

JTG

中华人民共和国推荐性行业标准

JTG/T F81-01—2004

公路工程基桩动测技术规程

Technical Specification of Dynamic Pile Tests for Highway Engineering

2004-09-01 发布

2004-11-01 实施

中华人民共和国交通部发布

1 总则

1.0.1 为加强公路工程基桩动力检测的管理,统一检测方法及技术规定,确保检测分析成果的质量,特制定本规程。

1.0.2 本规程适用于公路工程中的混凝土灌注桩和预制桩、钢桩及其他类型的刚性材料桩的检测。

1.0.3 基桩动力检测方法的选定与分析应综合考虑勘察、设计、施工等因素,做到技术先进,安全适用,经济合理,评价正确。

1.0.4 公路工程基桩动测除应符合本规程外,尚应符合国家及行业标准的有关规定。

1.0.5 检测单位应通过省级及其以上计量行政主管部门的计量认证,应具备行政主管部门颁发的专项检测资质证书。检测人员应经过培训考核,并持有相应检测方法的上岗证书。

2 术语、符号

2.1 术语

2.1.1 基桩动力检测 pile dynamic testing

通过对桩的应力波传播特性的测定和分析来评价桩的完整性,推算桩的承载力、桩侧和桩端岩土阻力及打桩应力的检测方法。

2.1.2 桩身完整性 pile integrity

反映桩身长度和截面尺寸、桩身材料密实性和连续性的综合状况。

2.1.3 桩身缺陷 pile defects

指桩身断裂、裂缝、缩颈、夹泥、离析、蜂窝、松散等现象。

2.1.4 低应变反射波法 low strain reflected wave method

在桩顶施加低能量冲击荷载,实测加速度(或速度)响应时程曲线,运用一维线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。

2.1.5 高应变动测法 high strain dynamic method

在桩顶施加高能量冲击荷载,实测力和速度信号,运用波动理论反演来推算被检桩的完整性、轴向抗压极限承载力或选择桩型和桩长、监控桩锤工作效率和打入桩桩身承受的最大锤击应力。

2.1.6 超声波法 ultrasonic logging method

根据超声波透射或折射原理,在桩身混凝土内发射并接收超声波,通过实测超声波在混凝土介质中传播的历时、波幅和频率等参数的相对变化来判定桩身完整性的检测方法。

2.2 符号

A ——桩身截面面积;

A_D ——波幅临界值;

A_i ——第 i 个测点相对波幅值;

- A_m ——波幅平均值;
 c ——桩身纵波传播速度(简称桩身波速);
 c_i ——第 i 根桩的桩身波速计算值;
 c_m ——桩身波速平均值;
 d ——声测管内径;
 d' ——径向换能器外径;
 D ——声测管外径、桩身直径;
 E ——桩身材料弹性模量;
 E_n ——桩锤传递给桩的实际能量;
 Δf ——幅频曲线上桩端相邻谐振峰间的频差;
 Δf_x ——幅频曲线上对应于缺陷的相邻谐振峰间的频差;
 F ——桩顶锤击力信号;
 $F(t_1)$ —— t_1 时刻的锤击力;
 F_{\max} ——实测最大锤击力;
 h ——两个接收换能器间的距离;
 J_c ——凯司法阻尼系数;
 l ——两根声测管外壁间的距离;
 L ——完整桩桩长、测点以下桩长;
 n ——基桩数量、测点数;
 Q_{uc} ——单桩轴向抗压极限承载力;
 ΔR ——缺陷以上部位土阻力的估计值;
 t ——声时值;
 t_0 ——声波检测系统延迟时间;
 t_1 ——速度信号第一峰对应的时刻、近道接收换能器首波值;
 t_2 ——远道接收换能器首波值;
 t_a 、 t_b ——计算桩身裂隙宽度所用的时间;
 t_i ——超声波第 i 个测点声时值;
 t_x ——缺陷反射峰对应的时刻;
 t' ——声时修正值;
 Δt ——两接收换能器之间的声时差;
 Δt_x ——时域信号第一峰与缺陷反射波峰间的时间差;
 T ——采样结束的时刻;
 ΔT ——时域信号第一峰与桩端反射波峰间的时间差;
 v_D ——声速临界值;
 v_i ——第 i 测点声速值;

v_L ——声速低限值;

v_t ——声测管壁厚度方向声速值;

v_w ——水的声速值;

v_m ——混凝土声速平均值;

\bar{v} ——正常混凝土声速平均值;

V ——桩顶实测振动速度信号;

$V(t_1)$ —— t_1 时刻的振动速度;

x ——测点至桩身缺陷之间的距离、测点至计算点之间的距离;

z_i ——第 i 个测点的深度;

Z ——桩身截面力学阻抗;

ρ ——桩身材料质量密度;

β ——桩身完整性系数;

σ_p ——桩身最大锤击压应力;

σ_t ——桩身最大锤击拉应力;

σ_v ——正常混凝土声速标准差;

δ_w ——桩身水平裂缝宽度。

3 基本规定

3.1 检测方法及选定原则

3.1.1 本规程所涉及的检测方法包括低应变反射波法、高应变动测法、超声波法(包括透射法和折射法)。检测方法应根据工程的需要和检测的目的按表 3.1.1 规定的检测内容确定。

表 3.1.1 检测方法一览表

检测方法		检测内容
低应变反射波法		检测桩身缺陷位置及影响程度,判定桩身完整性类别
高应变动测法		分析桩侧和桩端土阻力,推算单桩轴向抗压极限承载力;检测桩身缺陷位置、类型及影响程度,判定桩身完整性类别;试打桩及打桩应力监测
超声波法	透射法	检测灌注桩中声测管之间混凝土的缺陷位置及影响程度,判定桩身完整性类别
	折射法	检测灌注桩钻芯孔周围混凝土的缺陷位置及影响程度

3.1.2 为保证检测结论的可靠性,可根据不同被检对象和检测要求,选用多种测试方法进行综合分析判断。

3.1.3 桩的检测数量应符合下列规定:

- 1 公路工程基桩应进行 100% 的完整性检测,各种方法的选定应具有代表性和满足工程检测的特定要求;
- 2 重要工程的钻孔灌注桩应埋设声测管,检测的桩数不应少于 50%;
- 3 高应变动测法的抽检率可由工程设计或监理单位酌情决定,但不宜少于相近条件下总桩数的 5% 且不少于 5 根。

3.2 检测仪器与设备

3.2.1 基桩检测所用仪器设备的主要技术性能和工作环境条件应符合《基桩动测仪》JG/T 3055 中的规定,并具有良好的波形现场显示、记录和贮存功能。

3.2.2 检测仪器设备必须由法定计量单位定期进行标定和年检,合格后方能使用。

3.2.3 所有仪器设备在检测前后必须进行自检,确认仪器工作正常。

3.3 检测前的准备

3.3.1 被检工程应进行现场调查,搜集其工程地质资料、基桩设计图纸和施工记录、监理日志等,了解施工工艺及施工过程中出现的异常情况。

3.3.2 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。

3.3.3 检测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。

3.4 检测报告及桩身完整性类别评定

3.4.1 检测报告应用词规范,结论明确。其内容应包括工程概况、岩土工程勘察、检测技术及方法、桩位平面布置图、测试曲线、检测结果汇总表、结论及评价等。

3.4.2 检测报告格式应符合本规程附录 A 的规定。

3.4.3 桩身完整性类别应按表 3.4.3 划分。

表 3.4.3 桩身完整性类别划分

桩身完整性类别	特 征
I 类桩	桩身完整,可正常使用
II 类桩	桩身基本完整,有轻度缺陷,不影响正常使用
III 类桩	桩身有明显缺陷,对桩身结构承载力有影响
IV 类桩	桩身有严重缺陷,对桩身结构承载力有严重影响

4 低应变反射波法

4.1 适用范围

4.1.1 本方法是通过分析实测桩顶速度响应信号的特征来检测桩身的完整性,判定桩身缺陷位置及影响程度,判断桩端嵌固情况。

4.1.2 本方法适用于混凝土灌注桩和预制桩等刚性材料桩的桩身完整性检测。

4.1.3 使用本方法时,被检桩的桩端反射信号应能有效识别。

4.2 检测仪器与设备

4.2.1 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。

4.2.2 信号采集及处理仪应符合下列规定:

- 1 数据采集装置的模-数转换器不得低于 12bit。
- 2 采样间隔宜为 $10 \sim 500\mu\text{s}$,可调。
- 3 单通道采样点不少于 1024 点。
- 4 放大器增益宜大于 60dB,可调,线性度良好,其频响范围应满足 $5\text{Hz} \sim 5\text{kHz}$ 。

4.2.3 传感器的性能应符合下列规定:

1 传感器宜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带范围。

2 加速度传感器的电压灵敏度应大于 100mV/g ,电荷灵敏度应大于 20PC/g ,上限频率不应小于 5kHz ,安装谐振频率不应小于 6kHz ,量程应大于 100g 。

3 速度传感器的固有谐振频率不应大于 30Hz ,灵敏度应大于 $200\text{mV/cm} \cdot \text{s}^{-1}$,上限频率不应小于 1.5kHz ,安装谐振频率不应小于 1.5kHz 。

4.2.4 根据桩型和检测目的,宜选择不同材质和质量的力锤或力棒,以获得所需的激振频率和能量。

4.3 现场检测技术

4.3.1 检测前准备工作应符合下列规定:

- 1 检测前应按本规程第 3.3.1 条的规定搜集有关技术资料。
- 2 根据现场实际情况选择合适的激振设备、传感器及检测仪,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。
- 3 桩顶应凿至新鲜混凝土面,并用打磨机将测点和激振点磨平。
- 4 应测量并记录桩顶截面尺寸。
- 5 混凝土灌注桩的检测宜在成桩 14d 以后进行。
- 6 打入或静压式预制桩的检测应在相邻桩打完后进行。

4.3.2 传感器安装应符合下列规定:

- 1 传感器的安装可采用石膏、黄油、橡皮泥等耦合剂,粘结应牢固,并与桩顶面垂直。
- 2 对混凝土灌注桩,传感器宜安装在距桩中心 $1/2 \sim 2/3$ 半径处,且距离桩的主筋不宜小于 50mm。当桩径不大于 1000mm 时不宜少于 2 个测点;当桩径大于 1000mm 时不宜少于 4 个测点。
- 3 对混凝土预制桩,当边长不大于 600mm 时不宜少于 2 个测点;当边长大于 600mm 时不宜少于 3 个测点。
- 4 对预应力混凝土管桩不应少于 2 个测点。

4.3.3 激振时应符合下列规定:

- 1 混凝土灌注桩、混凝土预制桩的激振点宜在桩顶中心部位;预应力混凝土管桩的激振点和传感器安装点与桩中心连线的夹角不应小于 45° 。
- 2 激振锤和激振参数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轻锤短脉冲激振;长桩、大直径桩或深部缺陷桩的检测宜采用重锤宽脉冲激振,也可采用不同的锤垫来调整激振脉冲宽度。
- 3 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。

4.3.4 检测工作应遵守下列规定:

- 1 采样频率和最小的采样长度应根据桩长和波形分析确定。
- 2 各测点的重复检测次数不应少于 3 次,且检测波形具有良好的一致性。
- 3 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。
- 4 对存在缺陷的桩应改变检测条件重复检测,相互验证。

4.4 检测数据分析与判定

4.4.1 桩身完整性分析宜以时域曲线为主,辅以频域分析,并结合施工情况、岩土工程勘察资料和波型特征等因素进行综合分析判定。

4.4.2 桩身波速平均值的确定:

1 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:

$$c_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \quad (4.4.2-1)$$

$$c_i = \frac{2L \times 1000}{\Delta T} = 2L \cdot \Delta f \quad (4.4.2-2)$$

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 ——完整桩桩长(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 ——基桩数量($n \geq 5$)。

2 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。

4.4.3 桩身缺陷位置应按下列公式计算:

$$x = \frac{1}{2000} \cdot \Delta t_x \cdot c = \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{\Delta f_x} \quad (4.4.3)$$

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。

4.4.4 混凝土灌注桩采用时域信号分析时,应结合有关施工和岩土工程勘察资料,正确区分由扩径处产生的二次同相反射与因桩身截面渐扩后急速恢复至原桩径处的一次同相反射,以避免对桩身完整性的误判。

4.4.5 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,应结合岩土工程勘察和设计等有关资料以及桩端同相反射波幅的相对高低来推断嵌岩质量,必要时采取其他合适方法进行核验。

4.4.6 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:

- 1 超过有效检测长度范围的超长桩,其测试信号不能明确反映桩身下部和桩端情况。
- 2 桩身截面渐变或多变,且变化幅度较大的混凝土灌注桩。
- 3 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。
- 4 实测信号复杂、无规律,无法对其进行准确的桩身完整性分析和评价。
- 5 对于预制桩,时域曲线在接头处有明显反射,但又难以判定是断裂错位还是接桩不良。

4.4.7 桩身完整性类别应按下列原则判定:

- 1 I类桩:桩端反射较明显,无缺陷反射波,振幅谱线分布正常,混凝土波速处于正常范围。
- 2 II类桩:桩端反射较明显,但有局部缺陷所产生的反射信号,混凝土波速处于正常范围。
- 3 III类桩:桩端反射不明显,可见缺陷二次反射波信号,或有桩端反射但波速明显偏低。
- 4 IV类桩:无桩端反射信号,可见因缺陷引起的多次强反射信号,或按平均波速计算的桩长明显短于设计桩长。

4.4.8 检测报告应符合本规程附录 A 的规定,并应包括下列内容:

- 1 桩身混凝土波速值。
- 2 桩身完整性描述,包括缺陷位置、性质及类别。
- 3 时域曲线图,并注明桩底反射位置。
- 4 桩位编号及平面布置示意图,地质柱状图。

5 高应变动测法

5.1 适用范围

5.1.1 本方法适用于检测混凝土灌注桩、预制桩和钢桩的单桩轴向抗压极限承载力和桩身完整性;监测混凝土预制桩和钢桩打入时桩身应力和锤击能量传递比,为选择沉桩工艺参数及桩长选择提供依据。

5.1.2 进行单桩的轴向抗压极限承载力检测应具有相同条件下的动-静试验对比资料和现场工程实践经验。

5.1.3 超长桩、大直径扩底桩和嵌岩桩不宜采用本方法进行单桩的轴向抗压极限承载力检测。

5.2 检测仪器与设备

5.2.1 检测系统包括信号采集及分析仪、传感器、激振设备和贯入度测量仪等。

5.2.2 信号采集器和传感器的性能应符合下列规定:

1 信号采样点数不应少于 1024 点,采样间隔宜取 $100 \sim 200\mu\text{s}$ 。当用曲线拟合法推算被检桩的极限承载力时,信号记录长度应确保桩端反射后不小于 20ms 或达到 $5L/c$ 。

2 信号采集器的采样频率应可调,其模-数转换精度不应低于 12bit,通道之间的相位差不应大于 $50\mu\text{s}$;

3 力信号宜采用工具式应变传感器测量,其安装谐振频率应大于 2kHz,在 $1000\mu\text{E}$ 范围内的非线性误差不应大于 $\pm 1\%$;

4 速度信号宜采用压电式加速度传感器测量,其安装谐振频率应大于 10kHz,且在 $1 \sim 3000\text{Hz}$ 范围内灵敏度变化不大于 $\pm 5\%$,在冲击加速度量程范围内非线性误差不大于 $\pm 5\%$ 。

5 传感器的灵敏度系数应计量检定。

5.2.3 激振宜采用由铸铁或铸钢整体制作的自由落锤。锤体应材质均匀、形状对称、底面平整,高径比不得小于 1。

5.2.4 检测单桩轴向抗压承载力时,激振锤的重量不得小于基桩极限承载力的1.2%。

5.2.5 桩的贯入度应采用精密仪器测定。

5.3 现场检测技术

5.3.1 检测混凝土预制桩和钢桩的极限承载力的最短休止期应满足下列条件:

砂土 7d,粉土 10d,非饱和粘性土 15d,饱和粘性土 25d。

5.3.2 检测混凝土灌注桩的极限承载力时,其桩身混凝土强度等级应达到设计要求,且应满足第 5.3.1 条规定的最短休止期。

5.3.3 检测前的桩头处理应符合下列规定:

1 桩顶面应平整,桩头高度应满足安装锤击装置和传感器的要求,锤重心应与桩顶对中。

2 加固处理桩头时应满足下列要求:

1)新接桩头顶面应平整且垂直于被检桩轴线,侧面应平直,截面积应与被检桩相同,所用混凝土的强度应高于被检桩的强度;

2)被检桩主筋应全部接至新接桩头内,并设置间距不大于 150mm 的箍筋及上下间距不应大于 120mm 的 2~3 层钢筋网片。

5.3.4 检测时在桩顶面应铺设锤垫。锤垫宜由 10~30mm 厚的木板或胶合板等匀质材料制作,垫面略大于桩顶面积。

5.3.5 传感器的安装应符合下列规定:

1 桩顶下两侧面应对称安装加速度传感器和应变传感器各 1 只,其与桩顶的距离不应小于 1.5 倍的桩径或边长。传感器安装面应平整,所在截面的材质和尺寸与被检桩相同。

2 应变传感器与加速度传感器的中心应位于同一水平线上,同侧两种传感器间的水平距离不宜大于 100mm。传感器的中轴线应与桩的轴线保持平行。

3 在安装应变式传感器时,应对初始应变进行监测,其值不得超过规定的限值。

5.3.6 被检桩基本参数的设定应符合下列规定:

1 测点以下桩长和截面积可根据设计文件或施工记录提供的数据设定。

2 桩身材料质量密度宜按表 5.3.6 取值。

表 5.3.6 桩材质量密度 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

3 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 5.4.1 条第 2 款予以调整。

4 传感器安装位置处的桩身截面面积应按实际直径或边长计算确定,波速的设定宜综合考虑材料的设计强度和龄期的影响。

5 桩身材料的弹性模量应按式(5.3.6)计算:

$$E = \rho \cdot c^2 \quad (5.3.6)$$

式中 E ——桩身材料弹性模量(Pa);

c ——桩身波速(m/s);

ρ ——桩身材料质量密度(kg/m^3)。

5.3.7 激振应符合下列要求:

- 1 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 2.0m。
- 2 对于斜桩,应采用相应的打桩机械或类似装置沿桩轴线激振。
- 3 实测桩的单击贯入度应确认与所采集的振动信号相对应。用于推算桩的极限承载力时,桩的单击贯入度不得低于 2mm 且不宜大于 6mm。
- 4 检测桩的极限承载力时,锤击次数宜为 2~3 击。

5.3.8 检测桩身完整性和承载力时,应及时分析实测信号质量、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。每根被检桩的有效信号数不应少于 2 组。

5.3.9 出现下列情况之一时,采集的信号不得作为有效信号:

- 1 传感器安装处混凝土开裂或出现严重的塑性变形,使力信号最终未归零。
- 2 信号采集后发现传感器已有松动或损坏现象。
- 3 锤击严重偏心,一侧力信号呈现严重的受拉特征。

5.3.10 试打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。

5.3.11 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。桩身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;桩身锤击压应力宜在桩端进入硬土层或桩侧土阻力较大时测试。

5.4 检测数据分析与判定

5.4.1 锤击信号选取与调整应符合下列规定：

- 1 分析被检桩的承载力时,宜在第一和第二击实测有效信号中选取能量和贯入度较大者。
- 2 桩身波速平均值可根据已知桩长、力和速度信号上的桩端反射波时间或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。
- 3 传感器安装位置处原设定波速可不随调整后的桩身平均波速而改变。确有合理原因需作调整时,应对传感器安装处桩身的弹性模量按式(5.3.6)重新设置,且应对原实测力信号进行修正。
- 4 力和振动速度信号的上升沿重合性差时,应分析原因,不得随意调整。

5.4.2 推算被检桩的极限承载力前,应结合工程地质条件 and 设计参数,利用实测信号特征对桩的荷载传递性状、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。

5.4.3 采用实测曲线拟合法推算被检桩的极限承载力应符合下列规定：

- 1 采用的桩和土的力学模型应能分别反映被检桩和地基土的物理力学性状;在各计算单元中,所用土的弹性极限位移不应超过相应桩单元的最大计算位移。
- 2 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 或 $3L/c$ 中的较大值。
- 3 分析所用的模型参数应在岩土工程的合理范围内,可根据工程地质和施工工艺条件进行桩身阻抗变化或裂隙拟合。
- 4 拟合曲线应与实测曲线基本吻合,贯入度的计算值应与实测值基本一致,且整体曲线的拟合质量系数宜控制在合适的范围之内。

5.4.4 采用凯司法推算单桩的极限承载力时,应符合下列规定：

- 1 只适用于桩侧和桩端土阻力均已充分发挥的摩擦型桩。
- 2 用于混凝土灌注桩时,桩身材质、截面应基本均匀。
- 3 单桩轴向抗压极限承载力可按下列公式计算：

$$Q_{uc} = \frac{1}{2} \left\{ (1 - J_c) \cdot [F(t_1) + Z \cdot V(t_1)] + (1 + J_c) \cdot \left[F\left(t_1 + \frac{2L}{c}\right) - Z \cdot V\left(t_1 + \frac{2L}{c}\right) \right] \right\} \quad (5.4.4-1)$$

$$Z = \frac{EA}{c} \quad (5.4.4-2)$$

式中 Q_{uc} ——单桩轴向抗压极限承载力(kN);

J_c ——凯司法阻尼系数;

t_1 ——速度信号第一峰对应的时刻(ms);

$F(t_1)$ —— t_1 时刻的锤击力(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)。

4 J_c 应根据基本相同条件下桩的动-静载对比试验结果确定,或由不少于 50% 被检桩的曲线拟合结果推算,但当其极差相对于平均值大于 30% 时不得使用。

5.4.5 对于等截面桩,测点下第一个缺陷可根据桩身完整性系数 β 值按表 5.4.5 判定,其位置 x 按下式计算:

$$x = \frac{c \cdot (t_x - t_1)}{2000} \quad (5.4.5)$$

式中 x ——测点至桩身缺陷之间的距离(m);

t_1 ——速度信号第一峰对应的时刻(ms);

t_x ——缺陷反射峰对应的时刻(ms)。

表 5.4.5 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	$\beta < 0.6$

5.4.6 出现下列情况之一时,应按工程地质和施工工艺条件,采用实测曲线拟合法或其他检测方法综合判定桩身完整性:

1 桩身有扩径、截面渐变或多变的混凝土灌注桩。

2 桩身存在多处缺陷的桩。

3 力和速度曲线在上升沿或峰值附近出现异常,桩身浅部存在缺陷或波阻抗变化复杂的桩。

5.4.7 试打桩分析时,桩端持力层的判定应综合考虑岩土工程勘察资料,并应对推算的单桩极限承载力进行复打校核。

5.4.8 桩身最大锤击拉应力和桩身最大锤击压应力可分别按下列公式计算:

1 桩身最大锤击拉应力

$$\sigma_t = \frac{1}{2A} \max \left\{ Z \cdot V \left(t_1 + \frac{2L}{c} \right) - F \left(t_1 + \frac{2L}{c} \right) - Z \cdot V \left(t_1 + \frac{2L - 2x}{c} \right) - F \left(t_1 + \frac{2L - 2x}{c} \right) \right\} \quad (5.4.8-1)$$

式中 σ_t ——桩身最大锤击拉应力(kPa);
 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)。

2 桩身最大锤击压应力

$$\sigma_p = \frac{F_{\max}}{A} \quad (5.4.8-2)$$

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)。

5.4.9 桩锤实际传递给桩的能量可按下列公式计算:

$$E_n = \int_0^T FV dt \quad (5.4.9)$$

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);
 V ——桩顶实测振动速度信号(m/s)。

5.4.10 检测报告格式应符合本规程附录 A 的规定,并应包括下列内容:

- 1 实测力和速度信号曲线及由加速度信号经两次积分后得到的桩顶位移信号曲线;拟合曲线、模拟的静荷载-沉降曲线、土阻力和桩身阻抗沿深度的变化曲线;
- 2 凯司法中所取定的 J_c 值;
- 3 试打桩和打桩监控所采用的桩锤和锤垫类型,监测得到的锤击数、桩侧和桩端阻力、桩身锤击拉(压)应力、能量传递比等随入土深度的变化关系。
- 4 试桩附近的地质柱状图及土的物理力学性能指标。

6 超声波法

6.1 适用范围

6.1.1 本方法适用于直径不小于 800mm 的混凝土灌注桩的完整性检测,它包括跨孔透射法和单孔折射法。

6.2 检测仪器与设备

6.2.1 检测仪系统应包括信号放大器、数据采集及处理存储器、径向振动换能器等。

6.2.2 检测仪应具有一发双收功能。

6.2.3 声波发射应采用高压阶跃脉冲或矩形脉冲,其电压最大值不应小于 1000V,且分档可调。

6.2.4 接收放大与数据采集器应符合下列规定:

1 接收放大器的频带宽度为 5 ~ 200kHz,增益不应小于 100dB,放大器的噪声有效值不大于 $2\mu\text{V}$;波幅测量范围不小于 80dB,测量误差小于 1dB。

2 计时显示范围应大于 2000 μs ,精度优于 0.5 μs ,计时误差不应大于 2%。

3 采集器模-数转换精度不应低于 8bit,采样频率不应小于 10MHz,最大采样长度不应小于 32kB。

6.2.5 径向振动换能器应符合下列规定:

1 径向水平面无指向性。

2 谐振频率宜大于 25kHz。

3 在 1MPa 水压下能正常工作。

4 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。

5 接收换能器宜带有前置放大器,频带宽度宜为 5 ~ 60kHz。

6 单孔检测采用一发双收一体型换能器,其发射换能器至接收换能器的最近距离不应小于 30cm,两接收换能器的间距宜为 20cm。

6.3 现场检测技术

6.3.1 声测管的埋设应符合下列规定:

- 1 当桩径不大于 1500mm 时,应埋设三根管;当桩径大于 1500mm 时,应埋设四根管。
- 2 声测管宜采用金属管,其内径应比换能器外径大 15mm,管的连接宜采用螺纹连接,且不漏水。
- 3 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,并埋设至桩底,管口宜高出桩顶面 300mm 以上。
- 4 声测管管底应封闭,管口应加盖。
- 5 声测管的布置以路线前进方向的顶点为起始点,按顺时针旋转方向进行编号和分组,每两根编为一组。

6.3.2 检测前的准备应符合下列规定:

- 1 被检桩的混凝土龄期应大于 14d。
- 2 声测管内应灌满清水,且保证畅通。
- 3 标定超声波检测仪发射至接收的系统延迟时间 t_0 。
- 4 准确量测声测管的内、外径和两相邻声测管外壁间的距离,量测精度为 $\pm 1\text{mm}$ 。
- 5 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。

6.3.3 检测方法应符合下列要求:

- 1 测点间距不宜大于 250mm。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。
- 2 在对同一根桩的检测过程中,声波发射电压应保持不变。
- 3 对于声时值和波幅值出现异常的部位,应采用水平加密、等差同步或扇形扫测等方法进行细测,结合波形分析确定桩身混凝土缺陷的位置及其严重程度。

6.4 检测数据分析与判定

6.4.1 声时修正值可按式计算:

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

式中 t' ——声时修正值(μs), (t 为声波在混凝土中的传播时间,简称声时);

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);

v_w ——水的声速值(km/s)。

6.4.2 声时、声速和声速平均值应按下列公式计算,并绘制声速-深度曲线、波幅-深度曲线。

$$t = t_i - t_0 - t' \quad (6.4.2-1)$$

$$v_i = \frac{l}{t} \quad (6.4.2-2)$$

$$v_m = \sum_{i=1}^n \frac{v_i}{n} \quad (6.4.2-3)$$

式中 t ——声时值(μs);

t_i ——超声波第 i 测点声时值(μs);

t_0 ——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);

v_m ——混凝土声速平均值(km/s);

n ——测点数。

6.4.3 单孔折射法的声时、声速值应按下列公式计算:

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (6.4.3-1)$$

$$v_i = \frac{h}{\Delta t} \quad (6.4.3-2)$$

式中 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);

v_i ——第 i 测点的声速值(km/s);

h ——两个接收换能器间的距离(mm)。

6.4.4 桩身混凝土缺陷应根据下列方法综合判定:

1 声速判据

当实测混凝土声速值低于声速临界值时应将其作为可疑缺陷区。

$$v_i < v_D \quad (6.4.4-1)$$

式中 v_i ——第 i 个测点声速值(km/s);

v_D ——声速临界值(km/s)。

声速临界值采用正常混凝土声速平均值与 2 倍声速标准差之差,即:

$$v_D = \bar{v} - 2\sigma_v \quad (6.4.4-2)$$

$$\bar{v} = \sum_{i=1}^n \frac{v_i}{n} \quad (6.4.4-3)$$

$$\sigma_v = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(v_i - \bar{v})^2}{n-1}} \quad (6.4.4-4)$$

式中 \bar{v} ——正常混凝土声速平均值(km/s);

σ_v ——正常混凝土声速标准差;

v_i ——第 i 个测点声速值(km/s);

n ——测点数。

当检测剖面 n 个测点的声速值普遍偏低且离散性很小时,宜采用声速低限值判据。即实测混凝土声速值低于声速低限值时,可直接判定为异常。

$$v_i < v_L \quad (6.4.4-5)$$

式中 v_i ——第 i 个测点声速值(km/s);

v_L ——声速低限值(km/s)。

声速低限值应由预留同条件混凝土试件的抗压强度与声速对比试验结果,结合本地区实际经验确定。

2 波幅判据

用波幅平均值减 6dB 作为波幅临界值,当实测波幅低于波幅临界值时,应将其作为可疑缺陷区。

$$A_D = A_m - 6 \quad (6.4.4-6)$$

$$A_m = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{n} \quad (6.4.4-7)$$

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。

3 PSD 判据

采用斜率法作为辅助异常判据,当 PSD 值在某测点附近变化明显时,应将其作为可疑缺陷区。

$$\text{PSD} = \frac{(t_i - t_{i-1})^2}{z_i - z_{i-1}} \quad (6.4.4-8)$$

式中 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)。

6.4.5 对于混凝土声速和波幅值出现异常并判为可疑缺陷区的部位,应按本规程

6.3.3条第3款的要求,确定桩身混凝土缺陷的位置及影响程度。

6.4.6 对支承桩或嵌岩桩,宜同时采用低应变反射波法检测桩段的支承情况。

6.4.7 桩身完整性类别判定:

- 1 I类桩:各声测剖面每个测点的声速、波幅均大于临界值,波形正常。
- 2 II类桩:某一声测剖面个别测点的声速、波幅略小于临界值,但波形基本正常。
- 3 III类桩:某一声测剖面连续多个测点或某一深度桩截面处的声速、波幅值小于临界值,PSD值变大,波形畸变。
- 4 IV类桩:某一声测剖面连续多个测点或某一深度桩截面处的声速、波幅值明显小于临界值,PSD值突变,波形严重畸变。

6.4.8 检测报告应符合本规程附录A的规定。并应包括每根被检桩各剖面的声速-深度、波幅-深度曲线及各自的临界值,声速、波幅的平均值,桩身缺陷位置及程度的分析说明。

附录 A 报告格式

A.0.1 报告封面格式

公路工程基桩动测报告

编号: _____ 共 页

工程名称:

委托单位:

检测方法:

检测地点:

检测日期: _____ 年 _____ 月 _____ 日至 _____ 年 _____ 月 _____ 日

检测单位: _____ (盖章)

_____ 年 _____ 月 _____ 日

A.0.2 报告封二格式

项目负责人:

主要检测人:

报告编写人:

报告审核人:

报告签发人:

检测单位地址:

邮 政 编 码:

电 话 传 真:

电 子 信 箱:

A.0.3 低应变反射波法检测结果汇总表格式
低应变反射波法检测结果汇总表

工程名称:

序号	桩号	施工日期	测试日期	桩径(mm)	桩长(m)	波速(m/s)	桩身完整性	类别

检测人: 审核人:

A.0.4 高应变法检测结果汇总表格式

高应变法检测结果汇总表

工程名称:

序号	桩号	施工日期	测试日期	桩径(mm)	桩长(m)	入土深度(mm)	波速(m/s)	桩身完整性	类别	单桩极限承载力(kN)

检测人:

审核人:

A.0.5 超声波法检测结果汇总表格式

超声波法检测结果汇总表

工程名称:

序号	桩号	施工日期	测试日期	桩径(mm)	桩长(m)	平均声速(km/s)	平均波幅(dB)	桩身完整性	类别

检测人:

审核人:

A.0.6 低应变反射波法单桩检测报告格式**低应变反射波法单桩检测报告单**

编号:

工程名称		桩 号	
检测单位		测 试 人	
测试日期			
检测依据		审 核 人	

施工日期			测试仪器		
桩 型		设计强度 等级		设计桩径 (mm)	
设计桩顶标高 (m)		设计桩端标高 (m)		实测桩顶标高 (m)	
原始测试曲线:					
检测结果:					

提交报告时间: 年 月 日

A.0.7 高应变动测法单桩检测报告格式

高应变动测法单桩检测报告单

编号:

工程名称		桩 号	
检测单位		测 试 人	
测试日期			
检测依据		审 核 人	

施工日期			测试仪器		
桩 型		设计强度 等级		设计桩径 (mm)	
设计桩顶标高 (m)		设计桩端标高 (m)		实测桩顶标高 (m)	
测试曲线:					
计算曲线:					
检测结果:					

提交报告时间: 年 月 日

A.0.8 声波透射法单桩检测报告格式

超声波法单桩检测报告单

编号:

项目名称		桩 号	
检测单位		测 试 人	
测试日期			
检测规程		审 核 人	

施工日期			测试仪器				
桩 型		设计强度等级		设计桩径 (mm)			
设计桩顶标高 (m)		设计桩端标高 (m)		实测桩顶标高 (m)			
测管平面布置示意图:		测试结果		v_m (km/s)	A_m (dB)	v_D (km/s)	A_D (dB)
		组 号					
检测结果:							

提交报告时间: 年 月 日

附录 B 正常混凝土的声速平均值及标准差的确定方法

B.0.1 将同一根桩混凝土的各测点声速值按大小排列,即 $v_1 > v_2 > v_3 > \cdots v_n > v_{n+1} > v_{n+2} > \cdots$,将排在后面明显小的数据视为可疑值,如果 $v_{n+1} > v_{n+2} > \cdots$ 等测值可疑,先予以剔除,然后以 v_n 及其以前点按本规程公式(6.4.4-3)和公式(6.4.4-4)计算声速平均值 \bar{v} 、标准差 σ_v 及按公式(6.4.4-2)计算声速临界值 v_D 。此时,若 $v_n > v_D$ 而 $v_{n+1} < v_D$,则表明计算的 \bar{v} 、 σ_v 为符合正态分布的正常混凝土平均声速及标准差值;若 $v_n < v_D$,说明 v_n 也是缺陷点声速,不应参加统计而应予以剔除,再以 v_{n+1} 及其以上点统计计算新的 \bar{v} 、 σ_v 及 v_D ,再作判断,而后依次类推,直至计算出符合正态分布的正常混凝土平均声速、标准差值。

B.0.2 确定 \bar{v} 、 σ_v 时应注意下列事项:

- 1 测点数应 $n \geq 20$ 。
- 2 当被测桩混凝土内部缺陷范围大,经剔除可疑点后剩余的正常测点很少时,若仍以剩余测点统计 \bar{v} ,就可能会出现较大误差,判断失误。这时,应另选择质量正常的同类桩(同尺寸,同龄期、同一工地等)的声测值,以其 \bar{v} 、 σ_v 代表缺陷桩中的正常混凝土的平均声速和标准差。