

中国工程建设标准化协会标准

CECS 21 : 2000

超声法检测混凝土缺陷 技 术 规 程

Technical specification for inspection of
concrete defects by ultrasonic method

主编部门：陕西省建筑科学研究设计院

上 海 同 济 大 学

批准部门：中国工程建设标准化协会

2001-01 -01 实施

中国工程建设标准化协会

前 言

根据中国工程建设标准化协会(98)建标协字第 08 号《关于下达 1998 年第一批推荐性标准编制计划的函》的要求,制订本标准。

本规程是在《超声法检测混凝土缺陷技术规程》CECS 21:90 的基础上,吸收国内外超声检测仪器最新成果和超声检测技术的新经验,结合我国建设工程中混凝土质量控制与检测的实际需要进行修订的。

本规程的主要内容包括超声法检测混凝土缺陷的适用范围,检测设备技术要求,声学参数测量方法,混凝土裂缝深度、混凝土不密实区、新老混凝土结合质量、灌注桩和钢管混凝土缺陷等的检测及判断方法。

本规程主要对“超声波检测设备”及“声学参数测量”两章作了全面修订:将原“浅裂缝检测”和“深裂缝检测”两章合并成“裂缝深度检测”一章;删除了“匀质性检测”一章;对平测裂缝深度的判定、混凝土密实性检测的异常数据判断和表面损伤层检测的数据处理等方法做了补充和完善;增加了灌注桩和钢管混凝土缺陷检测。

现批准协会标准《超声法检测混凝土缺陷技术规程》,编号为 CECS 21:2000,推荐给工程建设设计、施工、使用单位采用。本规程由中国工程建设标准化协会混凝土结构委员会归口管理,由陕西省建筑科学研究设计院(陕西省西安市环城西路北段 272 号,邮编:710082)负责解释。在使用中如发现需要修改和补充之处,请将意见和资料寄解释单位。

主编单位:陕西省建筑科学研究设计院

上 海 同 济 大 学

参编单位:中国建筑科学研究院结构研究所

水利电力部南京水利科学研究院

北京市建筑工程质检中心第三检测所

重庆市建筑科学研究院

主要起草人:张治泰 李乃平 李为杜 林维正 张仁瑜 罗骥先 濮存亭 林文修

中国工程建设标准化协会

2000 年 11 月 10 日

1 总 则

1.0.1 为了统一超声法检测混凝土缺陷的检测程序和测试判定方法,提高检测结果的可靠性,制定本规程。

1.0.2 本规程适用于超声法检测混凝土的缺陷。

1.0.3 缺陷检测系指对混凝土内部空洞和不密实区的位置和范围、裂缝深度、表面损伤层厚度、不同时间浇筑的混凝土结合面质量、灌注桩和钢管混凝土中的缺陷进行检测。

1.0.4 超声法(超声脉冲法)系指采用带波形显示功能的超声波检测仪,测量超声脉冲波在混凝土中的传播速度(简称声速)、首波幅度(简称波幅)和接收信号主频率(简称主频)等声学参数,并根据这些参数及其相对变化,判定混凝土中的缺陷情况。

1.0.5 按本规程进行缺陷检测时,尚应符合国家现行有关强制性标准的规定。

2 术 语、符 号

2.1 术 语

2.1.1 超声法 Ultrasonic method

本规程所指的超声法,系采用带波形显示的低频超声波检测仪和频率为 20~250kHz 的声波换能器,测量混凝土的声速、波幅和主频等声学参数,并根据这些参数及其相对变化分析判断混凝土缺陷的方法。

2.1.2 混凝土缺陷 Concrete defects

破坏混凝土的连续性和完整性,并在一定程度上降低混凝土的强度和耐久性的不密实区、空洞、裂缝或夹杂泥砂、杂物等。

2.1.3 声速 Velocity of sound

超声脉冲波在混凝土中单位时间内传播的距离。

2.1.4 波幅 Amplitude

超声脉冲波通过混凝土后,由接收换能器接收,并由超声仪显示的首波信号幅度。

2.1.5 衰减 Attenuation

超声脉冲波在混凝土中传播时,随着传播距离的增大,由于散射、吸收和声束扩散等因素引起的声压减弱。

2.1.6 主频 Main frequency

在被接收的超声脉冲波各频率成份的幅度分布中,幅度最大的频率值。

2.2 主 要 符 号

A_i ——测点 i 接收信号的首波幅度值;

h_c ——混凝土裂缝深度;

h_f ——混凝土损伤层厚度;

d ——径向振动式换能器直径;

d_1 ——钻出的声测孔直径或预埋声测管的内径;

d_2 ——预埋声测管的外径;

f_i ——测点 i 的接收信号主频率;

l_i ——测点 i 的超声测试距离;

l' ——平测时发射和接收换能器内边缘之间的距离;

m_x 、 s_x ——分别为混凝土某一声学参数 x 的平均值和标准差;

m_v 、 s_v ——分别为混凝土声速的平均值和标准差;

T_k ——空气的摄氏温度;

T_i ——测点 i 的首波周期;

t_i ——测点 i 的测读声时值;

t_{ci} ——测点 i 的混凝土声时值;

t_o ——声时初读数;

t_i^o ——跨缝平测时测点 i 的测读声时值;

t_{o0} ——在钻孔或预埋管中测试的声时初读数;

t_h ——绕过空洞传播的声时值;

v^c ——空气声速标准值;

v^s ——空气声速实测值；
 v_f ——损伤层混凝土的声速；
 v_a ——未损伤混凝土的声速；
 v_w ——被测水中的声速；
 X_i ——测点 i 的某一声学参数值；
 X_0 ——声学参数异常情况的判断值。

3 超声波检测设备

3.1 超声波检测仪的技术要求

3.1.1 用于混凝土的超声波检测仪分为下列两类：

- 1 模拟式：接收信号为连续模拟量，可由时域波形信号测读声学参数；
- 2 数字式：接收信号转化为离散数字量，具有采集、储存数字信号、测读声学参数和对数字信号处理的智能化功能。

3.1.2 超声波检测仪应符合国家现行有关标准的要求，并在法定计量检定有效期内使用。

3.1.3 超声波检测仪应满足下列要求：

- 1 具有波形清晰、显示稳定的示波装置；
 - 2 声时最小分度为 $0.1\mu s$ ；
 - 3 具有最小分度为 1dB 的衰减系统；
 - 4 接收放大器频响范围 10~500kHz，总增益不小于 80dB，接收灵敏度(在信噪比为 3:1 时)不大于 $50\mu V$ ；
 - 5 电源电压波动范围在标称值 $\pm 10\%$ 的情况下能正常工作；
 - 6 连续正常工作时间不少于 4h。
- 3.1.4 对于模拟式超声波检测仪还应满足下列要求：
- 1 具有手动游标和自动整形两种声时读数功能；
 - 2 数字显示稳定。声时调节在 20~30 μs 范围，连续 1h，数字变化不大于 $\pm 0.2\mu s$ 。

3.1.5 对于数字式超声波检测仪还应满足下列要求：

- 1 具有手动游标测读和自动测读方式。当自动测读时，在同一测试条件下，1h 内每隔 5min 测读一次声时的差异应不大于 ± 2 个采样点；
- 2 波形显示幅度分辨率应不低于 1/256，并具有可显示、存储和输出打印数字化波形的功能，波形最大存储长度不宜小于 4k bytes；
- 3 自动测读方式下，在显示的波形上应有光标指示声时、波幅的测读位置；
- 4 宜具有幅度谱分析功能(FFT 功能)。

3.2 换能器的技术要求

3.2.1 常用换能器具有厚度振动方式和径向振动方式两种类型，可根据不同测试需要选用。

3.2.2 厚度振动式换能器的频率宜采用 20~250kHz。径向振动式换能器的频率宜采用

20~60kHz, 直径不宜大于 32mm。当接收信号较弱时, 宜选用带前置放大器的接收换能器。

3.2.3 换能器的实测主频与标称频率相差应不大于±10%。对用于水中的换能器, 其水密性应在 1MPa 水压下不渗漏。

3.3 超声波检测仪的检定

3.3.1 超声仪声时计量检验应按“时—距”法测量空气声速的实测值 V^s (见附录 A), 并与按公式(3.3.1)计算的空气声速标准值 V^c 相比较, 二者的相对误差应不大于±0.5%。

$$V^c = 331.4\sqrt{1 + 0.00367 \cdot T_K} \quad (3.3.1)$$

式中 331.4——0℃时空气的声速(m/s) ;

V^c ——温度为 T_K 度的空气声速(m/s) ;

T_K ——被测空气的温度(℃)。

3.3.2 超声仪波幅计量检验。可将屏幕显示的首波幅度调至一定高度, 然后把仪器衰减系统的衰减量增加或减少 6dB, 此时屏幕波幅高度应降低一半或升高一倍。

4 声学参数测量

4.1 一般规定

4.1.1 检测前应取得下列有关资料:

- 1 工程名称;
- 2 检测目的与要求;
- 3 混凝土原材料品种和规格;
- 4 混凝土浇筑和养护情况;
- 5 构件尺寸和配筋施工图或钢筋隐蔽图;
- 6 构件外观质量及存在的问题。

4.1.2 依据检测要求和测试操作条件, 确定缺陷测试的部位(简称测位)。

4.1.3 测位混凝土表面应清洁、平整, 必要时可用砂轮磨平或用高强度的快凝砂浆抹平。抹平砂浆必须与混凝土粘结良好。

4.1.4 在满足首波幅度测读精度的条件下, 应选用较高频率的换能器。

4.1.5 换能器应通过耦合剂与混凝土测试表面保持紧密结合, 耦合层不得夹杂泥砂或空气。

4.1.6 检测时应避免超声传播路径与附近钢筋轴线平行, 如无法避免, 应使两个换能器连线与该钢筋的最短距离不小于超声测距的 1/6。

4.1.7 检测中出现可疑数据时应及时查找原因, 必要时进行复测校核或加密测点补测。

4.2 声学参数测量

4.2.1 采用模拟式超声检测仪测量应按下列方法操作:

1 检测之前应根据测距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音干扰为前提, 将仪器“增益”调至较大位置保持不动;

2 声时测量。应将发射换能器(简称 T 换能器)和接收换能器(简称 R 换能器)分别耦合在测位中的对应测点上。当首波幅度过低时可用“衰减器”调节至便于测读, 再调

节游标脉冲或扫描延时,使首波前沿基线弯曲的起始点对准游标脉冲前沿,读取声时值 t_i (读至 $0.1\mu s$) ;

3 波幅测量。应在保持换能器良好耦合状态下采用下列两种方法之一进行读取 :

1) 刻度法: 将衰减器固定在某一衰减位置, 在仪器荧光屏上读取首波幅度的格数。

2) 衰减值法: 采用衰减器将首波调至一定高度, 读取衰减器上的 dB 值。

4 主频测量。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 $t_1(\mu s)$, 再将游标脉冲调至相邻的波谷(或波峰), 读取声值 $t_2(\mu s)$, 按(4.2.1)式计算出该点(第 i 点)第一个周期波的主频 f_i (精确至 $0.1kHz$)。

$$f_i = 1000 / (t_2 - t_1) \quad (4.2.1)$$

5 在进行声学参数测量的同时, 应注意观察接收信号的波形或包络线的形状, 必要时进行描绘或拍照。

4.2.2 采用数字式超声检测仪测量应按下列方法操作 :

1 检测之前根据测距大小和混凝土外观质量情况, 将仪器的发射电压、采样频率等参数设置在某一档并保持不变。换能器与混凝土测试表面应始终保持良好的耦合状态 ;

2 声学参数自动测读: 停止采样后即可自动读取声时、波幅、主频值。当声时自动测读光标所对应的位置与首波前沿基线弯曲的起始点有差异或者波幅自动测读光标所对应的位置与首波峰顶(或谷底)有差异时, 应重新采样或改为手动游标读数 ;

3 声学参数手动测量: 先将仪器设置为手动判读状态, 停止采样后调节手动声时游标至首波前沿基线弯曲的起始位置, 同时调节幅度游标使其与首波峰顶(或谷底)相切, 读取声时和波幅值 ; 再将声时光标分别调至首波及其相邻波的波谷(或波峰), 读取声时差值 $\Delta t(\mu s)$, 取 $1000 / \Delta t$ 即为首波的主频(kHz) ;

4 波形记录: 对于有分析价值的波形, 应予以存储。

4.2.3 混凝土声时值应按下式计算 :

$$t_{ci} = t_i - t_0 \text{ 或 } t_{ci} = t_i - t_{00} \quad (4.2.3)$$

式中 t_{ci} ——第 i 点混凝土声时值(μs) ;

t_i ——第 i 点测读声时值(μs) ;

t_0 、 t_{00} ——声时初读数(μs) ;

当采用厚度振动式换能器时, t_0 应参照仪器使用说明书的方法测得 ; 当采用径向振动式换能器时, t_{00} 应按附录 B 规定的“时-距”法测得。

4.2.4 超声传播距离(简称测距)测量 :

1 当采用厚度振动式换能器对测时, 宜用钢卷尺测量 T、R 换能器辐射面之间的距离 ;

2 当采用厚度振动式换能器平测时, 宜用钢卷尺测量 T、R 换能器内边缘之间的距离 ;

3 当采用径向振动式换能器在钻孔或预埋管中检测时, 宜用钢卷尺测量放置 T、R 换能器的钻孔或预埋管内边缘之间的距离 ;

4 测距的测量误差应不大于±1%。

5 裂缝深度检测

5.1 一般规定

5.1.1 本章适用于超声法检测混凝土裂缝的深度。

5.1.2 被测裂缝中不得有积水或泥浆等。

5.2 单面平测法

5.2.1 当结构的裂缝部位只有一个可测表面，估计裂缝深度又大于 500mm 时，可采用单面平测法。平时应在裂缝的被测部位，以不同的测距，按跨缝和不跨缝布置测点(布置测点时应避开钢筋的影响)进行检测，其检测步骤为：

1 不跨缝的声时测量：将 T 和 R 换能器置于裂缝附近同一侧，以两个换能器内边缘间距(l')等于 100、150、200、250mm……分别读取声时值(t_i)，绘制“时-距”坐标图(图 5.2.1-1)或用回归分析的方法求出声时与测距之间的回归直线方程：

$$l_i = a + bt_i$$

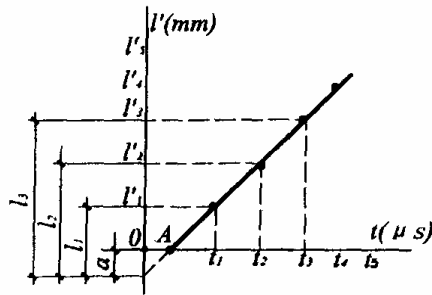


图 5.2.1-1 平测“时-距”图

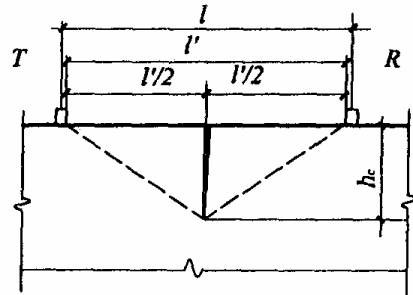


图 5.2.1-2 绕过裂缝示意图

每测点超声波实际传播距离 l_i 为：

$$l_i = l' + |a| \quad (5.2.1-1)$$

式中 l_i ——第 i 点的超声波实际传播距离(mm)；

l' ——第 i 点的 R、T 换能器内边缘间距(mm)；

a ——“时-距”图中 l' 轴的截距或回归直线方程的常数项(mm)。

不跨缝平测的混凝土声速值为：

$$v = (l'_n - l'_1) / (t_n - t_1) \quad (\text{km/s}) \quad (5.1.1-2)$$

$$\text{或 } v = b \quad (\text{km/s})$$

式中 l'_n 、 l'_1 ——第 n 点和第 1 点的测距(mm)；

t_n 、 t_1 ——第 n 点和第 1 点读取的声时值(μs)；

b ——回归系数。

2 跨缝的声时测量：如图(5.2.1-2)所示，将 T、R 换能器分别置于以裂缝为对称

的两侧， l' 取 100、150、200mm、……分别读取声时值 t_i^0 ，同时观察首波相位的变化。

5.2.2 平测法检测，裂缝深度应按式计算：

$$h_{ci} = l_i / 2 \cdot \sqrt{(t_i^0 v / l_i)^2 - 1} \quad (5.2.2-1)$$

$$m_{hc} = 1/n \cdot \sum_{i=1}^n h_{ci} \quad (5.2.2-2)$$

式中 l_i ——不跨缝平测时第 i 点的超声波实际传播距离(mm)；

h_{ci} ——第 i 点计算的裂缝深度值(mm)；

t_i^0 ——第 i 点跨缝平测的声时值(μs)；

m_{hc} ——各测点计算裂缝深度的平均值(mm)；

n ——测点数。

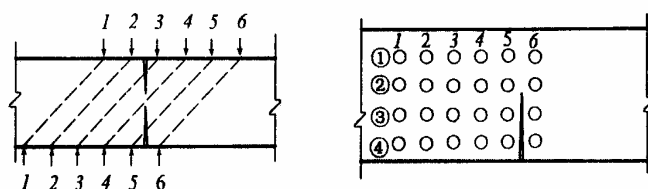
5.2.3 裂缝深度的确定方法如下：

1 跨缝测量中，当在某测距发现首波反相时，可用该测距及两个相邻测距的测量值按(5.2.2-1)式计算 h_{ci} 值，取此三点 h_{ci} 的平均值作为该裂缝的深度值(h_c)；

2 跨缝测量中如难于发现首波反相，则以不同测距按(5.2.2-1)式、(5.2.2-2)式计算 h_{ci} 及其平均值(m_{hc})。将各测距 l_i' 与 m_{hc} 相比较，凡测距 l_i' 小于 m_{hc} 和大于 $3m_{hc}$ ，应剔除该组数据，然后取余下 h_{ci} 的平均值，作为该裂缝的深度值(h_c)。

5.3 双面斜测法

5.3.1 当结构的裂缝部位具有两个相互平行的测试表面时，可采用双面穿透斜测法检测。测点布置如图 5.3.1 所示，将 T、R 换能器分别置于两测试表面对应测点 1、2、3……的位置，读取相应声时值 t_i 、波幅值 A_i 及主频率 f_i 。



(a)平面图

(b)立面图

图 5.3.1 斜测裂缝测点布置示意图

5.3.2 裂缝深度判定：当 T、R 换能器的连线通过裂缝，根据波幅、声时和主频的突变，可以判定裂缝深度以及是否在所处断面内贯通。

5.4 钻孔对测法

5.4.1 钻孔对测法适用于大体积混凝土, 预计深度在 500mm 以上的裂缝检测。

5.4.2 被检测混凝土应允许在裂缝两侧钻测试孔。

5.4.3 所钻测试孔应满足下列要求:

- 1 孔径应比所用换能器直径大 5~10mm;
- 2 孔深应不小于比裂缝预计深度深 700mm。经测试如浅于裂缝深度, 则应加深钻孔;
- 3 对应的两个测试孔(A、B), 必须始终位于裂缝两侧, 其轴线应保持平行;
- 4 两个对应测试孔的间距宜为 2000mm, 同一检测对象各对测孔间距应保持相同;
- 5 孔中粉末碎屑应清理干净;
- 6 如图 5.4.3(a)所示, 宜在裂缝一侧多钻一个孔距相同但较浅的孔(C), 通过 B、C 两孔测试无裂缝混凝土的声学参数。

5.4.4 裂缝深度检测应选用频率为 20~60kHz 的径向振动式换能器。

5.4.5 测试前应先向测试孔中注满清水, 然后将 T、R 换能器分别置于裂缝两侧的对应对应孔中, 以相同高程等间距(100~400mm)从上到下同步移动, 逐点读取声时、波幅和换能器所处的深度, 如图 5.4.3(b)所示。

5.4.6 以换能器所处深度(h)与对应的波幅值(A)绘制 $h-A$ 坐标图(如图 5.4.6 所示)。随换能器位置的下移, 波幅逐渐增大, 当换能器下移至某一位置后, 波幅达到最大并基本稳定, 该位置所对应的深度便是裂缝深度值 h_c 。

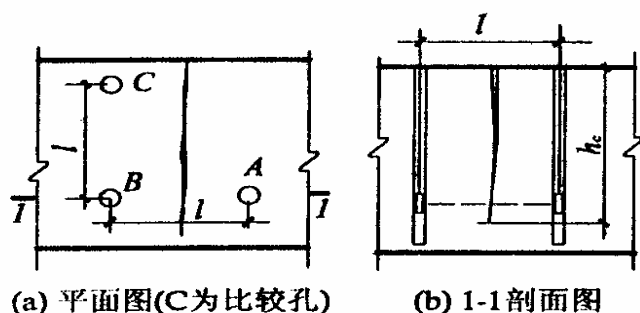


图 5.4.3 钻孔测裂缝深度示意图

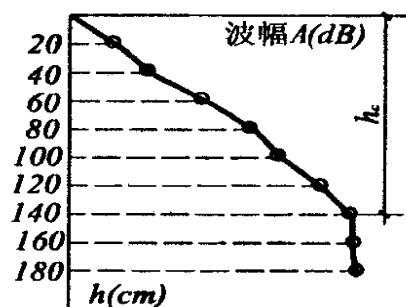


图 5.4.6 $h-A$ 坐标图

6 不密实区和空洞检测

6.1 一般规定

6.1.1 本章适用于超声法检测混凝土内部不密实区、空洞的位置和范围。

6.1.2 检测不密实区和空洞时构件的被测部位应满足下列要求:

- 1 被测部位应具有一对(或两对)相互平行的测试面;
- 2 测试范围除应大于有怀疑的区域外, 还应有同条件的正常混凝土进行对比, 且对比测点数不应少于 20。

6.2 测试方法

6.2.1 根据被测构件实际情况, 选择下列方法之一布置换能器:

- 1 当构件具有两对相互平行的测试面时, 可采用对测法。如图 6.2.1-1 所示, 在测试部位两对相互平行的测试面上, 分别画出等间距的网格(网格间距: 工业与民用建

筑为 100~300mm, 其它大型结构物可适当放宽), 并编号确定对应的测点位置;

2 当构件只有一对相互平行的测试面时, 可采用对测和斜测相结合的方法。如图 6.2.1-2 所示, 在测位两个相互平行的测试面上分别画出网格线, 可在对测的基础上进行交叉斜测;

3 当测距较大时, 可采用钻孔或预埋管测法。如图 6.2.1-3 所示, 在测位预埋声测管或钻出竖向测试孔, 预埋管内径或钻孔直径宜比换能器直径大 5~10mm, 预埋管或钻孔间距宜为 2~3m, 其深度可根据测试需要确定。检测时可用两个径向振动式换能器分别置于两测孔中进行测试, 或用一个径向振动式与一个厚度振动式换能器, 分别置于测孔中和平行于测孔的侧面进行测试。

6.2.2 每一测点的声时、波幅、主频和测距, 应按本规程第 4.2 节进行测量。

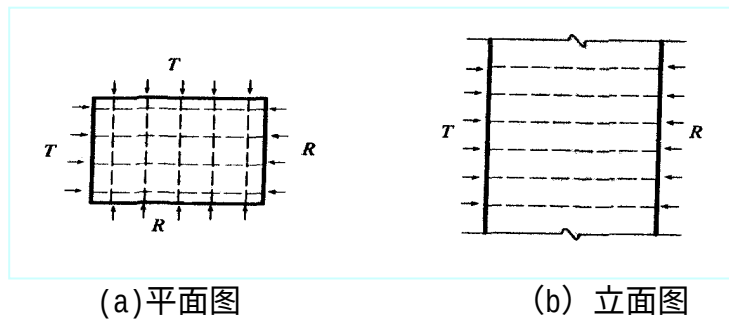


图 6.2.1-1 对测法示意图

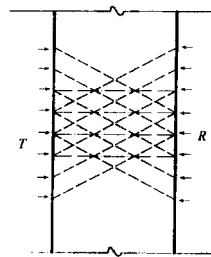


图 6.2.1-2 斜测法立面图

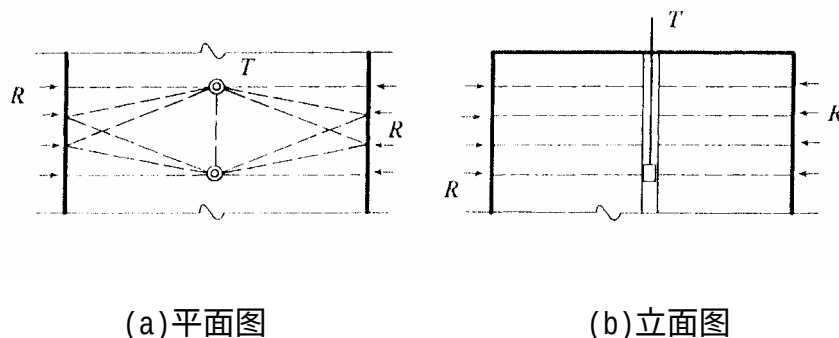


图 6.2.1-3 钻孔法示意图

6.3 数据处理及判断

6.3.1 测位混凝土声学参数的平均值(m_x)和标准差(s_x)应按下式计算:

$$m_x = \sum X_i / n \quad (6.3.1-1)$$

$$S_x = \sqrt{(\sum X_i^2 - n \cdot m_x^2) / (n-1)} \quad (6.3.1-2)$$

式中 X_i ——第 i 点的声学参数测量值；

n ——参与统计的测点数。

6.3.2 异常数据可按下列方法判别：

1 将测位各测点的波幅、声速或主频值由大至小按顺序分别排列，即 $X_1 \geq X_2 \geq \dots \geq X_n \geq X_{n+1} \dots$ ，将排在后面明显小的数据视为可疑，再将这些可疑数据中最大的一个(假定 X_n)连同其前面的数据按本规程第 6.3.1 条计算出 m_x 及 S_x 值，并按下式计算异常情况的判断值(X_0)：

$$X_0 = m_x - \lambda_1 \cdot S_x \quad (6.3.2-1)$$

式中 λ_1 按表 6.3.2 取值。

将判断值(X_0)与可疑数据的最大值(X_n)相比较，当 X_n 不大于 X_0 时，则 X_n 及排列于其后的各数据均为异常值，并且去掉 X_n ，再用 $X_1 \sim X_{n-1}$ 进行计算和判别，直至判不出异常值为止；当 X_n 大于 X_0 时，应再将 X_{n+1} 放进去重新进行计算和判别；

2 当测位中判出异常测点时，可根据异常测点的分布情况，按下式进一步判别其相邻测点是否异常：

$$X_0 = m_x - \lambda_2 \cdot S_x \quad \text{或} \quad X_0 = m_x - \lambda_3 \cdot S_x \quad (6.3.2-2)$$

式中 λ_2 、 λ_3 按表 6.3.2 取值。当测点布置为网格状时取 λ_2 ；当单排布置测点时(如在声测孔中检测)取 λ_3 。

注：若保证不了耦合条件的一致性，则波幅值不能作为统计法的判据。

表 6.3.2 统计数的个数 n 与对应的 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 值

n	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
λ_1	1.65	1.69	1.73	1.77	1.80	1.83	1.86	1.89	1.92	1.94
λ_2	1.25	1.27	1.29	1.31	1.33	1.34	1.36	1.37	1.38	1.39
λ_3	1.05	1.07	1.09	1.11	1.12	1.14	1.16	1.17	1.18	1.19
n	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58
λ_1	1.96	1.98	2.00	2.02	2.04	2.05	2.07	2.09	2.10	2.12
λ_2	1.41	1.42	1.43	1.44	1.45	1.46	1.47	1.48	1.49	1.49
λ_3	1.20	1.22	1.23	1.25	1.26	1.27	1.28	1.29	1.30	1.31
n	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78
λ_1	2.13	2.14	2.15	2.17	2.18	2.19	2.20	2.21	2.22	2.23
λ_2	1.50	1.51	1.52	1.53	1.53	1.54	1.55	1.56	1.56	1.57
λ_3	1.31	1.32	1.33	1.34	1.35	1.36	1.36	1.37	1.38	1.39
n	80	82	84	86	88	90	92	94	96	98
λ_1	2.24	2.25	2.26	2.27	2.28	2.29	2.30	2.30	2.31	2.31
λ_2	1.58	1.58	1.59	1.60	1.61	1.61	1.62	1.62	1.63	1.63
λ_3	1.39	1.40	1.41	1.42	1.42	1.43	1.44	1.45	1.45	1.45
n	100	105	110	115	120	125	130	140	150	160
λ_1	2.32	2.35	2.36	2.38	2.40	2.41	2.43	2.45	2.48	2.50
λ_2	1.64	1.65	1.66	1.67	1.68	1.69	1.71	1.73	1.75	1.77
λ_3	1.46	1.47	1.48	1.49	1.51	1.53	1.54	1.56	1.58	1.59

6.3.3 当测位中某些测点的声学参数被判为异常值时，可结合异常测点的分布及波形状况确定混凝土内部存在不密实区和空洞的位置及范围。

当判定缺陷是空洞，可按附录 C 估算空洞的当量尺寸。

7 混凝土结合面质量检测

7.1 一般规定

7.1.1 本章适用于前后两次浇筑的混凝土之间接触面的结合质量检测。

7.1.2 检测混凝土结合面时，被测部位及测点的确定应满足下列要求：

- 1 测试前应查明结合面的位置及走向，明确被测部位及范围；
- 2 构件的被测部位应具有使声波垂直或斜穿结合面的测试条件。

7.2 测试方法

7.2.1 混凝土结合面质量检测可采用对测法和斜测法，如图 7.2.2 所示。布置测点时应注意下列几点：

- 1 使测试范围覆盖全部结合面或有怀疑的部位；
- 2 各对 $T-R_1$ (声波传播不经过结合面) 和 $T-R_2$ (声波传播经过结合面) 换能器连线的倾斜角测距应相等；
- 3 测点的间距视构件尺寸和结合面外观质量情况而定，宜为 100~300mm。

7.2.2 按布置好的测点分别测出各点的声时、波幅和主频值。

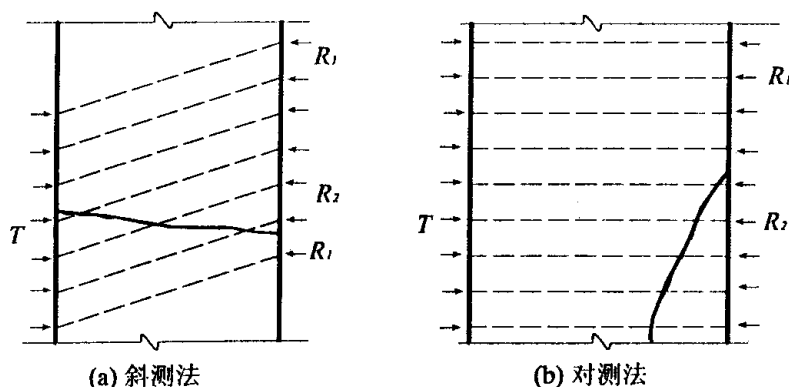


图 7.2.2 混凝土结合面质量检测示意图

7.3 数据处理及判断

7.3.1 将同一测位各测点声速、波幅和主频值分别按本规程第 6.3.1 和 6.3.2 条进行统计和判断。

7.3.2 当测点数无法满足统计法判断时，可将 $T-R_2$ 的声速、波幅等声学参数与 $T-R_1$ 进行比较，若 $T-R_2$ 的声学参数比 $T-R_1$ 显著低时，则该点可判为异常测点。

7.3.3 当通过结合面的某些测点的数据被判为异常，并查明无其他因素影响时，可判定混凝土结合面在该部位结合不良。

8 表面损伤层检测

8.1 一般规定

8.1.1 本章适用于因冻害、高温或化学腐蚀等引起的混凝土表面损伤层厚度的检测。

8.1.2 检测表面损伤层厚度时，被测部位和测点的确定应满足下列要求：

- 1 根据构件的损伤情况和外观质量选取有代表性的部位布置测位；
- 2 构件被测表面应平整并处于自然干燥状态，且无接缝和饰面层。

8.1.3 本方法测试结果宜作局部破损验证。

8.2 测试方法

8.2.1 表面损伤层检测宜选用频率较低的厚度振动式换能器。

8.2.2 测试时 T 换能器应耦合好，并保持不动，然后将 R 换能器依次锅台在间距为 30mm 的测点 1、2、3、……位置上，如图 8.2.2 所示，读取相应的声时值 t_1 、 t_2 、 t_3 ……，并

测量每次 T、R 换能器内边缘之间的距离 l_1 、 l_2 、 l_3 ……。每一测位的测点数不得少于 6 个，当损伤层较厚时，应适当增加测点数。

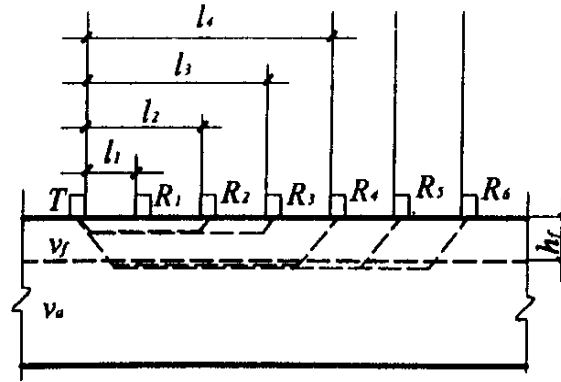


图 8.2.2 检测损伤层厚度示意图

8.2.3 当构件的损伤层厚度不均匀时，应适当增加测位数量。

8.3 数据处理及判断

8.3.1 求损伤和未损伤混凝土的回归直线方程：

用各测点的声时值 t_i 和相应测距值 l_i 绘制“时-距”坐标图，如图 8.3.1 所示。由图可得到声速改变所形成的转折点，该点前、后分别表示损伤和未损伤混凝土的 l 与 t 相关直线。用回归分析方法分别求出损伤、未损伤混凝土 l 与 t 的回归直线方程：

$$\text{损伤混凝土 } l_f = a_1 + b_1 \cdot t_f \quad (8.3.1-1)$$

$$\text{未损伤混凝土 } l_a = a_2 + b_2 \cdot t_a \quad (8.3.1-2)$$

式中 l_f ——拐点前各测点的测距(mm)，对应于图 8.3.1 中的 l_1 、 l_2 、 l_3 ；

t_f ——对应于图 8.3.1 中 l_1 、 l_2 、 l_3 的声时(μs) t_1 、 t_2 、 t_3 ；

l_a ——拐点后各测点的测距(mm)，对应于图 8.3.1 中的 l_4 、 l_5 、 l_6 ；

t_a ——对应于测距 l_4 、 l_5 、 l_6 的声时(μs) t_4 、 t_5 、 t_6 ；

a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 ——回归系数，即图 8.3.1 中损伤和未损伤混凝土直线的截距和斜率。

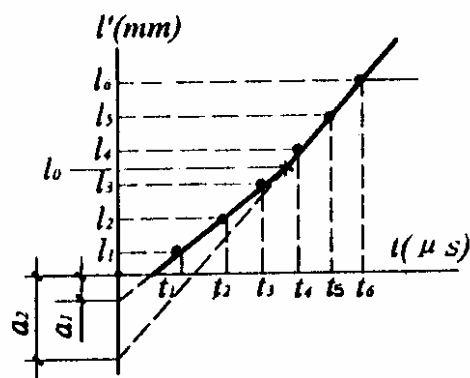


图 8.3.1 损伤层检测“时—距”图

8.3.2 损伤层厚度应按式计算：

$$l_0 = (a_1 b_2 - a_2 b_1) / (b_2 - b_1) \quad (8.3.2-1)$$

$$h_f = l_0 / 2 \cdot \sqrt{(b_2 - b_1) / (b_2 + b_1)} \quad (8.3.2-2)$$

式中 h_f ——损伤层厚度 (mm)。

9 灌注桩混凝土缺陷检测

9.1 一般规定

9.1.1 本章适用于桩径(或边长)不小于 0.6m 的灌注桩桩身混凝土缺陷检测。

9.2 埋设超声检测管

9.2.1 根据桩径大小预埋超声检测管(简称声测管), 桩径为 0.6~1.0m 时宜埋二根管; 桩径为 1.0~2.5m 时宜埋三根管, 按等边三角形布置; 桩径为 2.5m 以上时宜埋四根管, 按正方形布置, 如图 9.2.1 所示。声测管之间应保持平行。

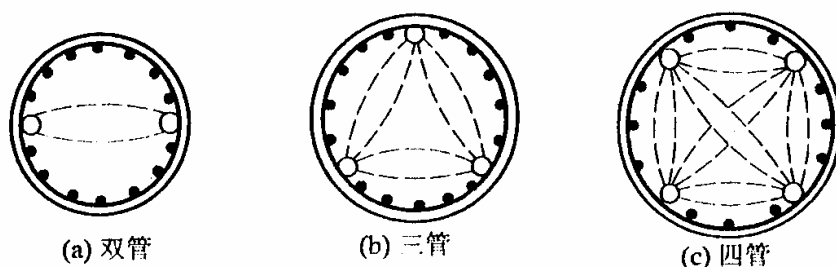


图 9.2.1 声测管埋设示意图

9.2.2 声测管宜采用钢管, 对于桩身长度小于 15m 的短桩, 可用硬质 PVC 塑料管。管的内径宜为 35~50mm, 各段声测管宜用外加套管连接并保持通直, 管的下端应封闭, 上端应加塞子。

9.2.3 声测管的埋设深度应与灌注桩的底部齐平, 管的上端应高于桩顶表面 300~500mm, 同一根桩的声测管外露高度宜相同。

9.2.4 声测管应牢靠固定在钢筋笼内侧。对于钢管，每 2m 间距设一个固定点，直接焊在架立筋上；对于 PVC 管，每 1m 间距设一固定点，应牢固绑扎在架立筋上。对于无钢筋笼的部位，声测管可用钢筋支架固定。

9.3 检测前的准备

9.3.1 了解有关技术资料及施工情况。

9.3.2 向管内注满清水。

9.3.3 采用一段直径略大于换能器的圆钢作疏通吊锤，逐根检查声测管的畅通情况及实际深度。

9.3.4 用钢卷尺测量同根桩顶各声测管之间的净距离。

9.4 检测方法

9.4.1 现场检测步骤

1 根据桩径大小选择合适频率的换能器和仪器参数，一经选定，在同批桩的检测过程中不得随意改变；

2 将 T、R 换能器分别置于两个声测孔的顶部或底部，以同一高度或相差一定高度等距离同步移动，逐点测读声学参数并记录换能器所处深度，检测过程中应经常校核换能器所处高度。

9.4.2 测点间距宜为 200~500mm。在普测的基础上，对数据可疑的部位应进行复测或加密检测。采用如图 9.4.2 所示的对测、斜测、交叉斜测及扇形扫测等方法，确定缺陷的位置和范围。

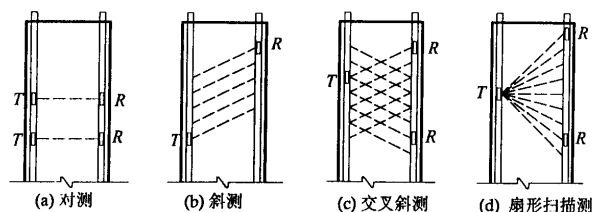


图 9.4.2 灌注桩超声测试方法剖面示意图

9.4.3 当同一桩中埋有三根或三根以上声测管时，应以每两根为一个测试剖面，分别对所有剖面进行检测。

9.5 数据处理与判断

9.5.1 数据处理：

1 桩身混凝土的声时(t_{ci})、声速(v_i)分别按下列公式计算：

$$t_{ci} = t_i - t_{00} (\mu s) \quad (9.5.1-1)$$

$$v_i = l_i / t_{ci} (km / s) \quad (9.5.1-2)$$

式中 t_{00} ——声时初读数(μs)，按附录 B 测量；

t_i ——测点 i 的测读声时值(μs)

l_i ——测点 i 处二根声测管内边缘之间的距离(mm)。

2 主频(f_i)：数字式超声仪直接读取；模拟式超声仪应根据首波周期按(9.5.1-3)式计算。

$$f_i = 1000/T_{bi} \text{ (kHz)} \quad (9.5.1-3)$$

式中 T_{bi} ——测点 i 的首波周期(μs)。

9.5.2 桩身混凝土缺陷可疑点判断方法：

1 概率法：将同一桩同一剖面的声速、波幅、主频按本规程第 6.3.1 和 6.3.2 条进行计算和异常值判别。当某一测点的一个或多个声学参数被判为异常值时，即为存在缺陷的可疑点；

2 斜率法：用声时(t_c)—深度(h)曲线相邻测点的斜率 K 和相邻两点声时差值 Δt 的乘积 Z ，绘制 $Z-h$ 曲线，根据 $Z-h$ 曲线的突变位置，并结合波幅值的变化情况可判定存在缺陷的可疑点或可疑区域的边界。

$$K = (t_i - t_{i-1}) / (d_i - d_{i-1}) \quad (9.5.2-1)$$

$$Z = K \cdot \Delta t = (t_i - t_{i-1})^2 / (d_i - d_{i-1}) \quad (9.5.2-2)$$

式中 $t_i - t_{i-1}$ 、 $d_i - d_{i-1}$ ——分别代表相邻两测点的声时差和深度差。

9.5.3 结合判断方法绘制相应声学参数—深度曲线。

9.5.4 根据可疑测点的分布及其数值大小综合分析，判断缺陷的位置和范围。

9.5.5 当需用声速评价一个桩的混凝土质量匀质性时；可分别按(9.5.5)各式计算测点混凝土声速值(v_i)和声速的平均值(m_v)、标准差(s_v)及离差系数(C_v)。彬据声速的离差系数可评价灌注桩混凝土匀质性的优劣。

$$v_i = l_i / t_{ci} \quad (9.5.5-1)$$

$$m_v = (\sum v_i) / n \quad (9.5.5-2)$$

$$s_v = \sqrt{(\sum v_i^2 - n \times m_v^2) / (n-1)} \quad (9.5.5-3)$$

$$C_v = s_v / m_v \quad (9.5.5-4)$$

式中 v_i ——第 i 点混凝土声速值(km/s)；

l_i ——第 i 点测距值(mm)；

t_{ci} ——第 i 点的混凝土声时值(μs)；

n ——测点数。

9.5.6 缺陷的性质应根据各声学参数的变化情况及缺陷的位置和范围进行综合判断。可按表 9.5.6 评价被测桩完整性的类别。

表 9.5.6 桩身完整性评价

类别	缺陷特征	完整性评定结果
I	无缺陷	完整。合格
II	局部小缺陷	基本完整。合格
III	局部严重缺陷	局部不完整。不合格。经工程处理后可使用
IV	断桩等严重缺陷	严重不完整。不合格。报废或通过验证确定是否加固使用

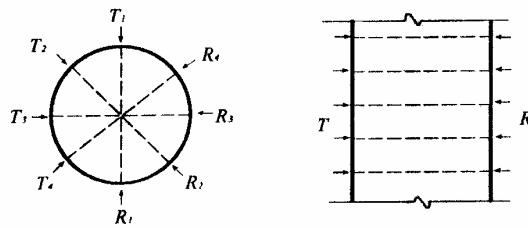
10 钢管混凝土缺陷检测

10.1 一般规定

- 10.1.1 本检测方法仅适用于管壁与混凝土胶结良好的钢管混凝土缺陷检测。
 10.1.2 检测过程中应注意防止首波信号经由钢管壁传播。
 10.1.3 所用钢管的外表面应光洁，无严重锈蚀。

10.2 检测方法

- 10.2.1 钢管混凝土检测应采用径向对测的方法，如图 10.2.1 所示。



(a)平面图

(b)立面图

图 10.2.1 钢管混凝土检测示意图

- 10.2.2 应选择钢管与混凝土胶结良好的部位布置测点。
 10.2.3 布置测点时，可先测量钢管实际周长，再将圆周等分，在钢管测试部位画出若干根母线和等间距的环向线，线间距宜为 150~300mm。
 10.2.4 检测时可先作径向对测，在钢管混凝土每一环线上保持 T、R 换能器连线通过圆心，沿环向测试，逐点读取声时、波幅和主频。
 10.2.5 对于直径较大的钢管混凝土，也可采用预埋声测管的方法检测，按本规程第 9 章的规定执行。

10.3 数据处理与判断

- 10.3.1 同一测距的声时、波幅和频率的统计计算及异常值判别应按本规程第 6.3.1 和 6.3.2 条规定进行。
 10.3.2 当同一测位的测试数据离散性较大或数据较少时，可将怀疑部位的声速、波幅、主频与相同直径钢管混凝土的质量正常部位的声学参数相比较，综合分析判断所测部位的内部质量。

附录 A 测量空气声速进行声时计量校验

A.0.1 测试步骤

取常用的厚度振动式换能器一对，接于超声仪器上，将两个换能器的辐射面相互对准，以间距为 50、100、150、200mm……依次放置在空气中，在保持首波幅度一致的条件下，读取各间距所对应的声时值 t_1 、 t_2 、 t_3 …… t_n 。同时测量空气的温度 T_k (读至 0.5 °C)。

测量时应注意下列事项：

- 1 两换能器间距的测量误差应不大于 $\pm 0.5\%$ 。
- 2 换能器宜悬空相对放置(如图 A.0.1 所示)。若置于地板或桌面时，应在换能器下面垫以海绵或泡沫塑料并保持两个换能器的轴线重合及辐射面相互平行；
- 3 测点数应不少于 10 个。

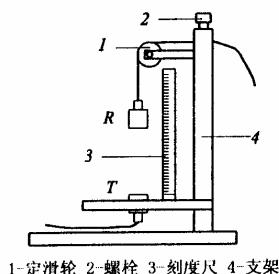


图 A.0.1 换能器悬挂装置示意图

A.0.2 空气声速测量值计算：以测距 l 为纵坐标，以声时读数为横坐标，绘制“时-矩”坐标图(如图 A.0.2 所示)，或用回归分析方法求出 l 与 t 之间的回归直线方程：

$$l = a + bt \quad (\text{A.0.2})$$

式中 a 、 b ——为待求的回归系数。

坐标图中直线 AB 的斜率“ $\Delta l / \Delta t$ ”或回归直线方程的回归系数“ b ”即为空气声速的实测值 v^s (精确至 0.1m/s)。

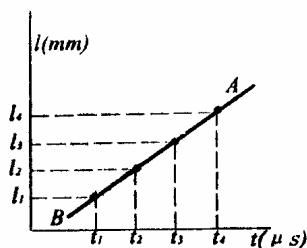


图 A.0.2 测空气声速的“时—距”图

A.0.3 空气声速的标准值应按下式计算：

$$v^c = 331.4 \cdot \sqrt{1 + 0.00367 \cdot T_k} \quad (\text{A.0.3})$$

式中 v^c ——空气声速的标准值(m/s)；

T_k —空气的温度(°C)。

A.0.4 空气声速实测值 v^s 与空气声速标准值 v^c 之间的相对误差 e_r 应按下式计算：

$$e_r = (v^c - v^s) / v^c \times 100\% \quad (\text{A.0.4})$$

通过(A.0.4)式计算的相对误差 e_r 应不大于±0.5%，否则仪器计时系统不正常。

附录 B 径向振动式换能器声时初读数(t_{00})的测量

将两个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，两个换能器内边缘间距先后调节在 l_1 (如 200mm)， l_2 (如 100mm)，分别读取相应声时值 t_1 、 t_2 。由仪器、换能器及其高频电缆所产生的声时初读数 t_0 应按下式计算。

$$t_0 = (l_1 \times t_2 - l_2 \times t_1) / (l_1 - l_2) \quad (\text{B.0.1})$$

用径向振动式换能器在钻孔中进行对测时，声时初读数应按下式计算：

$$t_{00} = t_0 + (d_1 - d) / v_w \quad (\text{B.0.2})$$

当用径向振动式换能器在预埋声测管中检测时，声时初读数应按下式计算：

$$t_{00} = t_0 + (d_2 - d_1) / v_g + (d_1 - d) / v_w \quad (\text{B.0.3})$$

式中 t_{00} ——钻孔或声测管中测试的声时初读数(μs)；

t_0 ——仪器设备的声时初读数(μs)；

d ——径向振动式换能器直径(mm)

d_1 ——钻的声测孔直径或预埋声测管的内径(mm)；

d_2 ——声测管的外径(mm)；

v_w ——水的声速(km/s)；按表 B.0.1 取值；

v_g ——预埋声测管所用材料的声速(km/s)。用钢管时 $v_g=5.80$ ，用 PVC 管时 $v_g=2.35$ 。

表 B.0.1

水温度(°C)	5	10	15	20	25	30
水声速(km/s)	1.45	1.46	1.47	1.48	1.49	1.50

当采用一只厚度振动式换能器和一只径向振动式换能器进行检测时，声时初读数可取该二对换能器初读数之和的一半。

附录 C 空洞尺寸估算方法

如图 C.0.1 所示, 设检测距离为 l , 空洞中心(在另一对测试面上声时最长的测点位置)距一个测试面的垂直距离为 l_h , 声波在空洞附近无缺陷混凝土中传播的时间平均值为 m_{ta} , 绕空洞传播的时间(空洞处的最大声时)为 t_h , 空洞半径为 r , 设 $X = (t_h - m_{ta}) / m_{ta} \times 100\%$;

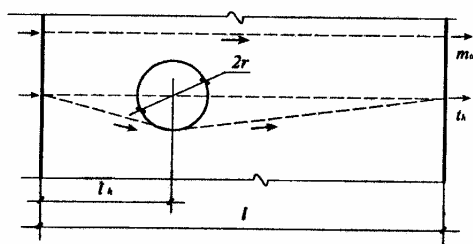


图 C.0.1 空洞尺寸估算原理图

$Y = l_h / l$; $Z = r / l$ 。根据 X 、 Y 值, 可由表 C.0.1 查得空洞半径 r 与测距 l 的比值 Z , 再计算空洞的大致半径 r 。

当被测部位只有一对可供测试的表面时, 只能按空洞位于测距中心考虑, 空洞尺寸可按下式计算:

$$r = l / 2 \cdot \sqrt{(t_h / m_{ta})^2 - 1} \quad (C.0.1)$$

式中 r ——空洞半径(mm);

l ——T、R 换能器之间的距离(mm);

t_h ——缺陷处的最大声时值(μs);

m_{ta} ——无缺陷区的平均声时值(μs)。

表 C 0.1

$X \backslash Z$ Y	0.05	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30
0.10(0.90)	1.42	3.77	6.26										
0.15(0.85)	1.00	2.56	4.06	5.97	8.39								
0.20(0.80)	0.78	2.02	3.18	4.62	6.36	8.44	10.9	13.9					
0.25(0.75)	0.67	1.72	2.69	3.90	5.34	7.03	8.98	11.2	13.8	16.8			
0.30(0.70)	0.60	1.53	2.40	3.46	4.73	6.21	7.91	9.38	12.0	14.4	17.1	20.1	23.6
0.35(0.65)	0.55	1.41	2.21	3.19	4.35	5.70	7.25	9.00	10.9	13.1	15.5	18.1	21.0
0.40(0.60)	0.52	1.34	2.09	3.02	4.12	5.39	6.84	8.48	10.3	12.3	14.5	16.9	19.6
0.45(0.55)	0.50	1.30	2.03	2.92	3.99	5.22	6.62	8.20	9.95	11.9	14.0	16.3	18.8
0.50	0.50	1.28	2.00	2.89	3.94	5.16	6.55	8.11	9.84	11.8	13.3	16.1	18.6

本规程用词说明

为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

- 1 表示很严格，非这样做不可的：
正面词采用“必须”；反面词采用“严禁”。
- 2 表示严格，在正常情况下均应这样做的：
正面词采用“应”；反面词采用“不应”或“不得”。
- 3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：
正面词采用“宜”；反面词采用“不宜”。
- 4 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

超声法检测混凝土缺陷技术规程

Technical specification for inspection of
concrete defects by ultrasonic method
CECS 21：2000

条文说明

1 总 则

1.0.2、1.0.3 本规程适用于各种混凝土和钢筋混凝土的缺陷检测。根据我国工程质量检测的实际需要，增添了灌注桩和钢管混凝土缺陷检测。本规程的修订，反映了混凝土超声检测技术不断成熟以及用于混凝土检测的超声仪器已发展到一个新水平。

1.0.4 由于混凝土是非均质的弹粘塑性材料，对超声脉冲波的吸收、散射衰减较大，其中高频成份更易衰减。因此，超声波检测混凝土缺陷一般采用较低的发射频率。当混凝土的组成材料、工艺条件、内部质量及测试距离一定时，其超声传播速度、首波幅度和接收信号主频等声学参数一般无明显差异。如果某部分混凝土存在空洞、不密实或裂缝等缺陷，破坏了混凝土的整体性，与无缺陷混凝土相比较声时值偏大，波幅和频率值降低。超声波检测混凝土缺陷，正是根据这一基本原理，对同条件下的混凝土进行声速、波幅和主频测量值的相对比较，从而判定混凝土的缺陷情况。

1.0.5 在进行混凝土缺陷检测时，还应遵守现行的安全技术和劳动保护等有关规定。

3 超声波检测设备

3.1 超声波检测仪的技术要求

3.1.1 原规程编制过程中，我国尚未生产数字式混凝土超声检测仪，超声检测设备的技术要求是按当时模拟式非金属超声仪的技术性能提出的。近年来国内先后研制生产了性能好、功能多的数字式非金属超声检测仪，为了适应这两类混凝土超声检测仪的使用，修订中除了保留两类仪器的共性要求外，还分别对模拟式和数字式超声波检测仪的技术性能提出了要求。两类混凝土超声波检测仪的含义是：

- 1 模拟式仪器用游标读取首波声时，并由数码管显示，也可由接收信号首波波幅

起跳达到一定电平后，关断声时计数电路并自动显示声时值，但当信号较弱时声时读数的误差较大；波幅的读数，采取固定屏幕波幅，调节衰减器衰减值读取，或者保持衰减器不动，直接在屏幕上读取首波高度的刻度数。

2 数字式仪器是将接收信号按一定时序转换成二进制数字量存入计算机内存。可通过软件程序判读首波声时，其判读精确度由数字波形样品时间间隔和软件功能决定，应能在低信噪比情况下准确判读，而波幅值由软件判读计算直接读取，并显示于仪器屏幕上。

3.1.2 超声波检测仪应按现行国家有关标准要求进行严格的质量检定，每项指标应达到规定的质量要求，方可使用。

3.1.3 超声波检测仪应满足下列技术要求：

1 结构混凝土存在缺陷时，会使声时、波幅、主频和波形发生变化，因此测量这些声学参数都须使用波形稳定、清晰的波形显示系统。

2 声时最小分度是声时测量精度的决定因素，因此，超声检测仪应满足这个要求。

3 在测距一定且测线平行的条件下，接收信号首波的大小可以反映混凝土缺陷的存在与否。模拟仪器一般采用衰减器测量波幅值，因此，超声仪应具有最小分度为 1dB 的衰减器。数字式仪器的波幅判读由软件计算其波幅的 dB 值或直接读取波幅的电压值，其精度均已超过 1dB。

4 仪器接收放大器的主频响应与混凝土超声检测中一般使用 20~50kHz 的换能器相适应，所以接收放大器在此频响范围可以满足电气性能要求。

单纯考虑接收放大器的增益是不全面的，应同时考虑其噪声水平，所以用信噪比达到 3:1 时的接收灵敏度要更为实际，它可以直观的反映出仪器与超声波穿透距离有关的重要技术因素。

5 仪器对电源电压的适应范围，系指当电源在此范围内波动时，其全部技术指标仍能达到额定值。

3.1.4 对模拟式超声波检测仪还应满足下列技术要求：

1 模拟式超声波检测仪必须具备手动游标读数功能，以便准确判读首波声时。自动整形声时读数功能一般仅适应于强信号、弱噪声条件，信噪比降低会导致自动整形声时读数的大误差，甚至丢波，要谨慎使用。

2 模拟仪器数码显示的稳定性是准确测量的基础。现场测试一般要求仪器连续工作 4h 以上，在工作期间，仪器性能必须保持一定的稳定性。

3.1.5 对数字式超声波检测仪还应满足的技术要求：

1 数字式仪器以自动判读方式为主，在大距离测试或信噪比极低的情况下，需要用手动游标读数。手动或自动判读声时，在同一测试条件下，测量数值的重复性是准确测量的基础，故应建立一定的检查声时测量重复性的方法，在重复测试中，判定首波起始点的样本偏差点数乘以样本时间间隔即声时读数的差异。

2 数字化超声波检测仪波幅读数的精度取决于数字信号采样的精度和屏幕波形幅度，在采样精度一定的条件下，加大屏幕幅度可提高波幅读数的精度，直接读取波幅电压值其读数精度应达到 mv 级并取小数点后有效位数两位。

在混凝土缺陷检测中，结合波形畸变现象有利于缺陷判别，因此，要具备显示、存储和打印数字化波形的功能。波形最大存储长度由最大探测距离所决定。

3 自动判读声时及波幅时，在屏幕上应显示其判读的位置，这样可及时检查自动读数是否存在错误。

4 数字化超声波检测仪一般都具有幅度谱功能。

3.2 换能器的技术要求

3.2.1 混凝土缺陷超声检测中,根据需要可采用平面测试(单面测试和通过两个平面对穿测试)或孔中测试(单孔和双孔测试)。平面测试所用的换能器是厚度振动方式,孔中测试用径向振动式换能器(园管式换能器径向指向性一致)。

3.3.2 混凝土缺陷检测,一般选用频率为 20~250kHz 的换能器(径向振动式换能器目前最高频率有 60kHz),可根据测距大小和混凝土质量好坏选用合适频率的换能器。一般在保证具有一定接收信号幅度的前提下,尽量选用较高频率的换能器,以提高对小缺陷反映的灵敏性。

3.3.3 换能器的实测频率与标称频率应尽量一致,实际频率差异过大,易使信号鉴别和数据对比造成混乱。

在水中检测一般水深不大于 100m,换能器水密性在 1MPa 时不漏水是可以满足要求的。

3.3 超声波检测仪的检定

3.3.1 这项检验方法为定期检验仪器综合性能提供一种声时理论值的标准,不仅检验了仪器的计时机构是否可靠,还验证了仪器操作者的声时读取方法是否准确。

3.3.2 波幅值一般按分贝(dB)计量表示,波幅值被增加(或减少)6dB,对应的屏幕波幅高度应升高(或降低)一倍,如果波幅变化高度不符,表示仪器衰减系统不正确或者波幅计量系统有误差,但要注意波幅变化中应始终不超屏。

4 声学参数测量

4.1 一般规定

4.1.1 了解、收集被测结构的有关资料 and 情况,为综合分析产生质量问题的原因和拟定检测方案提供依据,同时也是综合分析测试结果和存档必不可少的技术资料。

4.1.2 质量有怀疑的部位是大家关注的目标,结合测试操作条件的可能性,检测应突出重点,选取对混凝土质量有争议或根据施工情况易产生质量事故的部位进行检测,以求迅速而准确的判定质量问题。

4.1.3 超声“测缺”的基本目的是寻找隐蔽于结构混凝土内部的缺陷和不均匀性,但反映混凝土质量的声学参数容易受混凝土表面状态影响。为了使检测数据具有真实性和良好的可比性,必须避免表面状况对检测的影响。因此,应保持混凝土测试面平整、清洁无泥砂、灰尘。

4.1.4 因为超声波在混凝土中的衰减大小除了与混凝土质量有关外还与发射的超声波主频有关,较高主频的超声波在混凝土中声能衰减更快,首波幅度变化更明显,判别缺陷的灵敏度高。但选用的主频过高,首波很微弱,无法辨别波幅的变化,也不能有效判别混凝土缺陷。因此,在工程检测中,应视当时的测距大小,选用较高主频换能器。使用模拟式仪器时,宜以无缺陷混凝土的首波幅度不小于 30mm 为前提。

4.1.5 换能器辐射应通过耦合剂与混凝土测试表面接触以保证良好的声耦合。当耦合层中夹杂泥沙或者存在空气,使声时延长、波幅降低,检测结果就不能真实反映混凝土内部质量情况。

4.1.6 由于钢筋声速比一般混凝土声速高,当声传播路径与钢筋轴线平行且比较靠近

时,大部分路径沿钢筋轴向传播的声波,比沿混凝土直接传播的声波早到达接收点,即钢筋使声信号“短路”,因此,使测得的声时、波幅不能反映混凝土的实际质量情况。通过理论计算,当 T、R 换能器的连线与钢筋的最小距离大于测距的 $1/6$ 时,可避免上述影响。

4.2 声学参数测量

4.2.1 采用模拟式超声检测仪测量应按下列方法操作:

1 由于超声“测缺”技术是在相同技术条件(混凝土的原材料、配合比、浇筑工艺及构件类型、配筋情况、测试距离、耦合状态等)下进行声学参数的测量和比较,所以检测一个工程时,测试技术条件应始终保持一致,保证测得的数据具有可比性。因此,在测量前应视结构的测距大小和混凝土外观质量情况,将仪器的发射电压固定在某一合适位置。为便于观察和测读缺陷区的较弱信号,应以扫描基线不产生明显噪音干扰为前提,将仪器“增益”尽量调到最大位置。

2 声时测读值往往随着首波幅度的变化而有所波动。为了减少人为误差,规定每次读取声时值时,应将首波幅度调至一定高度。

3 波幅测量的目的是比较超声波在相同的混凝土内传播时能量的变化情况。有缺陷的混凝土,超声波在“缺陷体”界面发生散射、绕射及折射反射,造成声能不同程度的损失,首波幅度必须下降。测量前,应使换能器与测试面耦合良好(测试面平整,耦合层中不得夹杂泥砂)。1)、2)两种方法均为相对比较,方法 1)适用于测距长或强度等级低的混凝土,方法 2)适用于测距小、接收信号强的情况。

4 主频测量是测量接收信号第一个波的周期,再按主频值是周期的倒数的关系计算而得。如果波形发生畸变,测得主频的误差较大。

5 观察、描绘或拍摄波形可作为缺陷判别的参考,因为质量完好与存在缺陷的混凝土相比较,接收信号的波形或包络线的形状总是有差别的,一般说来有缺陷的混凝土,其波形必然产生“畸变”,但波形出现畸变并不一定是缺陷。随着研究工作的深入和频谱分析技术的发展,有可能找出混凝土不同缺陷的某些特征波形。

4.2.2 采用数字式超声检测仪测量应按下列方法操作:

1 超声仪的发射电压决定了换能器的发射能量,即与接收信号的波幅有关,采样主频与声时测读精度有关,为使声时、波幅、波形等声参量有相互可比性,应根据测距大小和混凝土外观质量情况固定仪器的发射电压,采样主频等参数。

2 数字式超声波检测仪在自动测读声时及波幅时,当操作不当或噪声很强时会发生误判,应在自动判读后及时观察自动判读是否正确,否则应重新采样再次自动判读或改用手动游标读数。主频测量采用一定长度波形样品进行线性 FFT 运算并自动判读,在做频谱分析计算时,参与分析计算的波形段的各波峰有可能因过份放大而削顶(称削波),由于出现削波时频谱分析将出现误差,故参与频谱分析的波形段不应削波。

3 数字式仪器声时、波幅的手动测量使用手动游标读数,主频的手动测量是通过游标读取相邻波峰(或波谷)的时间值,即为超声波在此瞬时的周期 T,周期的倒数即为主频。

4 在缺陷检测过程中,应将完整混凝土的超声接收波形与有缺陷部位的波形按已设定的采样记录长度存入计算机硬盘(或软盘),以便在数据分析或提交检测报告时为缺陷判断提供辅助信息。

4.2.3 读取的声时值中还包括一个叫声时初读数的 t_0 值,因此被测混凝土的超声传播时间应该是测读值减去声时初读数。声时初读数主要包括换能器外壳与耦合层的声延

时，仪器电路传输过程和高频电缆的电延时以及接收信号前沿起点的延时。其值可按仪器说明书或附录 B 进行测定。

4.2.4 不同测距的声时值无可比性，须由测距换算成声速，方可判别混凝土的质量。现场一般采用钢卷尺测量测距，有条件时可用专门工具测量，要求测量误差不大于±1%，才能保证声速计算值不超过允许误差。

5 裂缝深度检测

5.1 一般规定

5.1.1 原规程中裂缝检测分为“第四章 浅裂缝检测”和“第五章 深裂缝检测”。现合并为“5 裂缝深度检测”。因为在实际检测中事先很难估计裂缝的深浅，一般都是根据裂缝所处部位的具体情况，确定测试方法。所以无论浅裂缝还是深裂缝检测，只是测试和判断方法有些不同，但目的都是测量裂缝的深度，合并成一章便于使用。

5.1.2 若被测裂缝中有积水或泥浆，则声波经水介质耦合穿裂缝而过，则通过与不通过裂缝的超声首波信号无明显差异，给裂缝深度判断造成很大困难。

5.2 单面平测法

5.2.1 由于采用的是平测法，声传播距离有限，以目前常用的超声仪器及换能器而言，检测 500mm 深度的裂缝时首波信号很微弱，若再增大裂缝深度的检测范围则难以识别首波信号而误读后续波，导致检测错误。平测时如果 T、R 换能器的连线与附近钢筋轴线相一致，钢筋将使声信号“短路”，读取的声时不能反映混凝土的声速，更不能反映超声波绕过裂缝末端传播的声时。因此，布置测点时应使 T、R 换能器的连线避免与附近钢筋轴线平行，如能保持 45°C 左右的夹角为最好。

1 平测中测距以换能器内边缘为准，是为了提高测距的准确性，而以“时-距”法来求得声波的实际传播距离，可消除仪器初始读数及声波传播路径误差的影响。

2 跨缝进行声时测量时，在读取首波声时的同时，应注意观察首波相位的变化，因为首波出现反相时的测距与被测裂缝深度存在一定关系，记录了反相时的测距，有助于裂缝深度的分析判断。

5.2.2 裂缝深度计算式(5.2.2)，原规程为 $h_{ci} = l_i / 2 \cdot \sqrt{(t_i^0 / t_i)^2 - 1}$ ，修改中考虑到该计算式是根据跨缝与不跨缝测试的混凝土声速基本一致，在同一测距下，跨缝测试的声波绕过裂缝末端所形成折线传播，不跨缝测试的声波是直线传播到接收换能器的原理推导而来，而跨缝测试出现首波反相时的测距，不一定对应于不跨缝测试的测距，而且不跨缝各测距测得的声速值多存在一定差距。因此，修订稿先将不跨缝测试的混凝土声速 v 计算出来，再以 $t_i = l_i / v$ 代入原(5.2.2)式得到修订稿中的(5.2.2—1)式，同时求出各测距计算的裂缝深度平均值 m_{hco} 。

5.2.3 在跨缝测量中，经常出现首波反相现象，经模拟试验和工程实践的验证结果看出，首波出现反相时的测距 l_i' 与被测裂缝深度存在一定关系，但有时由于受过缝钢筋或裂缝中局部“连通”的影响而难以发现反相首波，因此，修订稿提出两条确定裂缝深度的方法。关于舍弃 $l_i' < m_{hc}$ 和 $l_i' > 3m_{hc}$ 的数据问题，从许多测试资料和模拟试验结

果看出,当 l_i' 与裂缝深度相近时,测得的裂缝深度较为准确;实践表明,T、R换能器测距过小或远大于裂缝深度,声时测试误差较大, t_i 、 t_i^0 对计算裂缝深度影响较大,所以对两个换能器的测距作了限制。

5.3 双面斜测法

5.3.1 在工业与民用建筑中常遇见梁与柱结合部位出现裂缝,需要检测其深度及其在水平方向是否贯通,这种结构一般至少具有一对相互平行的测试面,可采用等测距的过缝与不过缝的斜测法检测。这种方法较直观,检测结果较为可靠。

5.3.2 当发射和接收换能器的连接线通过裂缝时,由于裂缝破坏了混凝土的连续性,声能在裂缝处产生很大衰减,穿过裂缝传播到接收换能器的首波信号很微弱,其波幅或主频与等测距的无缝混凝土比较,存在显著差异,据此可以判定裂缝深度及它在水平方向是否贯通。

5.4 钻孔对测法

5.4.1 大体积结构的裂缝深度在500mm以上时,用平测法难以测量,又不具备斜测法所需要的一对相互平行的测试面,则可应用本测试方法进行检测。

5.4.2 本方法是在裂缝两侧的钻孔中作超声跨缝检测,所以在裂缝两侧必须钻声测孔。

5.4.3 对钻孔的要求:

1 应根据所用换能器的直径确定钻孔的直径,为使换能器在孔中移动顺畅,孔径应比换能器直径大5~10mm。

2 由于该测试方法的基础是以有无缝的混凝土声学参数相对比较而判别裂缝的所在范围,因此钻孔须深入到裂缝末端的完好混凝土中去,其深入深度应保证通过无缝混凝土的测点不少于3个。故规定钻孔深度大于裂缝深度700mm以上。

3 对应的二个测孔其轴线应保持平行,以免因钻孔不平行造成T、R换能器间距变化,干扰各深度处测试结果的相互比较。

4 对应测孔的间距宜为2m,这是按目前一般超声仪和径向换能器灵敏度而言。测孔间距太大则接收信号太弱,不利于测试数据的分析判断;测孔间距过小,延伸的裂缝则可能超出测距范围。

5 孔中若有粉末碎屑,充水后便形成悬浮液,将使声波剧烈衰减,影响测试结果,故应清理干净。

6 在裂缝一侧多钻一个较浅的孔,作为测试相同测距下无缝混凝土的声学参数,以利于对裂缝部位进行判别。

5.4.4 为保证径向换能器有一定的穿透能力,使接收信号有一定幅度,所以只能用较低主频。原规程为20~40kHz,因目前市场上已有60kHz径向换能器,并有足够的灵敏度,而且直径更小,所以现改为20~60kHz。

5.4.5 向测孔中灌水是作耦合剂用,必须用清水,无悬浮泥沙。测点间距以200mm左右为宜,深度大的裂缝测间距可适当大一些。为使换能器始终处于钻孔中心,宜在换能器上套两个橡皮圈。

5.4.6 结构物的裂缝宽度是从表面至内部逐渐变窄,直至闭合。裂缝越宽,对超声波的反射程度越大,波幅值越小。随着孔深增加,波幅值越来越大。当波幅达到最大并随着再往深处测量也基本稳定时,表示T、R换能器之间的混凝土是完好的,则可以判定波幅达到最大值(相对于有裂缝部位)所对应的钻孔深度即是裂缝深度值。

6 不密实区和空洞检测

6.1 一般规定

6.1.1 本章适用于混凝土内部不密实区和空洞的检测。所谓不密实区，系指因振捣不够、漏浆或石子架空等造成的蜂窝状或因缺少水泥而形成的松散状以及遭受意外损伤所产生的疏松状混凝土区域。

6.1.2 检测混凝土内部的不密实区或空洞一般采用穿透法，依据各测点的声速、波幅和主频的相对变化，寻找异常测点的坐标位置，从而判定缺陷范围。因此，测试部位最好具有两对相互平行的测试面，如受条件限制，至少也应有一对相互平行的测试面。怀疑混凝土内部是否存在空洞和不密实，一般是根据施工记录和外观质量情况，或者结构在使用过程中局部发生质量问题，其位置都是大致的。因此，为了避免缺陷漏检，测试范围除应大于所怀疑的区域外，还应确保在正常混凝土上有足够测试数据，以满足统计分析的需要。

6.2 测试方法

6.2.1 测试方法应根据被测构件或结构的外观形状来考虑，为便于判明混凝土内部缺陷的空间位置，构件被测部位最好具有两对相互平行的测试面，并尽可能采用两个方向对测。当被测部位只有一对可供测试的平行表面时，可在该对测试面上分别画出对应网格线，在对测的基础上对数据异常的测点部位，再进行交叉斜测，以确定缺陷的位置和范围。一般水坝、桥墩、大型设备基础等结构，断面尺寸较大，为提高测试灵敏度，可在适当位置钻竖向测试孔或预埋声测管进行测试。

6.2.2 该条说明同 4.2 节。

6.3 数据处理及判断

6.3.1 同一测试部位各测点的声学参数测量值的平均值和标准差，分别按(6.3.1—1)式和(6.3.1—2)式计算。

6.3.2 原规程规定“当同一测试部位各点的测距相同时，可直接用声时判别”，修订中考虑到声时判断值的计算式与其它几个声学参数判断值的计算通式不一致，为简化计算过程，修订稿中删除了直接用声时判断的内容，都用声速、波幅和主频进行异常值判断。原规程判出 x_n 为异常值后就停止了判断，实际上排列在 x_n 之前的数据中可能还包含有异常值。因此，修订稿中增加了 x_n 被判为异常值后再继续对 $x_n \sim x_{n-1}$ ，进行统计判断，直至判不出异常值为止。

异常值的判断值“ x_0 ”是参考数理统计学判别异常值方法确定的。基本原理如下：在 n 次测量中，取异常测点(含粗大误差的测量值)不可能出现数为 1，对于正态分布，异常测点不可能出现的概率为：

$$p(u \geq \lambda_1) = 1/\sqrt{2\pi} \int_{\lambda_1}^{\infty} (-x^2/2) dx = 1/n$$

表 6.3.2 中的 λ_1 值，根据统计数据的个数“ n ”，由 $\Phi(\lambda_1) = 1/n$ 在正态分布表中查得。

原规程只考虑了单个测点的判断。但是，当混凝土内部存在缺陷时，往往不是孤立的一个点，其相邻测点很有可能处于缺陷的边缘而被漏判。为了提高缺陷范围判定的准确性，现增加了对异常测点相邻点的判断。根据概率统计原理，在 n 次测试中相邻二点

不可能出现的概率是： $P_2=1/2\sqrt{1/n}$ ；当用径向振动式换能器在钻孔或预埋管中测试时，

相邻二点不可能出现的概率是： $P_3=\sqrt{1/2n}$ 。表 6.3.2 中的 λ_2 、 λ_3 值，是根据统计数据的

的个数“n”，分别由 $\Phi(\lambda_2)=1/2\sqrt{1/n}$ 、 $\Phi(\lambda_3)=\sqrt{1/2n}$ 在正态分布表中查得。

6.3.3 一般情况下混凝土内部的不密实区和空洞，并非孤立的一小块，由声学参数测量值反映到测点也不是孤立一个点。因此，可根据异常测点在二维平面或三维空间的分布情况，并结合波形特征综合判断不密实区域和空洞等缺陷的位置和范围。

有时因构件整体质量较差，各测点的声速、波幅测量值的标准差较大，按上述方法判断缺陷易产生漏判。此时，可利用另外一个同条件（构件类型、混凝土的龄期、材料品种及用量相同，测试距离一致）正常混凝土声学参数的平均值和标准差进行异常数据判断。

7 混凝土结台面质量检测

7.1 一般规定

7.1.1 混凝土前后两次浇筑时间间隔原规程是根据《混凝土结构工程施工及验收规范》有关规定大于 3h，修订中考虑到当前混凝土外加剂的品种繁多，导致混凝土的终凝时间波动范围很宽，所以修订稿中未规定具体间隔时间。如果前面浇筑的混凝土已达到了终凝，形成一定早期强度，此时接着往上浇筑混凝土，如不严格按施工缝处理前面浇筑混凝土的表面，则结合面的质量很难得到保证，所以有时人们担心结合面的结合不良，需要通过检测来确定结合面的质量。

7.1.2 在检测时，应首先查明结合面的位置及走向，以保证所布置的测点能使声波垂直或斜穿结合面。若结合面走向与声波传播方向平行或近似平行，则声波传播将不会穿过结合面，所测数据不能反映结合面的质量情况。

7.2 测试方法

7.2.1、7.2.2 利用超声波检测两次浇筑的混凝土结合面质量，主要是采用对比的方法。因此，测点的布置应包括有结合面和无结合面的两部分混凝土，为保证各测点具有一定的可比性，每一对测点都应保持倾斜角度一致，测距相等。

测点间距应根据结构尺寸和结合面质量情况确定，但一般不宜大于 300mm，因间距过大，可能使缺陷漏检。

换能器耦合状态不同将影响检测结果，向换能器施以恒压，可以使每一测点的耦合状态保持一致，提高测试数据的可比性。当发现某些测点声学参数异常时，应检查异常点测试表面是否平整、干净，并作必要的处理后再进行复测和细测。

7.3 数据处理及判断

7.3.1~7.3.3 如果所测混凝土的结合面结合良好，则超声波穿过有无结合面的混凝土时，声学参数应无明显差异。当结合面局部地方存在疏松、孔隙或填进杂物时，该部分混凝土与邻近正常混凝土相比，其声学参数值存在明显差异。但有时因耦合不良、测距发生变化或对应测点错位等因素的影响，导致检测数据异常。因此，对于数据异常的测

点，只有在查明无其他非混凝土自身因素影响时，方可判定该部位混凝土结合不良。

8 表面损伤层检测

8.1 一般规定

8.1.1 当混凝土遭受冻害、高温作用或化学物质浸蚀，其表层会受到程度不同的损伤，产生裂缝或疏松降低对钢筋的保护作用，影响结构的承载能力和耐久性。用超声波检测表面损伤层厚度，既能反映混凝土被损害的程度，又为结构加固补强提供技术依据。

8.1.2 选取有代表性的部位进行检测，既可减少测试工作量，又使测试结果更符合混凝土实际情况。

由于水的声速比空气的声速大 4 倍多，如果受损伤而较疏松的表层混凝土很潮湿，则其声速测值偏高，与未损伤的内部混凝土声速差异减小，使检测结果产生较大误差。测试部位表面有接缝或饰面层，也会使声速测值不能反映损伤层混凝土实际情况。

8.1.3 为了提高检测结果的准确性和可靠性，可根据测试数据选取有代表性的部位，局部凿开或钻芯取样进行验证。

8.2 测试方法

8.2.1 混凝土表面损伤层检测，一般是将换能器放在同一测试面上进行单面平测，这种测试方法接收信号较弱，换能器主频愈高，接收信号愈弱。因此，为便于测读，确保接收信号具有一定首波幅度，宜选用较低主频的换能器。

8.2.2、8.2.3 检测时 T 换能器与被测混凝土表面必须耦合良好，且固定不动。依次移动 R 换能器(原规程定为每次移动 50mm)，为便于检测较薄的损伤层，R 换能器每次移动的距离不宜太大，所以修改为 30mm。为便于绘制“时-距”坐标图，每一测位的测点数应不少于 6 点。

发现损伤层厚度不均匀时，应适当增加测位的数量，使检测结果更具有真实性。

8.3 数据处理及判断

8.3.1、8.3.2 原规程单纯用作图法求得 v_f 、 v_a 和 l_0 值，由于该方法的数据处理过程十分繁杂，而且往往因坐标图的声时轴比例较粗，求得的数值误差较大，因此修改成用回归分析的方法分别求出损伤、未损伤混凝土的回归直线方程，再根据两个回归直线的交点在轴上，对应的距离为 l_0 ，回归系数 $b_1=v_f$ 、 $b_2=v_a$ 按公式(8.3.2)计算损伤层厚度。(8.3.2)式是依据以下原理推导而得：如图 8.3.2 所示，当 T、R 换能器距离较近时，超声波沿损伤层直接传播到接收换能器(R)，随着 T、R 换能器间距增大，部分声波穿过损伤层沿未损伤混凝土传播一定距离后，再穿过损伤层到达接收换能器，当 T、R 换能器

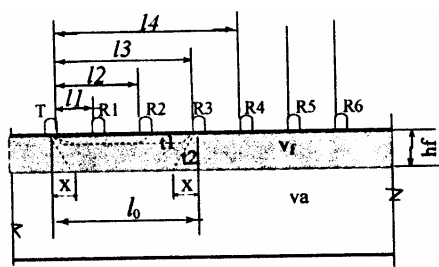


图 8.3.2 检测损伤层厚度示意图

间距增大到一定距离时，穿过损伤层经未损伤混凝土传播到 R 换能器的声波，比沿损伤层直接传播的声波早到达或同时到达 R 换能器，即 $t_2 \leq t_1$ 。

$$\begin{aligned} \text{由图可以看出} \quad t_1 &= l_0 / v_f \\ t_2 &= 2 \cdot \sqrt{h_f^2 + x^2} / v_f + (l_0 - 2x) / v_a \end{aligned}$$

$$\text{则} \quad l_0 / v_f = 2 / v_f \cdot \sqrt{h_f^2 + x^2} + (l_0 - 2x) / v_a \quad (1)$$

$$\text{因为} \quad l_0 = t_1 v_f$$

所以 $t_1 = 2 / v_f \cdot \sqrt{h_f^2 + x^2} - (l_0 - 2x) / v_a$ ，为使 x 值最小，可取 t_1 对 x 的导数等于 0，则

$$\begin{aligned} dt_1 / dx &= 2 / v_f \cdot 2x / (2\sqrt{h_f^2 + x^2}) - 2 / v_a = 2x / (v_f \sqrt{h_f^2 + x^2}) - 2 / v_a = 0 \\ x / (v_f \sqrt{h_f^2 + x^2}) &= 1 / v_a \end{aligned} \quad (2)$$

将(2)式整理后得 $x = h_f v_f / \sqrt{v_a^2 - v_f^2}$

将 x 代入(1)式得

$$l_0 / v_f = 2 / v_f \cdot \sqrt{h_f^2 + v_f^2 h_f^2 / (v_a^2 - v_f^2)} + l_0 / v_a - 2h_f v_f / (v_a \cdot \sqrt{v_a^2 - v_f^2}) \quad (3)$$

$$\text{将(3)式整理后得} \quad h_f = l_0 / 2 \cdot \sqrt{(v_a - v_f) / (v_a + v_f)} \quad (4)$$

$$\text{因为} \quad v_f = b_1; v_a = b_2$$

$$\text{所以} \quad h_f = l_0 / 2 \cdot \sqrt{(b_2 - b_1) / (b_2 + b_1)}$$

9 灌注桩混凝土缺陷检测

9.1 一般规定

9.1.1 一般灌注桩的直径(或边长)多在 0.6m 以上，由于灌注桩的特定施工条件，在混凝土灌注过程中，易产生夹泥、颈缩、空洞等缺陷。从一些模拟实验和大量工程实测结果来看，采用超声法检测灌注桩混凝土缺陷是较为有效的方法。

9.2 埋设超声检测管

9.2.1 声测管的埋设数量应能保证沿灌注桩横断面有足够的检测范围，同时还要保证超声仪能够接收到清晰的信号。

9.2.2 限制 PVC 塑料管的使用范围，是因为 PVC 塑料管的刚度小且容易损坏。采用外加套管连接是为了保持通直且可避免接头处内壁存在突出物。管的上下端封闭是为了避免在施工时水泥浆和砂土等杂物堵塞声测管。

9.2.3 管的上端高于桩顶表面且同一根桩的声测管外露高度相同，是为了检测方便和易于控制换能器在声测管中的位置。

9.2.4 为确保浇筑混凝土过程中声测管不变形不移位，声测管应做牢靠地固定，一般采用绑扎的方法进行固定，不宜将钢管直接焊在固定点上，这样容易烧穿钢管，在钢管内壁形成焊瘤，影响钢管的通直。

9.3 检测前的准备

9.3.1~9.3.4 检测前应做好充分准备工作。了解有关资料，便于检测数据的分析。向管内注清水作为耦合剂，以保证换能器与管壁之间的良好耦合。在放入换能器之前，应先检查各声测管是否通畅，以免测试过程中换能器被卡在管内。

9.4 检测方法

9.4.1 灌注桩直径较大时，宜选择主频较低的换能器，仪器发射电压调到较高档，以保证有较强的接收信号。将 T、R 换能器分别放入两个声测管的顶部或底部，以一定高程等距离同步向下或向上移动，逐点检测。当相邻测点的检测数据存在明显差异时，应及时校核换能器的高度，避免发生差错。必要时可以取出换能器检验仪器系统工作是否正常。

9.4.2 对数据可疑的部位进行复测，是为了检查测试操作是否有错误，当确认测试操作无误时，便可以通过对测、交叉斜测及扇形扫测的方法找出存在异常数据的范围。

9.5 数据处理与判断

9.5.1 数据处理

接收信号主频的计算：用模拟式仪器检测时，可按(9.5.1—3)式计算；如果用数字式仪器检测，则由仪器经 FFT 计算后直接显示出来。

首波幅度：模拟式仪器，用衰减器读出；数字式仪器，自动判读后直接显示出来。

9.5.2~9.5.4 根据检测数据绘制相应的声时(或声速)—深度曲线；波幅—深度曲线或主频—深度曲线以及 Z—H 曲线，结合异常测点判断，综合分析判定缺陷的位置和范围。对于较大的缺陷，可以采用工程钻机对灌注桩进行钻芯取样，以验证检测结果，同时还可以对缺陷部位进行压浆处理。

9.5.5 以混凝土声速的离差系数评价桩身混凝土质量的匀质性，只能反映施工过程中混凝土的匀质性，并不能反映混凝土强度的高低。

9.5.6 根据各声学参数的综合分析，判定单个桩身混凝土是否存在缺陷或存在缺陷的位置、范围，并根据缺陷性质、大小及其对桩身危害程度，可对桩身完整性作出定性的评价。一般说来，I、IV类桩容易划分，对无或基本无缺陷的桩，桩身完整性好，则划为 I 类桩，对完全断或接近断开的桩则划为 IV 类桩。但对于 II、III 类桩的划分难度较大，局部小缺陷与局部严重缺陷的区分，宜从以下三个方面来综合分析：①桩身同一横截面上缺陷所占面积；②整个桩身存在缺陷的数量及其分散情况；③缺陷沿桩身高度方向的分布位置。结合桩的受力状态，分析缺陷对桩身完整性的损害程度进行划分。

10 钢管混凝土缺陷检测

10.1 一般规定

10.1.1 对于胶结不良的钢管混凝土，由于管壁与混凝土之间存在空气介质，声波在此处产生反射或绕钢管壁传播，导致检测数据和缺陷判断的错误。

10.1.2 由于钢的声速远快于混凝土的声速，如果测点布置不合理或钢管内混凝土声速较低，仪器接收到的首波信号很可能是沿钢管壁传播的，此时便不能反映钢管内混凝土的质量情况。

10.1.3 规定钢管的表面光洁、无严重锈蚀,旨在保证检测时换能器与钢管外壁之间声耦合良好,减少声能的意外损失,以增强检测数据的可比性。

10.2 检测方法

10.2.1 钢管混凝土检测示意图说明测点的布置方式,无论在同一横截面对测还是保持一个较小的倾斜角度进行斜测,每对测点的连线都必须通过钢管混凝土中心。

10.2.2 选择钢管与混凝土胶结良好的部位布置测点,是为了保证发射声波能较充分地沿径向穿透钢管混凝土,从而反映核心混凝土的质量情况。因此,在检测前应采用简易方法先检查钢管与核心混凝土的胶结情况,以确定测点的位置。

10.2.3 在钢管圆周和母线方向等分、等距画线布置测点,其目的是为了保证每一对测点的直达声波都通过钢管混凝土中心,并使测点布置均匀。

10.2.4 通过圆心逐断面径向对测,是钢管混凝土最基本的检测方法,可直接用钢管标称外径作为测距计算声速,便于检测数据的分析比较。

10.2.5 对于大直径的钢管混凝土,为了提高测试灵敏度,可按照本规程第9章,预埋声测管进行检测。

10.3 数据处理及判断

10.3.1 与6.3.1和6.3.2条文说明同。

10.3.2 当测点较少,无法用统计方法判别异常值时,可用每个测点的声速、波幅、主频等参数与相同混凝土、相同直径的正常钢管混凝土声学参数进行比较,综合分析判别所测部位的核心混凝土是否存在缺陷。

附录 A 测量空气声速进行声时计量

在超声测试中,仪器的计时系统是否正常,操作者的测读方法是否正确,都直接影响声时读数的可靠性。由于空气的声速除受温度影响外,受其它因素的影响很小,因此用测量空气声速的办法来检验仪器的计时性能和操作者的测读方法是行之有效的。实践证明,只要仪器正常,操作人员测读正确,空气声速的测量值就十分接近标准值,其相对误差小于 $\pm 0.5\%$ 。如果相对误差较大,应首先检查测距和声时的测量是否有误,然后再检查仪器有关电路。

附录 B 径向振动式换能器声时初读数(t_{00})的测量

由于两个径向振动式换能器不能相互直接耦合,也不能耦合于标准棒上测其声时初读数,只能置于水中的同一水平高度,以两个换能器之间两次不同距离测得的声时值按式(B.0.1)计算,如利用钻孔测量混凝土声时,声时初读数就按(B.0.2)式计算,如果利用预埋声测管测量混凝土声时,初读数中还包含声测管所用材料的2倍壁厚的声延时,即按(B.0.3)式计算。

表B.0.1的数据是根据《物理手册》中水的声速(V_w)与其温度(T_w)之间的相关直线式: $V_w=1.433+0.0252T_w$ 计算而得。

附录 C 空洞尺寸估算方法

在混凝土缺陷检测中，有时需要对内部空洞尺寸进行估算。为便于计算，将混凝土中的空洞理想化为“球形”或者是其轴线垂直于声波传播方向的“圆柱体”，并且视空洞周围为正常混凝土，这与实际情况存在较大差异，所以计算结果只能是大致尺寸。不过经模拟试验和工程实测表明，用该方法粗略估算空洞尺寸是可行的。

表 C.0.1 中的数据是根据图 C.0.1 的原理推导计算而得：

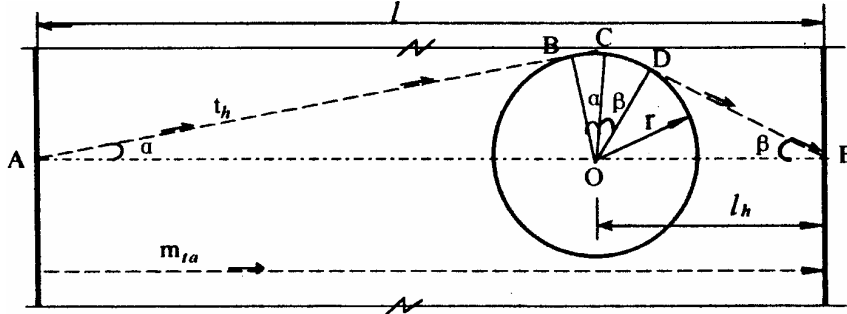


图 C.0.1

$$t_h - m_{ta} = \Delta t = [(AB + \widehat{BC} + \widehat{CD} + DE) - l] / V_c$$

因为 $V_c = l / m_{ta}$

$$AB = \sqrt{(l - l_h)^2 - r^2} \sqrt{l^2 - 2ll_h + l_h^2 - r^2}$$

$$\widehat{BC} = a \times \alpha \text{ (弧度)} = r \times 0.01745 \sin^{-1} [\alpha / (l - l_h)]$$

$$\widehat{CD} = a \times \beta \text{ (弧度)} = r \times 0.01745 \sin^{-1} [r / l_h]$$

$$DE = \sqrt{l_h^2 - r^2}$$

$$\Delta t / m_{ta} = \sqrt{1 - 2l_h / l + (l_h / l)^2 - (r / l)^2} + r / l \times 0.01745 [\sin^{-1} (l / r - l_h / r)^{-1} + \sin^{-1} (r / l_h)] + \sqrt{(l_h / l)^2 - (r / l)^2} - 1$$

$$\text{设 } \Delta t / m_{ta} = X; l_h / l = Y; r / l = Z; r / l_h = l \cdot Z / l \cdot y = Z / Y$$

$$\text{则 } X = \sqrt{(1 - y)^2 - Z^2} + \sqrt{y^2 - Z^2} + Z \cdot 0.01745 \times [\sin^{-1} (Z / (1 - y)) + \sin^{-1} (Z / y)] - 1$$

当结构的被测部位只有一对可供测试的表面时，因为 l_h 无法确定，此时可采用 C.0.1 式计算空洞尺寸。此式是假设空洞位于超声检测路径的正中央推导出来的，实践证明，用此式估算的空洞尺寸，比由表 C.0.1 估算的结果略大一些。