.3 桩基施工过程中可能出现以下情况：场地地质条件复杂或存在深厚软弱土层、挤土桩挤土效应严重、采用新桩型或新工艺、原材料发生变化、施工单位变换等，都可能造成质量隐患，因此要求增加检测数量。对桩基施工质量有疑问也要求增加检测数量，排除工程隐患；对设计桩数较少、单桩荷载较高的市政基础设施工程需增加检测数量，确保工程安全。

3.2.4 由于检测成本和周期问题，如不能做到对桩基工程全部基桩进行检测，为了在有限的检测数量中更能充分暴露桩基存在的质量问题，宜优先检测本条 1~4 款所列的基桩，其次再考虑随机性。

3.3 验证与扩大检测

3.3.1~3.3.6 这 6 条内容针对检测中出现的缺乏依据、无法或难于定论的情况，提出了验证检测原则。用准确可靠（或直观性）高的检测方法来弥补或复核准确可靠程度（或直观性）低的检测方法结果的不确定性，称为验证检测。验证检测可能较低应变普查的检测周期长、费用高，或者检测条件要求高，但所列的其它方法具有针对性强、直观性、可靠性强等优点。

对于空心预制桩，当桩身存在裂隙以及各节桩接头处存在开裂等问题时，仅凭常规的低应变检测结果往往难以准确判定，故第 3.3.2 条规定，对低应变检测结果判定为 II、III、IV 类预制桩，建议采用孔中摄像法进行一定比例的验证，以提高低应变检测结果的可靠性。

3.3.7、3.3.8 通常因初次抽样检测数量有限，当抽样检测中会发现完整性检测中 III、IV 类桩比例较大时，应会同有关各方分析和判断桩基整体质量情况，如果不能得出准确判断，为补强或设计变更方案提供可靠依据时，应扩大检测。扩大检测数量宜根据地基条件、桩基设计等级、桩型、施工质量变异性等因素合理确定。

3.4 检测结果评价和检测报告

3.4.1 表 3.4.1 规定了桩身完整性类别划分标准，有利于对完整性检测结果的判定和采用。但桩身完整性仅是基桩质量验收主控检查项目之一，仅反映基桩的桩身混凝土连续性状况，因此检测报告中应只给出完整性分类。

3.4.2 检测报告应根据所采用的检测方法和相应的检测内容出具检测结论。报告中应包括

各受检桩的原始检测数据和曲线，并附有相关的计算分析数据和曲线，目的是为了杜绝检测报告仅有检测结论而无任何检测数据和图表的现象发生。

4 低应变反射波法

4.1 一般规定

4.1.1 目前国内外普遍采用低应变反射波法检测桩身完整性，其原理是基于—维线弹性杆件波动理论。一般而言当受检桩的长径比较大，瞬态激励脉冲有效高频分量的波长与桩的横向尺寸之比大于 10 且设计桩身截面基本均匀规则时，基本可以满足—维波动理论。另外，—维理论要求应力波在桩身中传播时满足平截面假设，所以，对薄壁钢管桩和类似于 H 型钢桩的异型桩，除非采用能激发近似平面波的大横截面激振锤，本方法不适用。

本方法对桩身缺陷程度只宜作定性判定，由于目前测试仪器及桩身因素，以及桩侧土阻尼因素等综合影响，曲线拟合法还难以达到定量的程度。对于桩身不同类型的缺陷，低应变测试信号中主要反映桩身阻抗减小，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，只凭测试信号是很难区分的。因此，对缺陷类型进行判定，应结合地质、施工情况综合分析，或采取开挖、钻芯、声波透射等其他方法验证。

由于受激振能量、桩身材料阻尼和桩身截面阻抗变化、桩径、桩与桩周土相对刚度以及桩底土匹配程度等多因素的复杂影响，应力波在桩身内传播时衰减速度差异较大，难以确定统一的有效检测桩长（或长径比）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长桩、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。

4.1.2 对于桩身截面多变且变化幅度较大的灌注桩检测有效性的辅助验证，主要考虑以下几点：

1 阻抗变化会引起应力波多次反射，且阻抗变化截面离桩顶越近，反射越强，当多个阻抗变化截面的一次或多次反射相互叠加时，造成波形难于识别，特别是对于深度较深的缺陷很容易漏判或误判；

2 阻抗变化对应力波向下传播有衰减，截面变化幅度越大引起的衰减越严重；

3 大直径灌注桩存在横向尺寸效应，桩径越大，短波长窄脉冲激励造成响应波形的失真就越严重，以致检测信号难以判读；

4 桩身阻抗变化范围的纵向尺度与激励脉冲波长相比越小，阻抗变化的反射就越弱，即“纵向尺寸效应”越显著，这种影响也容易导致缺陷漏判。

因此，在这类灌注桩检测前，应在积累本地区经验的基础上，了解工艺和施工情况（例如充盈系数、护壁尺寸、何种土层采用何种施工工艺更容易出现塌孔等），使所选用的验证方法切实可行，降低误判几率。

4.2 仪器设备

4.2.1 低应变动力检测采用的测量响应传感器主要是压电式加速度传感器，根据其结构特点和动态性能，当压电式传感器的可用上限频率在其安装谐振频率的 1/3-1/5 以下时，可保证较高的冲击测量精度，且在此范围内，相位误差几乎可以忽略。所以应尽量选用安装谐振频率较高的加速度传感器。

对于桩顶瞬态响应测量，习惯上是将加速度计的实测信号积分成速度曲线，并据此进行判读。实践表明：除采用无锤垫金属小锤敲击外，速度信号中的有效高频成分一般在 2000Hz

以内。但这并不等于说，加速度计的频响线性段达到 2000Hz 就足够了。这是因为，加速度原始波形比积分后的速度波形要包含更多和更尖的毛刺，高频尖峰毛刺的宽窄和多寡决定了它们在频谱上占据的频带宽窄和能量大小。事实上，对加速度信号的积分相当于低通滤波，这种滤波作用对尖峰毛刺特别明显。当加速度计的频响线性段较窄时，就会造成信号失真。所以，在 $\pm 10\%$ 幅频误差内，加速度计幅频线性段的高限不宜小于 5000Hz，同时也应避免在桩顶表面凹凸不平时采用硬质材料锤（如金属锤头）直接敲击（不加锤垫）。

高阻尼磁电式速度传感器固有频率在 10~20Hz 之间时，幅频线性范围（误差 $\pm 10\%$ 时）约在 20~1000Hz 内，若要拓宽使用频带，理论上可通过提高阻尼比来实现。但从传感器的结构设计、制作以及可用性看却又难于做到。因此，若要提高高频测量上限，必须提高固有频率，势必造成低频段幅频特性恶化，反之亦然。同时，速度传感器在接近固有频率时使用，还存在因相位越迁引起的相频非线性问题。此外由于速度传感器的体积和质量均较大，其二阶安装谐振频率受安装条件影响很大，安装不良时会大幅下降并产生自身振荡，虽然可通过低通滤波将自振信号滤除，但在安装谐振频率附近的有用信息也将随之滤除。综上所述，高频窄脉冲冲击响应测量不宜使用速度传感器。

4.2.2 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 左右，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、橡皮垫等材料，锤的质量为几百克至几十千克不等。

4.3 现场检测

4.3.1 桩顶条件和桩头处理好坏直接影响测试信号的质量。因此，要求受检桩桩顶应平整密实、无浮浆和残渣且无积水。桩顶表面应基本与桩身轴线垂直。对于预应力管桩，当法兰盘与桩身混凝土之间结合紧密时，可不进行处理，否则，应采用电锯将桩头锯平。施工时带有护筒的灌注桩，桩头部分直径往往较正常桩身大，在护筒底部会出现类似缩颈信号，因此要查明护筒的直径和长度，以免发生误判。

还有一部分桩，由于开挖后桩头附近刚好为扩径处，桩顶标高附近的桩径也会大于实际桩径，如不注意这一情况也容易造成误判，因此要求检测时要量测桩头的实际尺寸，以减少误判可能性。对于桩头已浇筑截面尺寸比桩头尺寸大得多的承台时，除非凿除承台，否则不宜采用本方法进行检测。

4.3.2 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。但是在采样点数一定时，采样频率越高，总的采样时间长度就会越短，有时达不到本条第一款的规定，所以结合工程实测经验，综合考虑建议采样频率设为 20~100kHz 为宜。

从时域波形中找到桩底反射位置，仅仅是确定了桩底反射的时间，根据 $\Delta T = 2L/c$ ，只有已知桩长 L 才能计算波速 c ，或已知波速 c 计算桩长 L 。因此，桩长参数应以实际记录的施工桩长为依据，按测点至桩底的距离设定。测试前桩身波速可根据本地区同类桩型的测试值初步设定，实际分析过程中应按由桩长计算的波速重新设定或按 4.4.1 条确定的波速平均值 C_m 设定。

管桩中的土塞高度会在一定程度上影响到弹性波在桩中传播速度，所以当土塞较高时应当做现场的对比试验，以确定波速的正确取值。

4.3.3 本条是为保证响应信号质量而提出的基本要求：

- 1 传感器安装底面与桩顶面之间不得留有缝隙，安装部位混凝土凹凸不平时应磨平，

传感器用耦合剂粘结时，粘结层应尽可能薄。

2 激振点与传感器安装点应远离钢筋笼的主筋，其目的是减少外露主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，宜将其割短。为了减少锤击表面波的影响，激振点与传感器安装点也不宜过近。

3 激振方向应沿桩轴线方向的要求是为了有效减少敲击时的水平分量。

4 瞬态激振通过改变锤的重量及锤头材料，可改变冲击入射波的脉冲宽度及频率成分。锤头质量较大或硬度较小时，冲击入射波脉冲较宽，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或深部缺陷的反射信号。锤头较轻或硬度较大时，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。

4.3.4 本条主要是对激振点和检测点位置进行了规定，以保证从现场获取的信息尽量完备：

1 本条第 1 款有两层含义：

第一是减小尺寸效应影响。相对桩顶横截面尺寸而言，激振点处为集中力作用，在桩顶部位可能出现与桩的横向振型相对应的高频干扰。当锤击脉冲变窄或桩径增加时，这种由三维尺寸效应引起的干扰加剧。传感器安装点与激振点距离和位置不同，所受干扰的程度各异。理论研究表明：实心桩安装点在距桩中心约 $2/3$ 半径 R 时，所受干扰相对较小；空心桩安装点与激振点平面夹角等于或略大于 90° 时也有类似效果，该处相当于横向耦合低阶振型的驻点。传感器安装点、激振（锤击）点布置见图 4.3.4。另应注意：加大安装点与激振点距离或平面夹角将增大锤击点与安装点响应信号时间差，造成波速或缺陷定位误差。

第二是使同一场地同一类型桩的检测信号具有可比性。因不同的激振点和检测点所测信号的差异主要随桩径或桩上部截面尺寸不规则程度变大而变强，因此尽量找出同一场地相近条件下各桩信号的规律性，对复杂波形的判断有利。

当预制桩桩顶高于地面很多，或灌注桩桩顶部分桩身截面很不规则，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，可将两只测量响应传感器对称安装在桩顶以下的桩侧面，且宜远离桩顶。

2 本条第 2 款所述“适当改变激振点和检测点的位置”是指位置选择可不受第 1 款的限制。桩径增大时，桩截面各部位的运动不均匀性也会增加，桩浅部的阻抗变化往往表现出明显的方向性，故应增加检测点数量，使检测结果能全面反映桩身结构完整性情况。

3 不同检测点及多次实测时域信号一致性较差，往往说明桩身情况复杂或测试受到了干扰，此时应分析原因、排除干扰，并宜增加检测点数量以便全面真实地了解桩身的情况。

4 本条第 4 款的含义是，对现场检测人员的要求绝不能仅满足于熟练操作仪器，因为只有在检测人员对所获波形在现场作出快速准确判断后才有可能合理决定下一步激振点、检测点的位置及敲击方式（锤重、锤垫等）。对有明显或严重缺陷的桩，尤其应注意检测信号的覆盖范围和信号重复性，以免误判、漏判。

5 应合理选择测试系统量程范围，特别是传感器的量程范围，避免信号波峰削波。

6 每个检测点有效信号数不宜少于 3 个的要求，是为了验证信号的重复性，且能通过信号叠加平均提高信噪比。

7 检测实践表明，近似等周期衰减震荡曲线很多情况下是传感器安装不当引起或是由于桩头处理不到位引起的，因此需要消除这一干扰因素影响。

4.4 检测数据分析与判定

4.4.1 为分析不同时段信号所反映的桩身阻抗信息、核验桩底信号并确定桩身缺陷位置，需要确定桩身波速及其平均值 C_m 。波速除与桩身混凝土强度有关外，还与混凝土的骨料品种、粒径级配、密度、水灰比、成桩工艺（导管灌注、振捣、离心）等因素有关。波速与桩身混凝土强度整体趋势上呈正相关关系，即强度高则波速高，但二者并不是一一对应关系。

在影响混凝土波速的诸多因素中,强度对波速的影响并非首位。中国建筑科学研究院的试验资料表明:采用普硅水泥,粗骨料相同,不同试配强度及龄期强度相差1倍时,声速变化仅为10%左右;根据辽宁省建设科学研究院的试验结果:采用矿渣水泥,28天强度为3天强度的4~5倍,一维波速增加20%~30%;分别采用碎石和卵石并按相同强度等级试配,发现以碎石为粗骨料的混凝土一维波速比卵石高约13%。天津市政研究院也得到类似辽宁院的规律,但有一定离散性,即同一组(粗骨料相同)混凝土试配强度不同的杆件或试块,同龄期强度低约10%~15%,但波速或声速略有提高。也有资料报导正好相反,例如福建省建筑科学研究院的试验资料表明:采用普硅水泥,按相同强度等级试配,骨料为卵石的混凝土声速略高于骨料为碎石的混凝土声速。因此,不能依据波速去评定混凝土强度等级,反之亦然。

虽然波速与混凝土强度二者并不呈一一对应关系,但考虑到二者整体趋势上呈正相关关系,且强度等级是现场最易得到的参考数据,故对于超长桩或无法明确找出桩底反射信号的桩,可根据本地区经验并结合混凝土强度等级和骨料类型,综合确定波速平均值,或利用成桩工艺、桩型相同且桩长相对较短并能够找出桩底反射信号的桩确定的波速,作为波速平均值。此外,当某根桩露出地面且有一定的高度时,可沿桩长方向间隔一段可测量的距离安置两个测振传感器,通过测量两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波速值。对预制桩,做打入地下前后的波速对比试验,可以较准确地了解桩身波速受土层影响情况,有利于合理确定波速取值。

4.4.2 本方法确定桩身缺陷的位置是有误差的,原因是:(1)缺陷位置处 Δt_x 存在读数误差;(2)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。

对瞬态激振还存在另一种误差,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。因锤击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锤击点处滞后,考虑到表面波或剪切波的传播速度比纵波低得多,特别对大直径桩或直径较大的管桩,这种从锤击点起由近及远的时间线性滞后将明显增加。而波从缺陷或桩底以一维平面应力波反射回桩顶时,引起的桩顶面径向各点的质点运动却在同一时刻都是相同的,即不存在由近及远的时间滞后问题。严格地讲,按入射峰到桩底反射峰之间时差确定的波速将比实际的高,若按“正确”的桩身波速确定缺陷位置将比实际的浅;另外桩身截面阻抗在纵向较长一段范围内变化较大时,将引起波的绕行距离增加,使“真实的一维杆波速”降低。基于以上两种原因,按照目前的锤击方式测桩,不可能十分精确地测到桩的“一维杆纵波波速”。

4.4.3 表4.4.3列出了根据实测时域信号特征而判定的桩身完整性类别。完整桩典型的时域信号信号见图4.1,缺陷桩典型的时域信号信号见图4.2。

完整桩分析判定,据时域信号特征判定相对来说较简单直观,而分析缺陷桩信号则复杂些,有的信号的确是因施工质量缺陷产生的,但也有的是因设计构造或成桩工艺本身局限导致的,例如静钻根植桩和挤扩支盘桩桩身都设计有多处变截面、预制打入桩各桩节之间的焊缝,灌注桩的逐渐扩径再缩回原桩径的变截面(见图4.3a),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。另外,单纯根据测试信号缺陷信号幅值大小判定缺陷程度具有局限性,因为缺陷信号幅值大小除受缺陷程度影响外,还受桩周土阻力(阻尼)大小及缺陷深度的影响。相同程度的缺陷因桩周岩土性质不同或缺陷埋深不同,在测试信号中所表现出的幅值大小各异。因此,如何正确判定缺陷程度,特别是缺陷明显时,如何区分是III类桩还是IV类桩,应仔细对照桩型、地质条件、施工情况结合当地经验综合分析判断;不仅如此,

还应结合基础和上部结构型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,进行缺陷类别划分,不宜单凭测试信号进行定论。

桩身缺陷的程度及位置,除直接从时域信号上判定外,还可借助其他计算方式如时域信号曲线拟合法来判断,具体做法是,将桩划分为若干单元,以实测或模拟的力信号作为已知条件,设定并调整桩身阻抗及土参数,通过一维波动方程数值计算,计算出速度时域波形并与实测的波形进行反复比较,直到两者吻合程度达到满意为止,从而得出桩身阻抗的变化位置及变化量大小。该方法类似于高应变的曲线拟合法。

当灌注桩桩截面形态呈现如图 4.3(a)、(b)情况时,桩身截面(阻抗)先渐变后再突变,则在阻抗突变处的反射信号常表现为与实际情况相反的情形,从而造成误判。因此,可结合施工、地层情况综合分析加以区分;无法区分时,应结合其他检测方法综合判定。当桩身存在不止一个阻抗变化截面(包括上述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和多次反射波相互迭加,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。此时,在信号没有受尺寸效应、测试系统频响等影响产生畸变的前提下,宜按下列规定采用实测曲线拟合法进行辅助分析:

- 1 宜采用实测力波形作为边界条件输入。
- 2 桩顶横截面尺寸应按现场实际测量结果确定。
- 3 通过同条件下、截面基本均匀的相邻桩曲线拟合,确定引起应力波衰减的桩土参数取值。

土层的软硬交替以及大直径管桩土塞顶面也常常会出现类似缩颈或扩径的信号,需注意区分。

表 4.4.3 没有列出桩身无缺陷或有轻微缺陷但无桩底反射这种信号特征的类别划分。事实上,测不到桩底信号这种情况受多种因素和条件影响,例如:

- 软土地区的超长桩,长径比很大;
- 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。

其实,当桩侧和桩端阻力很强时,高应变法同样也测不出桩底反射。所以,上述原因造成无桩底反射也属正常。此时的桩身完整性判定,只能结合经验、参照本场地和本地区的同类型桩综合分析或采用其他方法进一步检测。

对设计条件有利的扩径灌注桩,不应判定为缺陷桩。

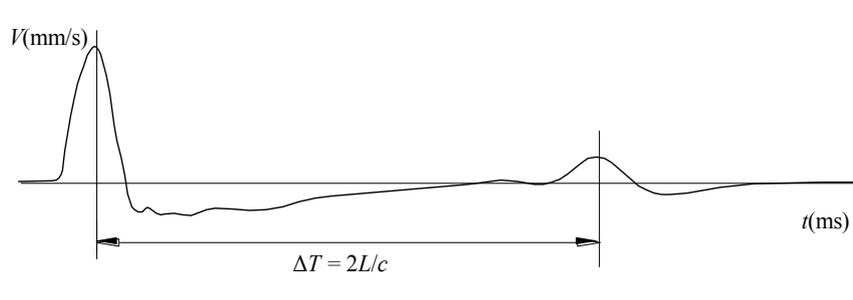


图 4.1 完整桩典型时域信号特征

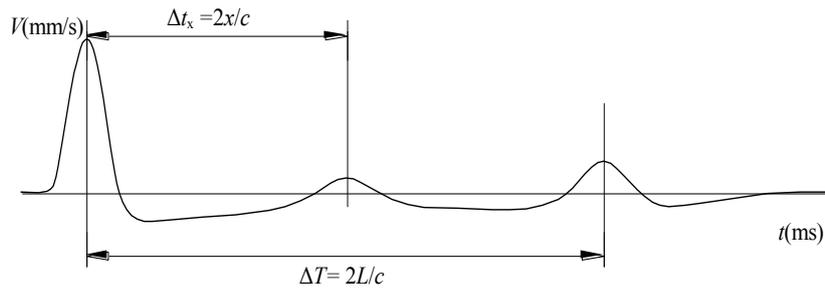


图 4.2 缺陷桩典型时域信号特征

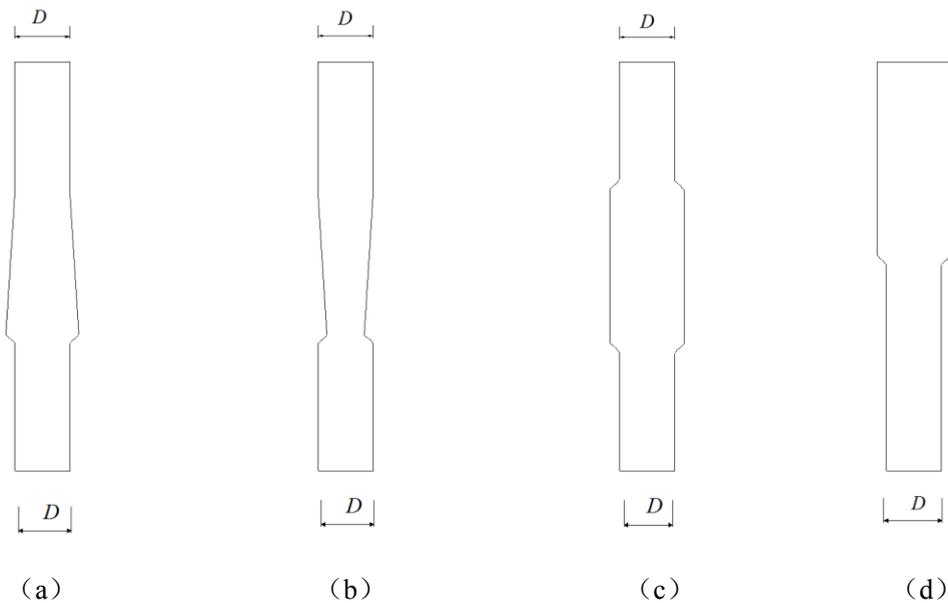


图 4.3 混凝土灌注桩截面(阻抗)变化示意图

(a) 逐渐扩径；(b)；逐渐缩颈；(c) 中部扩径；(d) 上部扩径

4.4.4 对嵌岩桩，如时域速度曲线上桩底反射信号主要为与激振脉冲同向信号时，往往意味着有较厚桩底沉渣或桩端下存在软弱夹层、溶洞等不利情况，这些都是直接关系到该桩能否安全使用的关键因素。因此当根据本方法检测结果判定桩端嵌固效果差时，应采用静载试验、钻芯等其他检测方法核验桩端嵌岩情况，确保基桩使用安全。

4.4.6 对于浅部缺陷，激励脉冲的波长有时很难明显小于浅部阻抗变化的深度，造成无法对桩身浅部特别是极浅部的阻抗变化进行定性和定位，甚至是误判，如浅部局部扩径，波形可能主要表现出扩径恢复后的“似缩颈”反射。因此要求根据力和速度信号起始峰的比例失调情况判断桩身浅部阻抗变化程度。此时也可以通过直接开挖方法进行查验。

4.4.7 人员水平低、测量系统动态范围窄、激振设备选择或操作不当、人为信号再处理影响信号真实性等，都会直接影响结论判断的正确性，只有根据原始信号曲线才能鉴别，所以本条款要求检测报告附实测信号曲线。对于缺陷桩，为了减小误判概率和全面了解桩身缺陷情况，给出 3 条以上实测曲线是必要的。

5 钻芯法

5.1 一般规定

5.1.1 钻芯法是用钻机钻取芯样,来达到检测桩身的混凝土强度、完整性、实际成桩桩长,桩底沉渣厚度,桩端持力层的岩土性状(强度)和厚度是否符合设计或规范要求的一种直观有效检测方法。当采用本方法判定或鉴别桩端持力层岩土性状时钻探深度应满足设计要求。

5.1.2 当受检测桩的长径比较大时,由于钻孔的垂直度很难控制,钻芯孔容易偏离桩身,故要求受检桩的长径比不宜大于 30。由于在本省实际使用中小于 800mm 直径混凝土灌注桩使用较多,因此在本条中未作限制,但对小于 800mm 直径桩宜慎用钻芯法,对小于 600mm 直径混凝土灌注桩不宜使用钻芯法。

5.2 仪器设备

5.2.1 应采用带有产品合格证的钻芯设备。钻机宜采用岩芯钻探的液压高速钻机,并配有相应的钻塔和牢固的底座,机械技术性能良好,不得使用立轴旷动过大的钻机。

水泵的排水量宜为 50~160L/min,泵压宜为 1.0~2.0MPa。

5.2.2 为保证桩身混凝土芯样的完整性,钻芯检测桩身混凝土的钻具应为单动双管钻具,不得使用单动单管钻具。

孔口管、扶正稳定器(又称导向器)及可捞取松软渣样的钻具应根据需要选用。桩较长时,应使用扶正稳定器确保钻芯孔的垂直度。桩顶面与钻机塔座距离大于 2m 时,宜安装孔口管,孔口管应垂直且牢固。

5.2.3 为了获得比较真实的芯样,要求钻芯法检测应采用金刚石钻头,钻头胎体不得有肉眼可见的裂纹、缺边、少角喇叭型磨损。

芯样试件直径不宜小于骨料最大粒径的 3 倍,在任何情况下不得小于骨料最大粒径的 2 倍,否则试件强度的离散性较大。目前,钻头外径有 76mm、91mm、101mm、110mm、130mm 几种规格,从经济合理的角度综合考虑,应选用外径为 101mm 和 110mm 的钻头;当受检桩采用商品混凝土、骨料最大粒径小于 30mm 时,可选用外径为 91mm 的钻头;如果不检测混凝土强度,可选用外径为 76mm 的钻头。

5.2.4 芯样制作分两部分,一部分是锯切芯样,另一部分是对芯样端部进行处理。锯切芯样时应尽可能保证芯样不缺角、两端面平行,可采用单面锯或双面锯。当芯样端部不满足要求时,可采取补平或磨平方式进行处理。具体要求见本规程附录 B。

5.3 现场钻芯与记录

5.3.1 当钻芯孔为一个时,规定宜在距桩中心 10~15cm 的位置开孔,是考虑导管附近的混凝土质量可能相对较差、不具有代表性;同时也方便第二个孔的位置布置。当选择钻芯法对桩长、桩底沉渣、桩端持力层进行验证检测时,且受检桩的长径比大于 30 时,宜在桩中心位置开孔。

为准确确定桩的中心点,桩头宜开挖裸露;难以开挖或不便开挖的桩,应用经纬仪或全站仪确定桩位中心。

桩端持力层岩土性状的准确判断直接关系到受检桩的使用安全。《建筑地基基础设计规范》GB 50007 规定:嵌岩灌注桩要求按端承桩设计,桩端以下三倍桩径范围内无软弱夹层、

断裂破碎带和洞隙分布，在桩底应力扩散范围内无岩体临空面。虽然施工前已进行岩土工程勘察，但有时钻孔数量有限，对较复杂的地质条件，很难全面弄清岩石、土层的分布情况。因此，应对桩端持力层进行足够深度的钻探。

当选择钻芯法对桩长、桩身混凝土强度、桩身局部缺陷、桩底沉渣、桩端持力层进行验证检测时，应根据具体验证的目的进行检测，不需要按本规程进行全面评价。如验证桩身混凝土强度，可在桩顶浅部对多桩（或单桩多孔）钻取混凝土芯样，按《混凝土结构现场检测技术标准》GB/T 50784 评定桩基混凝土强度；如验证桩身局部缺陷，钻进深度可控制为缺陷以下 1~2m 处，对芯样混凝土质量进行评价，必要时应进行芯样试件抗压强度试验。

5.3.2 设备安装后，应进行试运转，在确认正常后方能开钻。钻进初始阶段应对钻机立轴进行校正，及时纠正立轴偏差，确保钻芯过程不发生倾斜、移位。

当出现钻芯孔与桩体偏离时，应立即停机记录，分析原因。当有争议时，可进行钻孔测斜，以判断是受检桩倾斜超过规范要求还是钻芯孔倾斜超过规定要求。

5.3.3 钻进过程中，钻孔内循环水流不得中断，应根据回水含砂量及颜色调整钻进速度。

金刚石钻头、扩孔器与卡簧的配合和使用要求：金刚石钻头与岩芯管之间必须安有扩孔器，用以修正孔壁；扩孔器外径应比钻头外径大 0.3~0.5mm，卡簧内径应比钻头内径小 0.3mm 左右；金刚石钻头和扩孔器应按外径先大后小的排列顺序使用，同时考虑钻头内径小的先用，内径大的后用。

钻至桩底时，为检测桩底沉渣或虚土厚度，应采用减压、慢速钻进。若遇钻具突降，应立即停钻，及时测量机上余尺，准确记录孔深及有关情况。

当持力层为强风化岩层或土层时，可采用合金钢钻头干钻等适宜的钻芯方法和工艺钻取沉渣并测定沉渣厚度。

对中、微风化岩的桩端持力层，可直接钻取岩芯鉴别；对强风化岩层或土层，可采用动力触探、标准贯入试验等方法鉴别。试验宜在距桩底 1m 内进行。

5.3.4 芯样取出后，钻机操作人员应由上而下按回次顺序放进芯样箱中，芯样侧面上应清晰标明回次数、块号、本回次总块数（宜写成带分数的形式，如 $2\frac{3}{5}$ 表示第 2 回次共有 5 块芯样，本块芯样为第 3 块）。及时记录孔号、回次数、起至深度、块数、总块数、芯样质量的初步描述及钻进异常情况。

有条件时，可采用孔内摄像辅助判断混凝土质量。

对桩身混凝土芯样的描述包括桩身混凝土钻进深度，芯样连续性、完整性、胶结情况、表面光滑情况、断口吻合程度、混凝土芯是否为柱状、骨料大小分布情况，气孔、蜂窝麻面、沟槽、破碎、夹泥、松散的情况，以及取样编号和取样位置。

对持力层的描述包括持力层钻进深度，岩土名称、芯样颜色、结构构造、裂隙发育程度、坚硬及风化程度，以及取样编号和取样位置，或动力触探、标准贯入试验位置和结果。分层岩层应分别描述。

5.3.5 应先拍彩色照片，后截取芯样试件。芯样照片中应包含有工程名称、桩号、钻芯孔号、芯样试件采取位置、桩长、孔深、检测单位名称、检测人员、见证人员等内容，可将一部分内容在芯样上标识，另一部分标识在指示牌上。取样完毕，剩余的芯样宜移交委托单位妥善保存。

5.4 芯样试件截取和加工

5.4.1 本条规定了抗压强度试验混凝土芯样截取的原则，并明确芯样应在桩顶设计标高以下开始截取。同时截取的每个混凝土芯样应在相关见证人员在场的情况下按组按序编号，填上相关信息，然后见证员签字并当场封样，搬运过程中注意做好芯样的保护工作。

5.4.2 本条与上一条内容与《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106 基本保持了一致。

5.4.3 规定了一组混凝土芯样应制作 3 个芯样试件，为避免对芯样试件高径比进行修正，规定了芯样的高径比(H/d)宜为 1.00，其误差不得大于 5%。

5.5 芯样试件抗压强度试验

5.5.1 混凝土芯样试件抗压强度试验时应结合芯样情况，合理地选择压力机的量程和加荷速率，以保证试验精度。端面经过修补的芯样须根据修补剂说明书要求条件养护后方可进行试压。通常根据桩的工作环境状况，试件宜在 $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ 的清水中浸泡一段时间后进行抗压强度试验，在考虑到钻芯过程中诸因素影响均使芯样试件强度降低，因此允许芯样试件加工完毕后，立即进行抗压强度试验。

5.5.2 当抗压强度试验中出现某个强度值异常时，或当发现芯样试件平均直径小于 2 倍试件内混凝土粗骨料最大粒径时，应重新截取芯样试件进行抗压强度试验，条件不具备时，可将另外两个强度的平均值作为该组试件芯样试件抗压强度值，并在报告中对有关情况进行说明。

5.5.3 混凝土芯样试件的抗压强度值不等于标准养护 28 天的试块抗压强度，也不等于同条件养护试块的抗压强度。由于成型工艺和养护条件的不同相互之间会存在差异。当排除龄期和养护条件（温度、湿度）差异时，尽管普遍认为混凝土芯样强度低于立方体强度，但各地及多所高等院校的大量试验表明，尚不能采用一个当地统一的折算系数来反映芯样强度与立方体强度的差异。为了安全起见，本规程不推荐采用某一个统一的折算系数对芯样强度进行修正。

5.5.4 钻取桩端持力层岩芯的主要目的是鉴别或判断桩端持力层岩土性状，由于单桩钻芯所能截取的完整岩芯数量有限，当岩石芯样单轴抗压强度仅仅是为了配合判断桩端持力层岩性时，检测报告中可不给出岩石单轴抗压强度标准值，只给出单个岩芯单轴抗压强度检测值。当要求提供岩石单轴抗压强度标准值时须按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 相关规定通过多桩、多孔钻芯来完成。

5.6 检测数据分析与评定

5.6.1 本条规定了抗压强度检测值的确定原则。综合考虑了桩的受力机理，混凝土芯样试件抗压强度离散性大的特点及大量数据的对比验算。在一组中和在同一深度处取平均值，整桩取不同深度位置的混凝土芯样试件抗压强度检测值中的最小值作为该桩混凝土芯样试件抗压强度检测值是可行的。

5.6.2 当检测人员对岩土性状的判定和描述不熟悉时，须由工程地质专业人员参与。

5.6.3 本条规定了桩身完整性的判别原则，当有多个钻孔时须结合多个孔的情况进行综合判别，一方面强调了同一深度部位的不同钻孔的芯样质量的关联性，另一方面强调局部芯样强度检测值对桩身完整性判定的影响。虽然桩身完整性和混凝土芯样试件抗压强度是两个不同的概念，但为了充分利用钻芯法的有效检测信息、更客观地评价成桩质量，强调完整性判断应根据混凝土芯样表现特征和缺陷分布情况并结合局部芯样强度检测值进行综合判定，关注缺陷部位能否取样制作成芯样试件以及缺陷部位芯样试件强度的高低。当混凝土芯样的外观完整性介于 II 类和 III 类之间时，利用出现缺陷部位的芯样试件抗压强度检测值是否满足设计要求这一辅助手段加以区分。

当芯样混凝土出现分层现象时，宜截取分层部位的芯样进行抗压强度试验。当混凝土芯样抗压强度满足设计要求时，可判为 II 类；当混凝土芯样抗压强度不满足设计要求或不能制作成芯样试件时应判为 IV 类。桩长检测精度应考虑桩底锅底形的影响。按连续性涵义，实测

桩长小于施工记录桩长则应判为IV类。多于三个钻芯孔的基桩完整性可类比表 5.6.3 的三孔特征进行判定。

5.6.4 规定了受检桩的成桩质量评价按单根受检桩进行，从桩身完整性等级、桩身混凝土芯样抗压强度、桩长及桩底沉渣厚度以及桩底持力层性状和厚度是否合格或达到设计要求，给出了判定受检桩不满足设计要求的情形。对桩身完整性判定为III类的桩可酌情增加钻芯孔数并结合混凝土芯样试件抗压强度检测值能否满足设计要求，如强度检测值也小于混凝土设计强度，即判定受检桩不满足设计要求。

6 声波透射法

6.1 一般规定

6.1.1 当桩径小于 0.6m 时，声测管的声耦合误差使声时测试的相对误差增大，因此桩径小于 0.6m 时应慎用本方法。

由于桩内跨孔测试的测试误差高于上部混凝土的检测，且桩身混凝土纵向各部位硬化环境不同，粗细骨料分布不均匀，因此该方法不适宜用于推定桩身混凝土强度。

6.2 仪器设备

6.2.1 声波换能器有效工作面长度过大将夸大缺陷实际尺寸并影响测试结果。

换能器的谐振频率越高，对缺陷的分辨率越高，但高频声波在介质中衰减快，有效测距变小。选配换能器时，在保证有一定的接收灵敏度的前提下，原则上尽可能选择较高频率的换能器。提高换能器谐振频率，可使其外径减少到 30mm 以下，有利于换能器在声测管中升降顺畅或减小声测管直径。但因声波发射频率的提高，将使声波穿透能力下降。所以，本规范规定用 30kHz~60kHz 谐振频率范围的换能器，在混凝土中产生的声波波长约 8cm~15cm，能探测的缺陷尺度约在分米量级。当测距较大接收信号较弱时，宜选用带前置放大器的接收换能器，也可采用低频换能器，提高接收信号的幅度，但后者要以牺牲分辨力为代价。

桩中的声波检测一般以水作为耦合剂，换能器在 1MPa 水压下不渗水也就是在 100m 水深能正常工作，这可以满足一般的工程桩检测要求。对于超长桩，宜考虑更高的水密性指标。声波换能器宜配置扶正器，防止换能器在声测管内摆动影响测试声参数的稳定性。

6.2.2 对于声波检测仪的仪器标准，在仪器具备条件情况下，可选用以下推荐设置：

- 1 最小采样间隔为 0.1 μ s；
- 2 采样长度不小于 512 样点/道，并可选；
- 3 触发方式宜有内、外、信号、稳态等方式；
- 4 频带宽为 10Hz~500kHz；
- 5 声时测量精度为 $\pm 0.1\mu$ s；
- 6 发射电压为 100V~1000V；
- 7 发射脉宽为 1 μ s~500 μ s，并可选。

6.3 声测管的埋设

6.3.1 从保证声测管的径向刚度的角度考虑，建议选用钢管、镀锌管等管材，不宜选用 PVC 管。而且选用钢材类作为声测管还可以避免混凝土凝固后与声测管脱开产生空隙，进而更好地声测管平行度。

6.4 现场检测

6.4.2 径向换能器的径向无指向性，但在垂直面上有指向性，且换能器的接收响应随着发射换能器中线连线与水平面夹角 θ 的增大而非线性递减，为达到测斜目的，测试系统应有足够灵敏度，且夹角 θ 不应大于 30°。

6.5 检测数据分析与判定

6.5.1 一般情况下声测管倾斜造成各声测线的声速值有规律的偏离混凝土的正常取值，此时可采用高阶曲线拟合等方法对各条测线的测距作合理修正，然后重新计算各声测线的声速。但是对于各声测线声速值的偏离沿深度方向无变化规律时，不得随意修正。因堵管导致数据不全，只能对有效检测范围内的桩身进行评价，不能整桩评价。

6.5.4 声速低限值 v_L 和混凝土试件的声速平均值 V_P 的合理确定是大量既往检测经验的体现。当桩身混凝土未达到龄期而提前检测时，应对 v_L 和 V_P 的取值做适当调整。

7 高应变法

7.1 一般规定

7.1.1 本规程高应变法的主要功能是判定桩身完整性是否满足设计要求。高应变法检测的基桩是混凝土灌注桩、混凝土预制桩（包括预应力管桩），也可包括钢桩。施工后的基桩检测结果的评价包含了完整性和承载力两个相对独立的评价内容，高应变法检测单桩竖向抗压承载力应符合现行国家行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106 的有关规定。

带有普查性的桩身完整性检测，采用低应变反射波法更为经济合理。与低应变反射波法检测的轻便、快捷、廉价相比，高应变法检测桩身完整性有其激励能量和检测有效深度大的优点，特别在判定桩身水平整合型缝隙、预制桩接头等缺陷时，能够在查明这些“缺陷”是否影响桩身结构承载力的基础上，合理判定桩身缺陷程度。高应变法可对桩端嵌岩情况、低应变反射波法判定的桩身完整性Ⅲ类（或Ⅳ类）进行核验。当检测桩的桩长超过低应变反射波法有效检测桩长范围时，高应变法可作为桩身完整性检测的补充。

高应变法检测技术是从打入式混凝土预制桩发展起来的，试打桩和打桩监测属于其特有的功能，是静载试验无法做到的。计算桩身锤击拉应力、桩身最大锤击压应力和桩锤实际传递给桩的能量应符合现行国家行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106 的有关规定。

7.1.2 桩头质量应完整，包含了应凿掉混凝土桩桩头顶部的破碎层或不密实的混凝土，预制桩桩头不应有裂缝，对预应力管桩应尽量选择桩顶有钢帽的桩作为检测桩。桩头应完整，是为了避免击碎桩头。桩顶面应用水平尺找平、桩头中轴线与桩身上部的中轴线应重合，是为了减少锤击偏心 and 避免击碎桩头。

7.1.3 本条规定的桩头加固处理也是为了避免击碎桩头。混凝土桩的桩头接桩加固处理的桩顶高度和横截面尺寸大小也应考虑到便于保护重锤的导向装置的稳固放置。桩头接桩加固处理前和处理后都应对桩身完整性进行低应变法检测，以了解桩头浅部和接桩面的桩身完整性，提高高应变法检测工作的成功率。

7.2 仪器设备

7.2.1 本条对仪器的主要技术性能指标要求是按建筑工业行业标准《基桩动测仪》JG/T 3055 提出的，比较适中，大部分型号的国产和进口仪器能满足。因动测仪器的使用环境较差，故仪器的环境性能指标和可靠性也很重要。

测量力信号的工具式应变传感器，其安装谐振频率应大于 2kHz，在 1000 $\mu\epsilon$ 范围内的非线性误差不应大于 1.0%。测量速度信号的压电式加速度传感器，其安装谐振频率应大于 10kHz，且在 1Hz~3kHz 范围内灵敏度变化不应大于 5.0%，在冲击加速度量程范围内非线性误差不应大于 5.0%。本条对安装于距桩顶附近桩身侧表面的加速度计（即响应测量传感器）的量程未做具体规定，原因是针对不同类型的桩，各种因素影响使最大冲击加速度变化很大，建议根据实测经验来合理选择，宜使选择的量程大于预估最大冲击加速度值的一倍以上。如对钢桩，宜选择 20000 m/s^2 ~30000 m/s^2 量程的加速度计。

7.2.2 检测的专用锤击设备的导向和锤体形状直接关系到现场检测的安全与信号质量。使无导向装置的自由落锤脱钩，操作人员通常需在离检测重锤很近的范围内操作，缺乏安全保障，且脱钩时会不同程度地引起锤的摇摆，更容易造成锤击严重偏心而产生质量差信号。另外，如果采用汽车吊直接将重锤吊起并脱钩，因重锤的重量突然释放造成吊车吊臂的强烈反弹，可能对吊臂造成损害。因此，稳固的导向装置的另一作用是：在落锤脱钩前需将锤的重量通

过导向装置传递给锤击装置的底盘，使吊车吊臂不再受力。

扁平状锤(如分片组装式锤的单片或混凝土浇筑的强夯锤)下落时不易导向且平稳性差，容易造成严重锤击偏心，影响测试质量。因此规定锤体的高径(宽)比不得小于1。

当采取落锤上安装加速度传感器的方式实测锤击力时，重锤的高径(宽)比应为1.0~1.5。自由落锤安装加速度计测量桩顶锤击力的依据是牛顿第二定律和第三定律，其成立条件是同一时刻锤体内各质点的运动和受力无差异，也就是说，虽然锤为弹性体，只要锤体内部不存在波传播的不均匀性，就可视锤为一刚体或具有一定质量的质点。在大多数采用自由落锤的场合，牛顿第二定律能较严格地成立。规定锤体高径(宽)比不大于1.5正是为了避免波传播效应造成的锤内部运动状态不均匀。这种方式的锤高一般以2.0m~2.5m为限，则最大使用的锤重可能受到限制，除非采用重锤或厚软锤垫减少锤上的波传播效应。

利用打桩机械的初打检测，建设工程行业多采用具有导向装置的筒式柴油锤，它与自由落锤相比冲击动能较大，较轻锤也可能完成沉桩工作，并能获得明显的整桩反射波信息；导杆式柴油锤、振动锤的荷载上升时间过于缓慢，容易造成速度响应信号失真，因此，不得采用导杆式柴油锤、振动锤。

现行国家行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106中规定：采用高应变法进行承载力检测时，锤的重量与单桩竖向抗压承载力特征值的比值不得小于0.02。这样的规定是考虑到锤的重量大小直接关系到桩侧、桩端岩土阻力发挥的高低，只有充分包含岩土阻力发挥信息的信号才能视为有效信号，才能作为高应变承载力分析与评价的依据。

本条是保证高应变法桩身完整性检测信号的有效性而规定的锤重要求。采用高应变法进行桩身完整性检测，只有检测信号充分包含有效的桩侧和桩底反射波信息，才能作为高应变法桩身完整性分析与评价的依据。选用锤的重量可比现行国家行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106中规定的锤重值的要求偏低，但应能使实测信号有明显的桩底反射波出现，否则，应增加锤的重量；在实际检测过程中，当锤的重量已经是不小于单桩竖向抗压极限承载力值的1%时，而实测信号还是无明显的桩底反射波出现，在这种情况下，应结合桩型、桩长、地质条件等因素综合分析原因，待查明原因后，再进行下一步检测。检测缺陷桩的锤重选择，也应采用同一工程、同条件、同类型的完整桩的检测锤重，现场锤击高度的选择应综合考虑桩身缺陷程度及其发展情况。

采用同一重量和落距的锤：锤不反弹情况对应于桩的直径小、承载力低；锤反弹情况则一般对应于桩的直径大、承载力高；特别当桩的直径很大或桩的承载力很高时，锤将强烈反弹。轻锤打击桩顶后常出现锤的明显反弹，显然锤击能量不可能足够传递到桩身下部或桩端部位，也就是在高应变动测曲线上桩身下部或桩端部位的反射波信息反映不出来，从而影响桩身完整性分析结果的准确性。

锤重不变时，随着桩横截面尺寸、桩的质量或单桩承载力的增加，锤与桩的匹配能力下降，试验中直观表现是锤的明显反弹，锤落距提高引起桩身锤击应力的增加比传递给桩的有效锤击能量的增加效果更为显著，因此轻锤高落距锤击是不科学的，同时也增加了安全风险，有时轻锤高击还引起桩身破损。

当灌注桩桩径大于600mm或混凝土桩桩长大于30m时，为了对桩径或桩长增加引起的桩-锤匹配能力下降进行补偿，必要时应进一步提高检测用锤的重量，体现高应变法“重锤低击”原则的要求。对高应变法桩身完整性检测，一要体现“重锤低击”原则，二要考虑以下情况：

1 桩越长，在波传播过程中应力波的衰减越大，要使桩身中下部、桩端反射波信息被充分反映出来，也就是桩底反射波明显可辨，则要求锤重越重；

2 桩是否容易被“打动”取决于桩身“广义阻抗”的大小。广义阻抗与桩身截面波阻抗和桩周土岩土阻力均有关。随着桩直径增加，波阻抗的增加通常快于土阻力，而桩身阻抗

的增加实际上就是桩的惯性质量增加,使锤对桩的匹配能力下降,就要求锤重越重。

3 在单桩竖向抗压承载力构成中桩端阻力占的比例越大,要求锤重越重。

7.3 现场检测

7.3.1 锤击装置架立应垂直、锤击应平稳对中和桩顶面加设锤垫,以减小锤击偏心和避免击碎桩头;木板或胶合板等锤垫面宜略大于桩顶面积,其锤垫面直径(或边长)宜略大于桩径(或边长)20mm左右。所有这些措施都是为了保证现场测试信号质量。

使用合适的锤垫,一是起到滤波器的作用,可滤掉锤击力的高频分量,同时使锤击力分布更加均匀,将锤击能量更有效地传递到桩身;二是缓冲锤击力,使桩头不易被打碎。木板或胶合板等锤垫材料质地要干,而不能用湿板;锤垫的厚度要选择合适的,锤垫过厚,滤掉的锤击力会过多,从而减低锤击能量的传递,测试信号质量可能受到影响;锤垫过薄,则起不到有效作用。锤垫厚度可采用10mm~30mm。锤重相对较轻或落距较低时,选用较薄的锤垫;锤重相对较重或落距较高时,选用相对较厚的锤垫。锤垫厚度也可根据第一锤的测试波形加以调整。

7.3.2 采用对称安装在桩顶下桩侧表面的应变传感器测量测点处的应变,再将应变换算成锤击力。在自由落锤锤体(整体铸造锤)顶面下锤侧表面对称安装的加速度传感器可直接测量冲击力。

7.3.3 在距桩顶规定距离下的合适部位对称安装传感器,是为了对锤击偏心进行补偿和减小锤击在桩顶产生的应力集中,同时减小锤击力在桩顶可能产生的塑性变形的影响,以保证和提高测试信号质量;对于有桩外径、内径的被检桩,传感器安装位置处的桩径是指桩外径。为了减少截面突变处反射波对实测信号的影响,传感器安装面处的横截面尺寸应与原桩身横截面尺寸基本相同,传感器安装位置与桩身阻抗突变处距离应不小于0.3倍被检桩的外径或边长。

当传感器的安装面不平整时,可用磨光机将其磨平,以提高测试信号质量。

同侧的加速度传感器与应变传感器的水平距离不宜大于80mm,即宜为70mm±10mm。

传感器的安装应在检测仪器监控下完成。在锤击时,混凝土桩和钢桩的应变传感器可测轴向变形余量的绝对值分别不得小于1000μ ϵ 和1500μ ϵ 。

在连续锤击时检测预制桩的桩身完整性,应将传感器连接电缆有效固定,防止电缆晃动,以保护好传感器。

7.3.4 采样时间间隔为100μs,对常见的工业与民用建筑的桩长是合适的,但对于短桩或超长桩,这一采样时间间隔可适当减小或增大;例如桩长超过60m,采样时间间隔可放宽为200μs,当然也可增加采样点数。记录曲线的时间段长度在桩底面时刻后延续时间不应小于20ms;对于柴油锤打桩信号,在桩底面时刻后延续时间不应小于30ms。

为了确保实测信号的可靠性,传感器的设定值应按计量检定或校准结果设定。

应变式传感器直接测到的是其安装面上的应变,并按下式换算成锤击力:

$$F = A \cdot E \cdot \epsilon \quad (7.1)$$

式中:F——锤击力;

A——测点处桩身截面积;

E——桩身材料弹性模量;

ϵ ——实测应变值。

显然,锤击力的正确换算依赖于测点处设定的桩参数是否符合实际。计算测点以下原桩身的阻抗变化,包括加速度桩身运动及受力大小,都是以测点处桩头单元为相对“基准”的。

自由落锤安装加速度传感器测力时,力的设定值由加速度传感器设定值与重锤质量的乘

积确定。

测点下桩长是指桩头传感器安装点至桩底的距离，一般不包括桩尖部分。

对于普通钢桩，桩身波速可直接设定为 5120m/s。对于 C20~C80 的钢筋混凝土桩，桩身波速取决于混凝土的骨料品种、粒径级配、成桩工艺（导管灌注、振捣、离心）及龄期，其值变化范围大多为 3000m/s~4500m/s。混凝土预制桩可在沉桩前实测无缺陷桩的桩身平均波速作为设定值，但一般情况下，此波速要比沉桩后的桩身平均波速略高；混凝土灌注桩的桩身平均波速应结合本地区混凝土波速的经验值或同场地同类型桩已知值初步设定，但应根据实测信号进行校正。同时应指出，被检桩的桩身平均波速和传感器安装处的波速是两个不同量，传感器安装处的波速一般不应随桩身平均波速的改变而任意调整，因为其与计算桩身材料弹性模量值有关，同时宜综合考虑测点处桩头混凝土的设计强度和龄期的影响。由实测信号得到的桩身平均波速可对桩长进行核对。

7.3.5 交流供电的测试系统应接地良好，以消除交流供电时常出现 50Hz 的干扰。在现场高应变法检测时，自由落锤的落距应由低到高，一般每根受检桩的第一锤为试打锤，锤高度宜为 20cm 左右，以检查测试系统是否处于正常状态，确认测试系统正常后，就重锤低击原则开始正式检测。对于斜桩，应采用相应的打桩机械沿桩轴线激振。

根据波动理论分析，若视锤为一刚体，则桩顶的最大锤击应力只与锤冲击桩顶时的初速度有关，落距越高，锤击应力和偏心越大，越容易击碎桩头（桩端进入基岩时因桩端压应力放大造成桩尖破损）。此外，强锤击压应力是使桩身出现较强反射拉应力的先决条件，即使桩头不会被击碎，但当打桩阻力较低（例如挤土上浮桩、深厚软土中的摩擦桩）、且入射压力脉冲较窄（即锤较轻）或桩较长时，桩身有可能被拉裂。轻锤高击并不能有效提高桩锤传递给桩的能量，因为力脉冲作用持续时间显著与锤重有关。因此，“重锤低击”是保障高应变法检测桩身完整性准确性的基本原则。

采用高应变法进行桩身完整性检测时，受检桩的有效锤击是指能采集到有效实测信号。现场采集的有效锤击信号应充分包含桩身、桩底的反射波信息，所以应根据每锤信号质量以及测点最大动位移、最大锤击力和大致的土阻力发挥情况，初步判别采集的反射波信号是否满足检测目的和要求；同时，也要检查锤击拉应力、压应力和缺陷程度大小，以决定是否进一步锤击，以免桩头或桩身受损。

当出现测试波形紊乱、传感器安装处混凝土开裂、实测力和速度曲线第一峰起始段比例失调、严重锤击偏心时导致桩头浅部一侧力信号呈现严重的受拉特征、信号采集后发现传感器已有松动或损坏现象、四通道测试数据不全时，应停止检测，待查明原因后，重新检测。发现桩身有明显缺陷时，应增加使缺陷进一步发展的锤击信号，但要注意锤击能量的控制，发现桩身的缺陷程度加剧时，应停止检测。为确保采集到可靠的数据，检测人员应能正确判断波形质量、识别干扰，熟悉诊断测试系统的各类故障。

7.3.6 除柴油锤施打的长桩信号外，力的时程曲线应最终归零。对于混凝土桩，高应变测试信号质量不但受传感器安装面处混凝土是否开裂或出现塑性变形、传感器安装好坏、锤击偏心程度的影响，也受混凝土的不均匀性和非线性的影响。这些影响对采用应变式传感器测试、经换算得到的力信号尤其敏感。

在高应变法桩身完整性现场检测过程中，锤击偏心相当于两侧力信号幅值之一与其平均值之差的绝对值超过了平均值的 33%。通常锤击偏心很难避免，因此不得用单侧力信号代替平均力信号、桩头浅部一侧力信号呈现严重的受拉特征的信号进行被检测桩实际性状的分析计算。有的桩头浅部一侧力信号呈现严重的受拉特征，会明显影响整桩的桩身完整性判别，这时应查明原因，必要时，可进行低应变反射波法检测，核实桩头浅部的完整性情况。

信号采集后发现传感器已有松动或损坏现象，应及时进行正确处理，再重新测试。

理想的完整桩高应变动测波形信号,应具有力和速度的时程,曲线第一上升峰值前二者重合,峰值后二者协调,力曲线应在速度曲线之上,两曲线间距离随桩侧土阻力增大而增大,其差值能真实反映桩周土阻力的实际性状,波形平滑,桩底反射波明显,力和速度时程曲线最终归零,没有锤击严重偏心,对称的两个力或速度传感器的信号不应相差太大。

7.4 检测数据分析与判定

7.4.1 在桩底反射明显时,桩身波速也可根据下行波波第一峰起升沿的起点到上行波波下降沿(或嵌岩桩的上行波波上升沿)的起点之间的时差与已知传感器测点下桩长 L 值确定。对桩底反射峰变宽或有水平裂缝的桩,不应根据峰与峰间的时间差来确定桩身平均波速;桩较短且锤击力波上升缓慢时,可采用低应变法确定桩身平均波速。出现桩底反射波信号不明显的一般由桩身存在的明显缺陷、严重缺陷、横截面阻抗多变等情况所产生。当选用的锤重偏轻而引起桩顶锤击能量不足时,导致桩底反射波信号不明显,在这种情况下,则应增加锤的重量进行检测。

7.4.2 确定的桩身波速值大小直接影响到桩身材料弹性模量的大小,桩身材料弹性模量又直接与桩身应力有关系。通常,当桩身平均波速按实测波形改变后,桩身材料弹性模量则应按波速平方的比例关系改变。

当采用应变式传感器测力时,多数仪器并非直接保存实测应变值,如有些是以速度($V=c\cdot\varepsilon$)的单位存储,若弹性模量随波速改变后,仪器不能自动修正以速度为单位存储的力值,则应对原始实测力值校正;因此,对于采用应变传感器测量应变并由应变换算冲击力的方法,当原始力信号按速度单位存储时,桩身材料弹性模量调整后应对原始实测力值校正。

对于采用自由落锤安装加速度传感器实测锤击力的方式,当桩身材料弹性模量或桩身波速改变时,不得对原始实测力值进行调整,但应扣除响应传感器安装点以上的桩头惯性力影响;对于锤上安装加速度计的测力方式,由于力值 F 是牛顿第二定律 $F=m_r a_r$ (式中 m_r 和 a_r 分别为锤体的质量和锤体的加速度)直接测量得到的,因此不存在对实测力值进行校正的问题; F 仅代表作用在桩顶的力,而分析计算则需要安装在桩顶下安装测量响应加速度计横截面上的作用力,所以需要测量响应加速度计以上的桩头质量产生的惯性力,对实测桩顶力值修正。

7.4.3 通常情况下,如正常打的预制桩,力和速度信号在第一峰应基本成比例,即第一峰处的力值 F 与归一化速度值($V\cdot Z$)基本相等,其中 Z 为桩身横截面力学阻抗。但在以下几种力和速度信号第一峰不成比例(比例失调)的情况下属于正常:

- 1 桩浅部阻抗变化和土阻力影响;
- 2 采用应变式传感器测力时,测点处混凝土的非线性造成力值明显偏高;
- 3 在锤击力波上升缓慢或桩很短时,土阻力波或桩底反射波的影响。

信号随意比例调整均是对实测信号的歪曲,并产生虚假的结果,包括桩身完整性系数的结果。因此,为保证信号真实性,禁止将实测力或速度信号进行比例调整。这一点必须引起重视,因为有些仪器具有比例调整功能。

7.4.4 高应变法检测分析计算结果的可靠性高低取决于动测仪器、分析软件和人员素质三个要素。其中起决定作用的是具有坚实理论基础和丰富实践经验的高素质检测人员。只要检测波形质量有保证,就能定性地反映桩的承载性状及其他相关的动力学问题。因此对波形的正确性解释的重要性超过了软件建模分析计算本身,对人员的要求首先是解读波形,其次才是熟练使用相关软件。增强波形正确判读能力的关键是提高人员素质,仅靠技术规范以及仪器和软件功能的增强是无法做到的。

在判定桩身完整性方面,由于高应变具有较高的锤击能量,只要桩侧和桩端土阻力均已明显发挥,在高应变的实测力和速度曲线上,常常可以看到整个桩身上的所有变阻抗问题。

检测截面通常离开桩顶很近，桩顶自由端所产生的反射下行波，常常和原来的上行变阻抗反射波重叠在一起，而使力曲线的变化互相抵消，使速度曲线的变化表现得更加鲜明。假定桩身应力波从桩身横截面力学阻抗 Z_1 ($Z_1=\rho_1 \cdot A_1 \cdot c_1$) 传播到力学阻抗 Z_2 ($Z_2=\rho_2 \cdot A_2 \cdot c_2$)，对阻抗 Z_2 发生各种变化的情况进行讨论和分析：

1 当 $Z_1=Z_2$ 时，桩身材质均匀各向同性，为无缺陷桩。无阻抗变化界面，则无桩身缺陷反射波产生，只有桩周土阻力反射波产生。

2 当 $Z_1>Z_2$ 时，如桩身存在缩颈、断裂、空洞、离析、胶结不良、裂缝、沉渣等，阻抗变小，将产生上行的拉应力波；在上行波到达检测截面时，将引起力值的减小和速度值的增大，即出现力曲线下移而速度曲线上移的特征。

3 当 $Z_1<Z_2$ 时，如桩身存在扩颈、嵌岩桩桩底等，阻抗变大，将产生上行的压应力波；当上行波到达检测截面时，将引起力值的增大和速度值的减小，即出现力曲线上移而速度曲线下移的特征。

桩身完整性分析判定，有的反射波信号确实是施工质量缺陷产生的，但也有的信号是因设计构造本身局限、成桩工艺或地层导致的，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，地层硬夹层或软夹层影响等。因此，桩身完整性分析应有高素质的检测人员结合工程地质条件、设计参数、施工工艺和施工记录，对实测曲线特征、连续锤击时缺陷的扩大或逐步闭合情况、桩身缺陷程度与位置进行定性判别。

7.4.5 高应变法检测桩身完整性具有锤击能量和检测有效深度大，可对缺陷程度定量计算，连续锤击可观察缺陷的扩大和逐步闭合情况等优点。特别在判定桩身水平整合型缝隙、预制桩接头等缺陷时，能够在查明这些“缺陷”是否影响竖向抗压承载力的基础上，合理判定缺陷程度。但高应变法和低应变反射波法检测的仍是桩身阻抗变化，一般不宜判定缺陷的具体性质。在桩身、桩端情况复杂或存在多处阻抗变化时，可优先考虑用实测曲线拟合法判定桩身完整性。

实测曲线拟合法是通过波动问题数值计算，反演确定桩和土的力学模型及其参数值。其过程为：假定各桩单元的桩和土力学模型及其模型参数，利用实测的速度（或力、上行波、下行波）曲线作为输入边界条件，数值求解波动方程，反算桩顶的力（或力、上行波、下行波）曲线。若计算的曲线与实测曲线不吻合，说明假设的模型参数不合理，有针对性地调整桩和土的模型及参数再行计算，直至计算曲线与实测曲线的吻合程度良好且不易进一步改善为止。虽然从原理上讲，这种方法是客观唯一的，但由于桩、土以及它们之间的相互作用等力学行为的复杂性，实际运用时，还不能对各种桩型、成桩工艺、地基条件，都能达到十分准确地求解桩的动力学和承载力问题的效果。

采用实测曲线拟合法判定桩身完整性时，所用模型的物理力学概念应明确，参数取值应能限定；避免采用可使拟合计算结果产生较大变异的桩-土模型及其参数。关于桩与土模型：

1 目前已有成熟使用经验的土的静阻力模型为理想弹-塑性或考虑土体硬化或软化的双线性模型；模型中的两个重要参数——土的极限静阻力 R_u 和土的最大弹性位移 S_q ，可以通过静载试验（包括桩身内力测试）来验证。在加载阶段，土体变形小于或等于 S_q 时，土体在弹性范围工作；变形超过 S_q 后，进入塑性变形阶段（理想弹-塑性时，静阻力达到 R_u 后不再随位移增加而变化）。对于卸载阶段，同样要规定卸载路径的斜率和弹性位移限。

2 土的动阻力模型一般习惯采用与桩身运动速度 V 成正比的线性粘滞阻尼，带有一定的经验性，且不易直接验证。

3 桩的力学模型一般为一维杆模型，单元划分应采用等时单元（实际为特征线法求解的单元划分模式），即应力波通过每个桩单元的时间相等，由于没有高阶项的影响，计算精度高。

4 拟合时应根据波形特征，结合施工和地基条件合理确定桩土参数取值。因为拟合所

用的桩土参数的数量和类型繁多,参数各自和相互间耦合的影响非常复杂,而拟合结果并非唯一解,需通过综合比较判断进行参数选取或调整。正确选取或调整的要点是参数取值应在岩土工程的合理范围内。

5 桩单元除考虑 A、E、c 等参数外,也可考虑桩身阻尼和裂隙。另外,也可考虑桩底的裂隙、开口桩或异形桩的土塞、残余应力影响和其他阻尼形式。

曲线拟合时间段长度在 t_1+2L/c 时刻后延续时间不应小于 20ms;对于柴油锤打桩信号,在 t_1+2L/c 时刻后延续时间不应小于 30ms;使曲线拟合能包含土阻力响应区段的全部土阻力信息,提高桩身缺陷模型参数的合理性、真实性。各单元所选用的土的最大弹性位移 s_q 值不应超过相应桩单元的最大计算位移值。拟合的计算曲线与实测曲线应基本吻合。

当桩身有轻微缺陷,并确认为水平裂缝(如预制桩的接头缝隙)时,裂缝宽度 δ_w 可按下式计算:

$$\delta_w = \frac{1}{2} \int_{t_a}^{t_b} \left(V - \frac{F - R_x}{Z} \right) \cdot dt \quad (7.2)$$

式中: t_a ——裂缝缺陷的速度曲线反射峰起升沿起点对应的时刻;

t_b ——裂缝缺陷的速度曲线反射峰下降结束点对应的时刻(见本规程图 7.4.5)。

当满足“等截面桩”和“土阻力未卸载回弹”的条件时, β 值计算公式为解析解,即 β 值测试属于直接法,在结果的可信度上,与属于半直接法的高应变法检测判定承载力是不同的。“土阻力未卸载回弹”限制条件是指:当土阻力 R_x 先于 t_1+2x/c 时刻发挥并产生桩中上部明显反弹时, x 以上桩段侧阻提前卸载造成 R_x 被低估, β 计算值被放大,会不安全,因此公式(7.4.5-1)不适用,此种情况多在长桩存在深部缺陷时出现。

式(7.4.5-1)适用于截面基本均匀桩的桩顶下第一个缺陷的程度定量计算;桩身完整性系数 β 值的定义为缺陷 x 处桩身截面阻抗与 x 以上桩身完整截面阻抗的比值,它不反映缺陷的性质,在具体判定时应结合桩身结构、成桩工艺、桩周土层情况等综合判定。通过 820 根预制方桩完整桩的高应变法检测结果统计,其桩身完整性系数 β 值范围为 0.91~1.00,其中 β 值 1.00 的只有 100 根, β 值 0.99 的有 117 根, β 值 0.98 的有 133 根, β 值 0.97 的有 140 根, β 值 0.96 的有 95 根, β 值 0.95 的有 87 根,而 β 值平均值为 0.96。因此,桩身完整性类别可按桩身完整性系数 β 值并结合经验判定。

7.4.6 对混凝土灌注桩桩身截面渐变或多变、桩身有扩径(扩径反射波强烈致使桩底反射波难以辨别)、桩身存在多处缺陷、测点下第一缺陷深度 x 以上部位的土阻力 R_x 出现卸载回弹的情况,宜采用实测曲线拟合法分析桩身完整性,但应注意合理选择桩和土的模型参数。发现嵌岩桩桩底速度波同向反射强烈且在时间 $2L/c$ 后无明显端阻力波反射的情况,宜采用钻芯法核验,必要时可采用静载试验方法进一步验证。

高应变法锤击的荷载上升时间通常在 1ms~3ms 范围,因此对桩身浅部缺陷的判定存在盲区,不能定量给出缺陷的具体部位,也无法根据式(7.4.5-1)来判定缺陷程度。只能根据力和速度曲线不成比例的情况来粗略估计浅部缺陷程度;当锤击力波上升缓慢时,可能出现力和速度曲线不成比例的似浅部阻抗变化情况,但不能排除土阻力的耦合影响。对桩身浅部有缺陷的情况,宜采用低应变反射波法检测并进行缺陷判定,有条件时可采用直接开挖验证。

7.4.7 根据桩底反射明显时,桩身波速可根据速度波第一峰起升沿的起点到速度反射峰起升或下降沿(嵌岩桩或扩底桩的桩底速度反射峰下降沿)的起点之间的时差与已知测点下桩长值确定,而委托单位提供的桩长是实际施工桩长或设计有效桩长,因此,在成果中应明确桩顶下传感器安装处的测点深度,以求得测点下桩长。

8 孔中摄像法

8.1 一般规定

8.1.1 孔中摄像法是一种直观的探查方法，对于预制空心桩和钻有钻孔的灌注桩，采用本方法能起到其他方法无法实现的直观、可视化效果。

8.1.2 一般而言，建议在对桩孔或钻孔进行清孔并排除积水后进行检测，这样效果好，视频和图像资料清楚。当然在孔壁无附着物且孔内积水透明度较高，能保证水下图像、视频清晰的条件下也可进行水下检测。

8.1.3 对预制空心桩，由于土塞的影响(即使采用桩内清孔的方法一般也不能清孔到桩底，否则会破坏桩底持力层)，采用本方法检测时一般难以进行整桩检测，故而多数情况下本方法仅作为一种辅助检测手段，用来对低应变等其他检测方法结果的验证。对于进行钻芯法检测的灌注桩，可以进行整个钻孔深度范围内的检测，也可在有疑问的深度范围内进行验证检测。

8.2 仪器设备

8.2.1 孔中摄像法的仪器设备有很多种，目前也缺少统一标准，仪器最终以能保证获得清晰的图像或视频资料为准。

8.2.2 要求仪器带有深度记录功能是为了能及时准确记录随深度变化的桩孔内情况，特别是有缺陷存在时，能第一时间了解缺陷所处深度信息。摄像头定位和焦距调整功能都是为了确保获得清晰视频或图像资料。

8.3 现场检测

8.3.1 对于本条第1、2、3款规定情况的桩，桩身存在断裂的可能性较大，因此需要优先进行检测验证，本条第4、5款规定是由于其他方法(如低应变、取芯)检测时，无法准确判断其缺陷类型和严重程度时需要进一步进行验证检测。

8.3.2 无论是桩孔内无水条件下检测还是在水中检测，一般都需要清孔至预设检测深度以下一定距离以保证检测顺利进行，否则检测探头容易误入孔中污泥或杂物中。水中检测时，孔中积水应有足够透明度，否则影响成像质量。

8.3.3 本方法检测目的主要是对其他方法(如低应变、钻芯法)的检测结果进行验证，所以检测重点是其他方法检测时怀疑有缺陷的深度范围，当然也可以在整个清孔深度内对桩身情况进行检测，以全面检验其他方法的结果。特别要说明的是，竖向或高倾斜度裂缝等缺陷是低应变检测方法难以发现的，而采用本方法检测却可以发现，这也是本方法的优势之一。此外，视频影像和静态照片各有优势，前者反映情况较为全面和连贯，而后者可以保证较高的清晰度，因此两者结合使用往往可以取得较好的效果。

8.4 检测数据分析与判定

8.4.1 本方法检测判断是根据桩孔内观测到的静态照片和视频影像进行的，该方法有其优势的一面，也有其局限性，因为有可能出现这样一种情况，管桩桩身外侧受到一定损伤但没有延伸到桩管内壁，这样的缺陷孔内摄像法是检测不到的，因此当低应变检测发现某个深度可能存在缺陷，而本方法检测却没有发现缺陷时，应当审慎对待，不宜以后者检测结果轻易

否定前者的检测结果。为保险起见，必要时需通过静载荷试验等方法进一步进行验证，或者视情况采用灌芯法进行加固处理。

8.4.2 检测时除了获得足够的静态照片和视频影像资料，还需要对缺陷的特征参数如长度、宽度、范围、损伤程度等进行文字描述，对裂缝而言倾斜程度是比较重要的信息，也是必须描述的内容。

8.4.3 本方法检测时未发现缺陷，同时要求其他方法检测时未发现缺陷才能判断为 I 类桩的规定是为了防止出现 8.4.1 条文说明中那种情况。此外，桩身存在缺陷时对抗压强度的影响程度往往难以判断，必要时应抽取一定比例的桩进行静载荷试验验证。倾斜或竖向裂缝对桩身强度影响较大，在竖向荷载作用下容易引起桩身劈裂，因此出现这类裂缝时，应判为 IV 类桩。对于钻芯法检测结果的验证检测，其桩身完整性等级判定还应结合钻芯法检测结果综合进行。

9 旁孔透射波法

9.1 一般规定

9.1.1~9.1.2 旁孔透射波法是利用在既有建筑物下混凝土灌注桩侧土的检测孔，并在孔中利用三分量检波器逐点检测由结构体激发应力波到达的时间，在波的传播过程中除了在桩身遇到波阻抗和桩底反射外，同时有部分应力波向桩侧土进行透射，利用应力波在桩身传播和透射波的特征规律，分析各测点初至到达时间和幅值大小，达到检测桩端深度和桩身完整性的目的。

由于既有建筑物下的桩是隐蔽体，检测时只能在桩顶上方的混凝土承台、柱或梁板来激发应力波，被激发的应力波直接向桩身传至桩底，在桩身完整的条件下应力波到达桩身某一深度的时间是波速的函数，当应力波在桩身中传至存在波阻抗的缺陷部位时，由于应力波在缺陷处波能量的吸收和损耗，透射波到达井中传感器的时间较正常混凝土慢，反映在波列图中的首波往后移。而当应力波传至桩底向土层透射时，由于土层波速远低于混凝土波速，反映在波列图中的首波波列形成明显的拐点，由此根据波列的陡缓及拐点确定桩底的部位。

通常对工程基桩完整性进行检测时，人们一般采用快速价廉的低应变反射波法，但对于某些桩长较长而低应变的激振能量无法达到桩底或无法取得桩底信息的情况，为了抽样验证桩长和桩身完整性，也可采用该方法进行检测，其原因是桩顶激振的应力波信号很容易被安置于桩侧 1m 左右传感器所接收，因此该方法既可用于既有建筑工程桩的桩长检测，同时可用于非嵌岩桩桩长超出低应变反射波法的有效范围时，作为辅助检测手段应用，将会达到较好的效果。

9.2 仪器设备

9.2.1 旁孔透射波法测试系统除了井中三分量传感器和悬挂传感器的电缆线外，对其伸至深层水中传感器的抗水压和电缆线的抗拉强度都有严格要求。而仪器要接收从混凝土桩向桩端土透射的应力波，因此对仪器的要求比单道接收桩身反射波均有所不同和提高。测试系统对增益、A/D 转换、孔中传感器、最小采样间隔等的要求，都是为了提高信噪比，提高观测精度；而对激发能量的要求则是为了保证测试结果可靠。实时显示功能主要是为了了解现场检测情况。目前许多物探单位均采用地震仪来完成这项检测方法。

9.3 现场检测

9.3.1 本方法是采用在桩顶、桩顶承台或构筑物激振产生应力波在桩身的传播、在传播过程中应力波向桩侧土透射的原理，从各测点所测得的首波来解释桩身完整性，因此力求做到桩身与测试管的距离尽量靠近，以减少应力波透射到土中所产生的误差。测试管埋设完成后，如果钻孔与孔壁间有较大间隙，会对透射波在土中的传播途径和距离带来误差，因此当测试管放置完毕后应采用填料法将间隙填实，并经过几天的休止期，方可开始测试。这样可以很大程度减少测试时间的误差。

在成孔或埋设测试管后可能因水压和其他人为因素而造成测试孔破裂或堵管，因此要求测试前采用直径大于 50mm 的吊锤量测测试管的深度和通畅情况，如出现吊锤不能放至设计测试孔深，或发生测试管脱节断裂等情况，应重新安装成孔。

本方法要求测试孔平行于桩轴线，其目的是为了尽量减少计算实际桩端深度的误差，因此要求钻孔单位必须严格控制钻孔的垂直度，但是往往在实际钻进过程中钻孔的垂直度很难

达到要求，在计算桩底埋深时由此产生一定的计算误差。即便按照规程的钻孔垂直度要求，当测试孔达到30m时，底部的水平偏差可达到0.23m，桩端土为砾石时计算误差约在0.17m。因此通常要求在桩长大于30m时检测孔利用测斜管进行测斜。

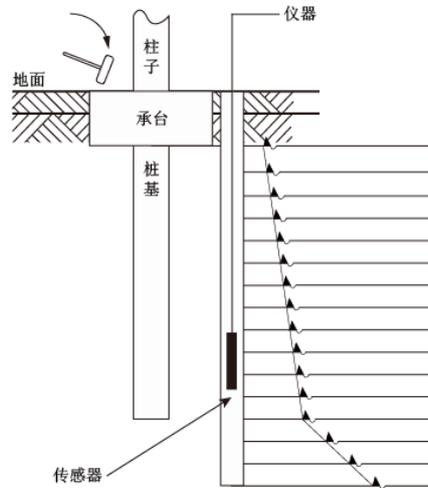


图 9.1 旁孔透射波法示意图

9.3.3 现场检测是旁孔透射法的关键一步，信号是否真实可靠，直接关系到结果的判断，因此首要条件是激发有效应力波。现场往往没有较好的条件，如桩头与桩身在接近地表承台处，此时要有目的地选择激振最佳点，比如开挖表层土、在承台顶部或柱子以及梁板桩顶中心投影点等。

在测试过程中，正常的完整桩波形初至及斜率规律性较好，因此检测时对长桩可放宽到每隔0.5m~1.0m布设一个测点。而对短桩、或者发现有异常的部位，应加密采样，减小采样间距，一般把测点加密到0.2m~0.3m。实时显示是为了现场可以对测试数据的质量和检测结果进行初步评判。在初步测量时如发现基桩桩端深度与设计不符时，应分析原因并进行复测，以确保所测数据和信号的真实性和完整性，消除人为疏忽或仪器设备工作状态有问题造成的不真实数据。只有测量数据是可靠的，分析结果才能正确。

9.4 检测数据分析与判定

9.4.1 由于本方法是通过桩头上方结构体的激振产生的应力波在桩身中传播，并在桩身外侧的平行检测孔中的传感器自下而上逐点检测桩的透射波，因此每个测点均可计算其该点距激振点的混凝土波速或深度，但当桩底部由于测试孔与桩身偏距较大，就应该将透射波在土层中的波速考虑在内并加以修正，由此所得出的桩长更接近实际桩长，本规程规定当桩长大于30m时，应进行测对检测孔的测斜，主要是测得的初至拐点进行校正以减少计算的桩长误差，因为如按钻孔的垂直度要求，如果钻孔的不垂直造成测试孔倾斜1度时，当测试孔达到30m时，底部的水平偏差可达到0.47m，按桩端土为砾石层计算误差约为0.31m，说明钻孔的垂直度是很重要的，当然我们考虑问题的前提是当桩是垂直的情识下来讨论深度修正的。

在本条中列出的计算桩身长度公式(9.4.1)中，其中有个参量为桩端范围内桩周土平均纵波速度值，可以通过井中三分量波速测试取得，也可参考工作区附近工程地质勘察时相应地层的场地波速测试值，表(9.4.1)中所示的地层纵波速度范围值是参考《城市工程地球物理探测规范》(JGJ7)、《水利水电工程物探规程》(SL T)中对有关物性参数表，而且也参照

刘平山和赵竹占编著的《浙江省地球物理地球化学勘查志》一书中的地质、物理参数表和吴世明与陈龙珠编著的《岩土工程波动勘测技术》中对上海金山核电站厂址 175m 深所作的跨孔波速测试资料，同时综合浙江、上海大量工地的岩土工程地质勘察所做的井中波速测试的波速范围作了对比统计，可作为工作时的参考值。

9.4.2 利用本方法判别桩身完整性类别时，主要根据各点的首波和深度波列图的斜率的规律性，分析相临二测点的首波时间差是否相等，以及桩身各测点首波的斜率一致性：

当波列图上桩底拐点明显，拐点对应的桩底深度与设计桩长相符，拐点以上深度各采样点首波初至时间-深度曲线上各相邻点斜率相同、波幅相近，拐点后相邻点首波斜率变缓且波幅变小属完好桩。

当波列图各采样点中多个相邻点斜率明显变缓、脱节或某采样点开始整段斜率有规律变缓属缺陷桩。

应该说明的是，当某种直径较大的钻孔桩存在轻微缺陷时，采用该方法的应力波传播过程中，尽管局部缺陷处存在着向桩顶的反射波，可能会产生桩侧传感器所接收的透射应力波初至时间延后反应不明显的可能性，因此在类别判定表中归为 I、II 类基本完整桩；如需对 I、II 类桩做进一步的判定，则可通过低应变反射波法或其他方法进行辅助检测。

桩身完整性判定可分为如下几种类型：

1. I、II 类基本完整桩

基本完整桩包括完整桩和有轻微缺陷桩。

完整桩各检测点测得的首波与深度的比值相等，即在整桩的波列图首波同相轴反应斜率一致，其斜率小混凝土强度大，波速高，桩身完整，而桩底后进入土层的透射波速，初至时间与二测点距离比增大，斜率变大，拐点明显，此拐点处即为桩底深度，图 9.2 为完整桩，波列图中 45m 为该桩的桩底。

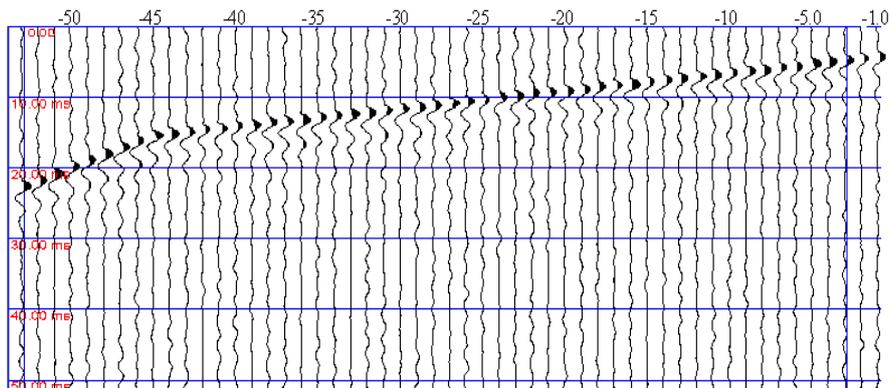


图 9.2 完整桩波列图

轻微缺陷桩各检测点测得的首波与深度的比值基本相等，即在整桩的波列图首波同相轴反应斜率基本一致，在整桩各测点仅出现 1-2 处首波延后现象，但首波幅值变化不大，而在桩底进入土层的透射波速，初至时间与二测点距离比增大，斜率变大，拐点明显，此拐点处反映桩底深度较明显，图 9.3 的 10m 处为该桩轻微缺陷处。

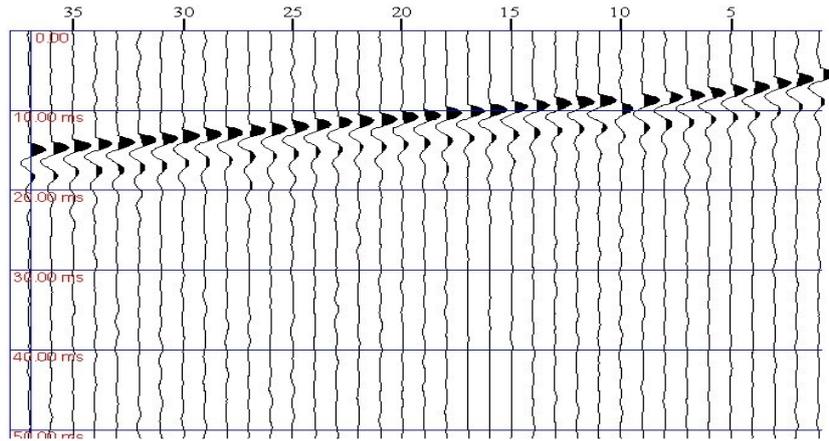


图 9.3 轻微缺陷桩波列图

2. III类明显缺陷桩

明显缺陷桩各检测点测得的首波与深度的比值在某一深度多个点不相等,即在整桩的波列图首波同相轴反应斜率某一深度多个点不一致,在整桩各测点仅出现 3 处及 3 处以上的首波规律性延后现象,而首波幅值也会有明显变化,图 9.4 的 14-17m 处为该桩明显缺陷处。

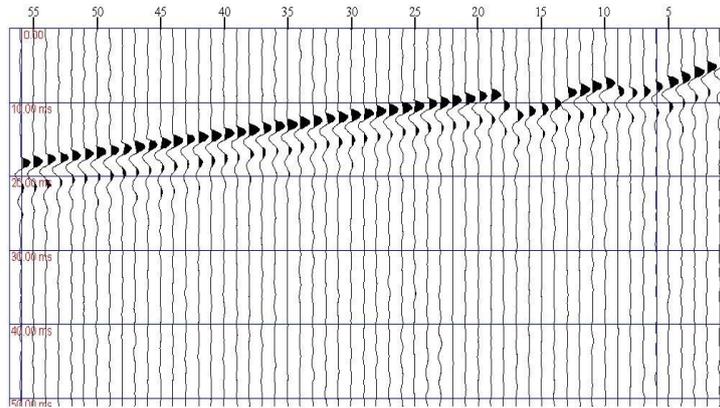


图 9.4 明显缺陷桩波列图

3. IV类严重缺陷桩

严重缺陷桩各检测点测得的首波与深度的比值在某一深度多个点不相等,即在整桩的波列图首波同相轴反应斜率某一深度多个点严重不一致,在整桩各测点仅出现 5 处及 5 处以上的首波规律性严重延后现象,而首波幅值也会有严重变化,图 9.5 的 14-17m 处为该桩严重缺陷处。

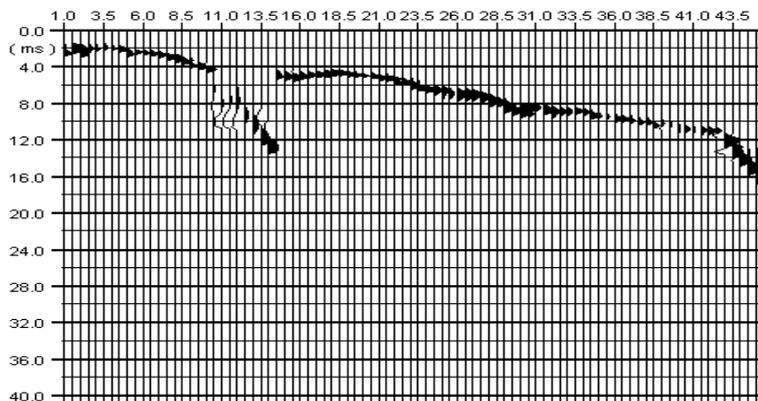


图 9.5 严重缺陷桩波列图