

桥梁基桩检测技术规程

Technical specifications for foundation piles testing of bridge engineering

2022-06-13 发布

2022-07-15 实施

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 基本规定 2

 4.1 仪器设备 2

 4.2 检测方法选择和检测数量 2

 4.3 检测桩位的确定 4

 4.4 检测前的准备 4

 4.5 验证与扩大检测 5

 4.6 检测结果评价 5

 4.7 检测报告 6

5 超声波法成孔质量检测 6

 5.1 一般规定 6

 5.2 检测仪器与设备 6

 5.3 现场检测技术 7

 5.4 检测数据分析与判定 7

6 接触式仪器组合法成孔质量检测 8

 6.1 一般规定 9

 6.2 检测仪器与设备 9

 6.3 现场检测技术 9

 6.4 检测数据分析与判定 11

7 低应变反射波法 11

 7.1 一般规定 11

 7.2 检测仪器与设备 12

 7.3 现场检测技术 12

 7.4 检测数据分析与判定 13

8 超声波法 14

 8.1 一般规定 14

 8.2 检测仪器与设备 15

 8.3 现场检测技术 15

 8.4 检测数据分析与判定 17

9 钻芯法 21

 9.1 一般规定 21

 9.2 检测仪器与设备 21

 9.3 现场检测技术 22

 9.4 芯样试件截取与加工 22

 9.5 芯样试件抗压强度试验 23

9.6 检测数据的分析与判定 23

10 高应变法 25

10.1 一般规定 25

10.2 检测仪器与设备 25

10.3 现场检测技术 26

10.4 检测数据的分析与判定 28

11 单桩竖向抗压静载试验 31

11.1 一般规定 31

11.2 检测仪器设备 31

11.3 现场检测技术 32

11.4 检测数据的分析与判定 33

12 单桩竖向抗拔静载试验 34

12.1 一般规定 34

12.2 检测仪器与设备 34

12.3 现场检测技术 34

12.4 检测数据的分析与判定 35

13 单桩水平静载试验 35

13.1 一般规定 35

13.2 检测仪器与设备 36

13.3 现场检测技术 36

13.4 检测数据的分析与判定 37

14 磁测井法 39

14.1 一般规定 39

14.2 检测仪器与设备 39

14.3 现场检测技术 39

14.4 检测数据的分析与判定 40

附录 A（规范性） 成孔质量检测仪标定方法..... 41

附录 B（规范性） 芯样试件加工和测量..... 42

附录 C（规范性） 混凝土桩头处理..... 43

附录 D（规范性） 桩身内力测试..... 44

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由天津市交通运输委员会提出并归口。

本文件起草单位：天津市交通科学研究院、天津市金艾工程检测有限责任公司。

本文件主要起草人：赵国普、彭振昨、罗会来、邵红杰、王子璐、赵国光、吕大勇、马秀君、王雪姣、王伟广、张建东、吕岳、于克扬、赵文志、高静、张弘博、吴国柱、王雪峰、张志远。

桥梁基桩检测技术规程

1 范围

本文件规定了天津市桥梁基桩检测的总体原则和一般要求，以及仪器设备、现场检测技术及检测数据的分析与判定等内容。

本文件适用于天津市桥梁工程基桩成孔质量、桩身完整性、单桩承载力、基桩钢筋笼长度的检测与评价。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- JG/T 518 基桩动测仪
- JT/T 738 基桩静载试验 自平衡法
- JTG F80/1 公路工程质量检测评定标准 第一册：土建工程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

基桩 foundation pile

桩基础中的单桩。

3.2

沉淀 sediment

基桩成孔后，淤积于孔底部的非原状沉淀物。

3.3

超声波法成孔质量检测 drilling hole test by ultrasonic method

采用超声波探头垂直连续测量各深度水平方向的孔径，根据由记录仪同步绘制出各方向孔壁形态的记录图，判定孔径、孔深、孔壁倾斜度。

3.4

接触式仪器组合法成孔质量检测 drilling hole test by instruments contactually inspection method

系用伞形孔径仪、专用测斜仪、沉淀测定仪或其他有效的沉淀检测工具来判定灌注桩成孔孔径、孔深、孔倾斜度及沉淀厚度。

3.5

桩身完整性 pile integrity

反映桩身长度和截面尺寸相对变化、桩身材料密实性和连续性综合状况的定性指标。

3.6

桩身缺陷 pile defects

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）、离析、空洞、蜂窝、松散等不良现象的统称。

3.7

低应变反射波法 low strain reflected wave method

在桩顶施加低能量冲击荷载，实测被检桩加速度（或速度）响应时程曲线，运用一维线弹性波动理论的时域和频域分析，对被检桩的完整性进行评判的检测方法。

3.8

超声波法 ultrasonic logging method

在桩身混凝土内发射并接收超声波，实测超声波在混凝土介质中传播的声时、波幅和频率等参数的相对变化，对被检桩的桩身完整性进行评判的检测方法。

3.9

钻芯法 core drilling method

用钻机钻取芯样，对被检桩的桩长、桩身缺陷及其位置、桩底沉淀厚度、桩身混凝土强度以及桩端岩土性状进行评判的检测方法。

3.10

高应变法 high strain dynamic method

在桩顶施加高能量冲击荷载，实测桩顶附近或桩顶部的速度和力时程曲线，通过波动理论分析，评判单桩竖向抗压承载力和桩身完整性的检测方法。该方法也可用于选择桩型和桩端持力层，监控打桩过程。

3.11

静载试验 static load test

在桩顶部逐级施加竖向压力、竖向上拔力或水平推力，观测桩顶部随时间产生的沉降、上拔位移或水平位移，以确定相应的单桩竖向抗压承载力、单桩竖向抗拔承载力或单桩水平承载力的试验方法。

3.12

磁测井法 Magnetic method

在桩中或桩侧土体成孔，通过测量磁场垂直分量沿孔深方向的变化来分析和判断钢筋笼长度的检测方法。

3.13

桩身内力测试 internal force testing of pile shaft

通过桩身应变、位移的测试，计算荷载作用下的桩侧阻力、桩端阻力或桩身弯矩的试验方法。

4 基本规定

4.1 仪器设备

4.1.1 基桩检测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，确认仪器设备工作正常后方可使用。

4.1.2 基桩检测用仪器设备的主要技术性能和工作环境条件应符合相关规定，并具有良好的显示、记录和贮存功能。

4.2 检测方法选择和检测数量

4.2.1 检测方法应根据工程需要和检测目的按表1规定的检测内容确定。

表1 检测方法一览表

检测方法		检测内容
超声波法成孔质量检测		检测灌注桩成孔的孔径、孔深及倾斜度
接触式仪器组合法成孔质量检测		检测灌注桩成孔的孔径、孔深、倾斜度及沉淀厚度
低应变反射波法		检测桩身缺陷及位置，评判桩身完整性类别
超声波法	透射法	检测灌注桩桩身缺陷及位置，评判桩身完整性类别
	折射法	检测灌注桩钻芯孔周围桩身缺陷及位置，辅助评判桩身完整性类别
钻芯法		检测桩长、桩身混凝土强度、桩底沉淀厚度、桩身缺陷及其位置，评判桩身完整性类别； 评判桩端持力层岩土性状
高应变法		分析桩侧和桩端土阻力，评判单桩竖向抗压承载力是否满足设计要求； 检测桩身缺陷及其位置，评判桩身完整性类别； 进行打桩过程监控
静载 荷 试 验	单桩竖向抗压静载试验	确定单桩竖向抗压极限承载力； 评判竖向抗压承载力是否满足设计要求； 通过桩身内力测试，测定桩侧及桩端阻力
	单桩竖向抗拔静载试验	确定单桩竖向抗拔极限承载力； 评判竖向抗拔承载力是否满足设计要求； 通过桩身内力测试，测定抗拔桩的桩侧阻力
	单桩水平静载试验	确定单桩水平临界荷载和极限承载力，推定土抗力参数； 评判水平承载力或水平位移是否满足设计要求； 通过桩身内力测试，测定桩身弯矩
磁测井法		检测灌注桩、预制桩的钢筋笼长度，评判钢筋笼长度是否满足设计要求

4.2.2 为保证检测结论的可靠性，根据不同被检对象和检测要求，当采用一种检测方法对桩身完整性类别评判有疑问时，应选用两种或两种以上的检测方法进行综合分析判断。

4.2.3 检测方法和检测数量应符合下列规定：

4.2.3.1 检测数量的确定以单位工程同一条件下的桩基总数为计算依据。

4.2.3.2 桥梁工程混凝土灌注桩应 100%进行成孔质量检测，检测方法的选定应具有适宜性并满足工程检测的特定要求。

4.2.3.3 勘测设计阶段，有下列情况之一时，施工前应进行试验桩承载力检测，检测方法采用静载试验。检测数量满足设计要求，且不应少于 3 根；当工程桩总数小于 50 根时，检测数量不应少于 2 根：

- 为设计提供依据的单桩承载力检测；
- 工程地质条件复杂、基桩施工质量可靠性低；
- 采用的新桩型或采用新工艺成桩的桩基；
- 设计等级为甲级的桩基；
- 设计或业主有要求的。

4.2.3.4 施工阶段的工程桩应进行单桩承载力和桩身完整性检测，灌注桩宜进行钢筋笼长度检测。

4.2.3.5 工程桩的单桩承载力检测数量应根据设计要求和工程地质条件确定。对设计等级为甲级、地质条件复杂或异型（非等直径）桩的桩基，其检测数量不应少于总桩数的 1%，且不应少于 3 根；其它桩基工程的检测数量不宜少于总桩数的 1%，且不应少于 3 根；当工程桩总数小于 50 根时，检测数量不应少于 2 根：

a) 对于特大桥和地质条件复杂的大、中桥的桩基，应采用静载试验方法确定单桩承载力；
b) 一般中桥、小桥的桩基，宜采用静载试验，在具有同一条件下的动-静试验对比资料和实测经验时也可采用高应变法；

c) 由于场地限制等原因难以采用静载试验检测时也可采用自平衡法。自平衡法可按照 JT/T 738 中的有关要求执行。

4.2.3.6 工程桩的桩身完整性应 100% 检测，检测方法可采用超声波法、低应变反射波法、高应变法或钻芯法。其中，采用超声波法检测桩身完整性的数量不应少于灌注桩总桩数的 50%，且桩径大于等于 1500mm 或桩长大于等于 40m 以及重要工程、关键部位的灌注桩均应 100% 采用超声波法进行桩身完整性检测；对大直径嵌岩灌注桩，还应采用钻芯法检测桩底沉淀厚度和桩端岩土性状，检测数量不宜少于总桩数 10%，且不少于 3 根；对于大桥、特大桥还应采取钻芯法检测桩身完整性，数量不应少于总桩数 1%，且不少于 3 根；对于设计等级为甲级或两节及以上的预制桩，应进行高应变法检测，检测数量不应少于总桩数的 5%，且不得少于 6 根。

4.2.3.7 工程桩检测钢筋笼长度可采用磁测井法，检测数量不宜少于总桩数的 5%，且不应少于 5 根；当工程桩总数在 50 根以内时，不应少于 3 根。对于施工质量有疑问的桩或重要工程、关键部位的桩，适当增加抽检数量。

4.2.3.8 高应变法检测单桩竖向抗压承载力时，在同一条件下检测数量不应少于总桩数的 5%，且不应少于 5 根；当工程地质条件复杂或对施工质量有疑问时，应增加检测数量。当采用高应变法进行打桩过程监测或为选择沉桩工艺参数时，不应少于 3 根。

4.2.3.9 采用超声波法检测端承桩桩身完整性时，应同时采用低应变反射波法或其它适宜的方法检测桩端的支承情况。

4.3 检测桩位的确定

4.3.1 检测桩位的选择应事先确定，检测过程中不得随意更改。

4.3.2 检测桩位的选择应按如下原则确定：

- a) 施工质量有问题或有疑问的桩；
- b) 结构受力较大部位或荷载差异较大部位；
- c) 地基土工程性能较差部位或土层变化复杂地段；
- d) 不同施工工艺以及不同施工机台的桩；
- e) 随机抽样，基本均匀分布，应具有代表性。

4.4 检测前的准备

4.4.1 检测机构应及时调查、搜集以下有关资料：

- 岩土工程勘察资料、桩基设计图纸或资料、施工记录及平面位置图等，了解施工工艺及施工过程中出现的异常情况；
- 检测项目现场实施的可行性。

4.4.2 检测方法和制定检测方案应根据调查结果和检测目的合理选用。检测实施方案宜包括：工程概况、所选用的检测方法及依据的检验标准、抽样原则、拟投入的仪器设备、检测时间进度安排、准备提交的成果资料以及其它应当说明的事项等。

4.4.3 在进行检测前对检测所需要的设备仪器仪表检查调试，确认其工作状态。

- 4.4.4 检测开始时间应满足拟用检测方法对混凝土强度（或龄期）和地基土休止期的规定：
- a) 当采用低应变反射波法或检测时，受检桩混凝土强度不应低于设计强度的 70%，且不应低于 15MPa，龄期不应少于 7d；
 - b) 对混凝土灌注桩进行单桩承载力检测或钻孔取芯检测时，受检桩的混凝土龄期应达到 28d 以上，或受检桩同条件养护试件强度应达到设计强度要求；
 - c) 承载力检测前的休止时间除应达到本条 b) 款规定的桩身混凝土强度要求外，其休止时间尚应符合表 2 的规定。采用泥浆护壁的钻孔灌注桩应根据情况适当延长休止期；
 - d) 对端承桩，应根据桩端持力层的土性来选用休止期；对于摩擦桩，休止期的确定应取决于桩侧土的性质，桩侧若是性质相差悬殊的层状土，则一般宜按休止较长的那种土层及其影响权重大小来综合考虑。对于摩擦端承桩和端承摩擦桩，其休止期遵从类似原则确定。

表2 休止时间

土的种类		休止时间（d）
砂土		7
粉土		15
粘性土	非饱和	15
	饱和	25

4.5 验证与扩大检测

- 4.5.1 钻孔灌注桩成孔质量检验标准，应符合 JTG F80/1 的相关规定。当检测结果不满足标准规定时，应立即通知有关部门，经处理后进行重复检测，直至符合要求。
- 4.5.2 单桩竖向抗压承载力验证应采用单桩竖向抗压静载试验。
- 4.5.3 桩身浅部缺陷可采用开挖验证。
- 4.5.4 桩身或接头存在裂隙的预制桩可采用高应变、静载试验等方法验证，空心预制桩也可采用孔内摄像的方式验证。
- 4.5.5 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。同时，也可采用孔内摄像的方式验证。
- 4.5.6 对低应变反射波法或超声波法检测中不能明确桩身完整性类别的桩或Ⅲ类桩，可根据实际情况采用钻芯法、静载法、高应变法、开挖等方法进行验证检测。
- 4.5.7 当单桩承载力或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。
- 4.5.8 当钢筋笼长度检测结果不满足设计要求时，应分析原因并扩大检测。
- 4.5.9 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的确认。

4.6 检测结果评价

- 4.6.1 桩身完整性评价，应给出每根被检桩的桩身完整性类别。桩身完整性分类应符合表 3 的规定，并按本标准第 7 章～第 10 章的相关技术要求划分。

表3 桩完整性类别划分

桩身完整性类别	特征
I 类桩	桩身完整
II 类桩	桩身基本完整，有轻度缺陷

Ⅲ类桩	桩身有明显缺陷
Ⅳ类桩	桩身有严重缺陷

- 4.6.2 单桩承载力的评价，应给出受检桩的承载力检测值，并评价单桩承载力是否满足设计要求。
- 4.6.3 成孔质量的评价，应给出受检桩成孔的孔径、孔深、倾斜度及沉淀厚度，并评价其是否满足规范或设计要求。
- 4.6.4 钢筋笼长度的评价，应给出受检桩的钢筋笼长度检测值，并评价钢筋笼长度是否满足设计要求。

4.7 检测报告

- 4.7.1 检测报告应用词规范、文字简练、数据可靠、结论明确。
- 4.7.2 检测报告宜包含以下内容：
- a) 检测人员、报告编写人员及审核审批人员的签字以及建设、设计、施工、监理、勘察等责任主体的全称；
 - b) 前言或概况：包括工程名称、地点、基础类型、总工程桩数、检测内容、数量及检测时间；检测仪器设备名称、型号及编号；
 - c) 地质条件描述；
 - d) 检测依据的规范，检测方法（原理）、检测过程叙述；
 - e) 受检桩（孔）的桩（孔）号、桩（孔）位；
 - f) 检测结果：受检桩的检测数据（表格）和汇总结果；
 - g) 检测结论：根据检测结果分析得到的结论；
 - h) 附图附表：包括桩（孔）位平面布置图、实测（计算分析）曲线等。

5 超声波法成孔质量检测

5.1 一般规定

- 5.1.1 本方法适用于检测灌注桩成孔的孔径、孔深及倾斜度。
- 5.1.2 被检测孔径不应小于 0.6m，不宜大于 5.0m。
- 5.1.3 泥浆性能应满足表 4 的要求。

表4 泥浆性能指标

项目	性能指标
重度	<12.0 (kN/m³)
粘度	18-25 (s)
含砂量	<4%

5.2 检测仪器与设备

- 5.2.1 超声波法检测仪器设备性能应符合下列规定：
- 孔径检测精度不低于±0.2%F·S；
 - 孔深检测精度不低于±0.3%F·S；
 - 测量系统为超声波脉冲系统；
 - 超声波工作频率应满足检测精度要求；
 - 脉冲重复频率应满足检测精度要求；

- 通道应至少二通道；
- 记录方式为模拟式或数字式；
- 具有自校功能。

5.3 现场检测技术

- 5.3.1 超声波法成孔检测，应在清孔完毕，孔中泥浆内气泡基本消散后进行。
- 5.3.2 检测前，应利用护筒直径作为标准距离标定仪器系统，标定至少进行 2 次。标定完成后，在该孔的检测过程中不得变动相关参数。
- 5.3.3 仪器探头宜对准护筒中心，检测自孔口至孔底或自孔底至孔口连续进行。
- 5.3.4 检测中探头升降速度不宜大于 12m/min。
- 5.3.5 检测时应正交 4 个方向进行，且标明检测剖面正交 4 个方向与实际方位的关系；试成孔、静载荷试桩孔、变直径桩孔及直径大于 4.0m 的桩孔宜增加检测方向。
- 5.3.6 现场检测的图像应清晰、准确；当不满足要求时，应采取有效措施。
- 5.3.7 在孔径检测可疑测点周围，应加密测点进行复测，进一步确定孔径变化位置及范围。

5.4 检测数据分析与判定

- 5.4.1 超声波在泥浆介质中传播速度可按下式计算：

$$c = 2(d_0 - d') / (t_a + t_b) \dots\dots\dots (1)$$

式中：c——超声波在泥浆介质中传播的速度（m/s）；
d₀——护筒直径（m）；
d'——两方向相反换能器的发射（接收）面之间的距离（m）；
t_a、t_b——对称探头的实测声时（s）。

- 5.4.2 孔径可按式计算：

- a) 探头中心与 4 个方向桩孔壁的距离（图 1），应按下式计算：

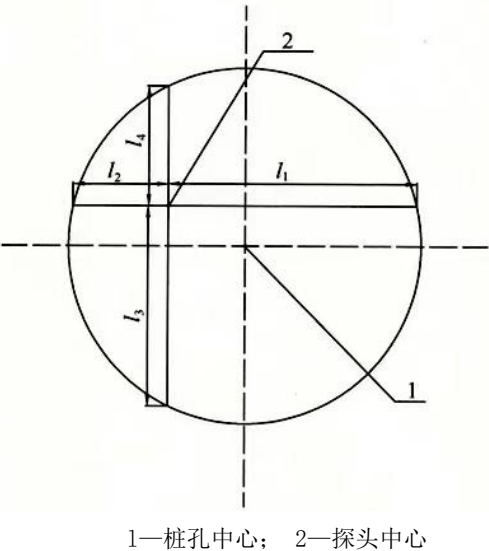


图1 超声波法孔径计算示意

$$l_i = c \cdot \frac{t_i}{2} + \frac{d'}{2} \dots\dots\dots (2)$$

式中：l_i——第i = (1,2,3,4)方向探头中心与桩孔壁的距离（m）；

t_i ——第 $i = (1,2,3,4)$ 方向上孔壁反射信号的声时值 (s)。

b) 成孔孔径应按下列式计算:

$$D = \sqrt{(l_3 - \frac{l_3+l_4}{2})^2 + (\frac{l_1+l_2}{2})^2} + \sqrt{(l_1 - \frac{l_1+l_2}{2})^2 + (\frac{l_3+l_4}{2})^2} \dots\dots\dots (3)$$

式中: D ——测点位置的孔径检测值 (m)。

5.4.3 成孔偏心距、倾斜度应按下列方法计算:

$$E_n = \sqrt{(\frac{l_{1,0}+l_{2,n}-l_{1,n}-l_{2,0}}{2})^2 + (\frac{l_{3,0}+l_{4,n}-l_{3,n}-l_{4,0}}{2})^2} \dots\dots\dots (4)$$

$$K_n = (E_n/H_n) \times 100\% \dots\dots\dots (5)$$

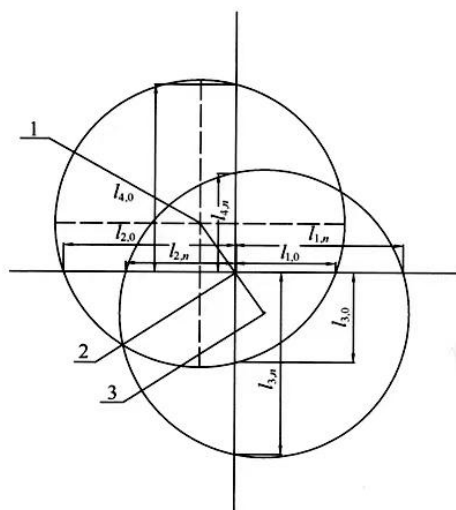
式中: E_n ——成孔在第 n 测点处的偏心距 (m) ;

$l_{i,0}$ ——孔口探头中心距离 i 方向桩孔壁的距离 (m) ;

$l_{i,n}$ ——第 n 测点探头中心距离 i 方向孔壁的距离 (m) ;

K_n ——桩孔在第 n 测点处的倾斜度 (%);

H_n ——桩孔在第 n 测点处的深度值, 由仪器自带的深度计数器同步测得 (m)。



1—孔口位置桩孔中心 ; 2—探头中心; 3—测点 n 位置桩孔中心

图2 超声波法倾斜度计算示意图

5.4.4 现场检测记录图应满足下列要求:

- 有明显的刻度标记, 能准确显示任何深度截面的孔径及孔壁的形状;
- 标记检测时间、设计孔径、检测方向及孔底深度;
- 记录图纵横比例尺, 应根据设计孔径及孔深合理设定, 并应满足分析精度需要。

5.4.5 检测报告除应符合本规程 4.7 条规定外, 宜包括下列内容:

- a) 按设计要求及相关标准评判成孔质量;
- b) 附图附表: 包括孔位平面布置图、每桩孔的测试记录图和典型地质柱状图。

6 接触式仪器组合法成孔质量检测

6.1 一般规定

本方法适用于检测灌注桩成孔的孔径、孔深、倾斜度及沉淀厚度。

6.2 检测仪器与设备

6.2.1 检测仪器设备可由伞形孔径仪、专用测斜仪及沉淀厚度测定仪、专用测绳组成。

6.2.2 检测仪器设备应具有良好的稳定性及绝缘性，且应具备检测工作所必须的防尘、防潮、防振等功能，并能在 $-10^{\circ}\text{C}\sim+40^{\circ}\text{C}$ 温度范围内正常工作。

6.2.3 伞形孔径仪应符合下列规定：

- 被测孔径小于 1.2m 时，孔径检测允许误差 $\pm 5\text{mm}$ ，被测孔径大于等于 1.2m 时，孔径检测允许误差 $\pm 25\text{mm}$ ；
- 孔深检测精度不低于 0.3%FS；
- 探头绝缘性能不小于 $100\text{M}\Omega/500\text{V}$ ，在潮湿情况下不小于 $2\text{M}\Omega/500\text{V}$ 。

6.2.4 专用测斜仪应符合下列规定：

- 顶角测量范围： $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ ；
- 顶角测量误差： $\pm 10'$ ；
- 分辨率不低于 $36''$ 。

6.2.5 沉淀测定仪应符合下列规定：

- 采用电阻率法测定沉淀的仪器，电阻率测量误差 $\leq 5\%$ ，换算沉淀厚度测量误差 $\leq \pm 5\text{mm}$ ；
- 采用探针压力法测量沉淀的仪器，其换算沉淀厚度测量误差应 $\leq \pm 5\text{mm}$ ，探针长度应能满足沉淀厚度的测试要求；
- 采用探针压力-倾角结合法的仪器，其换算沉淀厚度测量误差应 $\leq \pm 5\text{mm}$ ；
- 采用静力触探法，测量精度换算沉淀厚度误差应 $\leq \pm 5\text{mm}$ ；
- 探头的重量、截面积应能适应检测要求。

6.2.6 专用测绳应采用不易变形的材质，其长度应定期进行校准，最大量程不宜小于测量孔深的 1.2 倍，最小刻度不应大于 10mm，端部垂球宜为平底圆锥体，质量不应小于 1kg；

6.3 现场检测技术

6.3.1 孔径检测

6.3.1.1 接触式仪器组合法检测灌注桩成孔孔径，应在清孔完毕后进行。

6.3.1.2 伞形孔径仪进入现场检测前应进行标定，标定应按照附录 A.1.1 的要求进行。标定完毕后恒定电流源电流和量程，仪器常数及起始孔径在检测过程中不得变动。

6.3.1.3 检测前应检查自动记录仪与孔口滑轮的同步关系。

6.3.1.4 检测前宜将深度起算面与钻孔钻进深度起算面对齐，以此计算孔深。

6.3.1.5 孔径检测应自孔底向孔口连续进行。

6.3.1.6 检测中探头应匀速上提，提升速度应不大于 10m/min。孔径变化较大处，应降低探头提升速度。

6.3.1.7 检测结束时，应根据孔口护筒直径的检测结果，再次标定仪器的测量误差，必要时应重新标定后再次检测。

6.3.1.8 在孔径检测可疑点周围或桩径变化较大处，宜加密测点进行复测，进一步确定桩径变化位置及范围。

6.3.2 倾斜度检测

- 6.3.2.1 接触式仪器组合法检测灌注桩成孔倾斜度宜采用顶角测量方法。
- 6.3.2.2 专用测斜仪进入现场检测前应进行标定，标定应按照附录 A.1.2 的要求进行。
- 6.3.2.3 钻孔内直接测斜应外加扶正器，宜在孔径检测完成后进行。
- 6.3.2.4 应根据孔径检测结果合理选择不同直径的扶正器。
- 6.3.2.5 桩孔倾斜度检测应避开明显扩径段。
- 6.3.2.6 检测前应进行孔口校零。
- 6.3.2.7 应自孔口向下分段检测，测点距不宜大于 5m，在顶角变化较大处加密检测点数。若桩孔倾斜度检测超标，为保证检测精度，应该重复检测，二次检测结果误差应小于 1%，否则应查明原因，再次检测，可以取其中二次误差小于 1%的检测结果的平均值作为最终检测结果。三次检测结果误差均大于 1%，仪器设备应重新标定。

6.3.3 沉淀厚度检测

- 6.3.3.1 成孔的沉淀厚度检测，宜在清孔完毕后，混凝土灌注前进行。
- 6.3.3.2 沉淀厚度检测可采用电阻率法、探针压力法、压力-倾角结合法、静力触探法、比较孔深法等。
- 6.3.3.3 电阻率法检测步骤应符合下列规定：
 - a) 将沉淀测定仪探头对准孔中心部位，下放沉淀测定仪探头直到孔底，下放测头时观察电阻率值变化范围，选取合适的测量量程或放大倍数；
 - b) 提升沉淀测定仪探头 1~2m，再让测定仪探头自由下落，穿透沉淀层达到原土层；
 - c) 将沉淀测定仪探头匀速缓慢地提升，沉淀测定仪自动记录孔底不同深度的泥浆电阻率，并绘制出“泥浆电阻率-深度”曲线，直到将测定仪探头提升至距离孔底约 2m 高度停止；
 - d) 泥浆电阻率-深度曲线上的拐点以下部分可判断为沉淀，其厚度由深度坐标量取。
- 6.3.3.4 探针压力法检测步骤应符合下列规定：
 - a) 沉淀探头下放到孔槽底时，电机自动停止下放探头；
 - b) 主机读取探头状态，当探头倾斜超过一定范围时提示调整探头位置直至探头近似直立；
 - c) 主机控制探针缓慢伸出，同时测定探针压力和伸出长度，当探针穿过沉淀触碰到底部时压力开始增大，压力曲线发生变化，此时探针伸出长度即为当前位置沉淀厚度。
- 6.3.3.5 探针压力-探头倾角结合法检测步骤应符合下列规定：
 - a) 沉淀探头下放到孔槽底时，电机自动停止下放探头；
 - b) 主机读取探头状态，当探头倾斜超过一定范围时提示调整探头位置直至探头近似直立；
 - c) 主机控制探针缓慢伸出，同时测定探针压力和伸出长度，当探针穿过沉淀触碰到底部，压力曲线变化较小，角度曲线变化较大，由于底部的不规则导致探头倾斜，此时探针伸出长度即为当前位置沉淀厚度。
- 6.3.3.6 静力触探法检测步骤应符合下列规定：
 - a) 本方法一般用于旋挖成孔的灌注桩；
 - b) 成孔后，通过适配器将静力触探装置和钻杆稳固连接；
 - c) 下放探头，接近桩底时减缓速度；
 - d) 当静力触探头进入沉淀时，若干探头和浮盘，开始分别记录 锥尖阻力与位移，可根据阻力变化和位移测定沉淀厚度。
- 6.3.3.7 比较孔深法：通过测量实际孔深与钻进深度差值确定。
- 6.3.3.8 沉淀厚度检测应至少进行 2 次，取 2 次检测数据的平均值为该成孔的沉淀厚度值。

6.3.4 孔深检测

- 6.3.4.1 成孔的孔深检测，可以与前述孔径或倾斜度检测并行测量，也可采用测绳法单独测量。

- 6.3.4.2 检测前应将深度起算面与钻孔钻进深度起算面对齐，以此计算孔深。
- 6.3.4.3 采用专用测绳进行孔深测量应符合下列规定：
- 测绳距孔壁 100～200mm，垂绳应缓慢沉入孔内，接触孔底时，轻轻拉起垂球并放下，判断孔底位置；
 - 孔深测量每孔沿孔壁间隔布置不应少于 3 个测点，取其最小值为测量孔深。

6.4 检测数据分析与判定

- 6.4.1 孔径记录图应满足下列要求：
- 有明显孔径及深度的刻度标记，能准确显示任何深度截面的孔径；
 - 有设计孔径基准线、基准零线及同步记录深度标记；
 - 记录图纵横比例尺，应根据设计孔径及孔深合理设定，并应满足分析精度需要。
- 6.4.2 孔径 D 可按式计算：

$$D = D_0 + k \times \Delta V / I \dots\dots\dots (6)$$

式中： D ——孔径（m）；
 D_0 ——起始孔径（m）；
 k ——仪器常数（m/Ω）；
 ΔV ——信号电位差（V）；
 I ——恒定电流源电流（A）。

- 6.4.3 桩孔倾斜度可按式计算：
- $$K = (e/L) \times 100\% \dots\dots\dots (7)$$
- $$e = D/2 - \phi/2 + \sum h_i \times \sin[(\theta_i + \theta_{i-1})/2] \dots\dots\dots (8)$$

式中： K ——孔倾斜度；
 e ——桩孔偏心距（m）；
 L ——实测桩孔深度（m）；
 D ——孔径或钻具内径（m）；
 ϕ ——测斜探头或扶正器外径（m）；
 h_i ——第 i 段测点距（m）；
 θ_i ——第 i 测点实测顶角（°）；
 θ_{i-1} ——第 $i-1$ 测点实测顶角（°）。

- 6.4.4 检测报告除应符合本规程 4.7 条规定外，宜包括下列内容：
- a) 按设计要求及相关标准评判成孔质量；
 - b) 附图附表：包括孔位平面布置图、每桩孔的测试记录图和典型地质柱状图。

7 低应变反射波法

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，判定桩身缺陷程度及位置。桩的有效检测桩长范围应通过现场试验确定。
- 7.1.2 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反射波法检测的有

效性。

7.1.3 被检桩的反射信号应能有效识别，当无法有效识别时，应采用其他方法检测。

7.2 检测仪器与设备

7.2.1 检测系统包括信号采集及处理仪、传感器、激振设备和专用附件。

7.2.2 检测仪器应具有信号采集、显示、存储、滤波放大和信号分析功能，应具备增益高、噪声低、频带宽的特点。其主要技术性能指标应不低于 JG/T 518 中规定的 2 级标准要求。信号采集及处理仪应符合下列规定：

- 数据采集和处理器模/数 (A/D) 转换器的位数不宜低于 16bit；
- 采样间隔宜为 $5\mu\text{s}\sim 50\mu\text{s}$ ；
- 单通道采样点不少于 1024 点；
- 放大器增益宜大于 60dB，可调，线性度良好，其频响范围应满足 10Hz $\sim$ 5kHz。

7.2.3 传感器可选用压电式加速度传感器或磁电式速度传感器，频响曲线的有效范围应覆盖整个测试信号的频率范围；

7.2.4 瞬态激振设备应包括能够激发宽脉冲和窄脉冲的力棒、力锤和锤垫。

7.3 现场检测技术

7.3.1 检测前准备工作应符合下列规定：

- 根据现场实际情况选择合适的激振设备和传感器，检查测试系统各部分之间是否连接良好，确认整个测试系统处于正常工作状态；
- 桩头应凿除浮浆至新鲜坚硬混凝土，桩顶面平整、密室，宜用打磨机将测试点和激振点磨平；
- 应测量并记录桩顶截面尺寸；
- 预制桩的检测应在相邻桩施工完成后进行。

7.3.2 测试参数的设定，应符合下列规定：

- 时域信号记录的时间长度应在 $2L/c$ 时刻后延缓不少于 5ms，频域信号分析的频率上限应不小于 2000Hz；
- 设定桩长应为被检桩桩顶至桩底的实际施工桩长；
- 桩身波速可根据本地区同类型桩的测试值初步设定；
- 采样间隔或采样频率应根据桩长、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。

7.3.3 传感器的安装和激振操作应符合下列规定：

- 安装传感器部位的混凝土应平整，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；
- 激振设备宜通过现场对比试验选定。短桩或浅部缺陷桩的检测宜采用窄脉冲低能量激振；长桩、大直径桩或深部缺陷桩的检测宜采用宽脉冲高能量激振，也可采用不同的锤垫来调整激振脉冲宽度；
- 采用力棒激振时，应自由下落；采用力锤敲击时，应使其作用力方向与桩顶面垂直。

7.3.4 信号的采集应符合下列规定：

- 对混凝土灌注桩，激振点宜选在桩中心，传感器宜安装在距桩中心 $2/3$ 半径处，且距离桩的主筋不宜小于 50mm。当桩径小于 1000mm 时不宜少于 2 个测点，当桩径大于等于 1000mm 时应设置 3 $\sim$ 4 个测点，测点宜以桩心为中心对称布置；
- 对混凝土预制桩，当边长或桩径小于 600mm 时不宜少于 2 个测点，当边长或桩径大于等于 600mm 时不宜少于 3 个测点；

- 对预应力混凝土管桩，激振点、检测点和桩中心连线形成的夹角宜为 90°，且不应少于 2 个测点。当法兰盘与桩身混凝土之间结合紧密时，可以不进行处理。若有损裂现象，则需用电锯或电砂轮将其截除磨平，将传感器安置于管壁中间部位进行检测；
- 各测点的重复检测次数不应少于 3 次，且检测波形应具有良好的一致性；
- 当干扰较大时，可采用信号增强技术进行重复激振，提高信噪比。当信号一致性差时，应分析原因，排除人为和检测仪器等干扰因素，重新检测；
- 对存在缺陷的桩应改变检测条件重复检测，相互验证。

7.4 检测数据分析与判定

7.4.1 桩身完整性分析宜以时域曲线为主，辅以频域分析，并结合岩土工程勘察资料、桩型、施工记录 and 波形特征等因素进行综合分析评判。

7.4.2 桩身波速平均值的确定应符合下列规定：

- a) 当桩长已知、桩端反射信号明显时，选取相同条件下不少于 5 根 I 类桩的桩身波速按下式计算其平均值：

$$c_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \dots\dots\dots (9)$$

$$c_i = \frac{2L \times 1000}{\Delta T} = 2L \cdot \Delta f \dots\dots\dots (10)$$

式中：c_m——桩身波速平均值（m/s）；
c_i——第*i*根桩的桩身波速计算值（m/s）；
L——测点以下桩长（m）；
ΔT——时域信号第一峰与桩端反射波峰间的时间差（ms）；
Δf——幅频曲线桩端相邻谐振峰间的频差（Hz），计算时不宜取第一与第二峰；
n——参加波速平均值计算的基桩数量（n≥5）。

- b) 当桩身波速平均值无法按上款确定时，可根据本地区相同桩型及施工工艺的其他桩基工程的测试结果，并结合桩身混凝土强度等级与实践经验综合确定。

7.4.3 桩身缺陷位置应按下列公式计算：

$$x = \frac{1}{2000} \cdot \Delta t_x \cdot c = \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{\Delta f_x} \dots\dots\dots (11)$$

式中：x——测点至桩身缺陷之间的距离（m）；
Δt_x——时域信号第一峰与缺陷反射波峰间的时间差（ms）；
Δf_x——幅频曲线所对应缺陷的相邻谐振峰间的频差（Hz）；
c——桩身波速(m/s)，无法确定时用c_m值替代。

7.4.4 桩身完整性类别应结合缺陷出现的深度、测试信号衰减特性及设计桩型、成桩工艺、地基条件、施工情况，按表 5 所列时域信号特征或幅频信号特征进行综合分析判定。

表5 桩身完整性判定表

类别	时域信号特征	频域信号特征
I	2L/c 时刻前无缺陷反射波，有桩底反射信号	桩底谐振峰基本等间距排列，相邻频差Δf ≈ c/2L

II	2L/c 时刻前有轻微的缺陷反射波, 有桩底反射波信号	桩底谐振峰基本等间距排列, 相邻频差 $\Delta f \approx c/2L$, 局部轻微缺陷产生的谐振峰与桩底谐振峰之间频差 $\Delta f_x > c/2L$
III	2L/c 时刻前有明显缺陷反射波, 桩底反射信号不明显, 其它特征介于 II 类和 IV 类之间	
IV	2L/c 时刻前有严重的缺陷反射波, 或因桩身严重缺陷使波形呈现多次大振幅反射, 无桩底反射信号	严重缺陷峰-峰值排列基本等间距, 相邻频差 $\Delta f_x > c/2L$, 无桩底谐振峰; 或因桩身浅部严重缺陷只出现单一谐振峰
注: 同一场地、地质条件相近、桩型和成桩工艺相同的基桩, 由于桩端处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, 可按本场地同条件下有桩底反射波的其它桩实测信号判定桩身完整性类别。		

- 7.4.5 桩身完整性的分析当出现下列情况之一时, 宜结合其他检测方法综合评判:
- 超过有效检测长度的超长桩, 其测试信号不能明确反映桩身下部和桩端情况;
 - 因地层和施工工艺原因引起的桩身截面渐变或多变, 且变化幅度较大的混凝土灌注桩;
 - 当桩长的推算值与实际桩长明显不符, 且又缺乏相关资料加以解释或验证;
 - 实测信号复杂、无规律或呈现低频大振幅衰减振动, 无法对其进行准确的桩身完整性分析和评价;
 - 对于预制桩, 时域曲线在接头处有明显同相反射, 无法对其判定是断裂错位还是接桩不良。
- 7.4.6 对于嵌岩桩, 当桩端反射信号为单一反射波且与锤击脉冲信号同相时, 应结合桩底基岩的属性, 成桩工艺综合分析其原因, 必要时采取钻芯法、静载试验或高应变法核验桩端嵌岩情况。
- 7.4.7 预制桩在正常的桩底反射前出现与入射波同相异常反射时, 应分析是否存在接桩部位; 当无法对其进行准确评判时, 应结合其他检测方法综合评判桩身完整性。
- 7.4.8 检测报告除应符合本规程 4.7 条规定外, 宜包括下列内容:
- a) 桩身波速取值;
 - b) 桩身完整性描述, 包括缺陷位置、桩身完整性类别;
 - c) 时域曲线图, 并注明桩底及桩身缺陷反射位置。

8 超声波法

8.1 一般规定

- 8.1.1 超声波法包括跨孔声波透射法和单孔声波折射法。
- 8.1.2 跨孔声波透射法适用于检测直径不小于 800mm 的混凝土灌注桩的桩身完整性, 评判桩身缺陷的位置、范围和程度; 单孔声波折射法适用于辅助评判缺陷位置、范围和程度。
- 8.1.3 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进行评定:
- 声测管未沿桩身通长配置;
 - 声测管堵塞导致检测数据不全;
 - 声测管埋设数量不符合本规程第 8.3.1 条的规定。
- 8.1.4 超声波检测管堵管的处理办法:
- 对于声测管堵管应采取措施通管后, 再进行检测;

- 对于只有一根检测管无法通管的特殊墩台桩基，可在堵塞的检测管周围 15cm 范围内钻芯并利用钻芯孔进行复测评定；对于两根及以上检测管无法通管的，宜采用钻芯法检测评定；
- 对于无法通管的基桩，由检测单位采用适合方法综合评定。

8.2 检测仪器与设备

- 8.2.1 检测系统应由径向换能器、声波发射、接受放大、数据采集、数据处理、显示及存储部分组成。
- 8.2.2 检测仪应具有波形实时显示和声参量自动判读功能。当采用单孔声波折射法检测时，应具有一发双收功能。
- 8.2.3 声波发射应采用高压阶跃脉冲或矩形脉冲，其电压值宜为 250V~1000V，且分档可调。
- 8.2.4 接收放大与数据采集器应符合下列规定：
- 接收放大器的频带宽度为 5kHz~200kHz，增益分辨率不应小于 0.1dB，放大器的噪声有效值不大于 10 μ V；仪器动态范围不小于 100dB，测量误差小于 1dB；
 - 声时测量范围大于 2000 μ s，分辨率优于 1 μ s，测量误差不应大于 2%；
 - 采集器模—数转换精度不低于 8bit，采样频率不小于 10MHz，最大采样长度不应小于 8kB。
- 8.2.5 径向振动换能器应符合下列规定：
- 径向水平面应无指向性；
 - 谐振频率宜大于 25kHz；
 - 在 1MPa 水压下能正常工作；
 - 收、发换能器的导线均应有长度标注，其标注允许偏差不应大于 10mm；
 - 接收换能器宜带有前置放大器，频带宽度宜为 5kHz~60kHz；
 - 单孔检测采用一发双收一体型换能器，其中发射换能器至接收换能器的最近距离不应小于 300mm，两接收换能器的间距宜为 200mm。

8.3 现场检测技术

- 8.3.1 声测管的埋设应符合下列规定：
- 当桩径小于 1000mm 时，应埋设不少于 2 根管；当桩径大于或等于 1000mm 且小于或等于 1600mm 时，应埋设不少于 3 根管，按等边三角形均匀布置；当桩径大于 1600mm 且小于 2500mm 时，应埋设不少于 4 根管，按正方形均匀布置；当桩径大于或等于 2500mm 时，应增加声测管的数量；
 - 声测管宜采用金属管，其内径应比换能器外径至少大 15mm，壁厚不宜小于 2mm，保证足够的径向刚度；当对换能器加设定位器时，检测管内径可比换能器外径大 20mm；管的连接宜采用螺纹连接或套管焊接等工艺，光滑过渡且不渗漏；
 - 声测管应牢固焊接或绑扎在钢筋笼的内侧，且互相平行、定位准确，并通长埋设至桩底，管口宜高出桩顶面 100mm 以上；
 - 声测管管底应封闭，管口应加盖或者堵头，管身不得有破损，管壁不得有油污，管内无异物；
 - 声测管在钢筋笼上有效固定，声测管呈对称形状布置，宜以路线前进行方向的顶点为起始点，按顺时针方向依次编号，每两根编为一个剖面（图 3）。

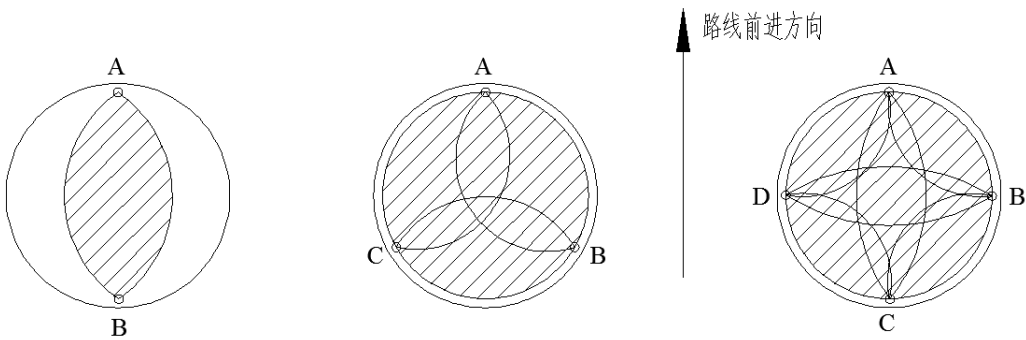


图3 检测声测管编组

8.3.2 检测前的准备应符合下列规定：

- 声测管内应灌满清水，且保证畅通；
- 标定超声波检测仪发射至接收的系统延迟时间 t_0 ；
- 准确量测声测管管径和壁厚，测量精度为 $\pm 0.1\text{mm}$ ，测量桩头处声测管外壁相互之间的距离，测量精度为 $\pm 1\text{mm}$ ；
- 利用钻芯法孔道进行检测时，取芯孔的垂直度误差不应大于 0.5%，检测前应进行孔内清洗。
- 在检测开始前或检测过程中，应避免如强电流、磁场或与检测信号频率相当的其他振动干扰。

8.3.3 检测方法应符合下列要求：

- 将发射与接收声波换能器按照深度标记分别置放于待测检测剖面的两个声测管中；当被检桩有三根及三根以上声测管时，应将每两根声测管编为一个检测剖面，分别进行检测；
- 平测时，发射与接收声波换能器始终保持相同深度；斜测时，发射与接收声波换能器始终保持固定高差（图 4）；

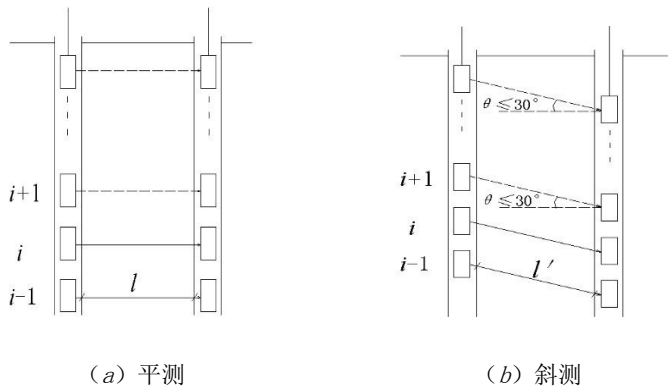


图4 平测、斜测示意图

- 测点间距宜为 100mm，发射与接收换能器应以相同标高同步升降，其累计相对高差不应大于 20mm，并随时校正。提升过程中应保持缓慢提升，确保测试波形的稳定性，提升速度不宜超过 0.4m/s；
- 检测中，应实时显示和记录接受信号声参量，同时应存储各测点包含首波的波形或波列；
- 在同一根桩各检测剖面的平测和斜测过程中，发射与接收声波换能器之间的距离和中点连线的水平夹角、声波发射电压和仪器设置参数应保持不变。

8.3.4 对桩身质量可疑部位，应采用加密测点、交叉斜测、扇形扫测、CT 影像技术等方式进行复测和加密测试，进一步确定缺陷的位置和空间分布范围。

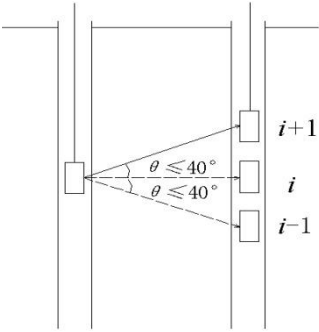


图5 扇形扫测示意图

8.4 检测数据分析与判定

8.4.1 声时的修正值应按式计算：

$$t' = \frac{D-d}{v_t} + \frac{d-d'}{v_w} \dots\dots\dots (12)$$

式中：t'——声时修正值（μs）；
D——声测管外径（mm）；
d——声测管内径（mm）；
d'——换能器外径（mm）；
v_t——声测管壁厚方向声速值（km/s），对钢质声测管，波速一般可取6000m/s；
v_w——水的声速值（km/s），20℃时水的声速可取1480m/s。

8.4.2 声时、声速和声速平均值应按下列公式计算：

$$t = t_i - t_0 - t' \dots\dots\dots (13)$$

$$v_i = \frac{l}{t} \dots\dots\dots (14)$$

$$v_m = \sum_i^n \frac{v_i}{n} \dots\dots\dots (15)$$

式中：t——声时值（μs）；
t_i——超声波第i测点声时值（μs）；
t₀——声波检测系统延迟时间（μs）；
t'——声时修正值（μs）；
v_i——第i个测点声速值（km/s）；
l——两根检测管外壁间的距离（mm），当采用斜测时，l取声波发射换能器中点对应的声测管外壁处与声波接受换能器中点对应的声测管外壁处之间的净距离，由桩顶处两声测管的外壁间净距离和发射接收换能器的高差计算而得；
n——测点数。

8.4.3 单孔折射法的数据应按下列方式计算、处理：

a) 声时差、声速值应按式（16）、式（17）计算：

$$\Delta t = t_2 - t_1 \dots\dots\dots (16)$$

$$v_i = \frac{h}{\Delta t} \dots\dots\dots (17)$$

式中： v_i ——第*i*测点声速值（km/s）；

Δt ——两个接收换能器间的声时差（ μs ）；

t_1 ——近道接收换能器声时（ μs ）；

t_2 ——远道接收换能器声时（ μs ）；

h ——两个接收换能器间的距离（mm）；

b) 声速平均值 v_m 应按式（15）计算；

c) 声速数据的处理方法及评判应按本规程第 8.4.5~8.4.6 条处理；

d) 波幅为最下端接收换能器的接收信号幅度，波幅的数据处理及评判应按本规程第 8.4.7 条处理。

8.4.4 应绘制被测桩各剖面的声速-深度曲线、波幅-深度曲线、PSD-深度曲线。

8.4.5 声速数据的处理应符合下列规定：

8.4.5.1 当声测管倾斜造成声速-深度曲线在一定深度范围内缓慢上升或下降而波幅基本不变时，应对管距进行合理修正，并对数据进行统计分析。当实测数据明显因声测管倾斜异常而又无法进行合理修正时，检测数据不应作整桩桩身完整性评价。

8.4.5.2 将同一检测剖面各测点的声速值由大到小依次排序，即

$$v_1 \geq v_2 \geq \dots \geq v_{k'} \geq \dots \geq v_{i-1} \geq v_i \geq v_{i+1} \geq \dots \geq v_{n-k} \geq \dots \geq v_{n-1} \geq v_n \dots\dots\dots (18)$$

式中： v_i ——第*i*测点的声速， $i = 1, 2, \dots, n$ ；

n ——剖面的测点总数；

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， $k' = 1, 2, \dots, n$ 。

8.4.5.3 对逐一去掉 v_i 序列中 k 个最小数值和 k' 个最大数值后余下的数据进行统计计算：

$$v_{01} = v_m - \lambda \cdot S_x \dots\dots\dots (19)$$

$$v_{02} = v_m + \lambda \cdot S_x \dots\dots\dots (20)$$

$$v_m = \frac{1}{n-k-k'} \sum_{i=k'+1}^{n-k} v_i \dots\dots\dots (21)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-k-k'-1} \sum_{i=k'+1}^{n-k} (v_i - v_m)^2} \dots\dots\dots (22)$$

$$C_v = \frac{S_x}{v_m} \dots\dots\dots (23)$$

式中： v_{01} ——声速异常小值判断值（km/s）；

v_{02} ——声速异常大值判断值（km/s）；

v_m —— $(n-k-k')$ 个数据的平均值（km/s）；

s —— $(n-k-k')$ 个数据的标准差（km/s）；

λ ——由表6查得的与 $(n-k-k')$ 相对应的系数；

C_v —— $(n-k-k')$ 个数据的变异系数。

表6 统计数据个数 $(n - k - k')$ 与对应的 λ 值

$n - k - k'$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
λ	1.28	1.33	1.38	1.43	1.47	1.50	1.53	1.56	1.59	1.62
$n - k - k'$	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

8.4.5.4 按 $k = 0, k' = 0, k = 1, k' = 1, k = 2, k' = 2, \dots$ 的顺序, 将参加统计的数列最小数据 v_{n-k} 与异常判断值 v_{01} 进行比较, 当 $v_{n-k} \leq v_{01}$ 时, 则去掉最小数据; 将最大数据 $v_{k'+1}$ 与 v_{02} 进行比较, 当 $v_{k'+1} \geq v_{02}$ 时去掉最大数据, 每次剔除一个数据, 对剩余数据构成的数列重复公式 (19) ~ (22) 的计算步骤, 直到下列两式成立:

$$v_{n-k} > v_{01} \dots\dots\dots (24)$$

$$v_{k'+1} < v_{02} \dots\dots\dots (25)$$

8.4.5.5 剖面各测点的声速异常判断概率统计值按下列方法确定:

$$v_0 = \begin{cases} v_m(1 - 0.015\lambda) & \text{当 } C_v < 0.015 \text{ 时} \\ v_{01} & \text{当 } 0.015 \leq C_v \leq 0.045 \text{ 时} \dots\dots\dots (26) \\ v_m(1 - 0.045\lambda) & \text{当 } C_v > 0.045 \text{ 时} \end{cases}$$

式中: v_0 ——剖面各测点声速异常判断概率统计值。

8.4.6 剖面的声速临界值应按下列方法确定:

- a) 根据预留同条件混凝土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, 结合本地经验, 分别确定桩身混凝土声速的低限值 v_L 和平均值 v_P ;
- b) 当 $v_L < v_0 < v_P$ 时,

$$v_c = v_0 \cdots \cdots (27)$$

式中： v_c ——检测剖面的声速异常判断临界值。

- c) 当 $v_0 \leq v_L$ 或 $v_0 \geq v_P$ 时，应分析原因， v_c 的取值可参考同一桩的其他检测剖面的声速异常判断临界值，或同一工程相同桩型的混凝土质量较稳定的受检桩的声速异常判断临界值综合确定；
- d) 声速异常时的临界值判据为：

$$v_i \leq v_c \cdots \cdots (28)$$

当公式（28）成立时，测点的声速可判定为异常，应将其作为可疑缺陷区。

8.4.7 波幅临界值应按公式（29）、公式（30）计算，当实测波幅低于波幅临界值时，应将其作为可疑缺陷区。

$$A_D = A_m - 6 \cdots \cdots (29)$$

$$A_m = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{n} \cdots \cdots (30)$$

- 式中： A_D ——波幅临界值（dB）；
 A_m ——波幅平均值（dB）；
 A_i ——第*i*个测点相对波幅值（dB）；
 n ——测点数。

8.4.8 采用斜率法作为辅助异常声测线判据时，PSD 值应按式（31）计算，当 PSD 值在某测点附近变化明显时，应将其作为可疑缺陷区。

$$PSD = \frac{(t_i - t_{i-1})^2}{z_i - z_{i-1}} \cdots \cdots (31)$$

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_i ——第*i*个测点声时值（ μs ）；
 t_{i-1} ——第*i* - 1个测点声时值（ μs ）；
 z_i ——第*i*个测点深度（m）；
 z_{i-1} ——第*i* - 1个测点深度（m）。

- 8.4.9 对于嵌岩桩，宜同时采用低应变反射波法检测桩端的支承情况。
- 8.4.10 对出现 8.1.4 情形的基桩，无法对整桩的桩身完整性进行评定时，应采用其它适宜的方法进行桩身完整性检测。
- 8.4.11 被测桩的桩身完整性类别可根据各剖面及缺陷区的分布、可疑缺陷区域测点的声参量偏离正常值的程度和接收波形变化情况，结合桩型、地质情况、成桩工艺等因素，按表 7 进行评判。

表7 桩身完整性判定

类别	特征
I	所有测点声学参数均正常，接收波形正常； 个别测点的多个声参量轻微异常，但此类测点离散，接受波形基本正常或个别测点波形轻微畸变； 多个测点的个别声参量轻微异常，其他声参量正常，但空间分布范围小，接受波形基本正常或个别测点波形轻微畸变
II	一个或多个剖面声多个测点的多个声参量轻微异常，在深度和径向形成较小的区域，多个测点接受波形存在明显畸变，其中个别测点的声速低于下限值； 一个或多个剖面上多个测点的个别声参量明显异常，其他声参量轻微异常，在深度和径向形成较小的区域，多

类别	特征
	个测点的接受波形存在明显畸变，其中个别测点的声速值低于低限值
III	在某一深度范围内，一个或多个剖面上多个测点的多个声参量明显异常，在深度或径向形成较大的区域，多个测点接受波形存在严重畸变或个别测点无法检测到首波，其中多个测点的声速低于低限值； 一个或多个剖面上多个测点的个别声参量异常严重，其它声参量明显异常，在深度或径向形成较大的区域，多个测点接受波形存在严重畸变或个别测点无法检测到首波，其中多个测点的声速低于低限值
IV	某一深度范围内，多个剖面上的多个测点的个别或多个声参量异常严重，在深度或径向形成很大的区域，波形严重畸变或无法检测到首波，较多测点的声速低于低限值

8.4.12 检测报告除应符合本规程 4.7 条规定外，尚宜包括以下内容：

- 每根被检桩各剖面的声速-深度、波幅-深度、PSD 值-深度等曲线，并标记各自的临界值，整桩波速、波幅的平均值；
- 桩身缺陷位置及程度的分析说明；
- 对加密测试、扇形扫测等的有关情况说明。

9 钻芯法

9.1 一般规定

9.1.1 本方法适用于检测混凝土灌注桩的桩长、桩身混凝土强度、桩底沉淀厚度、桩身缺陷及其位置，评判桩身完整性，判定或鉴别桩端持力层岩土性状。

9.1.2 受检桩的桩径不宜小于 800mm，长径比不宜大于 40。

9.1.3 每根受检桩的钻芯孔数和钻孔位置，应符合下列规定：

- 桩径小于 1.2m 的桩的钻孔数量不应少于 1 个，桩径 1.2m~1.6m 的桩钻孔数量不应少于 2 个，桩径大于 1.6m 的桩钻孔数量不宜少于 3 个；
- 当采用钻芯法仅对桩身混凝土强度、桩长、桩底沉淀、桩端持力层进行验证检测时，钻芯孔数可为 1 孔；
- 当钻芯孔数为 1 个时，宜在距桩中心 10cm~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 0.15D~0.25D 范围内均匀对称布置。

9.1.4 对桩端持力层评判的钻探深度应满足设计要求。若设计未有明确规定时，1 孔进入桩端持力层深度不宜小于 3 倍桩径，其余钻孔应进入桩端持力层不小于 0.5m。

9.1.5 对桩身局部缺陷进行验证取芯时，钻进深度可控制为缺陷位置以下不少于 1m。

9.2 检测仪器与设备

9.2.1 钻取芯样宜采用液压操纵的高速钻机，并配置适宜的水泵、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，直径宜为 42mm。钻机设备参数应满足：额定最高转速不低于 790r/min；转速调节范围不少于 4 档；额定配用压力不低于 1.5 MPa；
- 水泵的排水量宜为 50 L/min~160L/min，泵压宜为 1.0MPa~2.0 MPa；
- 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。

9.2.2 基桩桩身混凝土钻芯检测，钻机应配备单动双管钻具。

9.2.3 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。当被检桩混凝土集料最大粒径小于 30mm 时，可选用外径为 91mm 的钻头；不检测混凝土抗压强度时，可选用外径为 76mm 的钻头；当仅检测桩底沉淀或验证桩端持力层时，钻头外径可适当减少，但不宜小于 50mm。钻头胎体不得有肉眼可见的裂纹、缺边、少角、倾斜及喇叭口变形。

9.2.4 锯切芯样试件用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。

9.3 现场检测技术

9.3.1 钻机设备安装应平稳、牢固、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，在钻芯过程中不发生倾斜、移位，钻芯孔垂直度偏差不得大于 0.5%。

9.3.2 当桩顶面与钻机底座的高差较大时，应安装孔口管，孔口管应垂直牢靠。

9.3.3 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水泵水量和钻进速度。

9.3.4 提钻卸取芯样时，应确保芯样完整。

9.3.5 每回次钻孔进尺宜控制在 1.5m 内。钻至缺陷处或下降速度快的地方，应及时测量钻杆深度，确定缺陷位置；钻至桩底时，宜采取减压、慢速钻进、干钻等适宜的方法和工艺，钻取沉淀并测定沉淀厚度；对桩底压浆、桩底强风化岩层或土层，可采用标准贯入度试验、动力触探等方法对桩端持力层的岩土性状进行鉴别，试验一般在距桩底 0.5m 内进行；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 1m 内截取岩石芯样；遇分层岩性时，宜在各分层岩面取样。

9.3.6 钻取的芯样应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（3/5）表示第 2 回次共有 5 块芯样，本块芯样为第 3 块），并及时记录钻进情况及钻进异常情况。有条件时，可采用钻孔电视辅助判断混凝土质量。检测人员应对芯样质量进行特征描述，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。岩性分层需分层描述。

9.3.7 钻芯结束后，应对芯样和钻探标示牌的全貌进行拍照，芯样和钻探标示牌的内容包括：工程名称、桩号、钻芯孔号、芯样试件采取位置、桩长、孔深、钻芯日期、检测单位名称等，可将一部分内容在芯样上标识，另一部分标识在指示牌上。对全貌拍完彩色照片后，再截取芯样试件。取样完毕剩余的芯样宜移交委托单位妥善保存。

9.3.8 当单桩质量评价满足设计要求时，应采用 0.5~1.0MPa 压力，从钻芯孔孔底往上用水泥浆回灌封闭；当单桩质量评价不满足设计要求时，应封存钻芯孔，留待处理。

9.4 芯样试件截取与加工

9.4.1 截取混凝土抗压芯样试件应符合下列规定：

- 当桩长小于 10m 时，每孔应截取 2 组芯样；当桩长为 10m~30m 时，每孔应截取 3 组芯样；当桩长大于 30m 时，每孔应截取不少于 4 组芯样；
- 上部芯样位置距桩顶设计标高不宜大于 1 倍桩径或 2.0m，下部芯样位置距桩底不宜大于 1 倍桩径或 2.0m，中间芯样宜等间距截取；
- 缺陷位置能取样时，每个缺陷位置应增加截取 1 组芯样进行混凝土抗压试验；
- 当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 1 组芯样进行混凝土抗压试验；
- 每组混凝土芯样应制作 3 个抗压试件。

- 9.4.2 为保证持力层岩石的原始性质，选取的岩石应及时封样，避免芯样受损。
- 9.4.3 锯切后的芯样，应进行加工和测量，芯样试件的加工和测量应符合本规程附录 B 的规定。

9.5 芯样试件抗压强度试验

- 9.5.1 混凝土芯样试件的抗压强度试验宜按现行国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T50081 执行。
- 9.5.2 在混凝土芯样试件抗压强度试验中，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。
- 9.5.3 混凝土芯样试件抗压强度应按下列公式计算：

$$f_{cor} = \frac{4P}{\pi d^2} \dots\dots\dots (32)$$

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）。

- 9.5.4 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《建筑地基基础设计规范》GB 50007 执行。

9.6 检测数据的分析与判定

- 9.6.1 每根受检桩混凝土芯样试件抗压强度值的确定应符合下列规定：
- 取一组 3 块试件强度的平均值，作为该组混凝土芯样试件抗压强度代表值；
 - 同一受检桩同一深度部位有两组或两组以上混凝土芯样试件抗压强度检代表值时，取其平均值为该桩该深度处混凝土芯样试件抗压强度代表值；
 - 取同一受检桩不同深度位置的混凝土芯样试件抗压强度代表值中的最小值，作为该桩混凝土芯样试件抗压强度代表值。
- 9.6.2 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 8 的特征进行判定。

表8 桩身完整性判定

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，但在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、断口基本吻合，有下列情况之一：		

类别	特征		
	单孔	两孔	三孔
	1 局部芯样侧表面有蜂窝麻面、沟槽或较多气孔； 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，否则应判定为Ⅲ类	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； 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，否则应判定为Ⅲ类； 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，否则应判定为Ⅲ类或Ⅳ类	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； 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，否则应判定为Ⅲ类； 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，否则应判定为Ⅲ类或Ⅳ类
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，否则应判定为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，且在另两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，否则应判定为Ⅳ类； 3 任一孔局部混凝土芯样松散段长度不大于10cm，且在另两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，否则应判定为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；	1 任一孔因混凝土胶结质量差而难以钻进；	1 任一孔因混凝土胶结质量差而难以钻进；

类别	特征		
	单孔	两孔	三孔
2	混凝土芯样任一段松散或夹泥；	2 混凝土芯样任一段松散或夹泥；	2 混凝土芯样任一段松散或夹泥段
3	局部混凝土芯样破碎长度大于10cm	3 任一孔局部混凝土芯样破碎长度大于20cm； 4 两孔同一深度部位的混凝土芯样破碎	长度大于10cm； 3 任一孔局部混凝土芯样破碎长度大于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：当上一缺陷的底部位置标高与下一缺陷的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。			

9.6.3 当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。当混凝土抗压强度满足设计要求时，可判为Ⅱ类；当混凝土抗压强度不满足设计要求或不能制成芯样试件时，应判定Ⅳ类。多于三个钻芯孔的基桩桩身完整性可类比表 8 的三孔特征进行判定。

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

9.6.5 成桩质量评价应按单根受检桩进行。当出现下列情况之一时，应判定该受检桩不满足设计要求：

- 混凝土芯样试件抗压强度代表值小于混凝土设计强度等级；
- 桩长、桩底沉淀厚度不满足设计或规范要求；
- 桩端持力层岩土性状（强度）或厚度不满足设计或规范要求；
- 桩身完整性类别为Ⅳ类的桩。

9.6.6 检测报告除应包括本规程第 4.7 条内容外，尚宜包括下列内容：

- a) 钻芯设备情况；
- b) 检测桩数、钻孔数量，混凝土芯进尺、持力层进尺、总进尺，混凝土试件组数、岩石芯样试件组数、圆锥动力触探或标准贯入试验结果（必要时）；
- c) 现场混凝土芯样特征描述；
- d) 芯样单轴抗压强度试验结果；
- e) 芯样照片；
- f) 异常情况说明；
- g) 取芯开孔的准确位置布置图；
- h) 桩身完整性类别评判等。

10 高应变法

10.1 一般规定

10.1.1 本方法适用于检测单桩竖向抗压极限承载力，通过采用实测曲线拟合法分析得到桩侧土阻力的分布和桩端土阻力；用于检测桩身完整性，判定桩身缺陷的位置和缺陷程度；用于监测混凝土预制桩和钢桩沉桩过程中桩身应力和锤击能量传递比，为选择沉桩工艺参数和确定桩长提供依据。

10.1.2 进行基桩的竖向抗压承载力检测时，应具有现场实测经验和本地区同一条件下的可靠动-静试验对比资料，并应全部采用实测曲线拟合法。

10.2 检测仪器与设备

- 10.2.1 检测主要仪器设备应包括信号采集及分析仪、传感器、激振设备和贯入度测量设备等。
- 10.2.2 信号采集器和传感器的性能应符合下列规定：
- 检测仪器的主要技术性能指标不应低于 JG/T 518 中规定的 2 级标准要求，具有连续采集、快速自动存储、显示实测力与速度信号和处理分析信号的功能；
 - 信号采集器的采样频率应大于 10kHz，信号采样点数不应少于 1024 点；采样长度应满足计算、分析要求，记录、处理和数据显示装置，应有能力对应变、加速度和时间进行内部标定；
 - 加速度传感器的安装应满足谐振频率的要求，且加速度在 $0\sim10000\text{m/s}^2$ 和频率在 $1\sim7.5\text{kHz}$ 范围内呈线性，当被检桩为钢桩时，宜采用加速度在 50000m/s^2 范围内呈线性的加速度计。
- 10.2.3 激振锤宜采用由铸铁或铸钢整体制作的自由落锤，也可采用柴油锤、液压锤，严禁使用由钢板制成的分片组装锤。锤体应材质均匀、形状对称、底面平整，高径（宽）比不得小于 1，宜采用稳固的导向装置。
- 10.2.4 检测单桩竖向抗压极限承载力时，激振锤的重量不得小于基桩预估极限承载力的 1.2%，灌注桩的桩径大于 800mm 或桩长大于 35m 时宜适当增加锤重。
- 10.2.5 桩的贯入度应采用精密水准仪等光学仪器测定。

10.3 现场检测技术

- 10.3.1 检测前的桩头处理应符合下列规定：
- 桩顶面应平整，桩露出地面的高度应满足锤击装置和传感器安装的要求，锤重心应与桩顶对中；
 - 对不能承受锤击的桩头应进行加固处理，混凝土桩的桩头加固处理应按本规程附录 C 执行。
- 10.3.2 传感器的安装应符合下列规定：
- 应变传感器和加速度传感器，宜分别对称安装 2 只在距桩顶不宜小于 2 倍桩径或桩边长的桩侧表面处。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 倍桩径或桩边长。严禁采用 1 只加速度传感器或 1 只应变传感器进行检测；
 - 传感器安装面材质应均匀、密实、平整，不得安装在截面突变处附近。当传感器的安装面不平整时，可采用磨光机将其磨平。所在截面的材质和尺寸应与被检桩相同；
 - 加速度传感器和应变传感器的中心应位于同一水平截面内，同侧两种传感器间的水平距离不宜大于 100mm；固定传感器的螺栓孔应与桩轴线垂直，安装好的传感器应紧贴桩身，传感器的中心轴应与桩的中心轴平行，锤击时传感器不得产生滑动；
 - 在安装应变传感器时，应对初始应变进行监测，安装后的传感器初始应变值不应过大，锤击时传感器的可测轴向变形余量的绝对值应满足检测量程需要。
- 10.3.3 检测混凝土预制桩和钢桩的极限承载力最短休止期应满足本标准第 4.4.4 款规定。
- 10.3.4 检测混凝土灌注桩的极限承载力时，被检桩的混凝土龄期应满足本规程第 4.4.4 款第二条规定；检测混凝土灌注桩的完整性时，在桩身混凝土强度满足锤击要求的前提下，被检桩的混凝土龄期不应少于 14 天。
- 10.3.5 检测时在桩顶应设置垫层，垫层宜采用 10mm～30mm 厚的木板、纤维板、石棉板等。板的厚度相同、材质均匀。
- 10.3.6 被检桩基本参数的设定应符合下列规定：
- a) 测点桩身截面积及测点以下桩长应按实际设定；
 - b) 桩身材料质量密度宜按表 9 取值。

表9 桩身材料质量密度 ρ (kg/m^3)

混凝土灌注桩	混凝土预制桩	预应力混凝土管桩	钢桩
--------	--------	----------	----

2400	2450~2500	2550~2600	7850
------	-----------	-----------	------

- c) 桩身平均波速可结合本地经验或按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 10.4.2 条第 2 款予以调整；
- d) 桩身材料的弹性模量应按式(33)计算：

$$E = \rho \cdot c^2 \dots\dots\dots (33)$$

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（kg/m³）。

10.3.7 激振应符合下列要求：

- 采用自由落锤为激振设备时，宜重锤低击，锤的最大落距不宜大于 2.50m；
- 用于检测单桩竖向抗压极限承载力时，应实测每次锤击下桩的有效贯入度，单击贯入度宜控制在 2mm ~6mm 内。

10.3.8 检测桩身完整性和承载力时，应及时检查采集数据的质量、桩顶最大锤击力和动位移、贯入度以及桩身最大拉（压）应力、桩身缺陷程度及其发展情况等，并由此综合判定本次采集信号的有效性。为使所采集信号具有可比性，规定每根被检桩的有效信号数不应少于 2 组；沉桩监测按每次采集一阵（10 击）的实测信号进行判别。

10.3.9 现场检测信号出现下列情况之一时，应停止检测，且严禁将其用于分析：

- 力和速度信号第一峰起始比例失调；
- 测试波形紊乱；
- 桩身缺陷程度加剧。

10.3.10 对混凝土预制桩和钢桩进行试沉桩监测时，应符合下列规定：

- 试沉桩位置的地基条件应具有代表性；
- 试沉桩数量不应少于 3 根；
- 复打至初打的休止时间应符合本规程表 2 的规定；
- 试沉桩用于评价其承载力时，应按桩端进入的土层逐一进行测试；当持力层较厚时，应在同一土层中进行多次测试；
- 桩端持力层应根据试沉桩的承载力检测结果，并在综合考虑最终 5 击~10 击的贯入度和场地地基土的岩土特性进行综合评判；
- 采用试沉桩评判桩的承载力时，应在沉桩终锤前进行连续检测，并以最终 5 击~10 击采样结果为依据，时间效应应通过同一根桩的初、复打值对比确定。

10.3.11 桩身锤击应力监测与计算应符合下列规定：

- a) 桩身锤击应力监测应包括桩身最大锤击拉应力和最大锤击压应力两部分。
- b) 桩身最大锤击拉应力宜在预计桩端进入软土层或桩端穿过硬土层进入软夹层时测试，桩身最大锤击拉应力可按式(34)计算：

$$\sigma_t = \frac{1}{2A} \max \left\{ Z \cdot V \left(t_1 + \frac{2L}{c} \right) - F \left(t_1 + \frac{2L}{c} \right) - Z \cdot V \left(t_1 + \frac{2L-2x}{c} \right) - F \left(t_1 + \frac{2L-2x}{c} \right) \right\} \dots\dots\dots (34)$$

式中：*σ_t*——桩身最大锤击拉应力（kPa）；
t₁——速度信号第一峰对应的时刻（m/s）；
x——测点至计算点之间的距离（m）；
A——桩身截面面积（m²）；
Z——桩身截面力学阻抗（kN s/ m）；

c ——桩身波速 (m/s) ;

L ——完整桩桩长 (m) ;

V ——桩顶实测振动速度信号 (m/s) 。

- c) 桩身最大锤击压应力宜在预计桩端进入硬土层或桩侧土阻力较大时测试, 桩身最大锤击压应力可按公式 (35) 计算:

$$\sigma_P = \frac{F_{max}}{A} \dots\dots\dots (35)$$

式中: σ_P ——桩身最大锤击压应力 (kPa) ;

F_{max} ——实测最大锤击力 (kN) ;

A ——桩身截面面积 (m²) 。

10.4 检测数据分析与判定

10.4.1 实测波形应符合下列要求:

- 力曲线和速度曲线在起始阶段应重合, 两者峰值一般情况下出现在同一时刻 t_1 , 且幅值基本相等; 在 t_1 至 $t_1 + 2L/c$ 时间内, 力曲线和速度曲线应逐渐分离;
- 力曲线和速度曲线应基本光滑、无振荡或低频噪音信号叠加, 且曲线尾部应归零;
- 同一根被检桩相邻两次有效采样信号应有较好的重复性。

10.4.2 锤击信号选取与调整应符合下列规定:

- a) 桩身波速可由桩长和下行波上升沿的起点到上行波下降沿的起点之间的时差确定, 如下图 6 所示; 也可由桩长和力与速度信号上的桩端反射波时间确定; 桩端反射不明显时, 应根据桩长及相邻桩的桩身波速等综合确定;
- b) 当测点处原设定的平均波速与实测波速相比需要调整时, 应按公式 (33) 对桩身材料的弹性模量重新进行计算, 并应对原实测力值进行校正;

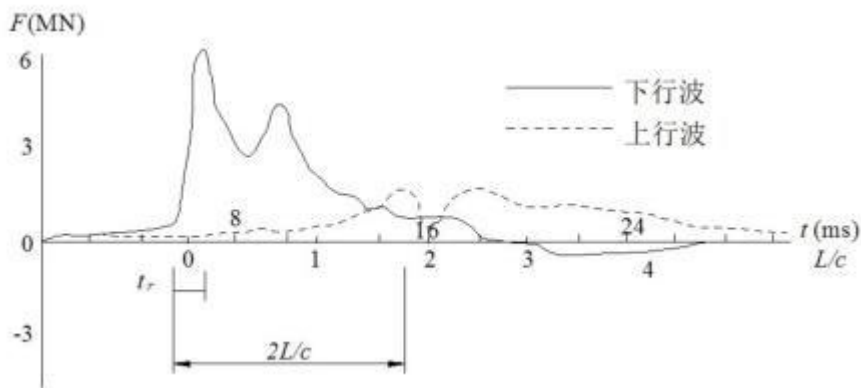


图6 桩身波速的确定

10.4.3 当出现下列情况之一时, 高应变锤击信号不得作为承载力分析计算依据:

- 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;

- 锤击严重偏心，两侧力信号幅值相差超过 1 倍；
- 触变效应的影响，桩在多次锤击下承载力下降；
- 桩身有明显缺陷时；
- 四通道测试数据不全。

10.4.4 判定被检桩的竖向极限承载力前，应根据工程地质条件和设计参数，通过实测波形对桩承载性状、桩身缺陷程度和位置及连续锤击时缺陷的逐渐扩大或闭合情况进行定性判别。

10.4.5 采用实测曲线拟合法判定被检桩的竖向抗压承载力，应符合下列规定：

- 采用的力学模型应与被检桩的工程实际情况相符；
- 拟合使用的土参数应在岩土工程的合理范围内，所用土的最大弹性变形值应合理，且不得超过相应桩单元的最大计算位移；
- 曲线拟合时间段长度在 $t_1 + 2L/c$ 后的延续时间不应小于 20ms，对于柴油锤沉桩信号，在 $t_1 + 2L/c$ 时刻后的延续时间不应小于 30ms；
- 拟合结束时，土阻力响应区的计算曲线与实测曲线应吻合，其他拟合区段应基本吻合；
- 贯入度的计算值与实测值基本一致。

10.4.6 试沉桩时如现场需要判定单桩竖向抗压承载力，可采用凯司法对单桩竖向抗压承载力进行初步计算，且应符合下列规定：

- 仅限于中、小直径桩，且应有较可靠的地区经验；
- 桩身材质应基本均匀、界面应基本相等；
- 计算单桩竖向抗压承载力可按下列公式计算：

$$Q_{uc} = \frac{1}{2} \left\{ (1 - J_c) \cdot [F(t_1) + Z \cdot V(t_1)] + (1 + J_c) \cdot \left[F\left(t_1 + \frac{2L}{c}\right) - Z \cdot V\left(t_1 + \frac{2L}{c}\right) \right] \right\} \dots\dots\dots (36)$$

$$Z = \frac{EA}{c} \dots\dots\dots (37)$$

式中： Q_{uc} ——计算获得的单桩竖向抗压承载力（kN）；

J_c ——凯司法阻尼系数；

$F(t_1)$ —— t_1 时刻的桩身实测锤击力（kN）；

$V(t_1)$ —— t_1 时刻的振动速度（m/s）；

Z ——桩身截面力学阻抗（kN s/m）；

E ——桩身材料弹性模量（kPa）；

A ——桩身截面面积（m²）；

c ——桩身波速（m/s）；

L ——测点以下桩长（m）。

10.4.7 桩身完整性可采用下列方法进行判定：

- a) 桩身缺陷位置宜用实测力波与速度波相比较的方法或分离上、下行波的方法，也可通过实测曲线拟合法确定；
- b) 对于等截面桩，桩身完整性可按表 10 规定并结合经验判定；桩身完整性系数 β 值和桩身缺陷位置 x 应分别按公式（38）、（39）计算：

$$\beta = \frac{[F(t_1) + Z \cdot V(t_1)] - 2\Delta R + [F(t_x) - Z \cdot V(t_x)]}{[F(t_1) + Z \cdot V(t_1)] - [F(t_x) - Z \cdot V(t_x)]} \dots\dots\dots (38)$$

$$x = \frac{c \cdot (t_x - t_1)}{2000} \dots\dots\dots (39)$$

式中： t_1 ——速度信号第一峰对应的时刻（ms）；
 t_x ——缺陷反射速度波峰值对应的时刻（ms）；
 ΔR ——缺陷以上部位土阻力的估计值（kN），其值等于缺陷反射起始点处的实测力与桩身截面力学阻抗乘以速度的差值，如图7所示；
 x ——传感器安装截面至缺陷处的距离（m）；
 β ——桩身完整性系数，其值等于缺陷 x 处桩身截面阻抗与 x 以上桩身截面阻抗的比值。

表10 桩身完整性判定

类别	β 值	类别	β 值
I	$0.95 < \beta \leq 1.0$	III	$0.6 \leq \beta < 0.8$
II	$0.8 \leq \beta \leq 0.95$	IV	$\beta < 0.6$

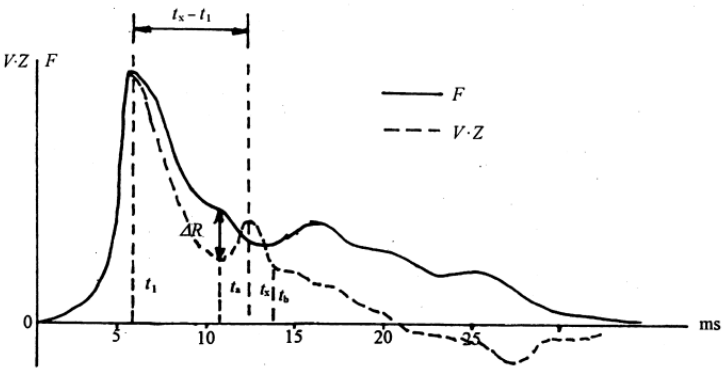


图7 桩身完整性系数计算

a) 对等截面单节预制桩，桩身完整性系数 $\beta = 1$ 时，应评判为 I 类桩；对多节预制桩及灌注桩，应结合预制桩接桩工艺、灌注桩成孔质量检测结果和施工因素，并参考表 10 综合评判。

10.4.8 当出现下列情况之一时，应按工程地质条件和施工工艺，结合实测曲线拟合法或其他检测方法综合评判桩身完整性：

- 混凝土灌注桩桩身有扩径、截面渐变或多变；
- 桩身存在多处缺陷；
- 桩身浅部存在缺陷；
- 力曲线在上升沿上升缓慢，力和速度曲线在上升沿出现异常。

10.4.9 锤击能量监测应符合下列规定：

- a) 桩锤最大动能宜通过实测重锤最大运动速度确定；
- b) 桩所获得的实际锤击能量按公式（40）计算：

$$E_n = \int_0^T FVdt \dots\dots\dots (40)$$

式中： E_n ——桩锤传递给桩的实际能量（J）；
 T ——采样结束的时刻（s）；
 F ——桩顶锤击力信号（N）；

- c) 锤击额定能量为锤重乘以锤底与桩顶距离；
 - d) 锤击能量传递比应为桩所获得的实际锤击能量除以锤击额定能量；
 - e) 锤击效率为桩锤最大动能除以锤击额定能量。
- 10.4.10 检测报告格式除应符合本规程 4.7 的规定外，还应包括下列内容：
- a) 被检桩与对应地质柱状图的相对位置；
 - b) 计算中实际采用的桩身波速值；
 - c) 选用的各单元桩土模型参数、土阻力沿桩身的分布图；
 - d) 实测贯入度；
 - e) 试沉桩和沉桩监控所采用的桩锤型号、垫层类型，监测得到锤击数、桩侧和桩端阻力、桩身锤击拉(压)应力、桩身完整性及能量传递比等随入土深度的变化关系。

11 单桩竖向抗压静载试验

11.1 一般规定

11.1.1 本方法适用于确定单桩竖向抗压承载力。

11.1.2 为设计提供依据的试验桩，应加载至桩侧与桩端的岩土阻力达到极限状态或者加载至设计要求的最大加载值；工程桩抽样检测和评价时，最大加载值一般应采用单桩承载力特征值的 2.0 倍或达到设计要求；当桩的承载力以桩身强度控制时，可按设计要求的加载量进行。

11.1.3 当埋设有测量桩身应变(应力)、桩底反力测量传感器(压力盒)或位移测量杆时，可测定桩周各土层侧摩阻力、端阻力或截面的沉降量。桩身内力测试应按本规程附录 D 执行。

11.2 检测仪器设备

11.2.1 检测仪器设备包括加载装置、反力装置、荷载测量装置、变形测量装置等。

11.2.2 试验加载设备宜采用油压千斤顶加载。加载反力装置可根据现场条件选择锚桩横梁反力装置、压重平台反力装置、锚桩压重联合反力装置，其承载能力不应小于最大加载量的 1.3 倍，且满足强度和变形要求。在压重平台反力装置中，压重宜在检测前一次加足，且压重施加于地基的压应力不宜大于地基承载力特征值的 1.5 倍。

11.2.3 千斤顶应平放于试桩中心。当采用 2 个及以上千斤顶加载时，千斤顶的型号、规格应相同，应并联同步工作，并使千斤顶的合力中心与反力装置的中心、被检桩的横截面的形心重合。

11.2.4 采用锚桩进行竖向抗压静载荷试验时应符合下列规定：

- 每一根锚桩的桩顶都安置位移量测仪表，对其上拔量进行监测；
- 测读点位应在锚桩桩顶的中心并能反映桩顶的实际上拔状况，不得安置在锚桩的钢筋上；

11.2.5 荷载测量可采用放置于千斤顶上的荷重传感器直接测定荷载，或采用并联于千斤顶油路上的压力表或压力传感器测定油压，根据千斤顶率定曲线换算荷载。试验用压力表、油泵、油管在加载时的压力不应超过额定工作压力的 80%。

11.2.6 沉降测量仪表宜采用位移传感器或大量程百分表，并应符合下列规定：

- 对于直径或边宽大于 500mm 的试桩应在其 2 个正交直径方向对称安置 4 个位移量测仪表，直径小于等于 500mm 的试桩可对称安置 2 个位移量测仪表；
- 沉降测定平面宜在桩顶平面以下 200mm~500mm 之间，测点应牢固固定于桩身；支承仪表的基准架应有足够的刚度和稳定性，基准梁一端应固定在基准桩上，另一端应简支于基准桩上并可以水平移动。基准桩应埋入地基表面以下一定深度，确保基准梁不受气候条件等影响。

11.2.7 试桩、锚桩(压重平台支墩边)和基准桩之间的中心距离应符合表 11 的规定。

表11 试桩、锚桩（压重平台支墩边）和基准桩之间的中心距离

反力系统	试桩中心与锚桩中心 (或压重平台支墩边)	试桩中心与基准桩中心	基准桩中心与锚桩中心 (或压重平台支墩边)
锚桩横梁反力装置	$\geq 4(3)D$ 且 $>2.0m$	$\geq 4(3)D$ 且 $>2.0m$	$\geq 3D$ 且 $>2.0m$
压重平台反力装置	$\geq 4D$ 且 $>2.0m$	$\geq 4(3)D$ 且 $>2.0m$	$\geq 3D$ 且 $>2.0m$
注1：D—试桩或锚桩的设计直径或边宽，取其较大者（如试桩或锚桩为扩底桩或多支盘桩时，试桩与锚桩的中心距尚不应小于2倍扩大端直径）。			
注2：括号内数值可用于工程桩验收检测时多排桩设计桩中心距离小于4D的情况。			

- 11.2.8 量测仪表技术要求应符合下列规定：
- 荷重传感器的测量误差不应大于 1%，压力表精度应优于或等于 0.4 级，压力传感器的测量误差不应大于满量程的 0.5%；
 - 位移传感器或大量程百分表的量程不宜小于 50mm，分辨率优于或等于 0.01mm，测量误差不应大于 0.1%FS。

11.3 现场检测技术

- 11.3.1 被检桩应满足下列要求：
- 被检桩的桩型、地质条件、截面尺寸、桩长、成桩工艺和质量控制标准应与工程桩一致；
 - 陆上试桩时，桩顶部应高于试坑底面，试坑底面宜与桩承台底高程一致；
 - 水上试桩时，应搭设牢固试验平台，平台高程应考虑水位及风浪的影响，被检桩桩顶部应高出试验平台高程；
 - 混凝土桩的桩头加固，可按本规程附录 C 执行；
 - 为便于在原地面处施加荷载，在承台底面以上部分或局部冲刷线以上部分设计不能考虑的摩擦力应予扣除；
 - 桩身需通过尚未固结新近沉积的土层或湿陷性黄土、软土等土层时，对于负摩擦力的影响应采取工程桩相同的措施；
- 11.3.2 试验前后应对被检桩及锚桩进行桩身完整性检测。
- 11.3.3 单桩竖向抗压静载试验应采用慢速维持荷载法。慢速维持荷载法试验加、卸载及沉降观测应符合下列规定：
- a) 等量分级加载，每级荷载宜为最大加载量或单桩预估极限承载力的 1/10~1/15，第一级可按 2 倍分级荷载加荷；
 - b) 每级加载后，第一小时内按第 5、15、30、45、60min 各测读一次桩顶沉降量，以后每隔 30min 测读一次，每级荷载在维持荷载过程中的变化幅度不得超过分级荷载的±10%；
 - c) 沉降相对稳定标准：桩端下为巨粒土、砂类土、坚硬粘质土，最后 30min 沉降量不大于 0.1mm 时；桩端下为半坚硬和细粒土，最后 1h 沉降量不大于 0.1mm 时；桩端下为其它粘性土，每一小时内的桩顶沉降量不得超过 0.1mm，并连续出现两次（从分级荷载施加后的第 30min 开始，按 1.5h 连续三次每 30min 的沉降观测值计算）；
 - d) 当桩顶沉降达到相对稳定标准时，再施加下一级荷载；
 - e) 最后一级荷载完成后，应分级卸荷至零，每级卸载量宜取加载时分级荷载的 2 倍；
 - f) 卸载时，每级卸载应维持 1h，分别按第 15min、30min、60min 测读桩顶沉降后，即可卸下一级荷载；卸载至零后，应测读桩顶残余沉降量，维持时间不得少于 3h，测读时间为第 15min、30min，以后每隔 30min 测读一次桩顶沉降量，每级荷载在维持荷载过程中的变化幅度不得超过分级荷载的±10%。

11.3.4 加载终止条件

- a) 被检桩在某级荷载作用下的沉降量大于前一级荷载作用下沉降量的 5 倍，且桩顶总沉降量大于 40mm 时；
- b) 被检桩在某级荷载作用下的沉降量大于前一级的 2 倍且经 24h 尚未稳定，且桩顶总沉降量大于 40mm 时；
- c) 荷载-沉降曲线呈缓变型时，可加载至桩顶总沉降量 60~80mm；当桩长超过 40m 或被检桩为钢桩时，宜考虑桩身压缩变形，可加载至桩顶总沉降量超过 80mm；
- d) 工程桩验收检测时，试验荷载已达到单桩承载力特征值的 2 倍或设计要求的最大加载值，且桩顶沉降达到相对稳定标准；
- e) 当采用工程桩作锚桩时，锚桩上拔量已达到设计允许值，或已达到加载反力装置的最大限值；
- f) 桩身出现明显破坏现象。

11.4 检测数据的分析与判定

11.4.1 单桩竖向抗压静载试验检测数据的整理应符合下列规定：

- a) 确定单桩竖向抗压承载力时，应绘制竖向荷载-沉降（ $Q-s$ ）、沉降-时间对数（ $s-lgt$ ）曲线，需要时也可绘制其他辅助分析所需曲线；
- b) 提供竖向抗压静载试验结果汇总表，所有试验数据应及时填写记录；
- c) 当进行桩身应变（应力）、变形和桩底反力测定时，应绘制桩身轴力分布图，计算不同土层的分层侧摩阻力和端阻力值。

11.4.2 单桩竖向抗压极限承载力可按下列方法综合分析确定：

- a) 对陡降型曲线：
 - 1) 取 $Q-s$ 曲线上陡降起始点所对应的荷载；
 - 2) 取 $s-lgt$ 曲线尾部出现明显向下弯曲的前一级荷载。

以上述两点标准综合分析确定单桩竖向抗压极限承载力。

- b) 出现 11.3.4 第 1、2 款情况，取前一级荷载；
- c) 对缓变型 $Q-s$ 曲线，宜取 $s=40\text{mm}$ 对应的荷载；当桩长大于 40m 时，宜考虑桩身的弹性压缩量；对直径大于或等于 800mm 的桩，可取 $s=0.05D$ （ D 为桩端全断面直径）对应的荷载；
- d) 符合 11.3.4 第 4、5 款情况，且总沉降量小于 40mm 时，取最大加载值；
- e) 出现 11.3.4 第 6 款情况，应结合工地现场具体情况分析原因。

11.4.3 单桩竖向抗压极限承载力统计值的确定应符合以下规定：

- a) 参加统计的试桩结果，当其极差不超过平均值的 30% 时，取其平均值为单桩竖向抗压极限承载力统计值；
- b) 当极差超过平均值的 30% 时，应分析极差过大的原因，结合工程具体情况，综合确定其极限承载力统计值，必要时可增加试桩数量；
- c) 桩为 3 根或 3 根以下的独立承台基桩时，应取低值。

11.4.4 单位工程同一条件下的单桩竖向抗压承载力特征值应按单桩竖向抗压极限承载力统计值的一半取值。

11.4.5 当 $Q-s$ 曲线的形态出现异常时，应根据桩身完整性检测结果和静载试验结果对被检桩的桩身质量和承载力进行综合分析评价。当证实桩身存在缺陷时，应在检测报告中明确指出。

11.4.6 检测报告中除应符合本规程的第 4.7 条规定外，宜包含以下内容：

- a) 被检桩桩位邻近的钻孔柱状图；
- b) 被检桩及锚桩的桩形尺寸、材料强度、锚桩数量等；
- c) 加载反力装置种类；

- d) 加、卸载方法，荷载分级；
- e) 单桩竖向抗压承载力确定的依据；
- f) 进行分层摩阻力测试时，传感器类型、安装的位置、轴力计算方法、各级荷载下桩身轴力变化曲线，各土层的桩侧摩阻力和桩端阻力等；
- g) 被检桩为灌注桩时，宜提供被检桩成孔检测结果；为设计提供依据的试验桩，应提供成孔质量检测结果。

12 单桩竖向抗拔静载试验

12.1 一般规定

- 12.1.1 本方法适用于确定单桩竖向抗拔承载力。
- 12.1.2 为设计提供依据的试验桩应加载至桩侧土破坏或桩身材料达到设计强度。工程桩验收检测时，应按设计要求确定最大加载值。
- 12.1.3 基桩在抗压试验后再做抗拔试验，其休止时间可根据桩侧最差土质参照表 2 确定。此外，不得在抗压静载试验的同时利用锚桩进行抗拔静载试验。
- 12.1.4 当埋设有测量桩身应变（应力）传感器或位移测量杆时，可测定桩周各土层桩侧抗拔摩阻力或桩端上拔量。桩身内力测试应按本规程附录 D 执行。

12.2 检测仪器与设备

- 12.2.1 抗拔桩试验检测仪器及设备包括加载装置、反力装置、荷载测量、变形测量等组成。
- 12.2.2 加载装置：宜采用油压千斤顶加载。
- 12.2.3 试验反力装置宜采用反力桩（或工程桩）提供反力，也可根据现场情况采用天然地基提供反力，反力装置所能提供的承载能力应不小于最大抗拔加载量的 1.3 倍，加载反力装置的构件应进行强度验算。并符合下列规定：
 - 采用反力桩（或工程桩）提供反力时，反力桩顶面应平整并具有足够的强度；
 - 采用天然地基提供反力时，施加于地基的压应力不宜超过地基承载力特征值的 1.5 倍。
- 12.2.4 荷载测量及仪器的技术要求应符合本规程第 11.2.4 条、第 11.2.7 条的有关规定。
- 12.2.5 桩顶上拔量测量及仪器的技术要求应符合本规程第 11.2.5 条、第 11.2.7 条的有关规定。上拔量测量点不得设置在受拉钢筋上；对于大直径灌注桩，可设置在钢筋笼内侧的桩顶面混凝土上。
- 12.2.6 试桩、支座和基准桩之间的中心距应符合本规程 11.2.6 条的有关规定。
- 12.2.7 当需要测试桩侧抗拔阻力分布或桩端上拔位移时，桩身内埋设传感器或桩端埋设位移杆应按本规范附录 D 执行。

12.3 现场检测技术

- 12.3.1 对混凝土灌注桩、有接头的预制桩，宜在抗拔桩试验前采用低应变反射波法或超声波法检测受检桩的桩身完整性。为设计提供依据的抗拔灌注桩，应进行成孔质量检测，桩身中、下部位出现明显扩径的桩，不宜作为抗拔试验桩；对有接头的预制桩，应复核接头强度。上拔试桩的钢筋主筋为通长，且宜露出桩顶至少 30 倍钢筋直径，并不得有影响钢筋拉力的硬伤。
- 12.3.2 加载方法：应采用慢速维持荷载法进行。施加的荷载必须作用于桩的中轴线，加载应均匀、无冲击。
- 12.3.3 上拔观测应符合本规程第 11.3.3 条沉降观测规定，并注意观察记录桩身外露部分的裂缝展开情况。
- 12.3.4 上拔相对稳定标准：每一小时内的桩顶沉降量不得超过 0.1mm，并连续出现两次（从分级荷载

施加后的第 30min 开始,按 1.5h 连续三次每 30min 的沉降观测值计算)。

12.3.5 当满足下列条件之一时,可终止加载:

- 在某级荷载作用下,桩的上拔量超过前一级荷载作用下上拔量的 5 倍,且桩顶总上拔量大于 40mm 时;
- 按桩顶上拔量控制,累计桩顶上拔量超过 100mm;
- 按钢筋抗拉强度控制,钢筋应力达到钢筋抗拉强度设计值,或某根钢筋拉断;
- 对于工程桩验收检测,达到设计要求的最大上拔荷载或最大上拔位移,且桩顶上拔达到相对稳定标准。

12.4 检测数据的分析与判定

12.4.1 所有试验观测数据应及时填写记录,并绘制上拔荷载-桩顶上拔量($U-\delta$)关系曲线和桩顶上拔量-时间对数($\delta-\lg t$)关系曲线。

12.4.2 单桩竖向抗拔极限承载力可按下列方法综合判定:

- a) 根据上拔量随荷载变化的特征确定:对陡升型 $U-\delta$ 曲线,取陡升起始点对应的荷载;
- b) 根据上拔量随时间变化的特征确定:取 $\delta-\lg t$ 曲线斜率明显变陡或曲线尾部明显向上弯曲的前一级荷载;
- c) 在某级荷载作用下抗拔钢筋断裂时,取其前一级荷载;
- d) 当被检测的工程桩在最大上拔荷载作用下未出现以上三款情况,且桩顶上拔量达到相对稳定标准时,可取最大加载值。

12.4.3 单桩竖向抗拔极限承载力统计值的确定应符合本规程第 11.4.3 条的规定。

12.4.4 单位工程同一条件下的单桩竖向抗拔承载力特征值应按单桩竖向抗拔极限承载力统计值的一半取值。

12.4.5 当工程桩不允许带裂缝工作时,应取桩身开裂前一级荷载作为单桩竖向抗拔承载力特征值,并与 12.4.4 条确定的承载力特征值比较,取其小值作为单桩竖向抗拔承载力特征值。

12.4.6 检测报告中除应符合本规程的第 4.7 条规定外,宜包含以下内容:

- a) 被检桩桩位邻近的钻孔柱状图;
- b) 被检桩尺寸;
- c) 加、卸载方法,荷载分级;
- d) 单桩竖向抗拔承载力确定的依据;
- e) 进行分层摩阻力测试时,传感器类型、安装的位置、轴力计算方法、各级荷载下桩身轴力变化曲线,各土层的桩侧摩阻力等;
- f) 被检桩为灌注桩时,宜提供被检桩成孔检测结果;为设计提供依据的试验桩,应提供成孔质量检测结果。

13 单桩水平静载试验

13.1 一般规定

13.1.1 本方法适用于检测桩顶自由的单桩水平承载力、推定桩侧地基土水平抗力系数的比例系数,当埋设有应变(应力)测量传感器时,可量测相应水平荷载作用下的桩身应力,并由此计算桩身弯矩。

13.1.2 为设计提供依据时,应加载至桩侧土体破坏或桩身结构破坏;对工程桩进行检测和评价时,应按设计要求的最大水平荷载加载量或最大水平位移量控制。

13.1.3 被检桩的位置应根据工程地质条件、设计要求和类似工程经验等因素综合确定。

13.2 检测仪器与设备

- 13.2.1 水平推力加载设备宜采用卧式千斤顶，其加载能力不得小于最大试验加载量的 1.2 倍。
- 13.2.2 反力装置可采用相邻桩，也可专门设置，其承载能力和刚度应大于试验桩的 1.3 倍。
- 13.2.3 荷载测量及其仪器的技术要求应符合本规程第 11.2.4 条、第 11.2.7 条的规定；水平力作用点宜与实际工程桩的水平受荷高程一致；千斤顶和试验桩接触处应安置球形铰座，使千斤顶作用力通过桩身轴线；当千斤顶与试桩接触面的混凝土不密实或不平整时，应对其进行补强或补平处理。
- 13.2.4 桩的水平位移测量及其仪器的技术要求应符合本规程第 11.2.5 条、第 11.2.7 条的有关规定。在水平力作用平面的受检桩两侧应对称安装两个位移计；当测量桩顶转角时，尚应在水平力作用平面以上 50cm 的受检桩两侧对称安装两个位移计。试验装置如图 8 所示。
- 13.2.5 位移测量的基准点设置不应受试验和其他因素的影响，其与被检桩和反力桩的净距不宜小于 5 倍桩径（或边长），当基准点设置在与作用力方向垂直且与位移方向相反的试桩侧面，间距可适当减小，但不小于 2m。
- 13.2.6 测量桩身应变（应力）时，各测试断面的测量传感器应沿受力方向对称布置在远离中性轴的受拉和受压主筋上（桩身表面）；埋设传感器的纵剖面与受力方向之间的夹角不得大于 10°。承台底面高程下 15 倍桩径（或边长）的深度范围内，桩身的主要受力部分应加密测试断面，断面间距不宜超过 1 倍桩径。桩身内传感器的埋设应符合本规范附录 D 的规定。

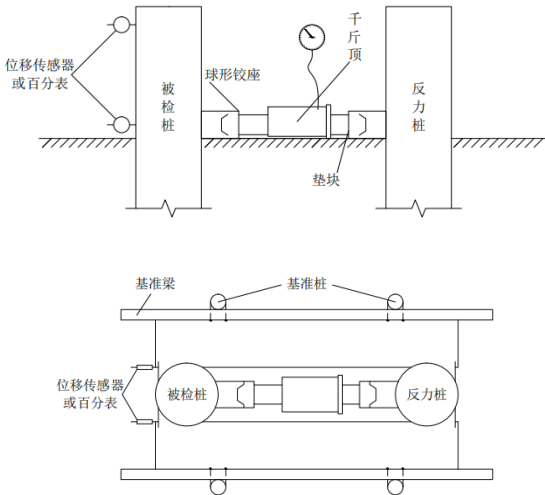


图8 水平静载试验装置

13.3 现场检测技术

- 13.3.1 加载方法的要求：
- 当设计对加载方法有要求时，应按设计要求进行加、卸载；当设计没有给出具体加载要求时，应根据工程桩实际受力特性选择合适的加载方法，可选用单向多循环加卸、载法或本规程第 11 章规定的慢速维持荷载法；
 - 当需要测量桩身应变（应力）时，宜采用慢速维持荷载法进行试验。
- 13.3.2 单向多循环加、卸载法按下列规定执行：
- a) 荷载分级：不应大于预估水平极限承载力或最大试验荷载的 1/10~1/12；
 - b) 加、卸载程序与位移观测：各级荷载施加后，维持荷载 4min 测读水平位移，然后卸载至零，2min 后测读残余水平位移，至此完成一个加、卸载循环，如此循环 5 次，便完成一级荷载的试验观测。加载时间应尽量缩短，测量位移间隔时间应严格准确，试验不得中途停歇；

- c) 当出现下列情况之一时即可终止加载：
- 1) 桩身折断
 - 2) 桩顶水平位移超过 30mm~40mm（软土取 40mm）；
 - 3) 达到设计要求的最大加载值或水平位移允许值。

13.3.3 慢速维持荷载法的加、卸载分级及水平位移的测读方式应符合本规程第 11.3.3 条的规定。

13.4 检测数据的分析与判定

13.4.1 检测数据应按下列要求整理：

- a) 单向多循环加卸载法：应绘制水平力-时间-力作用点位移关系曲线($H_0 - t - Y_0$ 曲线)，见图 9；
水平力-力作用点位移梯度关系曲线($H_0 - \Delta Y_0/\Delta H_0$ 曲线)，见图 10。

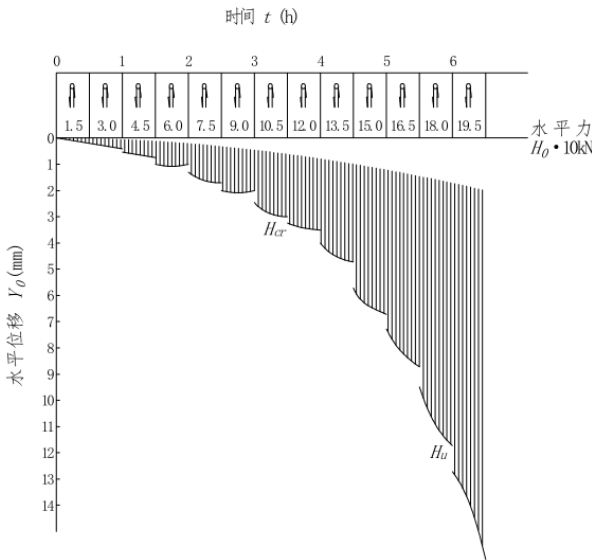


图9 $H_0 - t - Y_0$ 曲线

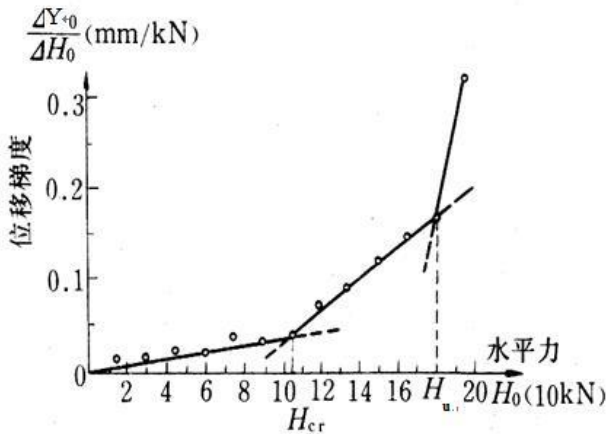


图10 $H_0 - \Delta Y_0/\Delta H_0$ 曲线

- a) 慢速维持荷载法：应绘制水平力-力作用点位移关系曲线($H_0 - Y_0$ 曲线)，水平力-力作用点位移梯度关系曲线($H_0 - \Delta Y_0 / \Delta H_0$ 曲线)、力作用点位移-时间对数关系曲线($Y_0 - \lg t$)和水平力-力作用点位移双对数关系曲线($\lg H_0 - \lg Y_0$)；
- b) 当桩身埋有应变(应力)传感器时，应绘制各级水平力作用下的桩身弯矩分布图及水平力—最大弯矩截面钢筋拉应力关系曲线($H_0 - \sigma_g$ 曲线)，见图 11，并列表给出相应数据。

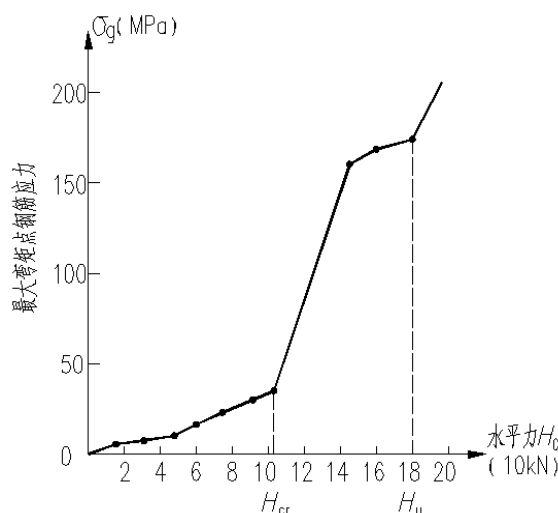


图11 $H_0 - \sigma_g$ 曲线

13.4.2 单桩水平临界荷载(H_{cr})可按下列方法综合确定：

- a) 单向多循环加卸、载法：根据 $H_0 - t - Y_0$ 曲线出现拐点的前一级水平荷载值和 $H_0 - \Delta Y_0 / \Delta H_0$ 曲线上第一拐点对应的水平荷载值综合确定；
- b) 慢速维持荷载法：根据 $H_0 - Y_0$ 曲线上出现拐点的前一级水平荷载值、 $H_0 - \Delta Y_0 / \Delta H_0$ 曲线和 $\lg H_0 - \lg Y_0$ 曲线上第一拐点对应的水平荷载值；
- c) 取 $H_0 - \sigma_g$ 曲线第一拐点对应的水平荷载值。

13.4.3 单桩水平极限承载力(H_u)可按下列方法综合确定：

- a) 单向多循环加卸、载法：根据 $H_0 - t - Y_0$ 曲线产生明显陡降的前一级水平荷载值和 $H_0 - \Delta Y_0 / \Delta H_0$ 曲线上第二直线段的终点对应的水平荷载值综合确定；
- b) 慢速维持荷载法：根据 $H_0 - Y_0$ 曲线产生明显陡降的起点对应的水平荷载值、 $Y_0 - \lg t$ 曲线尾部出现明显弯曲的前一级水平荷载值、 $H_0 - \Delta Y_0 / \Delta H_0$ 曲线和 $\lg H_0 - \lg Y_0$ 曲线上第二拐点对应的水平荷载值综合确定；
- c) 取桩身折断或钢筋屈服时的前一级水平荷载值。

13.4.4 单桩水平极限承载力统计值的确定方法可按本规程第 11.4.3 条的规定确定。

13.4.5 单位工程同一条件下的单桩水平承载力特征值的确定应符合下列规定：

- a) 当按桩身强度确定单桩水平承载力时，取单桩水平临界荷载统计值和单桩水平极限承载力统计值的一半的小值为单桩水平承载力特征值；
- b) 当桩受长期水平荷载作用且桩不允许开裂时，取水平临界荷载统计值的 0.75 倍和单桩水平极限承载力统计值的一半的小值为单桩水平承载力特征值；
- c) 当按设计要求的水平位移允许值确定水平承载力时，取设计要求的水平位移允许值对应的水平荷载统计值作为单桩水平承载力特征值；

- d) 单桩水平临界荷载统计值和本条第 3 款水平荷载统计值的确定方法可按本规程第 11.4.3 条的规定确定。
- 13.4.6 检测报告中除应符合本规程的第 4.7 条规定外，宜包含以下内容：
 - a) 受检桩桩位对应的地质钻孔柱状图，并应注明水平荷载施加位置；
 - b) 受检桩的截面尺寸及配筋情况；
 - c) 加、卸载方法，荷载分级；
 - d) 本规范第 13.4.1 条要求绘制的曲线；
 - e) 单桩水平承载力判定依据；
 - f) 当进行钢筋应力测试并由此计算桩身弯矩时，应包括传感器类型、安装位置、内力计算方法。

14 磁测井法

14.1 一般规定

本方法适用于施工后的灌注桩、预制桩中的钢筋笼长度检测。

14.2 检测仪器与设备

- 14.2.1 检测前应对仪器设备检查调试，检测用计量器具应在检定或校准周期的有效期内。
- 14.2.2 当现场操作环境不符合仪器设备使用要求时，应停止检测，待满足要求后，重新检测。
- 14.2.3 仪器设备应符合下列要求：
 - 使用深度编码器自动记录深度，深度分辨率 $\leq 5\text{cm}$ ；
 - 磁敏元件应为磁阻传感器，测量范围 $-99999\text{nT}\sim 99999\text{nT}$ ；
 - 分辨率宜小于 50nT ，精度宜优于 150nT ；
 - 传感器工作环境温度 $0^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$ ；
 - 数字输出更新速度 ≥ 3 秒；
 - 能实时对测试数据和曲线进行查看、平滑、倒序等处理；
 - 井下设备应：适孔斜 $0^{\circ}\sim 20^{\circ}$ ，耐压 $>1.5\text{MPa}$ 。

14.3 现场检测技术

14.3.1 磁测井法的检测系统如图 12：

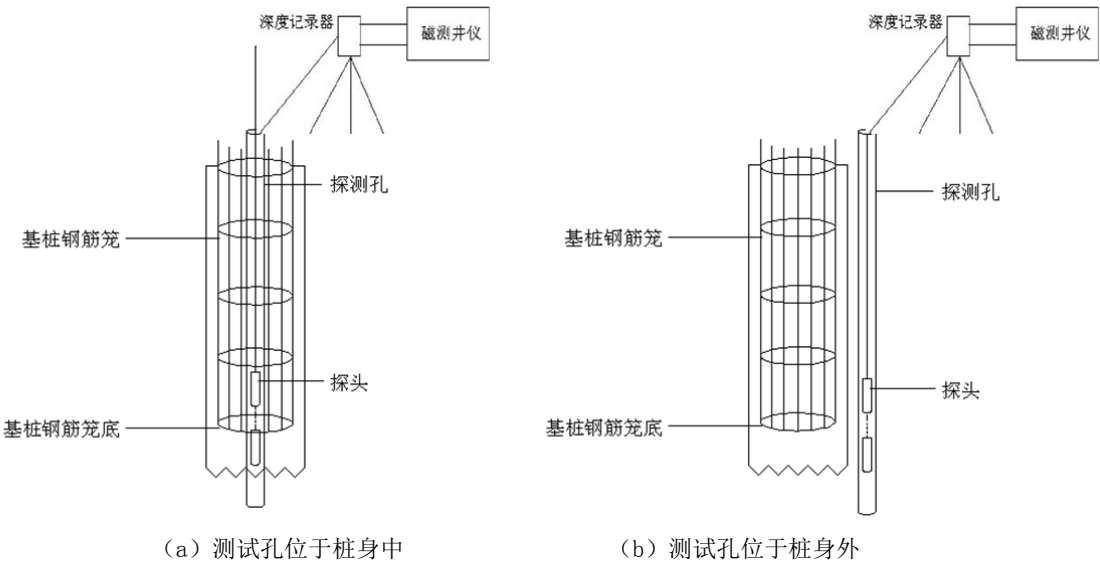


图12 磁测井法的检测系统

14.3.2 测试孔布置应符合下列规定：

- 测试孔宜设置在距受检桩外侧边缘不大于 0.5m 的土（岩）中，并尽量远离临近的桩，测试孔应平行于桩身中心线；测试孔也可设置在钻孔灌注桩中心的混凝土中，钻孔竖向中心线宜与桩身纵轴线吻合，当测试孔深超过 50m，测试孔的倾角达到 2° 及以上时，宜重新布置检测孔；
- 测试孔内径不宜小于 75mm，测试孔深度宜大于被检测桩钢筋笼设计深度 5.0m 以上；
- 设置于土（岩）中的测试孔，宜在测试孔内设置 PVC 管，PVC 管外径宜大于 60mm；
- 孔中严禁有铁磁性物体存在。

14.3.3 检查测试孔或 PVC 管的畅通情况，井下传感器应能在全程范围内升降顺畅。

14.3.4 现场检测步骤应符合下列规定：

- a) 将传感器放入测试孔或 PVC 管中，从下往上或从上往下进行磁场垂直分量（ Z ）强度的测量。传感器应匀速提升或下降且速度不宜大于 30cm/s，采样间距不宜大于 25cm；
- b) 现场应能记录并显示深度-磁场垂直分量（ $H-Z$ ）曲线及深度-磁场垂直分量梯度（ $H-dZ/dH$ ）曲线；
- c) 当发现钢筋笼长度与设计长度不符时，应进行复测，进一步确定钢筋笼底的位置。

14.3.5 数据质量应符合下列规定：

- 实测曲线特征应能反应钢筋笼位置的特征；
- 重复探测曲线应具有良好的重复性、波形一致；
- 数据不应失真和零飘，幅值应正常。

14.4 检测数据的分析与判定

14.4.1 根据磁场实测垂直分量（ Z ）曲线下端平坦的 Z 值，结合本地区地磁图来判断磁场背景值 Z_0 。14.4.2 当磁场垂直分量值（ Z ）明显低于或高于背景值 Z_0 时，可判定有钢筋笼存在。14.4.3 根据上下（相连）两点的实测磁场垂直分量（ Z ）和测点距，可按式计算磁场垂直分量梯度值 dZ/dH ：

$$dZ/dH = (Z_2 - Z_1)/\Delta h \quad (41)$$

式中： dZ/dH ——垂直磁场梯度值（nT/m）；

Z_1 、 Z_2 ——上下测点的实测磁场垂直分量强度值（nT）；

Δh ——上下测点的测点距（m）。

14.4.4 钢筋笼底端深度应根据实测深度-磁场垂直分量曲线，并结合深度-磁场垂直分量梯度曲线，进行综合判定。

- 根据深度-磁场垂直分量（ $H-Z$ ）曲线确定：取深度-磁场垂直分量（ $H-Z$ ）曲线下部小于背景场转成大于背景场的拐点（斜率最大处）对应的深度位置；
- 结合深度-磁场垂直分量梯度（ $H-dZ/dH$ ）曲线确定：取深度-磁场垂直分量梯度（ $H-dZ/dH$ ）曲线最深的明显极值点对应的深度位置。

14.4.5 按本规程 14.4.4 条所述方法判定基桩中钢筋笼长度，误差小于 ± 1.0 m。

14.4.6 钢筋笼长度检测结果评价，应给出每根受检桩的钢筋笼长度。

14.4.7 检测报告除应满足本规范第 4.7 条规定的内容外，宜包括下列内容：

- a) 被检桩设计钢筋笼长度、钻孔位置及深度；
- b) 每根受检桩的实测深度-磁场垂直分量（ $H-Z$ ）曲线（深度-磁场垂直分量梯度（ $H-dZ/dH$ ））；
- c) 每根受检桩的钢筋笼底端深度和长度及与检测内容相应的检测结论。

附录 A (规范性) 成孔质量检测仪标定方法

A.1.1 伞形孔径仪标定方法

- a) 伞形孔径仪的标定应在专用标定架上进行。标定架应定期送交计量检测机构检定。
- b) 标定架刻度误差应 $\leq \pm 1\text{mm}$ 。
- c) 具体标定方法如下：
 - 1) 连接孔径仪，打开电源，确认设备工作正常；
 - 2) 按从小到大，从大到小的顺序，分别将四条测臂置于标定架不同直径的刻度点，记录仪器每次测量值；
 - 3) 将各次的直径 $\sim$ 测量值数据组，按最小二乘法拟合出 $D \sim d$ 的线性方程：

$$d = D_0 + k \times D \dots\dots\dots (A.1)$$

式中： k ——斜率（仪器常数）；

D_0 ——截距（起始孔径）。

- 4) 将方程求出的仪器常数及起始孔径输入记录仪；
- 5) 将测臂置于标定架不同直径刻度点 3 次，分别记录各次仪器测量值；
- 6) 将上述 3 次标准直径分别代入线性方程，计算出方程的测量值；
- 7) 对应不同标准直径，比较方程测量值与仪器测量值的差值。
- d) 根据上述标定的结果，若仪器测量值与方程测量值之差满足规范精度要求，表明仪器正常，可以进行检测。否则需重新标定确定仪器常数及起始孔径，若精度仍不满足要求，仪器必须返厂维修。

A.1.2 专用测斜仪标定方法

- a) 专用测斜仪应在专用校验台上标定，校验台应定期送交计量检测机构检定合格；
- b) 校验台应安放在四周空旷、半径 2m 范围内没有磁性材料的场所；
- c) 校验台倾角误差应 $\leq \pm 30'$ ；
- d) 标定操作步骤如下：
 - 1) 采用 $2''$ 精度经纬仪将校验台调准到垂直轴铅垂位置；
 - 2) 用测角器校正校验台上顶角刻度盘；
 - 3) 将测斜仪安置于校验台，任意选择一个倾角（ $0^\circ \sim 15^\circ$ 范围内）进行测试，记录仪器输出顶角值，重复进行 2 次。
- e) 若每组测试结果的精度均满足规范的要求，表明仪器正常，可以进行检测。否则需重新标定，若精度仍不满足要求，设备必须返厂维修。

附 录 B
(规范性)
芯样试件加工和测量

- B.1.1 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.1.2 锯切后的芯样试件不满足平整度及垂直度要求时,应选用以下方法进行端面加工:
- 在磨平机上磨平;
 - 用水泥砂浆、水泥净浆、硫磺胶泥或硫磺等材料在专用补平装置上补平。水泥砂浆或水泥净浆的补平厚度不宜大于 5mm, 硫磺胶泥或硫磺补平厚度不宜大于 1.5mm。
- B.1.3 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.1.4 试验前,应对芯样试件的几何尺寸做下列测量:
- 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;
 - 芯样高度:用钢卷尺或钢板尺进行测量,精确至 0.5mm;
 - 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°;
 - 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.1.5 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:
- 芯样试件有裂缝或有其他较大缺陷时;
 - 混凝土芯样试件内含有纵向钢筋时;
 - 混凝土芯样试件高度小于 $0.95d$ 或大于 $1.05d$ 时 (d 为芯样试件平均直径);
 - 岩石芯样试件高度小于 $2.0d$ 或大于 $2.5d$ 时;
 - 沿试件高度任一直径与平均直径相差达 2mm 以上时;
 - 芯样试件端面不平整度在 100mm 长度内超过 0.1mm 时;
 - 芯样试件端面与轴线的不垂直度超过 2°时;
 - 表观混凝土粗骨料最大粒径大于芯样试件平均直径 0.5 倍时。

附 录 C
(规范性)
混凝土桩头处理

- C.1.1 混凝土桩应先凿掉桩顶部分的破碎层和软弱不密实混凝土。
- C.1.2 桩头顶面应水平、平整，桩头中轴线与桩身上部中轴线应重合。
- C.1.3 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.1.4 距桩顶1.5倍桩径范围内，箍筋应加密布设，其间距不宜大于100mm。桩顶下应设置钢筋网片2层~3层，间距60mm~100mm，桩顶钢筋网片保护层厚度为50mm，桩身主筋应与网片搭焊。
- C.1.5 距桩顶1倍桩径范围内，宜采用厚度3mm~5mm的钢板围裹
- C.1.6 浇筑前应做好两次浇筑搭接面处接桩措施，桩头宜采用比原桩身强度提高1~2个等级的混凝土制作。
- C.1.7 高应变法检测桩传感器安装处的桩身截面尺寸应与桩身设计截面尺寸相同。
- C.1.8 接完桩头后应进行养护，达到C.1.5条规定的强度后可进行检测，冬季施工时应注意对混凝土的保温养护。

附录 D (规范性) 桩身内力测试

- D.1.1 桩身内力测试可用于桩身横截面尺寸基本恒定或已知的桩。
- D.1.2 对竖向抗压静载试验桩，可得到桩侧各土层的分层抗压摩阻力和桩端支撑力；对竖向抗拔静荷载试验桩，可得到桩侧土的分层抗拔摩阻力；对水平静荷载试验桩，可求得桩身弯矩分布，最大弯矩位置等；对打入式预制混凝土桩和钢桩，可得到打桩过程中桩身各部分的锤击压应力、锤击拉应力。
- D.1.3 基桩内力测试宜根据测试目的、试验桩型及施工工艺选用电阻应变式传感器、振弦式传感器、滑动测微计或光纤式应变传感器等。
- D.1.4 传感器设置位置及数量应符合下列规定：
- 传感器宜放在两种不同性质土层的界面处，以测量桩在不同土层中的分层摩阻力。在地面处（或以上）应设置一个测量断面作为传感器标定断面。传感器埋设断面距桩顶和桩底的距离不宜小于 1 倍桩径；
 - 传感器标定断面处应对称设置 4 个传感器，其他测量断面处可对称设置 2~4 个传感器，当桩径较大或试验要求较高时取高值。
- D.1.5 传感器安装，可根据不同桩型选择下列方式：
- 钢桩可将应变计用特殊的粘贴剂直接贴在桩身上，振弦式和光纤式传感器可采用焊接或者螺栓连接固定在桩身上；
 - 混凝土桩可采用焊接或绑焊工艺将传感器固定在钢筋笼上；对采用蒸汽养护或高压蒸养的混凝土预制桩，应采用耐高温的电阻应变计、粘贴剂和导线；
 - 带有接长杆弦式钢筋计宜焊接在主筋上，不宜采用螺纹连接。
- D.1.6 采用滑动测微计时，可在桩身内通长埋设 1 根或 1 根以上的测管，测管内宜每隔 1m 设测标或测量断面 1 个。
- D.1.7 电阻应变计及其连接电缆均应有可靠的防潮绝缘防护措施；正式试验前电阻应变计及电缆的系统绝缘电阻不应低于 $200\text{M}\Omega$ 。
- D.1.8 电阻应变测量所用的电阻应变仪，宜具有多点自动测量功能，仪器的分辨力应优于或等于 $1\mu\epsilon$ ，并有存储或打印功能。
- D.1.9 振弦式钢筋计应按主筋直径大小选择，并采用与之匹配的频率仪进行测量。频率仪的分辨力应优于或等 1Hz，仪器的可测频率范围应大于桩在最大加载时的频率的 1.2 倍。使用前，应对钢筋计逐个标定，得出压力（拉力）与频率之间的关系。
- D.1.10 滑动测微计测管的埋设应确保测标同桩身位移协调一致，并保持测标清洁。测管安装可根据下列情况采用不同的方法：
- 对于钢管桩，可通过安装在测管上的测标与钢管桩的焊接，将测管固定在桩壁内侧；
 - 对非高温养护预制桩，可将测管埋设在预制桩中；管桩可在沉桩后将测管放入中心孔中，用微膨胀水泥浆填充测管与桩壁间的空隙；
 - 对灌注桩，可在浇筑混凝土前将测管绑扎在主筋上，并应采取防止钢筋笼扭曲的措施。
- D.1.11 滑动测微计测试前后，应对仪器进行标定，获得仪器零点和标定系数。
- D.1.12 当桩身内力与桩身位移需要同时测量时，桩身位移测试应与桩身内力测试同步。
- D.1.13 测试数据整理应符合下列规定：

- a) 采用电阻应变式传感器测量，但未采用六线制长线补偿时，应按下列公式对实测应变值进行导线电阻修正：

$$\text{采用半桥测量时：} \varepsilon = \varepsilon' \cdot \left(1 + \frac{r}{R}\right) \dots\dots\dots (D. 1)$$

$$\text{采用全桥测量时：} \varepsilon = \varepsilon' \cdot \left(1 + \frac{2r}{R}\right) \dots\dots\dots (D. 2)$$

式中： ε ——修正后的应变值；

ε' ——修正前的应变值；

r ——导线电阻（ Ω ）；

R ——应变计电阻（ Ω ）。

- b) 采用振弦式钢筋计测量时，应根据率定系数将钢筋计的实测频率换算成力值，再将力值换算成与钢筋计断面处混凝土应变相等的钢筋应变值；
- c) 采用滑动测微计测量时，应按下列公式计算应变值：

$$e = (e' - z_0) \cdot K \dots\dots\dots (D. 3)$$

$$\varepsilon = e - e_0 \dots\dots\dots (D. 4)$$

式中： e ——仪器读数修正值；

e' ——仪器读数；

z_0 ——仪器零点；

K ——率定系数；

e_0 ——初始测试仪器读数修正值。

- d) 数据处理时，应删除异常测点数据，求出同一断面有效测点的应变平均值，并按下式计算该断面处的桩身轴力：

$$Q_i = \bar{\varepsilon}_i E_i A_i \dots\dots\dots (D. 5)$$

式中： Q_i ——桩身第*i*断面处轴力（kN）；

$\bar{\varepsilon}_i$ ——第*i*断面处应变平均值，长期监测时消除桩身徐变影响；

E_i ——第*i*断面处桩身材料弹性模量（kPa）；当混凝土桩身测量断面与标定断面两者的材质、配筋一致时，宜按标定断面处的应力与应变的比值确定；

A_i ——第*i*断面处桩身截面面积（ m^2 ）。

- e) 每级试验荷载下，应将桩身不同断面处的轴力值制成表格，并绘制轴力分布图。再由桩顶极限荷载下对应的各断面轴力值计算桩侧土的分层侧阻力和桩端阻力，桩侧土的分层侧阻力和桩端阻力应分别按下列公式计算：

$$q_{si} = \frac{Q_i - Q_{i+1}}{u \cdot l_i} \dots\dots\dots (D. 6)$$

$$q_p = \frac{Q_n}{A_0} \dots\dots\dots (D. 7)$$

式中： q_{si} ——桩第*i*断面与*i* + 1断面间侧阻力（kPa）；

q_p ——桩的端阻力（kPa）；

i ——桩检测断面顺序号， $i=1, 2, \dots\dots, n$ ，并自桩顶以下从小到大排列；

u ——桩身周长（m）；

l_i ——第*i*断面与第*i* + 1断面之间的桩长（m）；

Q_n ——桩端的轴力（kN）；

A_0 ——桩端面积（m²）。

f) 桩身第*i*断面处的钢筋应力应按下式计算：

$$\sigma_{si} = E_s \cdot \varepsilon_{si} \dots\dots\dots (D. 8)$$

式中： σ_{si} ——桩身第*i*断面处的钢筋应力（kPa）；

E_s ——钢筋弹性模量（kPa）；

ε_{si} ——桩身第*i*断面处的钢筋应变。
