



CECS 21:2000

中国工程建设标准化协会标准

超声法检测混凝土缺陷 技术规程

Technical specification for inspection of
Concrete defects by ultrasonic method

条文说明

筑龙网

2000 北京

中国工程建设标准化协会标准

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

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

施行日期：2001年1月1日

筑龙网

2000 北京

目 录

1	总 则	5
3	超声波检测设备	6
3.1	波检测仪的技术要求	6
3.2	换能器的技术要求	8
3.3	超声波检测仪的检定	8
4	声学参数测量	9
4.1	一般规定	9
4.2	声学参数测量	10
5	裂缝深度检测	12
5.1	一般规定	12
5.2	单面平测法	12
5.3	双面斜测法	13
5.4	钻孔对测法	13
6	不密实区和空洞检测	15
6.1	一般规定	15
6.2	测试方法	15
6.3	数据处理及判断	16
7	混凝土结合面测质量检测	17
7.1	一般规定	17
7.2	测试方法	17
7.3	数据处理及判断	17
8	表面损伤层检测	19
8.1	一般规定	19
8.2	测试方法	19
8.3	数据处理及判断	20
9	灌注桩混凝土缺陷检测	22

9.1	一般规定	22
9.2	埋设超声检测管	22
9.3	检测前的准备	22
9.4	检测方法	23
9.5	数据处理与判断	23
10	钢管混凝土缺陷检测	25
10.1	一般规定	25
10.2	检测方法	25
10.3	数据处理及判断	26
附录 A	测量空气声速进行声时计算	27
附录 B	径向振动式换能器声时初读数 (T_{00}) 的测目	28
附录 C	空洞尺寸估算方法	29

1 总 则

1.0.2、1.2.3 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 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 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，但当信号软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 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 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 20~250kHz 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序时读数的大误差, 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 混凝土上缺陷超声检测中，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）。

3.2.2 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。

3.2.3 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有关外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，使测得声时、波幅不能反映混凝土的实际质量情况。通过理论，当 T、R 换能器的连线与钢筋的最小距离大于测距的 $L/6$ 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软弱信号，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于动游标读数。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 $\pm 1\%$ ，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 500m 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° 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，因为首波出现反相对的测距与被测裂缝深度存在一定关系，记录了反相对的测距，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对的测距，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_{hc} 。

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测的验证结果看出，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 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的跨中或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 20~40 kHz，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 为异常值后就停止了判断，实际上排列在 X 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 被判为异常值后再继续对 $X_1 \sim X_{n-1}$ 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 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： $P_3 = 1/2\sqrt{1/2n}$ 。表 6.3.2 中的 λ_2 、 λ_3 值，是根据统计数据的个数“ n ”，分别由 $\Phi(\lambda_2) = 1/2\sqrt{1/n}$ 、 $\Phi(\lambda_3) = 1/2\sqrt{1/2n}$ 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 混凝土结合面质量检测

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，所以修门稿中未规定具体间隔时间。狻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，则声波传播将不会芽过结合面，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

凝本时，声学参效应无明显差异。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侵蚀，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，换能器主频频主愈高，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_n 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，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

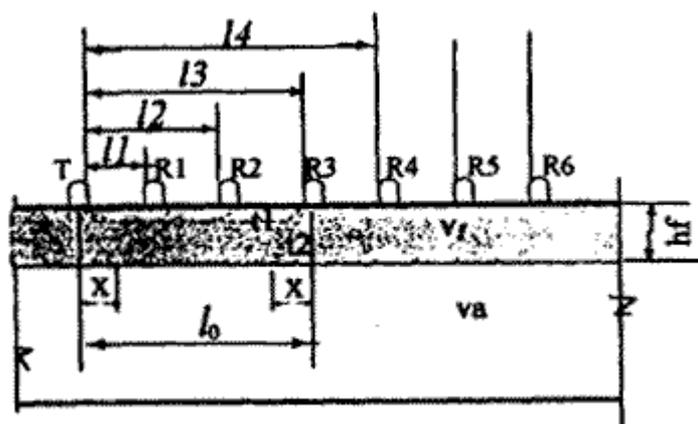


图 8.3.2 检测损伤层厚度示意图

器，当 T、R 换能器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 $t_1 \geq t_2$ 。

由图可以看出 $t_1 = L_0 / V_f$

$$t_2 = 2 \cdot \sqrt{h_f^2 + x^2} / V_f + (L_0 - 2X) / V_a$$

$$\text{则 } L_0 / V_f = 2 / V_f \sqrt{h_f^2 + x^2} + (L_0 - 2X) / V_a \quad (1)$$

因为 $L_0 = t_1 V_f$

所以 $t_1 = 2 / V_f \sqrt{h_f^2 + x^2} - (L_0 - 2X) / V_a$ ，为使 X 值最小，可取 t_1 对 X 的导数等于 0，

$$\text{则 } dt_1/dx = 2 / V_f \cdot 2x / (\sqrt{h_f^2 + x^2}) - 2 / V_a$$

$$= 2x / (V_f \sqrt{h_f^2 + x^2}) - 2 / V_a = 0$$

$$x/(V_f \sqrt{h_f^2 + x^2}) = 1/V_a \quad (2)$$

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

$$L_0/V_f = 2/V_f \cdot \sqrt{h_f^2 + V_f^2 h_f^2 / V_a^2 - V_f^2} + L_0/V_a - 2 h_f V_f / (V_a \cdot \sqrt{V_a^2 - V_f^2}) \quad (3)$$

将 (3) 式整理后得 $h_f = L_0/2 \cdot \sqrt{(V_a - V_f)/(V_a + V_f)}$ (4)

因为 $V_f = b_1$; $V_a = b_2$

所以 $V_f = L_0/2 \cdot \sqrt{(b_2 - b_1)/(b_2 + b_1)}$

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 检测的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美好耦合。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 FTT 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算

在超声测试中，仪器的训·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}) 的测目

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： $V_w=1.433+0.0252 T_w$ 计算而得。

附录 C 空洞尺寸估算方法

在混凝土缺陷检测中，有时需要对内部空间尺寸进行估算。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，着与实际情况存在较大差异，所以计算结果只能是大致尺寸。不过经模拟实验和工程实测表明，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：

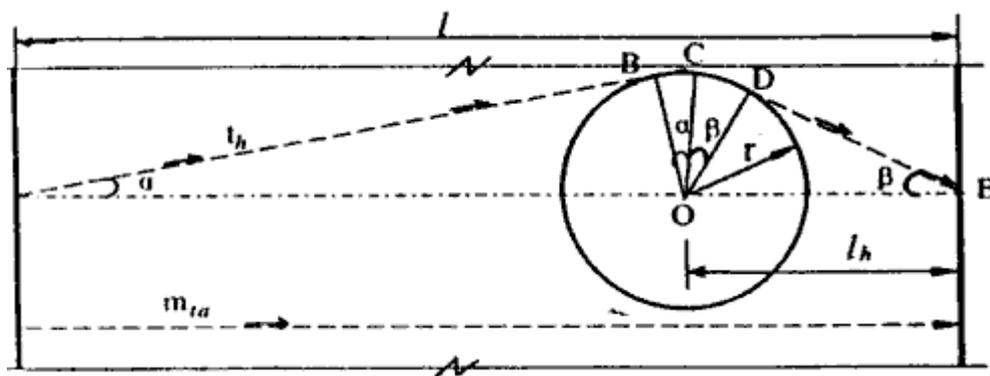


图 C.0.1

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

因为： $V_c = L / m_{ta}$

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

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

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

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

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

设 $\Delta t / m_{ta} = X$; $L_h / L = Y$; $r / L = Z$; $r / L_h = L \cdot Z / L \cdot y = Z / Y$

$$\begin{aligned} \text{则 } X = & \sqrt{(1 - y)^2 - Z^2} + \sqrt{y^2 - Z^2} + Z * 0.01745 \\ & x [\sin^{-1}(Z / (1 - y)) + \sin^{-1}(Z / y)] - 1 \end{aligned}$$

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

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。