

中华人民共和国行业标准

铁路工程基桩无损检测规程

Specification for non-destructive testing railway piles

TB 10218—99

主编单位：铁道部大桥工程局

批准部门：中华人民共和国铁道部

施行日期：1999 年 6 月 1 日

中 国 铁 道 出 版 社

1999 年 · 北 京

(京)新登字 063 号

中华人民共和国行业标准
铁路工程基桩无损检测规程
TB 10218—99

*

中国铁道出版社出版发行
(100054, 北京市宣武区右安门西街 8 号)
北京市彩桥印刷厂印

开本, 850 mm×1 168 mm 1/32 印张, 1.25 字数, 29 千字

1999 年 5 月第 1 版 1999 年 5 月第 1 次印刷

印数, 1~5 000 册

统一书号, 15113·1264 定价, 5.30 元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 请与本社发行部调换。

关于发布《铁路通信设计规范》等 12个铁路工程建设标准的通知

铁建设函〔1999〕69号

《铁路通信设计规范》(TB 10006—99)、《铁路信号设计规范》(TB 10007—99)、《铁路电力设计规范》(TB 10008—99)、《铁路数字微波通信工程设计规范》(TB 10060—99)、《新建铁路工程测量规范》(TB 10101—99)、《铁路桥梁抗震鉴定与加固技术规范》(TB 10116—99)、《铁路通信施工规范》(TB 10205—99)、《铁路信号施工规范》(TB 10206—99)、《铁路电力施工规范》(TB 10207—99)、《铁路架桥机架梁规程》(TB 10213—99)、《铁路工程基桩无损检测规程》(TB 10218—99)和《铁路光缆通信同步数字系列(SDH)工程施工规范》(TB 10219—99)等12个标准,经审查,现批准发布,自1999年6月1日起施行。修订后的施工规范含工程验收内容。届时,《铁路通信设计规范》(TBJ 6—85)、《铁路信号设计规范》(TBJ 7—85)、《铁路电力设计规范》(TBJ 8—85)、《铁路测量技术规则》(TBJ 101—85)、《铁路通信施工规范》(TBJ 205—86)、《铁路信号施工规范》(TBJ 206—86)、《铁路电力施工规范》(TBJ 207—86)和《铁路架桥机架梁规则》(TBJ 213—86)计8个标准废止。

以上标准由部建设管理司负责解释,由铁道出版社和铁路工程技术标准所组织出版发行。

中华人民共和国铁道部

一九九九年三月二日

前 言

本规程系根据铁道部铁建函〔1995〕181号文件的要求，在科研工作的基础上，通过实践，总结了现场技术发展及应用经验编制而成。

本规程分为五章，主要内容包括：总则、符号、基本规定、声波透射法和瞬态激振（敲击）时域频域分析法。规程中所规定的两种检测方法理论依据正确，技术成熟可靠，且操作简便，能准确判定缺陷位置、范围及性质。另外，本规程还完善了声测管埋设工艺和基桩质量等级的评定及基桩混凝土强度的估算。

本规程是首次编制，希望各单位在执行本规程过程中认真总结经验，积累资料，如发现需要修改和补充之处，请及时将意见和有关资料寄交铁道部大桥工程局（武汉市汉阳区汉阳大道 38 号，邮政编码：430050），并抄送铁路工程技术标准所（北京市朝阳区朝阳门外大街 227 号，邮政编码：100020），供今后修改时参考。

本规程由铁道部建设管理司负责解释。

本规程主编单位：铁道部大桥工程局。

本规程参加单位：铁道部铁道科学研究院。

本规程主要起草人：王邦楣、徐慧、王根清、周明星、潘东发。

目 次

1	总 则	1
2	符 号	2
3	基本规定	4
3.1	检测数量	4
3.2	仪器设备	4
3.3	检测前的准备工作	4
3.4	检测步骤	5
3.5	基桩混凝土质量等级的评定	5
3.6	检测报告	5
4	声波透射法	7
4.1	一般规定	7
4.2	仪器设备	7
4.3	声测管的材料及埋设工艺	8
4.4	现场检测	9
4.5	数据分析与判定.....	10
4.6	基桩混凝土强度估算.....	13
5	瞬态激振（敲击）时域频域分析法.....	15
5.1	一般规定.....	15
5.2	检测系统.....	15
5.3	现场检测.....	16
5.4	数据分析与判定.....	17
附录 A	本规程用词说明	20
	《铁路工程基桩无损检测规程》条文说明.....	21

1 总 则

1.0.1 为统一铁路工程基桩无损检测的方法和要求，确保基桩工程的质量，制定本规程。

1.0.2 本规程声波透射法适用于检测桩径或边长大于 **0.6 m** 的混凝土灌注桩的桩身完整性及强度评估；瞬态激振（敲击）时域频域分析法适用于检测混凝土灌注桩和打入桩的桩身完整性及强度评估。

1.0.3 检测单位应具有铁道部认定的资质证书。检测结果应由经认定资质的单位中持上岗证的检测人员提出。

1.0.4 基桩无损检测除应符合本规程外，尚应符合国家现行的有关强制性标准的规定。

2 符 号

A_i ——第 i 个测点声波振幅

A_{\max} ——声波振幅的最大测值

C_E ——夏里埃概率密度函数中的峰凸系数

d ——声测管内径或桩身直径

d' ——柱状径向振动式换能器外径

D ——声测管外径

E_i ——第 i 个测点的综合样本值

f_1 ——桩土系统第一阶谐振频率

f_1' ——桩身缺陷的第一阶谐振频率

Δf ——完整桩的特征频率

$\Delta f'$ ——桩身缺陷部位反射波的特征频率

F ——概率

F_i ——第 i 个测点的声波振动频率

F_{\max} ——声波振动频率的最大测值

l ——两个声测管外壁间混凝土的距离

l_i ——柱状径向振动式换能器在水中的第 i 个测距

L ——桩长

L_m ——测量桩长

L' ——缺陷沿桩身所在的位置

m ——概率保证系数

n ——测点数

$NFP(i)$ ——第 i 个测点 NFP 的判据值

t ——声波传播时间

t' ——声时修正值

- t_0 ——声时初读值
- t_{1i} ——声波在第 i 个测点到达首波前半个周期波谷（或波峰）的时间
- t_{2i} ——声波在第 i 个测点到达首波相邻波谷（或波峰）的时间
- t_i ——第 i 个测点的声时值
- t_{ei} ——第 i 个测点混凝土中声波传播时间
- ΔT ——桩底反射波周期
- $\Delta T'$ ——桩身缺陷部位反射波的周期
- μ ——综合样本的平均值
- v_i ——第 i 个测点混凝土中声波传播速度
- v_{\max} ——声速的最大测值
- v_t ——声波在声测管管壁厚度方向的传播速度
- v_w ——声波在水中的传播速度
- v_c ——桩身纵向应力波波速
- $\overline{v_c}$ ——该工地桩身纵向应力波平均波速
- σ ——综合样本的标准差

3 基本规定

3.1 检测数量

3.1.1 对于大跨度桥梁的基桩、直径大于或等于 1.5 m 的基桩、同一墩台基桩数量小于或等于 2 根时，全部基桩应进行检测。

其他基础桩，应根据工程的重要性、抗震设防等级、地质条件、成桩工艺、检测目的和施工班组等情况进行抽测。抽测数不得少于该批桩总数的 30%，且不得少于 10 根。当检测不合格的桩数大于抽测数的 30% 时，应加倍重新抽测。当加倍抽测后不合格的桩数仍大于抽测数的 30% 时，应全部检测。

3.2 仪器设备

3.2.1 检测仪器应通过技术鉴定，并具有产品合格证书和计量鉴定证书。

3.2.2 检测仪器应具有防尘、防潮性能，并应在温度为 $-10 \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度小于或等于 80%，电源电压在 $220 \times (1 \pm 10\%) \text{ V}$ （直流供电电压上下 5%）的环境中连续正常工作 4 h 以上。

3.2.3 仪器长期不使用时，应按使用说明书要求定期通电。长途搬运时，仪器应装在有防震措施的仪器箱内。

3.2.4 仪器设备应每年进行一次全面检查和调试，其技术指标应符合仪器质量标准的要求。

3.3 检测前的准备工作

3.3.1 检测前应具有下列资料：工程地质资料、基桩设计图、施工原始记录（钻孔记录与混凝土灌注记录等）和桩位布置图。

3.3.2 检测前应对所需检测的基桩做好准备，检测管应通畅，桩头处理应符合要求等。

3.4 检测步骤

3.4.1 检测步骤应分别按照声波透射法和瞬态激振（敲击）时域频域分析法的具体规定执行。

3.5 基桩混凝土质量等级的评定

3.5.1 基桩混凝土质量等级应根据基桩有无缺陷或缺陷的性质、大小和桩身混凝土强度，分为Ⅰ类桩、Ⅱ类桩、Ⅲ类桩和Ⅳ类桩四个等级。

3.5.2 基桩混凝土质量等级的评定应符合下列规定

1 Ⅰ类桩——桩身混凝土完整性好，桩身混凝土强度达到设计强度；

2 Ⅱ类桩——桩身混凝土基本完整，有小缺陷，截面稍有削弱，但对桩的受力无影响，桩身混凝土强度达到设计强度；

3 Ⅲ类桩——桩身有缺陷，但不是断桩等严重缺陷或桩身混凝土强度低于设计强度，但达到或大于设计强度的80%；

4 Ⅳ类桩——桩身混凝土有断桩等严重缺陷，或桩身混凝土强度小于设计强度的80%；

5 Ⅰ类桩为桩身质量优良桩；Ⅱ类桩为合格桩；Ⅲ类桩有明显缺陷，需与有关单位研究，以确定修补方案或继续使用，按要求修补后或经研究可继续使用的视为合格桩，Ⅳ类桩为不合格桩。

3.6 检测报告

3.6.1 检测报告应包括下列内容：

1 工程名称（项目全名、分项工程名称）及概况、委托及检测单位、检测日期；

2 工程地质概况、基桩设计与施工概况、桩位布置图；

3 检测依据、检测方法简介及所用仪器设备；

4 检测结果；

- 5 基桩混凝土质量等级的评定；
- 6 检测结论和建议；
- 7 签署报告单位名称、检测人员、检测负责人、报告审核人。

4 声波透射法

4.1 一般规定

4.1.1 本方法可判定缺陷桩的缺陷性质、位置及范围。

4.1.2 本方法可评定基桩混凝土质量等级。

4.2 仪器设备

4.2.1 超声波检测仪的技术性能应符合下列规定：

1 显示系统应同时显示接收波形和声波传播时间，其测时范围为 $0.1\sim 999.9\ \mu\text{s}$ 、 $1\sim 9\ 999\ \mu\text{s}$ ；

2 测读方式为手动游标读数自动整形测读或手动游标读数程序判读声时；

3 发射方式为连续激发或单次激发，频率大于或等于 $50\ \text{Hz}$ ；

4 发射电压为大于或等于 $500\ \text{V}$ ；

5 放大器频带为 $10\sim 250\ \text{kHz}$ ；

6 接收灵敏度小于或等于 $50\ \mu\text{V}$ ；

7 示波显示扫描宽度为 $50\sim 100$ 分档；

8 相对发射脉冲的扫描延时为 $40\sim 5\ 000\ \mu\text{s}$ 连续可调；

9 游标调节为 $10\sim 100\ \mu\text{s}$ 连续可调或 $10\sim 300$ 个采样间隔连续可调；

10 衰减器衰减范围为 $0\sim 80\ \text{dB}$ ，衰减器精度为小于或等于 $1\ \text{dB}$ ；

11 仪器应具有良好的稳定性，当声时显示小于或等于 $50\ \mu\text{s}$ 时，末位每小时加或减 1 个数字。

4.2.2 换能器技术性能应符合下列规定：

1 发射换能器应采用柱状径向振动的换能器，其标称频率

宜为 $10\sim 500\text{ kHz}$ ，最常用为 $20\sim 50\text{ kHz}$ ；长度宜为 $200\sim 300\text{ mm}$ 。换能器宜装有前置放大器。前置放大器的频带宽度宜为 $10\sim 50\text{ kHz}$ 。换能器的水密性应满足在 1 MPa 水压下不漏水。

2 接收换能器的长度、频带宽度及水密性能应与发射换能器的要求相同。

3 换能器应避免摔损和撞击，工作完毕应擦拭干净单独存放。换能器的表面及接头连续处应避免磨损。

4 换能器的绝缘电阻宜大于 $500\text{ M}\Omega$ 。当小于 $100\text{ M}\Omega$ 时，应更换新的换能器。

4.3 声测管的材料及埋设工艺

4.3.1 声测管应具有一定的强度、韧性及刚度，宜采用内径为 $43\sim 60\text{ mm}$ 的钢管，接头宜采用螺纹连接。

4.3.2 声测管埋设前应检查其是否通畅，管壁是否完好。

4.3.3 声测管埋设数量应根据桩径确定。桩径 $0.6\sim 1.0\text{ m}$ 宜埋设双管；桩径 $1.0\sim 2.0\text{ m}$ 宜埋设 3 根管；桩径 2.0 m 以上宜埋设 4 根管（图 4.3.3）。

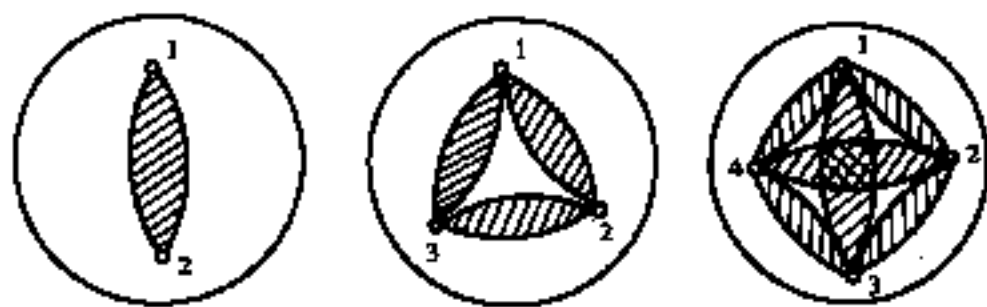


图 4.3.3 声测管埋设示意图

4.3.4 声测管在桩中位置，应基本等分桩的圆周。为减少测距变化对声测精度的影响，各相对应声测管的间距应基本保持均匀。

当需要估算基桩混凝土强度时，声测管的间距应保证相对误差不大于 3% ，并在下钢筋笼时，直接分段测量，记录间距。

4.3.5 声测管应焊接或绑扎在钢筋笼的内侧。声测管的接头和

管底必须严格密封。

4.3.6 声测管应埋设到桩底。在无钢筋笼段，可另行制作简易钢支架固定测管。

4.3.7 为便于检测，声测管应高出检测工作面 **300 mm** 以上。

4.3.8 声测管在随钢筋笼下沉时，要求每下沉一节钢筋笼，向管内注一次清水。下沉完毕后，应将测管注满清水，并将外露管头用铁板、木塞等物密封。

4.4 现场检测

4.4.1 现场检测应符合下列规定：

1 柱状径向振动式换能器声时初读数 (t_0) 的测量：

将两个柱状径向振动式换能器保持其轴线相互平行，置于清水中同一水平高度，逐次调节两个换能器轴线间距，并测量其距离 l_i 和读取相应的声时值 t_i (测点数不得少于 **10** 个)，用统计方法求出 t_i 和 l_i 之间的回归式，即

$$t_i = a + b \cdot l_i \quad (4.4.1)$$

式中 a, b ——待求的回归系数，其中 a 是由仪器和换能器及其高频电缆所产生的初读数部分 (t_0)；

2 将发射与接收换能器分别置于不同编号的声测管中，打开仪器电源开关；

3 根据测试距离大小将仪器的发射电压调在某一档，并以扫描基线不产生明显噪声干扰为前提，将仪器“增益”调至较佳位置保持不变；

4 调节衰减器的衰减量，使示波屏上首波最大波幅（换能器在桩内上下移动）调至满屏的 **50%~80%**；

5 测量时发射与接收换能器可置于同一高程或不同高程，当置于不同高程时，两个换能器中点连接的水平夹角不宜大于 **40°**，或两个换能器的高差不宜大于 **500 mm**；

6 测量点间距宜为 **200~500 mm**；

7 测量时发射与接收换能器应同步升降，各测点发射与接

收换能器相对高差不应大于 20 mm, 并应随时校正;

8 声时测量: 调节游标脉冲, 应用其前沿对准首波前沿基线弯曲的起始点, 读取声时值 t_i (精确至 0.1 μs);

9 波幅测量: 应从仪器示波屏上读取首波幅值 A_i , 精确至毫米;

10 频率测量: 应先将游标脉冲调至首波前半个周期的波谷 (或波峰) 读取声时值 t_{1i} (μs), 再将游标脉冲调至相邻的波谷 (或波峰) 读取声时值 t_{2i} (μs);

11 测距测量: 可用钢卷尺测出两个声测管外壁间混凝土的距离 I (mm), 测量误差不应大于 $\pm 1\%$;

12 波形观察: 应观察接收信号的波形是否畸变。

4.5 数据分析与判定

4.5.1 声测管及耦合水的声时修正值 t' 应按下式计算:

$$t' = \frac{D-d}{v_t} + \frac{d-d'}{v_w} \quad (4.5.1)$$

式中 t' ——声时修正值 (μs), 精确至 0.1 μs ;

D ——声测管的外径 (mm);

d ——声测管的内径 (mm);

d' ——换能器的外径 (mm);

v_t ——声波在声测管管壁厚度方向的传播速度 (km/s), 精确至小数点后三位;

v_w ——声波在水中的传播速度 (km/s), 精确至小数点后三位。

4.5.2 声波在混凝土中的传播速度 v_i 应按下式计算;

$$v_i = \frac{I}{t_i - t_0 - t'} \quad (4.5.2)$$

式中 v_i ——声波在混凝土中的传播速度 (km/s), 精确至小数点后三位;

I ——两个检测管外壁间混凝土的距离 (mm);

t_i ——第 i 个测点声时原始测试值 (μs)。

4.5.3 声波在混凝土中的振动频率 F_i 应按下式计算：

$$F_i = \frac{1\,000}{t_{2i} - t_{1i}} \quad (4.5.3)$$

式中 F_i ——声波在第 i 个测点的振动频率 (kHz)，精确至小数点后一位；

t_{1i} ——声波在第 i 个测点到达首波前半个周期波谷（或波峰）的时间 (μs)；

t_{2i} ——声波在第 i 个测点到达首波相邻波谷（或波峰）的时间 (μs)。

4.5.4 桩身完整性的判定方法宜采用多因素综合概率分析 (NFP) 法，也可用斜率 (PSD) 法和概率法。

4.5.5 多因素综合概率分析 (NFP) 法判定桩身完整性应符合下列规定：

1 计算综合样本值 E_i

$$E_i = \frac{v_i}{v_{\max}} \times \frac{F_i}{F_{\max}} \times \frac{A_i}{A_{\max}} \quad (i=1, 2, 3, \dots) \quad (4.5.5-1)$$

式中 E_i ——第 i 个测点的综合样本值，精确至小数点后四位；

v_i, F_i, A_i ——第 i 个测点的声速、频率、振幅值；

$v_{\max}, F_{\max}, A_{\max}$ ——声速、频率、振幅的最大值。

2 计算综合样本的平均值 μ

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i \quad (4.5.5-2)$$

精确至小数点后三位。

3 计算综合样本的标准差 σ

$$\sigma = \left[\sum_{i=1}^n (E_i - \mu)^2 / (n - 1) \right]^{1/2} \quad (4.5.5-3)$$

计算得到的标准差值应精确至小数点后三位。

表 4.5.5—1 $F \leq 0.01$ 时的 $m \sim C_E$

$\begin{matrix} C_E \\ F \\ m \end{matrix}$	$C_E \leq 1$	$1 < C_E \leq 2$	$2 < C_E \leq 3$	$3 < C_E \leq 4$	$4 < C_E \leq 5$	$5 < C_E \leq 6$	$6 < C_E \leq 7$	$7 < C_E \leq 8$	$8 < C_E \leq 9$
-2.1	0.007 2								
-2.2		0.007 9							
-2.4			0.008 2						
-2.7				0.008 2					
-2.9					0.009 7				
-3.1						0.009 4			
-3.2							0.009 9		
-3.3								0.01	
-3.4									0.009 5

4 计算夏里埃概率密度函数中的峰凸系数 C_E

$$C_E = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - \mu)^4}{\sigma^4} \quad (4.5.5-4)$$

计算得到的峰凸系数应精确至小数点后三位。

5 在表 4.5.5—1 中，用内插法计算概率保证系数 m 。

8 计算综合判据值 $NFP(i)$

$$NFP(i) = \frac{E_i}{\mu + m \cdot \sigma} \quad (4.5.5-5)$$

综合判据值应精确至小数点后三位。

若 $NFP(i) \geq 1$ ，说明该处混凝土质量正常；

若 $NFP(i) < 1$ ，说明该处混凝土有缺陷，且 $NFP(i)$ 越低，缺陷越严重。

7 缺陷的基本性质应根据综合判据值 $NFP(i)$ 及三个声学指标按表 4.5.5—2 进行综合分析。

表 4.5.5—2 缺陷性质分析

综合判据值	声速	频率	波幅	波 形	缺陷性质分析
$NFP \geq 1.0$	正常	正常	正常	正 常	质量优良无缺陷
$0.5 \leq NFP < 1.0$	正常	正常	略低	轻微变异	有局部夹泥砂或其他小缺陷
	略低	略低	略低	正 常	低强度区或局部少浆缺陷
$0.3 \leq NFP < 0.5$	略低	略低	较低	有 畸 变	较严重的局部夹泥、夹砂
	较低	较低	较低	明显畸变	较严重的低强或颈缩
$0 \leq NFP < 0.3$	较低	较低	很低	波形低矮畸变	砂石堆积断层
	很低	很低	很低	波形紊乱畸变	夹泥、夹砂严重断层

8 在有缺陷存在的区段内，应再进行细测，以确定缺陷的位置、性质和大小。

4.6 基桩混凝土强度估算

4.6.1 基桩混凝土的强度可依据所测混凝土的波速进行估算。

4.8.2 波速与混凝土抗压强度的换算关系，应采用工程实际所用的材料及配合比，在同一天至少制作 **36** 个标准试件，并分别按龄期 **14 d**、**21 d**、**28 d**、**38 d**、**48 d**、**60 d** 进行试块的声速值测试及立方体强度试验，经回归分析，得出换算强度 **R** 与声速 **v** 的专用测强曲线。

4.8.3 根据专用测强曲线推算的 **28 d** 强度与 **28 d** 试块强度的相对误差应小于或等于 **$\pm 12\%$** 。

4.8.4 专用测强曲线回归方程宜用幂函数或指数函数方程。

4.8.5 超声声速值应精确至 **0.001 km/s**，强度值应精确至 **0.1 MPa**。

5 瞬态激振（敲击）时域频域分析法

5.1 一般规定

5.1.1 本方法可判定缺陷桩的缺陷性质及其沿桩身所在位置。

5.1.2 本方法可核对施工桩长。

5.1.3 本方法检测的基桩桩径宜为 $0.2\sim 2.2\text{ m}$ ，桩长不宜大于 50 m 。

5.2 检测系统

5.2.1 检测系统可分为激振设备和测试系统两部分。检测系统框图如图 5.2.1 所示。

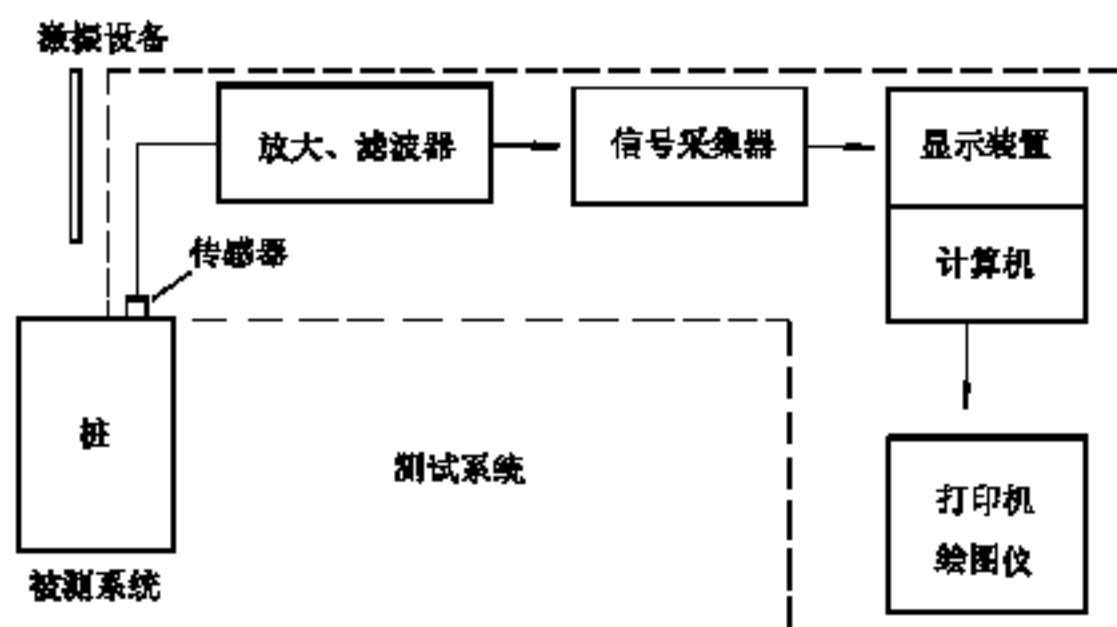


图 5.2.1 瞬态激振检测系统框图

5.2.2 激振设备应包括不同大小、不同质量的力锤、力棒、手锤和不同材质的激振头。

5.2.3 拾振传感器可选用高灵敏度的压电式加速度传感器或速度传感器。其可测频率范围为 $0\sim 1\,000\text{ Hz}$ 和 $20\sim 10\,000\text{ Hz}$ 两种。加速度传感器灵敏度应优于 $1\,000\text{ pC/g}_n$ ，速度传感器灵敏

度应优于 $300 \text{ mV}/(\text{cm/s})$ 。

5.2.4 信号采集仪可选用基桩动测分析仪，也可用通用测试仪器（如放大器、滤波器和记录仪等）。

5.2.5 放大系统应与传感器的类型相对应。放大器增益应大于 60 dB ，可调，线性度良好，误差应在 $\pm 1\%$ 范围内，滤波频率可调。

5.2.6 信号采集的模/数转换位数不应小于 8 位。采样时间最小间隔不应大于 $10 \mu\text{s}$ ，可分多档调整。

5.2.7 多通道采集系统应具有—致性，其振幅偏差应小于 3% ，相位偏差应小于 0.1 ms 。

5.2.8 测试系统中，各仪器设备的使用技术性能应相互匹配。

5.2.9 检测前应对仪器设备进行检查，性能正常方可使用。

5.3 现场检测

5.3.1 在检测前，对被测桩应做好桩头处理：除去浮碴，凿除松动和有裂隙部分，露出密实混凝土，大致凿平。中心激振处和传感器安装处要磨平。对打入桩应在施打后尽快检测。

5.3.2 传感器安装应符合下列要求：

1 将安装传感器的部位用刷子和棉纱清理干净，不得有浮动砂土颗粒存在；

2 用黄油或其他粘接耦合剂将传感器粘在桩顶安装传感器的地方，粘接应牢固，传感器底面粘接剂越薄越好；

3 传感器应安装在距中心 $2/3$ 半径处。

5.3.3 电源及测试系统应处于正常状态，接地良好，方可接通电源开始试验。

5.3.4 测试参数的选定应符合下列要求：

1 通过现场数根（至少 3 根）完整桩的试验或混凝土试块或清理出的桩头或钻孔取样的芯样的试验，确定出该工地桩的平均波速 \bar{v}_c ；

2 根据桩长和波形分析需要确定采样频率和最低采样数据

长度，每个信号的采样点数不宜少于 512 点；

3 采样频率确定后，测试各环节的仪器档位调节均应相匹配。

5.3.5 当信号干扰较大时，可采用信号增强技术进行多次重复激振，提高信噪比。

5.3.6 在测试中，信号幅值大小宜不使二次仪表超载和不削波。

5.3.7 当检测桩身上部缺陷时，宜采用高频激振，并配合采用横向激振，用水平传感器接收，进行辅助判别；当检测桩身下部缺陷或桩底反射信号时，宜采用低频激振。

5.3.8 测试时应及时观察实测波形的重复性，若有异常，应立刻检查。被检测的单桩均应进行二次及以上重复测试，须采集二个以上好的波形。

5.4 数据分析与判定

5.4.1 应根据实测时域波形和频谱分析判定单桩的混凝土质量。

5.4.2 桩身纵向应力波传播速度 v_c ，桩长 L ，桩底反射波周期 ΔT ，缺陷位置 L' 等应按下列公式计算：

$$v_c = \frac{2L}{\Delta T} = 2L\Delta f \quad (5.4.2-1)$$

式中 Δf ——完整桩的特征频率， $\Delta f = 1/\Delta T$ 。

$$L' = \frac{\Delta T' \times \bar{v}_c}{2} = \frac{\bar{v}_c}{2\Delta f'} \quad (5.4.2-2)$$

式中 $\Delta T'$ ——桩身缺陷部位反射波的周期；

$\Delta f'$ ——桩身缺陷部位反射波的特征频率， $\Delta f' = 1/\Delta T'$ ；

\bar{v}_c ——该工地桩身纵向应力波平均波速。

5.4.3 桩身完整性可根据桩的时域频域图形的特点进行判断：

1 完整桩时域频域图形的特点（图 5.4.3—1）

在时域波形中有桩底反射信号，其反射周期为 ΔT ，波形规则，波程中无其他明显的阻抗变化反射。在频域图形中，谱峰排列规律，相邻峰间隔即特征频率 Δf 基本相等，且 $\Delta f = 1/\Delta T$ 。

摩擦桩桩底反射波与入射波同相位，且 $f_1 \approx \Delta f$ ；嵌岩桩桩底反射波与入射波反相位，且 $f_1 \approx 0.5\Delta f$ 。

2 断桩时域频域图形的特点 (图 5.4.3—1)

时域波形和频域图形也很规则。在时域波形中反射信号明显并与入射波同相位，反射波周期为 $\Delta T'$ 。在频域图形中，相邻峰间隔 $\Delta f'$ ，也基本相等。但由工地平均波速 \bar{v}_e 与 $\Delta T'$ 或 $\Delta f'$ 算出的桩长 L' 比施工桩长要短，即 $L' < L$ ，在时域频域图形中无桩底反射信号。

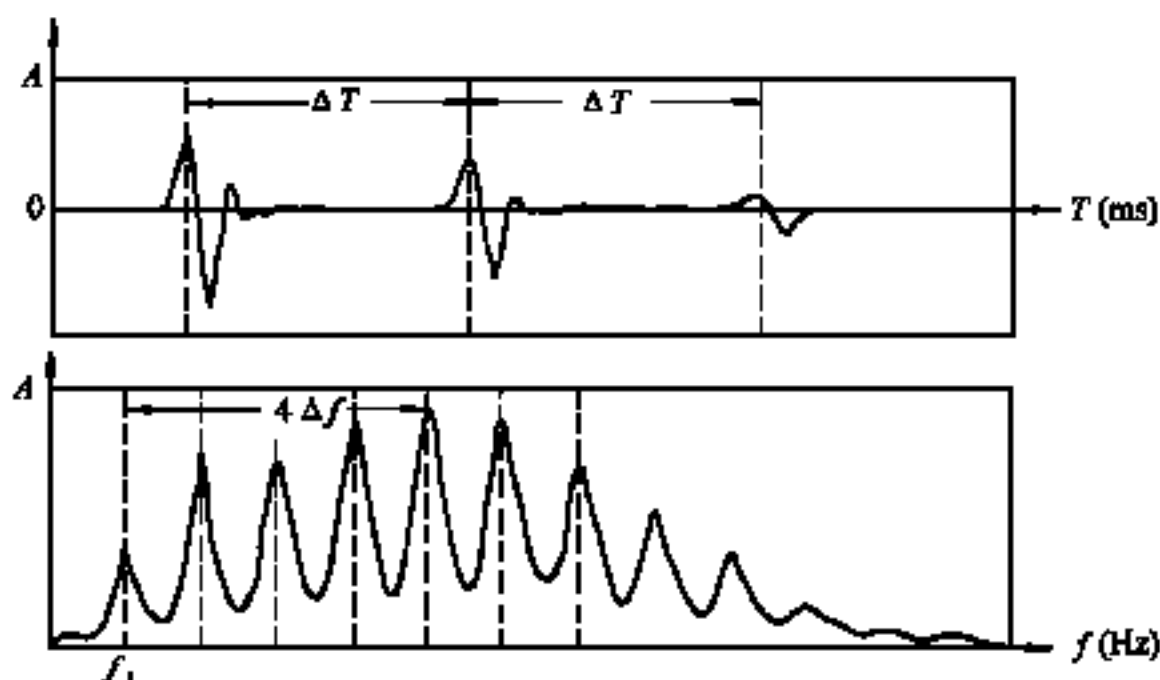


图 5.4.3—1 完整桩的实测时域和频域图

3 缩孔桩时域频域图形的特点 (图 5.4.3—2)

时域波形中有桩底反射，既有完整桩的 ΔT ，也有缺陷的反射并与入射波同相位，即有缺陷的 $\Delta T'$ 。在频域图形中既有整桩的 Δf ，也有缺陷部分的特征频率 $\Delta f'$ 。可根据公式求出缩孔沿桩长所在位置 L' 。局部夹碴、夹泥、空洞等缺陷桩的波形特征与缩孔桩类似，其 $f_1' \approx \Delta f'$ 。

$$L' = \frac{\Delta T' \times \bar{v}_e}{2} = \frac{\bar{v}_e}{2 \times \Delta f'} \quad (5.4.3)$$

4 离析桩时域频域图形的特点 (图 5.4.3—2)

其实测的时域波形中既有 ΔT 也有 $\Delta T'$ ，缺陷处反射波与入

射波同相位。在频域图形中既有完整桩特征频率 Δf ，也有缺陷桩特征频率 $\Delta f'$ 。

但离析桩整体波速 v_e 比工地完好桩的波速偏低，且缺陷信号频率低，波幅衰减快。

5 扩孔桩时域频域图形的特点 (图 5.4.3—2)

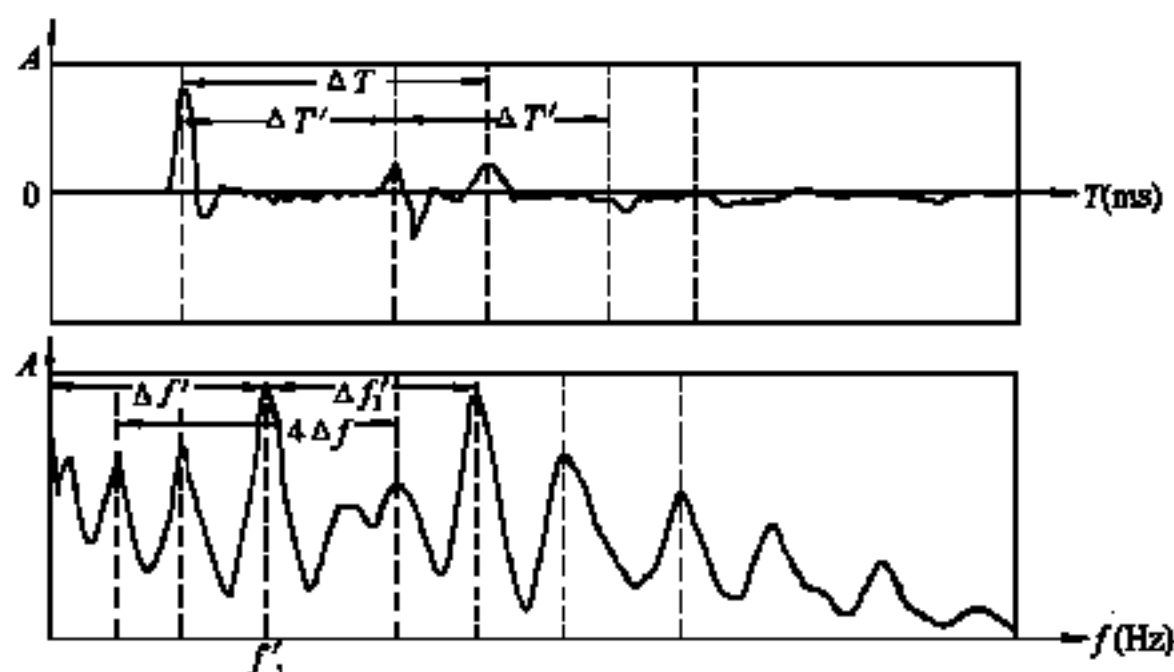


图 5.4.3—2 缺陷桩的时域和频域图

扩孔桩的时域频域图形中除有桩底反射之外，也有扩孔反射，即有 ΔT 和 $\Delta T'$ ，但扩孔反射波与入射波反相位。在频域图形中也存在 Δf 和 $\Delta f'$ 特征频率，但其 $f_1' \approx 0.5 \Delta f'$ 。

5.4.4 对有问题的疑难桩或当桩身内存在两处以上缺陷时，其实测波形比较复杂，应结合工程地质资料、施工情况等综合分析判定，找出造成严重缺陷的原因，以免误判。

5.4.5 按桩身纵向应力波波速 v_e 可估算桩身混凝土强度，但波速与混凝土抗压强度的换算关系，应通过测定钻孔取样的芯样或混凝土试件的应力波波速和抗压强度的对比试验确定。

5.4.6 可根据已测试过的完整桩的桩身纵向应力波平均波速 \bar{v}_e ，和桩底反射波周期 ΔT ，按式 (5.4.6) 计算测量桩长 L_m ，核对施工桩长。

$$L_m = \frac{\Delta T \cdot \bar{v}_e}{2} \quad (5.4.6)$$

附录 A 本规程用词说明

执行本规程条文时，对于要求严格程度的用词说明如下，以便在执行中区别对待。

A.0.1 表示很严格，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”；

反面词采用“严禁”。

A.0.2 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：

正面词采用“应”；

反面词采用“不应”或“不得”。

A.0.3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”；

反面词采用“不宜”。

表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

《铁路工程基桩无损检测规程》

条文说明

本条文说明系对重点条文的编制依据、存在的问题以及在执行中应注意的事项等予以说明。为了减少篇幅，只列条文号，未抄录原条文。

1.0.1 随着高层建筑、铁路及公路桥梁、海港建设等工程的发展，桩基得到了越来越广泛的应用。

传统的基桩质量检测方法是通过静荷载试验和钻芯取样法进行的。但是，随着灌注桩桩径和桩长的日益增大和承载力的日益提高，静载试验方法已越来越难以适应。钻芯取样法也存在一定的局限性，不适用于普查，钻孔根数有限；钻孔截面占桩截面的比例很小；钻孔使桩身整体性受到破坏；长桩钻孔易发生偏钻现象，往往达不到质量检查的目的。另外，有资料表明，国外在现场灌注桩施工中桩身出现缺陷的概率约为 **15%~20%**。国内这一概率为 **20%**左右。鉴于上述情况，常规的基桩检测方法已不能满足现代化施工质量检查和生产控制的需要，成为施工过程中的主要矛盾，故迫切需要寻找快速、经济、有效的基桩质量检测手段。

目前，国内基桩检测的方法主要有超声波法（简称声测法）和振动法（包括阻抗法、电火花法、应力法等）。基桩检测队伍发展也很快，但目前使用的仪器性能不一，技术能力参差不齐。过去铁路部门没有统一的技术标准，这些检测技术在应用过程中出现过一些不尽人意的地方。制定本规程的目的在于防止或减少误判，并促进提高基桩检测的质量。

1.0.2 在桩径较小时，由于声波换能器与检测管的声耦合会引

起较大的相对测试误差，故声波透射法只适用于桩径或边长大于0.6 m的灌注桩。

瞬态激振（敲击）时域频域分析法能用于检测混凝土灌注桩和打入桩的桩身混凝土质量，对于打入桩，主要检测桩身有无破损和断桩。

1.0.3 目前，国内基桩无损检测单位资质由建设部工程桩动测单位资质考核审定委员会统一组织考试和管理，省、部级也有相应的管理机构。本条规定铁路工程基桩无损检测的单位必须在铁道部相应管理机构登记审核，或有铁道部颁发的资质证书。

3.1.1 目前，我国桥梁建设突飞猛进，一些大型桥梁的主墩基桩在向大直径、入土深的方向发展；另外，一些墩台基础采用大直径钻孔桩后，桩的数量也相应减少。基桩质量越来越显得重要，对这些基桩全部进行检测是十分必要的。例如悬索桥、斜拉桥等主、边墩基础，单桩单柱或双桩单（双）柱基础。

由于施工班组的技术水平和管理水平存在差异，因此按班抽测具有较好的代表性。根据我国实际情况，由建设、设计、质监和施工等有关单位共同商定抽测数量是可行的。本条参考国内外混凝土灌注桩出现各类缺陷的概率，并考虑我国国情，仅对抽测数量规定了下限。

3.5.1~3.5.2 目前国内出版的《基桩低应变动力检测规程》没有对基桩混凝土质量评定等级和标准作出规定。基桩检测在实际操作时，各单位对基桩混凝土质量评定等级和标准都有不同的规定。例如，有的单位按离散系数 $C_v \leq 5\%$ 、 $C_v \leq 10\%$ 、 $C_v \leq 15\%$ 、 $C_v > 15\%$ 分优、良、合格、不合格四个等级；有的单位按桩的混凝土声速 $v \geq 4\,120\text{ m/s}$ 、 $v \geq 3\,300\text{ m/s}$ 、 $v \geq 2\,750\text{ m/s}$ 、 $v < 2\,750\text{ m/s}$ 分为优、良、合格、不合格四个等级；有的单位对钻（冲）孔灌注桩超声波检测质量等级评定作以下分类：

A类桩：混凝土声速 $v \geq 3\,950\text{ m/s}$ ，声时均方差 $\sigma \leq 15.0$ ，声时标准离差 $C_v \leq 5\%$ ，桩身混凝土均匀性好，混凝土质量良好，满足设计要求；

B类桩：混凝土声速 $v \geq 3\,700\text{ m/s}$ ，声时均方差 $\sigma \leq 20.0$ ，声时标准离差 $C_v \leq 10\%$ ，桩身存在轻度缺陷，但对桩身混凝土质量影响不大，整体均匀性略差，能满足设计要求；

C类桩：混凝土声速 $v \geq 3\,200\text{ m/s}$ ，声时均方差 $\sigma \leq 30.0$ ，声时标准离差 $C_v \leq 15\%$ ，桩身局部存在一定程度的缺陷，对局部混凝土质量有影响，但尚能满足设计要求；

D类桩：混凝土声速 $v < 3\,200\text{ m/s}$ ，声时均方差 $\sigma > 30.0$ ，声时标准离差 $C_v > 15\%$ ，桩身存在严重缺陷（夹层或断桩），不能直接使用，需处理并经检验合格后方可使用。

有的单位将基桩混凝土质量等级的评定分为 **I类桩**、**II类桩**、**III类桩**、**IV类桩**和暂不评定桩。其中 **I**、**II**类桩满足设计要求，可以使用；**III**类桩局部有一定缺陷，但尚能满足使用要求；**IV**类桩为不合格桩，需报废或经处理并检验合格后方能使用；暂不评定桩是因为该桩存在较大的缺陷或对该桩的桩长或强度有怀疑，需进行处理或取芯检校后复测再作评定。

总之，基桩混凝土质量等级的评定，没有统一的标准，各单位自订的评定标准也各有优缺点。为了在实际操作时有一个统一的标准，本规范规定了基桩混凝土质量等级评定的标准。

4.3.1 为了使探头能达到检测部位，必须预留若干检测通道。因此，在采用超声检测时，必须在灌注混凝土前预埋声测管。声测管材质的选择应考虑声能损失和安装定位的问题。假定不计混凝土对声能的吸收衰减，而只考虑因声测管所引起的界面损失，则各界面声能透过系数 $T = 4Z_1Z_2 / (Z_1 + Z_2)^2$ （ Z_1 、 Z_2 为界面两侧介质的声阻抗率）。

双孔测量时，声通路中有四个界面，总的声能透过系数 $T_{\text{总}} = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4$ 。

根据计算和试验，采用钢管时，双孔测量的声能透过率只有

0.5%，采用塑料管时则为 42%，可见采用塑料管时接收信号比采用钢管时强。但由于在地下水泥水化热不易散发，而塑料温度变形系数又较大，因此当混凝土硬化后塑料管因温度下降而产生纵向和径向收缩时，将导致混凝土与塑料管局部脱开，易造成误判。试验证明，钢管的界面损失虽然较大，但仍有足够大的接收信号，而且安装方便，可代替部分钢筋截面，还可作为以后桩底压浆的通道，所以采用钢管作声测管是合适的。塑料管的声能透过率较高，在能保证它与混凝土良好粘结的前提下，也可使用。如 PVC 工程塑料管在桩长 20 m 时，在深圳就有应用例子。其他还有高频焊管、钢质波纹管等，只要满足声测要求，均可以使用。

声测管在埋设过程中，径向变形不得大于管内径的 10%，纵向弯曲的矢高应小于 12 mm(即 $\phi 35 \times 300$ mm 的超声波换能器及其连接线能顺利放下)。

4.3.3 根据工地实测验证，直径 1 m 以下的桩，采用两管对测，即可基本上反映全断面各部位的主要缺陷；1 m 以上的桩应采用三管测量或四管六次对测。虽三管测量在中心位置有一个“盲区”，但中心位置产生缺陷的可能性最小，故该条规定的根据桩径确定声测管埋设数量是可以满足检测要求的。

4.3.4 声测管之间的不平行度应控制在一定的范围内。但在实际施工中，由于钢筋骨架刚度不足，对平行度提出过高的要求是不现实的。在检测基桩混凝土缺陷时，不平行度的影响可在数据处理中予以鉴别和消除，所以对平行度不必苛求。但在检测基桩混凝土强度时，则必须严格控制。

4.3.5 声测管焊接或绑扎在钢筋笼的外侧，下沉钢筋笼时，可能挤坏声测管。接头和管底的密封，是为了防止施工中渗入泥浆或砂浆。

4.3.7 在施工中，施工平台往往比桩顶设计高程高出几米或十几米，声测管如果不引到平台上来，则要等全部基桩施工完毕，开挖基坑以后才能检测，这对监控施工质量，及时发现问题，处

理有问题的桩带来不便，且影响施工工期。所以本条规定声测管应高出检测工作面 **300 mm** 以上，就是为使声测管露出来可以检测。

4.3.8 声测管在随钢筋笼下沉时，如果管内是空的，几十米长的声测管，内外压差很大，当管底和接头密封不好，泥浆或砂浆就会渗入到管内，导致测管报废。灌满清水，声测管内外压差一致，即使焊接或螺纹连接有少量的密封差一点，也不会导致测管报废。外露管头应密封，是为了防止施工中各种杂物掉入而堵塞测管。

4.4.1

5 柱状径向振动式换能器在水平方向具有一定的指向性。当发射与接收换能器置于不同高程时，为保证测点间声场可以覆盖而不致漏测，两个换能器的高差（或水平夹角）就要有一定的限制。

6 随着两换能器沿桩的纵轴方向同步升降，使超声脉冲扫过桩的整个纵剖面，从而可得到各项声参数沿桩的纵剖面的变化数据。由于实测时是沿纵剖面逐点移动换能器、逐点测读各项声参数，因此，测点间距应视要求而定。在桩比较长，两换能器有一定高差斜测时，测点间距可较大；在桩比较短，两换能器在同一水平面上平测时，间距应较小。

4.5.5 混凝土内存在缺陷，会使测试的声速、频率、波幅发生明显变化（降低），但三个声学参数单独用于缺陷判断，则各有其优点和局限性。如声时（或声速），相对于其他两参数来说，能在各种情况下获得比较一致的物理量，受测试操作人员经验的影响较小，但缺点在于变化幅度和范围不大，对缺陷反应不敏感。用频率值判别缺陷的优点是变化幅度较大，但需要有较熟练的测试技术，否则容易出现测试误差。波幅对缺陷反应十分敏感，但受仪器、基桩混凝土质量影响大，致使不同桩间测试可比性差，而且测试精度相对偏低。综上所述，用单一的声学参数作为判断的依据，必然有较大的局限性。

为了克服用单一参数的局限性，**NFP** 法是用 3 个参数的相对值按下式组成新的检验样本（下称“综合样本”） $E(i)$ 来进行综合概率分析：

$$E(i) = v_i' \cdot f_i' \cdot A_i' \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

式中 v_i' —— i 测点的相对声速值，即 i 点声速除以该桩中最大声速值之商；

f_i' —— i 测点的相对频率值，即 i 点频率除以该桩中最大频率值之商；

A_i' —— i 测点的相对波幅值，即 i 点波幅除以该桩中最大波幅值之商。

(1) 样本的概率分布特性

要对样本进行概率分析，必须对样本的概率分布的特性进行论证分析。**NFP** 法研究小组通过对大量工程桩单一声学参数的实测样本进行 χ^2 检验分析，发现除个别无缺陷桩的声速、频率样本服从正态概率密度函数分布 $N(\mu, \sigma)$ 外，大多数桩，尤其是波幅样本，均被予以拒绝。而有缺陷，尤其是有较多缺陷的桩，基本上不服从 $N(\mu, \sigma)$ 。

从样本特征来看，声速、频率样本偏倚系数 C_s 还较稳定，但峰凸系数 C_E 却变化很大；波幅样本则不论偏倚、峰凸系数都随桩不同而有很大变化。由此不难看出，用单一声学参数通过“概率法”判断缺陷，其理论概率的计算应以与实际样本相拟合的概率密度函数为依据，而不能一概而论。这是因为桩身混凝土质量是由其特殊灌注工艺（桩尖、桩顶冲击捣实效果不同，混凝土导管埋深不一等）所决定的。

根据综合样本 $E(i) (i=1, 2, \dots, n)$ ，经对各种典型桩（无缺陷、有部分局部缺陷、有部分严重缺陷及较多缺陷的桩）进行频数分布分析，发现有缺陷的桩都不服从正态概率密度函数。因此，另选了可以考虑样本分布的偏倚系数 C_s 和峰凸系数 C_E 影响的夏里埃（Charlier）渐近展开函数的夏里埃概率密度函

数，并与其正态概率密度函数作 χ^2 检验比较。夏里埃概率密度函数模型如下：

$$P(\chi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{\chi-\mu}{\sigma}\right]^2} \left[1 - f\left(\frac{\chi-\mu}{\sigma}, C_S\right) + f\left(\frac{\chi-\mu}{\sigma}, C_E\right) \right] \quad (\text{说明 4.5.5—1})$$

式中 $\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \chi_i$ (样本平均值)；

$\sigma = \left[\sum_{i=1}^n (\chi_i - \mu)^2 / (n-1) \right]^{1/2}$ (样本标准差)；

$C_S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\chi_i - \mu)^3 / \sigma^3$ (样本偏倚系数)；

$C_E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\chi_i - \mu)^4 / \sigma^4$ (样本峰凸系数)。

比较结果见说明表 4.5.5—1。

说明表 4.5.5—1 $E(i)$ 的 χ^2 检验结果 (显著水平 $\alpha=0.05$)

桩代号	缺陷状况	样本 $E(i)$ 的 χ^2 检验		剔除可疑数后样本	
		对正态分布	对夏里埃分布	对正态分布	对夏里埃分布
32-3	无缺陷	接受	接受		
15-5-1.3	无缺陷	接受	接受		
15-5-1.2	有局部小缺陷	拒绝	拒绝	拒绝	接受
28-4-2.4	有断层及局部缺陷	拒绝	拒绝	拒绝	接受
模拟试桩	有各种缺陷 10 处	拒绝	拒绝	拒绝	接受

由比较分析可以看出：①夏里埃分布数学模型较适合于钻孔桩混凝土质量的分布；②有缺陷桩的样本两种模型都不接受，这是由于综合样本中有部分“非随机变量”（缺陷部位测值）所致。因此，首先应当将非随机变量（可疑数据）剔除，获得“新的综合样本” $E'(i)$ 后才能用于概率分析。但哪些是“可疑数据”又是未知的。故 **NFP** 法推荐选用夏里埃概率密度函数，并提出

逐步剔除可疑数据的办法。

首先对原样本进行 χ^2 检验，看是否服从夏里埃分布。若服从，则按原样本进行概率分析。若不服从，则从原样本中剔除一个最大值和一个最小值，再进行 χ^2 检验。若仍不服从，则再剔除一个最大值和一个最小值，直到服从夏里埃分布为止。然后再以服从分布的“新样本” $E'(i)$ 作为概率分析依据。

(2) “综合样本”的概率分布

将式(说明 4.5.5—1)对 χ 积分可得概率分布函数 $F(\chi)$ ，即

$$\begin{aligned} F(\chi) &= \int_{\bar{\chi}}^{\chi} P(\chi) d\chi \\ &= \int_{\bar{\chi}}^{\chi} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{\chi-\mu}{\sigma}\right]^2} \left[1 - f\left(\frac{\chi-\mu}{\sigma}, C_S\right) + f\left(\frac{\chi-\mu}{\sigma}, C_E\right)\right] d\chi \end{aligned} \quad (\text{说明 4.5.5—2})$$

式中 μ, σ, C_S, C_E ——样本提供的平均值、标准差、偏倚系数、峰凸系数的估计值。

由式(说明 4.5.5—2)可以看出， $-\bar{\chi} \leq \chi \leq \bar{\chi}$ 的概率 $F(\bar{\chi})$ 及 $\chi \leq -\bar{\chi}'$ 的概率 $F(\bar{\chi}')$ 与正态分布不同，它不仅与样本的 $(\chi-\mu)/\sigma$ 、 σ 有关，而且与 C_S 、 C_E 有关。也就是说，对不同的样本（不同的 C_S 、 C_E ），应要求某一独立变量出现的概率如 $F(\chi \leq -\bar{\chi}')$ 为定值，其变量 $-\bar{\chi}'$ 或 $(\bar{\chi}'-\mu)/\sigma$ 不是一个定值，而是随 C_S 、 C_E 或近似值 C_E 而变。

根据式(说明 4.5.5—2)可通过电算制定出概率 $F(\bar{\chi}')$ 与 $(\bar{\chi}'-\mu)/\sigma$ 及 C_E 的对应关系表。现从该表中摘录出 $F(\bar{\chi}') \leq 0.01$ 时的 $(\bar{\chi}'-\mu)/\sigma$ 及 C_E 值列于说明表 4.5.5—2 中，供一般情况下使用。表中 $(\bar{\chi}'-\mu)/\sigma = m$ ，称为“概率保证系数”。显然，当概率保持一定时，样本峰凸系数 C_E 越大，要求的 m 绝对值越大。

说明表 4.5.5—2 $F \leq 0.01$ 时的 $m \sim C_E$

$\frac{C_E}{F}$	$C_E \leq 1$	$1 < C_E \leq 2$	$2 < C_E \leq 3$	$3 < C_E \leq 4$	$4 < C_E \leq 5$	$5 < C_E \leq 6$	$6 < C_E \leq 7$	$7 < C_E \leq 8$	$8 < C_E \leq 9$
-2.1	0.007 2								
-2.2		0.007 9							
-2.4			0.008 2						
-2.7				0.008 2					
-2.9					0.009 7				
-3.1						0.009 4			
-3.2							0.009 9		
-3.3								0.01	
-3.4									0.009 5

(3) 缺陷判据

由 $(X' - \mu)/\sigma = m$ 可得 $X' = \mu + m\sigma$ 或 $X'/(\mu + m\sigma) = 1$ 。

若设定概率 $F(X') \leq 0.01$ (如说明表 4.5.5—2), 且样本数据数 $n < 100$ 次, 则小于 X' 的 E_i 允许出现次数小于 1 (不可能发生事件)。但实际出现了, 所以 E_i 为可疑测值, 或 i 处有缺陷。因此, **NFP** 法选定判据:

$$NFP(i) = \frac{E_i}{\mu + m \cdot \sigma}$$

$$m = f(F(X'), C_E)$$

若 $NFP(i) \geq 1$, 说明该处混凝土质量正常;

若 $NFP(i) < 1$, 说明该处混凝土有缺陷, 且 $NFP(i)$ 越低, 缺陷越严重。

表 4.5.5—2 缺陷性质分析中“略低”、“较低”、“很低”的解释见说明表 4.5.5—3。

说明表 4.5.5—3 声学参数变化程度标准

定义 参数	略 低	较 低	很 低
声速	比正常部位低 10%左右	比正常部位低 15%左右	比正常部位低 20%以上
频率	比正常部位低 10%~15%	比正常部位低 20%左右	比正常部位低 25%以上
波幅	比正常部位衰减 20%	比正常部位衰减 50%左右	比正常部位衰减 80%以上

综上所述可以看出, **NFP** 法充分利用了各项声学参数; 概率计算考虑了样本的频率分布特征; 做到了判据“定量”, 减少了对人为测试经验的依赖, 因而提高了缺陷判断的准确性。该法已在 2 000 余根工程桩中应用, 获得了铁道部先进科技成果四等奖。

4.6.1~4.6.5 混凝土声速与强度有良好的相关性, 所以可用声速值推定混凝土的强度等级。但声速与强度的相关性受许多因素的影响。例如不同配合比的混凝土往往有不同的“声速—强度”

的相关公式。所以，通常针对一定配合比和原材料条件的混凝土，事先制成“声速—强度”专用测强曲线，在检测中作为推定强度的依据。

5.1.1~5.1.3 本方法可用以确定缺陷沿桩身所在的位置，判定缺陷的可能类型。在已知波速的情况下，本方法还能核对施工桩长。根据铁路测桩单位目前的技术水平及方法的要求，规定检测桩径定在 $0.2\sim 2.2\text{ m}$ 的范围内，桩长不宜大于 50 m 。对于一些比较特殊的桩，宜采用其他方法检测。

5.2.1 检测系统包括激振设备和测试系统。测试仪器应具有信号放大、滤波采集、显示、分析及打印结果等功能。可以是一体化设备，也可以是具有相应功能的仪器配套使用。

5.2.2 为检测不同深度的缺陷，要求激振设备有多种规格和材质，试验时根据需要选用合适的设备，以便能改变激振能量和频率范围，提高测试精度和分析能力。

5.2.3 传感器是测试系统的重要组成部分，要求传感器性能满足测桩要求。可测频率范围指的是在该频率范围内幅频曲线平坦。

5.2.6 根据调查，目前国内外基桩动测仪的模数转换器位数均大于 8 位，有的达 24 位（位数高有利于提高分辨率），最小采样时间间隔都不大于 $10\text{ }\mu\text{s}$ 。为了测试芯样或试块的波速，最小采样时间间隔最好能达到 $1\text{ }\mu\text{s}$ 。

5.3.1 桩头处理的好坏，直接关系到测试波形。为了使测试波形能真实反映基桩的情况，要把桩头浮浆或松动部分凿除，特别是中心激振处和传感器安装处，要露出密实混凝土，并磨平。为了尽量减少桩周土阻力对测试的影响，对打入桩要在施打后尽快检测。

5.3.2 传感器必须安装牢固，以免测试波形失真。粘接耦合剂有多种，可根据实际情况选用。

5.3.4 工地桩平均波速的确定，应尽量通过现场部分完整桩试验来确定。在情况特殊时，可通过芯样或混凝土试块试验来确

定，但对测试仪器及方法的要求更高，有条件时才能做到。

5.4.1~5.4.4 灌注桩桩身混凝土出现缺陷的类型多为扩孔、缩孔、夹碴、空洞、离析低强等；打入桩桩身出现的缺陷类型多为局部破裂、接头开裂等。各种缺陷的时域频域图形各有其特点，可根据其特点来判定。但要精确判定具体缺陷性质及其大小范围，目前还有一定的困难。在第 5.4.3 条中列出了几种类型时域频域图形，其中断桩的时域频域图形近似于短的完整桩，在实践中应积累经验，提高分析判定水平。

5.4.5 利用该条款估算的桩身混凝土强度为平均强度，在无可靠的换算系数时应慎重使用。

5.4.6 测量桩长的计算准确度取决于平均波速 \bar{v}_c 和桩底反射周期 ΔT 的准确度，与实际施工桩长核对时应准确把握。