



T/CECS21-2024

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**

中国计划出版社

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

T/CECS21-2024

主编单位：陕西省建筑科学研究院有限公司

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：2025年5月1日

中国计划出版社

2024 北京

中国工程建设标准化协会公告

第 2275 号

关于发布《超声法检测混凝土缺陷技术规程》的公告

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2017 年第一批工程建设协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字〔2017〕014 号）的要求，由陕西省建筑科学研究院有限公司、同济大学、中国建筑科学研究院有限公司等单位编制的《超声法检测混凝土缺陷技术规程》，经协会混凝土结构专业委员会组织审查，现批准发布，编号为 T/CECS21-2024，自 2025 年 5 月 1 日起施行。原《超声法检测混凝土缺陷技术规程》CECS21:2000 同时废止。

中国工程建设标准化协会

二〇二四年十二月二十日

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2017 年第一批工程建设协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字〔2017〕014 号）的要求，为满足和适应建设工程混凝土缺陷检测需要和该项技术发展，规程编制组在广泛调查和征求意见的基础上总结了近二十多年检测技术最新应用成果和经验，并通过一系列专项试验研究，对《超声法检测混凝土缺陷技术规程》CECS21:2000 进行了修订。

本规程是对原《超声法检测混凝土缺陷技术规程》CECS21:2000 的修订。本次修订的主要内容：

1. 取消了模拟式混凝土超声波检测仪相关内容；
2. 取消了附录 C 空洞尺寸估算方法；
3. 增加了波形变化系数判定参数；
4. 修订了数据处理和异常值判定方法；
5. 修订并完善了钢—混凝土组合结构缺陷检测方法；
6. 增加了装配式混凝土结构缺陷检测方法；
7. 修订并完善了大体积混凝土构件和灌注桩缺陷检测方法，取消了灌注桩完整性等级评定方法；
8. 增加了混凝土缺陷处理意见。

本规程共分为 10 章和 2 个附录。10 章主要技术内容包括总则、术语和符号、超声波检测设备、声学参数测量和计算、数据处理和异常值判定方法、一般混凝土构件缺陷检测、大体积混凝土构件和灌注桩缺陷检测、钢—混凝土组合结构缺陷检测、装配式混凝土结构缺陷检测和混凝土缺陷处理意见；2 个附录主要技术内容包括仪器计时系统校准和声时初读数测量。

请注意本规程的某些内容可能直接或间接涉及到某些专利，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程由中国工程建设标准化协会混凝土结构专业委员会归口管理，由陕西省建筑科学研究院有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中，如有意见或建议，请反馈给陕西省建筑科学研究院有限公司（地址：陕西省西安市莲湖区环城西路北段 272 号，邮政编码 710082，邮箱 1770157378@qq.com）。

主编单位：陕西省建筑科学研究院有限公司

（以下参编单位、个人均未排名）

参编单位： 同济大学

中国建筑科学研究院有限公司

水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院

北京市建设工程质量第三检测所有限责任公司

重庆市建筑科学研究院有限公司

上海同济检测技术有限公司

重庆市渝北区建设工程质量检测所

昆山市建设工程质量检测中心

北京海创高科科技有限公司

北京市康科瑞工程检测技术有限公司

北京智博联科技股份有限公司

浙江省建筑科学设计研究院有限公司

上海立胜工程检测技术有限公司

北京宇通时代检测技术有限公司

北京市建设工程质量第一检测所有限责任公司

绍兴市越城区建设工程质量监督检测有限公司

主要起草人： 李乃平 张治泰 郭晓潞 张仁瑜

陈忠华 彭国荣 林文修 童寿兴

晏维江 顾 盛 杨利刚 管 钧

何国胜 翟延波 陆 进 孙刚柱

凡 俊 黄建东 来朝辉 任辰昊

张 彬 刘欣洋 郭 栋 姚选社

颜丙山 苏定勤

目 次

1	总 则	(1)
2	术语和符号	(1)
2.1	术语	(1)
2.2	符号	(3)
3	超声波检测设备	(4)
3.1	超声波检测仪技术要求	(4)
3.2	换能器技术要求	(4)
3.3	检定、校准和保养	(5)
4	声学参数测量和计算	(6)
4.1	一般规定	(6)
4.2	声学参数测量	(6)
4.3	声学参数计算	(7)
5	数据处理和异常值判定方法	(10)
5.1	一般规定	(10)
5.2	对比法异常值判定	(10)
5.3	概率法异常值判定	(11)
6	一般混凝土构件缺陷检测	(14)
6.1	一般规定	(14)
6.2	内部不密实区和空洞的检测	(14)
6.3	裂缝深度检测	(15)
6.4	结合面缺陷检测	(18)
6.5	表面损伤层检测	(19)

7	大体积混凝土构件和灌注桩缺陷检测	(23)
7.1	一般规定	(23)
7.2	大体积混凝土构件缺陷检测	(23)
7.3	灌注桩混凝土缺陷检测	(27)
8	钢—混凝土组合结构缺陷检测	(30)
8.1	一般规定	(30)
8.2	钢管混凝土缺陷检测	(30)
8.3	钢骨混凝土缺陷检测	(33)
9	装配式混凝土结构缺陷检测	(35)
9.1	一般规定	(35)
9.2	后浇混凝土或灌浆料缺陷检测	(35)
9.3	钢筋连接部位套筒或浆锚孔道灌浆饱满度检测	(37)
10	混凝土缺陷处理意见	(39)
附录 A	仪器计时系统校准	(40)
附录 B	声时初读数测量	(42)
	本规程用词说明	(44)
	引用标准名录	(45)
附：	条文说明	(46)

Contents

1	General provisions.....	(1)
2	Terms and symbols.....	(1)
2.1	Terms.....	(1)
2.2	Symbols.....	(3)
3	Ultrasonic test equipment.....	(4)
3.1	Technical requirements for ultrasonic detectors.....	(4)
3.2	Technical requirements for transducers.....	(4)
3.3	Verification, calibration and maintenance.....	(5)
4	Measurement and calculation of acoustic parameters.....	(6)
4.1	General requirements.....	(6)
4.2	Measurement of acoustic parameters.....	(6)
4.3	Calculation of acoustic parameters.....	(7)
5	Data processing and abnormal value determination method.....	(10)
5.1	General requirements.....	(10)
5.2	Abnormal value determination by the comparative method.....	(10)
5.3	Abnormal value determination by the probability method.....	(11)
6	Defect detection of general concrete membem	(14)
6.1	General requirements.....	(14)
6.2	Detection of concrete undense areas and cavities.....	(14)
6.3	Detection of concrete crack depth.....	(15)
6.4	Defect detection of concrete joint surface.....	(18)
6.5	Detection of superficial damage layer on concrete.....	(19)
7	Defect detection of large volume concrete member and cast-in-place pile.....	(23)
7.1	General requirements.....	(23)
7.2	Defect detection of large volume concrete member.....	(23)
7.3	Defect detection of cast-in-place pile concrete.....	(27)

8	Defect detection of steel-concrete composite.....	(30)
8.1	General requirements.....	(30)
8.2	Defect detection of concrete-filled steel tube.....	(30)
8.3	Defect detection of steel reinforced concrete.....	(33)
9	Defect detection of prefabricated concrete structure	(35)
9.1	General requirements.....	(35)
9.2	Defect detection of post cast concrete or grouting materials.....	(35)
9.3	Detection of grouting fullness for sleeve or rebar lap grouting anchor holes.....	(37)
10	Opinions on handling concrete defects.....	(39)
	Appendix A Calibration of instrument timing system.....	(40)
	Appendix B Measurement of acoustic sound-time initial reading	(44)
	Explanation of wording in this specification.....	(44)
	List of quoted standards.....	(45)
	Addition:Explanation of provisions.....	(46)

1 总 则

1.0.1 为了规范超声法检测混凝土缺陷的检测和判定方法，提高检测结果的准确性，特制订本规程。本规程适用于超声法检测混凝土缺陷。

1.0.2 超声法检测的混凝土缺陷系指构件内部混凝土不密实区（或低强度区）、空洞位置和范围、裂缝深度、结合面缺陷以及表面损伤层厚度等。它涉及一般混凝土构件、大体积混凝土构件、灌注桩等地下结构构件、钢—混凝土组合结构以及装配式混凝土结构等缺陷。

1.0.3 超声法系指采用带波形显示功能、数据存储功能的数字式混凝土超声波检测仪，通过测量超声脉冲纵波在混凝土中的传播时间（简称声时）、首波幅度（简称波幅）、接收波形的频率（简称主频）和波形变化系数等参数，并根据这些参数值（或计算值）的相对变化，来判定混凝土缺陷的方法。

1.0.4 采用超声法检测混凝土缺陷，除应执行本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 混凝土缺陷 concrete defects

系指混凝土连续性、完整性、均质性等遭到明显破坏，并在一定程度影响结构安全性和耐久性的内部不密实区（或低强度区）和空洞、裂缝、结合面缺陷以及表面损伤层等。

2.1.2 声速 velocity of sound

超声脉冲波在混凝土中单位时间传播的距离。

2.1.3 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。

2.1.4 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，由于声波的扩散、吸收和散

射等因素引起的声压减弱。

2.1.5 样本波形 sample waveform

从仪器接收的时域波形中，抽取一个区段用以计算波形变化系数的波形，称之为样本波形。样本波形的区段长度（以下简称样本波形长度）一般由首波起跳点至 1~6 个周期的波形长度。

2.1.6 基准波形 reference waveform

同条件测点的样本波形中，某一远离缺陷怀疑部位的正常混凝土测点（对比点）波形，称之为基准波形。

2.1.7 波形变化系数 waveform variation coefficient

同条件测点的样本波形中，任一测点波形相对于基准波形，通过标准化欧氏距离公式计算的数值，称之为波形变化系数。

2.1.8 主频 main frequency

将接收信号的时域波形通过傅里叶变换，在频率—幅度谱分布中幅度最大的频率值，称之为主频。

2.1.9 钢筋浆锚搭接连接 rebar lapping in grout-filled hole

装配式混凝土结构中，在预制构件预留的钢筋搭接浆锚孔道中插入搭接钢筋，通过注入灌浆料以实现钢筋搭接的连接方式。钢筋搭接浆锚孔道一般采用波纹管制作。

2.1.10 钢筋套筒灌浆连接 grout sleeve splicing of rebars

装配式混凝土结构中，在钢筋连接用套筒中插入单根带肋钢筋并注入灌浆料，通过灌浆料硬化形成钢筋对接的连接方式。钢筋连接用套筒是采用铸造工艺或机械加工工艺制造的金属套筒。

2.1.11 灌浆饱满度 grouting plumpness

装配式混凝土结构中，预制剪力墙、柱竖向钢筋连接用套筒或浆锚搭接孔道在灌浆结束并稳定后，套筒或浆锚孔道内灌浆料液面到达出浆口的程度。

2.1.12 预制剪力墙底部接缝 bottom joint of precast shear wall

装配式混凝土结构中，预制剪力墙底部与其下部构件之间预留的水平间隙，其高度不宜小于 20mm，一般注入灌浆料或采用坐浆料填实。

2.1.13 后浇混凝土叠合面 laminated surface

装配式混凝土结构中，现场后浇混凝土与预制构件之间的结合面。

2.2 符号

A_i ——第 i 点接收信号的首波幅度值；

f_i ——第 i 点接收信号的主频值；

t_i ——第 i 点混凝土声时值；

l_i ——第 i 点对测或斜测距离；

l'_i ——第 i 点平测时两厚度振动式换能器中心连线内边缘间距离，或两径向振动式换能器（或声测孔、声测管）中心连线内边缘间距离；

v_i ——第 i 点混凝土声速值；

D_i ——第 i 点波形变化系数；

x_i ——第 i 点某一判定参数值（如 A_i 、 t_i 、 v_i 、 f_i 、 D_i 等）；

x_0 、 k_m ——分别为某一判定参数异常值的判定值、判定系数；

T_k ——检测环境空气摄氏温度；

v_k ——空气声速标准值；

v_m ——空气声速测量值；

t_0 ——采用厚度振动式换能器声时初读数测量值；

t_{00} ——采用径向振动式换能器声时初读数测量值；

h_c ——裂缝深度检测值；

h_d ——表面损伤层厚度。

3 超声波检测设备

3.1 超声波检测仪技术要求

3.1.1 用于混凝土缺陷检测的超声波检测仪应为数字式混凝土超声波检测仪（以下简称数字式超声仪）。数字式超声仪应符合现行行业标准《混凝土超声波检测仪》JG/T 5004 有关规定，并具有产品合格证、出厂检定证书。

3.1.2 数字式超声仪应符合以下要求：

- 1 具有波形清晰、显示稳定的示波装置；
- 2 具有手动游标测读和自动测读两种声学参数值测读功能，且在自动测读时应有首波声时、波幅测读位置的标记线；
- 3 波形显示幅度分辨率不应低于 1/256，并具有自动化采集、存储和输出波形数据的功能。波形最大采样长度应不小于 2k bytes；
- 4 声时测量范围为 $0.1\mu\text{s}\sim 9999\mu\text{s}$ ，最小分度为 $0.1\mu\text{s}$ 。在测试条件不变的情况下，1h 内每隔 5min 测读一次声时，其重复性差异应不大于 2 个采样点间隔；
- 5 测量波幅的总幅度不小于 100dB，最小精度不大于 1dB；
- 6 仪器接收灵敏度（在信噪比为 3:1 时）不大于 $30\mu\text{V}$ ；
- 7 接收信号系统的频带宽度范围不小于 10kHz~500kHz；
- 8 仪器应具有对接收信号波形智能化处理、频率幅度谱分析等功能；

3.1.3 数字式超声仪能在以下条件正常工作：

- 1 电源电压波动范围在标称值 $\pm 10\%$ 的情况下；
- 2 连续正常工作时间不少于 4h；
- 3 环境温度 $0\sim 40^{\circ}\text{C}$ ；空气相对湿度不大于 80%。

3.2 换能器技术要求

3.2.1 混凝土缺陷检测常用换能器有两种类型：厚度振动式和径向振动式换能器。

- 1 厚度振动式换能器常采用标称频率为 50kHz~500kHz，径向振动式换能器常采用标称频率为 20kHz~100kHz；换能器直径一般介于 10mm~40mm 之间；
- 2 不同直径、类型和标称频率的换能器应根据现场检测条件、检测项目的具体要

求来选择。

3.2.2 在检测时若仪器接收信号较弱，除了增大仪器发射电压外，应采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不应大于 $\pm 10\%$ ；用于水中的换能器，其水密性应在 1MPa 水压下不渗漏。

3.3 检定、校准和保养

3.3.1 数字式超声仪存在下列情况之一时应进行检定：

- 1 新购仪器在启用前；
- 2 超过检定有效期（一般为 1 年）；
- 3 仪器经过维修或校准结果不正常；
- 4 检测过程发现某参数值反常或读数不稳定。

3.3.2 数字式超声仪在使用前可按下列方法进行校准：

- 1 仪器计时系统校准：

首先按本规程附录 A 求得空气声速测量值，然后将该值与测试环境空气声速标准值相比较，若二者相对误差的绝对值不大于 0.5%，即表明仪器计时系统正常。

- 2 仪器波幅值校准：

将两换能器辐射面对准并间隔一定距离，使首波信号幅度至仪器显示屏一定高度后停止采样、保存波幅数据，并标记好该高度位置；然后在保证仪器增益等参数不变的条件下，改变两换能器间距使首波高度降低原来一半或升高一倍时，再停止采样、保存波幅数据。若前、后两次波幅值相差 $\pm 6\text{dB}$ 时（精确至 1dB），即表明该仪器波幅计量系统正常。

3.3.3 数字式超声仪应按下列规定保养：

- 1 仪器在搬运过程中应注意防震；若仪器较长时间不用时，应每月至少通电一次，且每次通电时间不少于 1h；

- 2 仪器和换能器使用完毕后应及时擦去表面灰尘或油污，晾干后放入箱内，存放于通风、阴凉干燥处。

4 声学参数测量和计算

4.1 一般规定

4.1.1 检测前应进行现场调查和资料调查：

- 1 工程概况、检测内容、委托要求和目的；
- 2 被测部位所处环境、条件、混凝土外观质量和怀疑部位缺陷产生原因、类型和大小范围；
- 3 被测结构构件类型、相关尺寸和构造特点等；
- 4 被测部位所用材料种类、强度以及施工日期、工艺和养护情况等。

4.1.2 根据 4.1.1 条调查结果制订检测方案，确定混凝土缺陷测试区域（简称测区）并布置测点。

4.1.3 测区混凝土表面（与换能器接触面）应清洁、平整，必要时可采用砂轮等工具进行磨平；若测区表面存在较大外观缺陷，可采用无收缩高强水泥砂浆等材料进行修补。

4.1.4 当采用厚度振动式换能器检测时，一般采用黄油等材料为耦合剂。检测过程中应始终保持换能器辐射面与混凝土表面紧密接触，耦合剂中不得夹杂粉尘、泥砂等杂质。

4.1.5 在满足首波信号清晰可辨能测读的条件下，应优先选用标称频率较高的换能器；若测试距离较大，可提高仪器的发射电压。

4.1.6 对于同一构件或同批构件，检测过程中所用仪器设备系统及参数设置应固定保持不变。

4.2 声学参数测量

4.2.1 声时、波幅测量

1 自动模式测量：

声时、波幅自动测读方法见仪器说明书。一般在自动测读模式下，如果声时测读光标未能对准首波起跳点位置，或波幅测读光标与首波（前半波）峰顶或谷底存在差异时，应调节仪器增益、水平控制线等按键，直至光标可正确标记声时、幅度的测读位置才可停止采样、保存。

2 手动模式测量：

声时、波幅手动测读方法见仪器说明书。如受环境和其它因素影响，在自动测读模式下操作仪器按键，首波声时、波幅测读光标仍难以正确标记各自位置，这时应切换为手动测读模式，即在静态波形下调整手动游标，使声时游标至首波起跳点，波幅游标与首波峰顶或谷底相切，即可保存。

4.2.2 主频测量

1 自动模式测量：

一般数字式超声仪自带了频谱分析软件，当波形采样长度设定后，仪器会自动将接收到的时域波形通过该软件计算分析得到主频值。

2 手动模式测量：

在静态接收波形下，采用手动声时游标测读首波一个完整周期的声时差（也称为周期），该周期的倒数即为手工测读的主频值。

4.2.3 样本波形数据采样：

1 在测读首波声时、波幅的同时，若被选样本波形在其长度范围不出现超屏时，即可保存；

2 当受环境和其它因素影响，首波声时、波幅在测读的同时难以保证样本波形不超屏，故需要进行二次操作。首先测读首波声时、波幅并保存；然后调节仪器增益、水平控制线等按键，使被选样本波形在其长度范围不超屏时，即可保存。

4.2.4 声波传播距离测量：

1 声波传播距离，简称为测距。一般采用二级精度的直尺或钢卷尺进行直接或间接测量。测量误差应不大于 $\pm 1\%$ ；

当采用厚度振动式换能器检测时，对测或斜测的距离为两换能器中心连线之间的距离，平测距离为两换能器中心连线辐射端面内边缘之间的距离；当采用径向振动式换能器检测时，测距为两换能器中心连线内边缘，或声测管（或声测孔）的内边缘之间的距离。

4.3 声学参数计算

4.3.1 混凝土声时计算：

1 检测前应首先测量仪器声时初读数。采用厚度振动式换能器或径向振动式换能

器声时初读数测量方法按本规程附录 B 相关规定执行。

2 将声时初读数测量结果输入到仪器“零声时”对话框并确认后，在检测时仪器会自动扣除声时初读数，直接得到第 i 点混凝土声时 (t_i)。

4.3.2 混凝土声速按下式计算：

$$v_i = \frac{l_i}{t_i} \quad (4.3.2)$$

式中： v_i ——第 i 点混凝土声速 (m/s)；

l_i ——第 i 点距离 (mm)；

t_i ——第 i 点混凝土声时 (μs)；

4.3.3 样本波形数据计算：

1 样本波形数据总数 (N) 按下式计算：

$$N = \frac{l_s}{d_s} \quad (4.3.3)$$

式中： N ——被选样本波形在其长度区间波形数据的总数（或采样点总数）（个）；

l_s ——被选样本波形长度（或采样长度）（ μs ）；

d_s ——采样点间隔（检测前由仪器事先设定的参数）（ μs ）。

2 同条件基准波和第 i 点波形数据统计量计算：

1) 同条件基准波和第 i 点波形（样本波形数据）可构成以下有序数列：

$$\text{基准波: } \{a_{0,k}\}: a_{0,1}, a_{0,2}, \dots, a_{0,k}, \dots, x_{0,N} \quad (4.3.4-1)$$

$$\text{第 } i \text{ 点波形: } \{a_{i,k}\}: a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,k}, \dots, x_{i,N} \quad (4.3.4-2)$$

式中： $a_{0,1}, a_{0,2}, \dots, a_{0,k}, \dots, x_{0,N}$ ——基准波数列 $\{a_{0,k}\}$ 中各采样点对应的波形数据；

$a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,k}, \dots, x_{i,N}$ ——第 i 点波形数列 $\{a_{i,k}\}$ 中各采样点对应的波形数据；

$a_{0,1}$ 、 $a_{i,1}$ ——分别代表基准波、第 i 点波形在首波起跳点对应的波形数据；

$a_{0,N}$ 、 $x_{i,N}$ ——分别代表基准波、第 i 点波形在被选样本波形的采样长度对应的波形数据。

2) 同条件基准波、第 i 点波形数据的平均值、标准差分别按下式计算：

$$\bar{a}_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N a_{0,k} \quad (4.3.4-3)$$

$$\bar{a}_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N a_{i,k} \quad (4.3.4-4)$$

$$s_0 = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (a_{0,k} - \bar{a}_0)^2} \quad (4.3.4-5)$$

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (a_{i,k} - \bar{a}_i)^2} \quad (4.3.4-6)$$

式中： $\bar{a}_0$ 、 $\bar{a}_i$ ——分别为基准波、第 i 点波形数据的平均值；

s_0 、 s_i ——分别为基准波、第 i 点波形数据的标准差；

$a_{0,k}$ 、 $a_{i,k}$ ——分别为基准波、第 i 点波形第 k 个波形数据。

4.3.4 波形变化系数计算：

基于 4.3.3 条计算结果，同条件下第 i 点波形变化系数（ D_i ）按下式进行计算：

$$D_i = \sqrt{\sum_{k=1}^N \left(\frac{a_{i,k} - \bar{a}_i}{s_i} - \frac{a_{0,k} - \bar{a}_0}{s_0} \right)^2} \quad (4.3.4-7)$$

式中： D_i ——第 i 点波形变化系数，即相对于基准波采用标准化欧氏距离公式计算

的无量纲数值。 $D_i \geq 0$ ，该系数越小，即表明该测点波形变化不大，即越接近于无缺陷的正常混凝土。第 i 点波形变化系数一般可采用 Excel 电子表格等软件进行计算。

5 数据处理和异常值判定方法

5.1 一般规定

5.1.1 对于混凝土缺陷检测，测点数据处理和异常值判定方法可分为两种：对比法异常值判定（以下简称对比法）和概率法异常值判定（以下简称概率法）。当测点数据较少时一般采用对比法；当测点数据较多时采用概率法或将其与对比法并用。

5.1.2 测点数据异常值判定必须以同条件测点数据为基本判定单元，且应包含一定数量的对比点。对比点系指同条件无缺陷的正常混凝土测点；基准波是对比点中某一测点的样本波形。

5.1.3 同条件测点系指仪器设备系统及参数设置、测试距离、角度、声波通过非缺陷介质（如内部钢筋、外部钢管等）的部位和距构件边缘距离等条件基本一致的测点。它包括了被怀疑的缺陷部位测点以及对比点。

5.1.4 判定参数选用：

1 一般情况下，应采用声时（或声速）、波幅和波形变化系数等多参数进行异常值分析和判定，并以对缺陷敏感性较大的参数为主要判定参数；

2 对一般混凝土构件、大体积混凝土构件和灌注桩等缺陷判定时，一般采用声时（或声速）、波幅等参数为判定参数。若涉及内部混凝土不密实区和空洞判定，应增加波形变化系数；

3 对于非圆形钢筋混凝土构件缺陷、装配式混凝土结构钢筋连接部位套筒或浆锚孔道灌浆缺陷（饱满度）判定时，以波形变化系数为主要判定参数，其它参数为辅；

4 当采用波形变化系数判定时，被选样本波形长度应根据接收信号遇缺陷可能产生的波形变化区间来定。若难以确定样本波形长度，一般情况下取首波起跳点至一个完整周期的波形长度。本规程若无特殊说明，被选样本波形长度即为首波一个完整周期的波形长度。

5.1.5 当采用以上参数对异常值判定结果有怀疑时，可局部钻芯取样或采用内窥镜等方法进行验证。

5.2 对比法异常值判定

5.2.1 当同条件测点数较少时，应采用对比法进行异常值判定。判定时测点总数不得少于 5 个。其中，对比点数不少于总点数的 1/3 且不少于 2 个。

5.2.2 对比法异常值判定一般采用以下两种方法：

1 经验对比法：即将同条件下某一可疑测点数据直接与对比点数据相比较，若发现该测点数据与对比点数据存在明显差异，可直接判定该测点数据为异常值；

2 统计学聚类法：若采用经验法难以判定异常值，可借助统计学系统聚类法将同一条件下所有测点数据分成较大、较小两类，若某一可疑测点数据与对比点数据不属一类，可判定该测点数据为异常值。

5.3 概率法异常值判定

5.3.1 测点数据统计量计算：

设 X 为某一判定参数，代表声时（ t ）、声速（ v ）、波幅（ A ）、主频（ f ）和波形变化系数（ D ）等参数。 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为某一判定参数（ X ）同条件测点数据，其平均值和标准差按下列公式计算：

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.3.1-1)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.3.1-2)$$

式中： $\bar{x}$ 、 s ——分别为某判定参数同条件测点数据的平均值、标准差；

n ——测点总数，一般不少于 30 个，当测点布置受限时应不少于 20 个。其中对比点数不应少于测点总数的 1/2，且不应少于 10 个。

5.3.2 概率法异常值判定公式：

$$\text{对于声速}(v)\text{、波幅}(A)\text{和主频}(f): x_0 = \bar{x} - k_m \cdot s \quad (5.3.2-1)$$

$$\text{对于声时}(t)\text{和波形变化系数}(D): x_0 = \bar{x} + k_m \cdot s \quad (5.3.2-2)$$

式中： $\bar{x}$ 、 s ——分别为某判定参同条件测点数据的平均值、标准差。

x_0 、 k_m ——分别为某判定参同条件测点异常值的判定值（精确到 0.01）、判定系数。其中判定系数（ k_m ）由表 5.3.3 确定， m 为参与异常值判定的测点数。

5.3.3 异常值的判定系数（ k_m ）见表 5.3.3。

表 5.3.3 异常值判定系数 (k_m)

测点数 m	判定系数 k_m	测点数 m	判定系数 k_m	测点数 m	判定系数 k_m
$n \leq 5$	1.074	23	1.492	41	1.601
6	1.136	24	1.501	42	1.605
7	1.185	25	1.509	43	1.609
8	1.226	26	1.517	44	1.612
9	1.260	27	1.524	45	1.616
10	1.290	28	1.531	46	1.620
11	1.316	29	1.538	47	1.623
12	1.339	30	1.545	48	1.626
13	1.360	31	1.551	49	1.630
14	1.378	32	1.557	50	1.633
15	1.395	33	1.562	60	1.66
16	1.411	34	1.568	70	1.682
17	1.425	35	1.573	80	1.700
18	1.438	36	1.578	90	1.715
19	1.451	37	1.583	100	1.727
20	1.462	38	1.588	110	1.738
21	1.473	39	1.592	120	1.748
22	1.482	40	1.596	>120	1.748

5.3.4 异常值判定方法:

- 1 将某一判定参数 (X) 同条件下 n 个测点数据由小到大排序, 见下式:

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_{k-1} \leq x_k \leq x_{k+1} \leq \dots, \leq x_n \quad (5.3.4)$$

- 2 在异常值初次判定前, 原始测点数据预处理和统计量计算见表 5.3.4;

表 5.3.4 原始测点数据预处理和统计量计算

判定参数	测点数据处理和统计量 ($\bar{x}$ 、 s) 计算
波幅、声速和主频	若原始测点数据未发现明显偏小数据时, 可直接根据 5.3.1 条中的公式计算 $\bar{x}$ 、 s ; 若发现, 可将明显偏小或不大于第 5% 的分位数对应的测点数据假定为异常, 去除后利用剩点数据计算 $\bar{x}$ 、 s
声时和波形变化系数	若原始测点数据未发现明显偏大数据时, 可直接根据 5.3.1 条中的公式计算 $\bar{x}$ 、 s ; 若发现, 将明显偏大或不小于第 95% 的分位数对应的测点数据假定为异常, 去除后利用剩余测点数据计算 $\bar{x}$ 、 s

- 3 初次异常值的判定值计算:

将表 5.3.4 得到的平均值 ($\bar{x}$) 和标准差 (s) 以及由查表 5.3.3 查到的判定系数 (k_m)

代入公式 5.3.2-1 或公式 5.3.2-2 可得到初次异常值的判定值 ($x_{0,1}$)。参与初次异常值判定的测点数 (m) 取原始测点总数 (n)。

4 波幅、声速和主频异常值判定:

1) 初次异常值判定

将初次异常值的判定值 ($x_{0,1}$) 与 $x_1 \sim x_n$ 排序靠前的测点数据 (含初次假定的异常值) 相比较, 若第 1 个测点数据 (x_1) 存在 $x_1 > x_{0,1}$, 可判定 $x_1 \sim x_n$ 测点不存在异常值; 若第 k 个测点数据 (x_k) 存在 $x_k \leq x_{0,1}$, 则可判定 $x_1 \sim x_k$ 测点数据为异常值;

2) 异常值再次判定

将上述 $x_1 \sim x_k$ 异常数据去除后利用剩余测点数据 ($x_{k+1} \sim x_n$) 计算平均值 ($\bar{x}$) 和标准差 (s), 查表 5.3.3 得到判定系数 (k_m), 一并代入公式 5.3.2-1 可得到二次异常值的判定值 ($x_{0,2}$)。参与再次异常值判定的测点数 $m = n - k$;

然后将 $x_{0,2}$ 与 $x_{k+1} \sim x_n$ 排序靠前的测点数据再比较, 重复以上操作, 直至最后判不出异常值为止。

5 声时和波形变化系数异常值判定:

1) 初次异常值判定

将初次异常值的判定值 ($x_{0,1}$) 与 $x_1 \sim x_n$ 排序靠后的测点数据 (含初次假定的异常值) 相比较, 若第 n 个测点数据 (x_n) 存在 $x_n < x_{0,1}$, 可判定 $x_1 \sim x_n$ 测点不存在异常值; 若第 k 个测点数据 (x_k) 存在 $x_k \geq x_{0,1}$, 可判定 $x_k \sim x_n$ 测点数据为异常值;

2) 异常值再次判定

将上述 $x_k \sim x_n$ 异常数据去除后利用剩余测点数据 ($x_1 \sim x_{k-1}$) 计算均值 ($\bar{x}$) 和标准差 (s), 查表 5.3.3 得到判定系数 (k_m), 一并代入公式 5.3.2-2 可得到二次异常值的判定值 ($x_{0,2}$)。参与再次异常值判定的测点数 $m = k-1$;

然后将 $x_{0,2}$ 与 $x_1 \sim x_{k-1}$ 排序靠后的测点数据再比较, 重复以上操作, 直至最后判不出异常值为止。

6 一般混凝土构件缺陷检测

6.1 一般规定

6.1.1 本章适用于采用厚度振动式换能器检测的一般混凝土构件内部不密实区、空洞的位置和范围、混凝土裂缝深度、结合面缺陷和表面损伤层厚度等。

6.1.2 对于其它类型结构构件混凝土缺陷检测，或采用径向振动式换能器检测的构件，可按本规程第7章、第8章和第9章相关规定执行。

6.2 内部不密实区和空洞检测

6.2.1 一般规定：

- 1 本节适用于一般构件混凝土内部不密实区、空洞位置和范围的检测；
- 2 被测部位应至少有一对相互平行、或相邻的检测面；测区范围应大于被怀疑的缺陷区域；
- 3 同条件测点总数、对比点数应符合本规程 5.3.1 条相关规定。

6.2.2 检测方法：

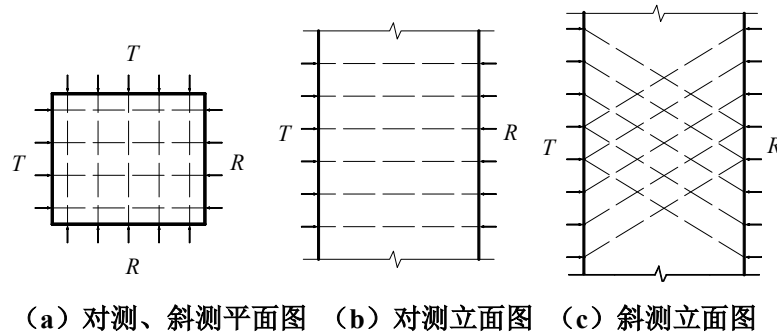


图 6.2.2-1 对测法或斜测法示意图

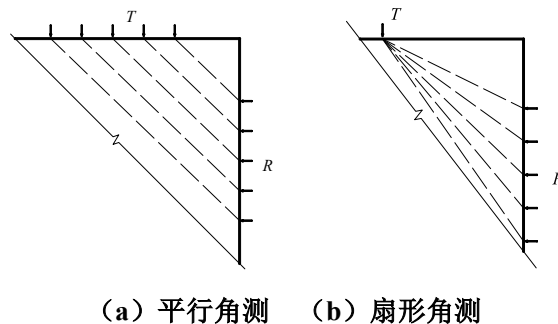


图 6.2.2-2 角测法平面或立面图示意图

1 当构件具有一对或两对互相平行的检测面时，可采用对测法、斜测法或将该两种方法并用。检测时应尽量避免发、收换能器连线（以下简称 T、R 换能器连线，也称测点连线）与构件内部钢筋平行。如图 6.2.2-1（a）、(b)和（c）所示；

2 当构件仅有两个相邻的检测面时，可采用角测法布置网格测点。角测法分为平行角测和扇形角测，如图 6.2.2-2（a）、(b)所示；

3 布置网格测点时，按图 6.2.2-1 和图 6.2.2-2 所示在 T、R 换能器连线所处的检测面上布置网格测点。相邻测点的水平或竖向间距宜为 100mm~300mm；测点距构件边缘不应小于 50mm。此外，应记录好测点位置和测试顺序，并尽量使同条件测点属网格线的某行或某列；

4 当检测中，若发现某些测点数据异常或需要进一步确定混凝土内部不密实区或空洞位置和范围时，除复测或加密补测外，可在原检测的基础上利用已有检测面进行多角度检测。

6.2.3 数据处理和判定：

基于构件内部实际混凝土缺陷的复杂性，采用波幅、声时（或声速）和波形变化系数等参数值，并结合网格测点连线的位置关系，按本规程第 5 章概率法和对比法对同条件测点数据是否异常进行综合分析判定。若判定某些测点数据为异常，可进一步确定内部缺陷位置和大致范围。

6.3 裂缝深度检测

6.3.1 一般规定：

1 混凝土裂缝深度检测一般分为单面平测法、双面斜测法和声测孔法。其中声测孔法检测按本规程第 7 章相关规定执行；

2 被测裂缝内部不得有积水，不得含泥浆及其它填充物。

6.3.2 单面平测法：

1 一般规定：

1) 当被测裂缝在一个检测面且裂缝深度估计值不大于 500mm 时，利用该检测面检测混凝土裂缝深度的方法，称为单面平测法；

2) 一般情况下单面平测法跨缝、不跨缝的测点数均不得少于 5 点，当测点布置

受限时，均不得少于 3 点；平测距离不应大于 1000mm；

3) 在布置测点时，应使测点连线与钢筋方向保持一定夹角，并应避开测试部位其它细小裂缝和外观缺陷。

4) 跨缝测点连线应选取无错位、宽度较大的裂缝部位；若裂缝长度较短，还应位于缝长 1/2 位置。

2 检测方法：

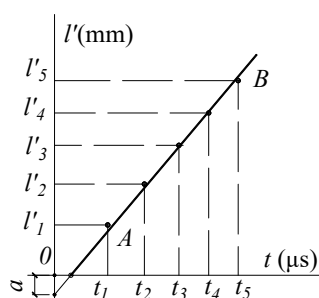


图 6.3.2-1 单面平测法时—距坐标图

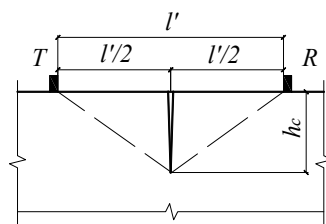


图 6.3.2-2 跨缝检测声波传播路径示意图

1) 首先采用不同测距，按跨缝和不跨缝分别布置测点。不跨缝测点的 T、R 换能器位于裂缝同侧，跨缝测点位于裂缝两侧。跨缝与不跨缝测距应一一对应并保持一致。

2) 跨缝和不跨缝测点声时测读：

设跨缝、不跨缝各测点平测距离(T、R 换能器中心连线内边缘间距)为 l'_1 、 l'_2 、 $\dots$ 、 l'_i 、 $\dots$ 、 l'_n 。如依次可取 100mm、150mm、200mm、.....。

按上述不同测距，分别测得跨缝测点声时 t_{01} 、 t_{02} 、 $\dots$ 、 t_{0i} 、 $\dots$ 、 t_{0n} 和不跨缝测点声时 t_1 、 t_2 、 $\dots$ 、 t_i 、 $\dots$ 、 t_n 。

3) 根据不跨缝测距 (l'_i) 和声时 (t_i) 求得以下回归直线方程：

$$\hat{l} = bt + a \quad (6.3.2-1)$$

式中： $\hat{l}$ ——回归直线方程测距估计值 (mm)，图 6.3.2-1 中回归直线 (AB) 纵坐标值。

当 $t = t_i$ 时, 平测距离估计值 ($\hat{l}_i$): $\hat{l}_i = bt_i + a$;

a ——回归常数, 图 6.3.2-1 中回归直线截距 (mm);

b ——回归系数, 图 6.3.2-1 中回归直线斜率, 混凝土平测声速 (v_p): $v_p = b$,
单位取 km/s。

3 裂缝深度计算:

第 i 点裂缝计算深度和平均值按以下公式计算:

$$h_i = \frac{1}{2} \sqrt{\hat{l}_{0i}^2 - \hat{l}_i^2} \quad (6.3.2-2)$$

$$\bar{h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \quad (6.3.2-3)$$

式中: h_i ——第 i 点裂缝计算深度 (mm);

$\bar{h}$ ——裂缝深度平均值 (mm);

$\hat{l}_{0i}$ 、 $\hat{l}_i$ ——分别为第 i 点跨缝、不跨缝平测距离估计值 (mm), 它们分别由对应的声时 $\hat{t}_{0i}$ 、 $\hat{t}_i$ 通过 6.3.2-1 公式计算得到。

4 数据处理和裂缝深度检测值 (h_c) 确定:

1) 当跨缝检测未发现首波反相时, 剔除测距 $l'_i < \bar{h}$ 和 $l'_i > 3\bar{h}$ 所对应的裂缝计算深度 (h_i), 取剩余计算深度的平均值作为该裂缝深度检测值 (h_c); 若剩余裂缝计算深度出现较大和较小分组现象, 应取较大一组裂缝计算深度的平均值作为该裂缝深度检测值 (h_c);

2) 当跨缝检测发现某一测距 l'_{0i} 处首波反相, 可根据该测距和相邻测距对应的声时 ($t_{0(i-1)}$ 、 t_{0i} 、 $t_{0(i+1)}$), 以及同测距对应的不跨缝声时 ($t_{(i-1)}$ 、 t_i 、 $t_{(i+1)}$) 分别代入 6.3.2-1 公式计算得的相应的测距估计值, 然后根据公式 6.3.2-2 得到 3 个测点裂缝计算深度, 取其平均值作为该裂缝深度检测值 (h_c)。

6.3.3 裂缝双面斜测法:

1 一般规定:

1) 双面斜测法系指利用构件两个相互平行的检测面检测裂缝深度的方法, 称为裂缝双面斜测法;

2) 被测裂缝可以是单面裂缝, 也可以是基本对称的双面裂缝。采用双面斜测法可以检测裂缝深度及其贯穿范围。

2 检测方法:

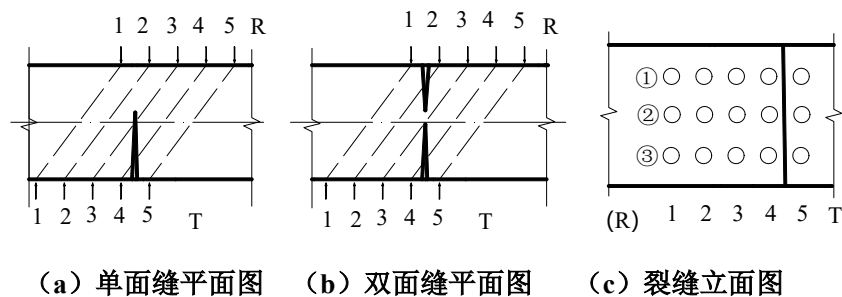


图 6.3.3 裂缝双面斜侧法示意图

1) 布置测点时,假定被测裂缝在构件断面贯穿,且在两个检测面对称。按图 6.3.3 所示在裂缝两侧的检测面上布置测点。沿裂缝高度方向布置测点不少于 2 排,每排间距 200mm~500mm,图 6.3.3 (c) 中所示的①~③代表测点排号;

2) 按图 6.3.3 (a)、(b) 所示将 T、R 换能器分别置于两个检测面对应的 1、2、3、.....测点位置。每排应使 T、R 换能器连线大部分穿过裂缝(其中 1 条与构件水平剖面中心线相交),少部分不穿过裂缝(至少有 2 条)作为对比测点;

3) 以图 6.3.3 (c) 所示的高度方向的排为测点主序号,分别读取各排各点声时、波幅等参数值。

3 裂缝深度检测值(h_c)判定:

采用波幅、声时等参数按本规程第 5 章对比法判定测点数据是否异常;若某些测点数据为异常,可根据过缝时异常值测点连线与假定裂缝位置的相交关系,判定混凝土裂缝深度及其贯穿情况。

6.4 结合面缺陷检测

6.4.1 一般规定:

1 混凝土结合面系指前后间隔一定时间、二次与前次浇筑的混凝土所形成的接触面,也称为混凝土施工缝。本节也适用于加固、置换修补混凝土结合面缺陷检测;

2 混凝土结合面一般分为水平、倾斜和竖向结合面。结合面结合不良系指结合部位两次浇筑的混凝土之间存在缝隙、疏松层和杂物等缺陷;

3 结合面检测应具备两个相互平行的检测面或其它检测条件,以使声波能穿过结合面。对于大体积混凝土构件等,当仅有一个检测面时可采用声测孔法,具体检测应按

本规程第 7 章相关规定执行。

6.4.2 检测方法:

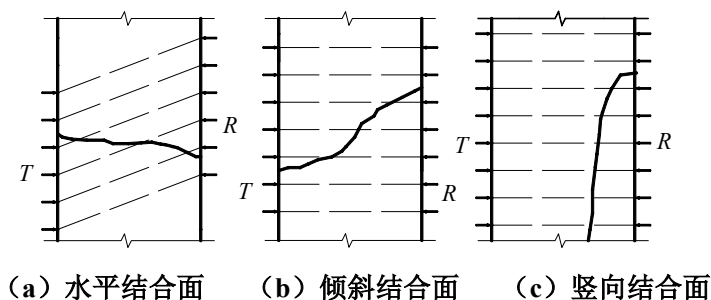


图 6.4.2 结合面检测立面示意图

1 混凝土结合面检测测点布置与本规程第 6.3.3 条双面斜测法类似，一般根据结合面类型采用对测法、斜测法或将该两种方法并用。如 6.4.2 图所示，在 T、R 换能器连线的两检测面上布置网格测点，且确保多数排测点连线通过结合面，少数排测点连线不通过结合面，且在结合面两侧各不少于 1 排，作为对比点；测点间距为 100mm~300mm，各测点连线角度、测距应一致。

2 检测时逐排逐点测读声时、波幅等参数值。若检测中发现某排测点数据可疑时，除复测或加密测点补测外，还可采用多角度进行检测。

6.4.3 数据处理和异常值判定:

采用波幅、声时（或声速）和波形变化系数等参数，并根据测点连线与结合面位置相交关系，按本规程第 5 章对比法判定结合面是否结合良好。若结合面测点数据异常，可进一步确定其部位和大致范围；若对判定结果持有怀疑，有条件可局部钻芯取样进行验证。

6.5 表面损伤层检测

6.5.1 一般规定:

1 本节适用于结构构件因冻害、高温作用和化学腐蚀等引起的表面混凝土损伤层厚度检测，同时也适用于因施工工艺、材料配合比变化引起的表面混凝土疏松层厚度检测，以下统称表面损伤层检测；

2 表面损伤层检测宜选用标称频率不大于 100kHz 的厚度振动式换能器。表面损伤层厚度估计值不应大于 100mm。被测损伤层表面（换能器接触面）应平整，并处于干

干燥自然状态。

6.5.2 检测方法:

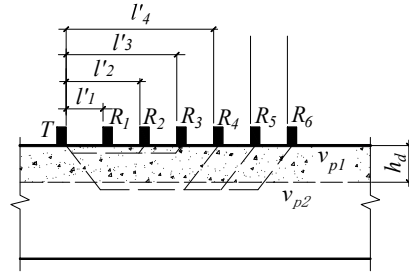


图 6.5.2-1 损伤层厚度检测示意图

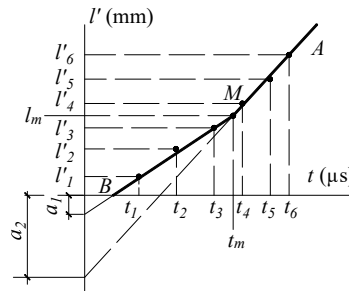


图 6.5.2-2 损伤、未损伤混凝土时一距坐标图

- 1 根据表面混凝土损伤程度和范围，选取有代表性部位，采用单面平测法检测表面损伤层厚度；
- 2 布置测点时，T、R 换能器所处部位及其连线间应避开裂缝、蜂窝等外观缺陷，同时应根据本规程第 6.3.2 条相关规定避开内部钢筋影响；
- 3 如图 6.5.2-1 所示，在检测时将 T 换能器置于某一部位且保持不动，然后将 R 换能器以内边缘间距 30mm 起，依次置于 R_1 、 R_2 、 R_3对应测点位置，同时测读 l'_1 、 l'_2 、...、 l'_i 、...、 l'_n （如取 30mm、60mm、90mm、.....）对应的声时 t_1 、 t_2 、...、 t_i 、...、 t_n 。 n 为测点总数，一般不少于 6 个测点；
- 4 若混凝土表面损伤层厚度分布不均匀或初步检测数据异常时可适当增加测试部位，且不得少于 1 处。

6.5.3 表面损伤层测点数据有效性判定:

相邻测点声速估算值 (v'_i) 按下式进行计算:

$$v'_i = \frac{l_{i+1} - l_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (6.5.3)$$

式中: v'_i ——相邻测点声速估算值(km/s);

l'_i 、 l'_{i+1} 和 t_i 、 t_{i+1} ——分别为相邻测点平测距离 (mm) 和对应的声时 (μ s)。

根据 6.5.3 公式可以计算出 $n-1$ 个声速估算值, 将其由小到大排序: v'_1 、 v'_2 、 $\dots$ 、 v'_{i-1} 、 v'_i 、 v'_{i+1} 、 $\dots$ 、 v'_{n-1} ;

1 若 $v'_1 \sim v'_{n-1}$ 声速估算值存在较小、较大分组现象, 且靠前一组、靠后一组对应的测点数均不少于 3 点, 即表明该部位损伤层检测数据有效。即靠前一组较小的声速估算值代表声波通过损伤混凝土, 靠后一组较大的声速估算值代表声波通过未损伤混凝土;

2 若 $v'_1 \sim v'_{n-1}$ 声速估算值不存在较小、较大分组现象, 或存在分组现象但每组对应的测点数少于 3 点, 经增加测点重新计算, 也难以满足上述要求, 则可断定该部位损伤层厚度很小或该部位损伤层检测数据无效。

6.5.4 表面损伤层厚度计算:

1 损伤层检测数据有效时, 采用以上分组中较小声速估算值对应的测点数据 ($t_1 \sim t_i$, $l'_1 \sim l'_i$) 和较大声速估算值对应的测点数据 ($t_{i+1} \sim t_n$, $l'_{i+1} \sim l'_n$) 可分别求得损伤层、未损伤混凝土回归直线方程:

$$\text{损伤层混凝土: } \hat{l}_1 = a_1 + b_1 t \quad (6.5.4-1)$$

$$\text{未损伤混凝土: } \hat{l}_2 = a_2 + b_2 t \quad (6.5.4-2)$$

式中: a_1 、 a_2 ——分别为损伤、未损伤混凝土回归直线方程常数项, 图 6.5.2-2 中直线 BM 和 MA 的截距 (mm);

b_1 、 b_2 ——分别为损伤、未损伤混凝土回归直线方程系数, 图 6.5.2-2 中回归直线 BM 和 MA 的斜率。设 v_{p1} 、 v_{p2} 分别为损伤、未损伤混凝土平测声速, 即 $v_{p1} = b_1$, $v_{p2} = b_2$, 单位取 km/s。

根据公式 6.5.4-1 和 6.5.4-2 可求得两条回归直线方程的交点。对应坐标为 $M(t_m, l_m)$, 纵坐标 (l_m) 可按下式计算:

$$l_m = \frac{a_1 \cdot v_{p2} - a_2 \cdot v_{p1}}{v_{p2} - v_{p1}} \quad (6.5.4-3)$$

2 表面混凝土损伤层厚度 (h_d) 按下式计算:

$$h_d = \frac{l_m}{2} \sqrt{\frac{v_{p2} - v_{p1}}{v_{p2} + v_{p1}}} \quad (6.5.4-4)$$

式中： h_d ——为表面混凝土损伤层厚度(mm)；

l_m ——为损伤、未损伤两条回归直线方程交点的纵坐标值（mm）。

3 对于表面混凝土损伤层厚度检测，有条件可钻取芯样，并根据混凝土湿度变化对损伤层厚度计算结果进行验证。

7 大体积混凝土构件和灌注桩缺陷检测

7.1 一般规定

7.1.1 本章适用于采用两只径向振动式换能器，或一只径向振动式换能器和一只厚度振动式换能器检测大体积混凝土构件、灌注桩混凝土缺陷。

7.1.2 对于类似灌注桩环境条件的其它地下结构构件混凝土缺陷检测，可按本章相关规定执行。

7.1.3 当采用径向振动式换能器时，其标称频率宜为 20kHz~60kHz；当采用了两种类型换能器时，对于厚度振动式换能器，其标称频率宜为 50kHz。

7.1.4 检测前应根据换能器耦合方式，按本规程附录 B 相关规定测量仪器声时初读数。

7.2 大体积混凝土构件缺陷检测

7.2.1 一般规定：

1 本节适用于各类工程和设备的基础、水坝和桥墩等大体积混凝土构件缺陷检测。大体积混凝土缺陷主要包括混凝土裂缝深度、结合面缺陷、空洞和不密实区等缺陷；

2 检测前应调查大体积混凝土缺陷产生原因、怀疑部位和大小范围，并依据被检测构件声测孔、检测面等条件制订检测方案；

3 大体积混凝土缺陷检测常采用以下两种方法：

1) 孔一孔法：

若被怀疑的缺陷部位距构件外立面较远，或仅有一个检测面（如顶面或斜立面），可利用该检测面（钻声测孔）采用一对径向振动式换能器检测混凝土缺陷，该方法称为孔一孔法。

2) 孔一面法：

若被怀疑的缺陷部位距构件某一外立面较近，或仅有一个顶面和一个相邻的外立面，可利用该顶面（钻声测孔）采用径向振动式换能器和外立面（布置网格测点）采用厚度振动式换能器检测混凝土缺陷，该方法称为孔一面法。对于检测面网格测点布置应按本规程第 6 章相关规定执行。

4 大体积混凝土检测用声测孔一般采用风钻或水钻成孔。孔径宜大于径向振动

式换能器直径 5mm~10mm，且应保持各声测孔中心线基本平行；孔中粉末应采用高压水清理干净。测试前孔中必须注满清水，并保证径向振动式换能器上下移动通畅。同水平面相邻声测孔间距宜为 500mm~2000mm，最大不超过 3000mm；沿高度方向相邻测点间距宜为 100mm~300mm。

7.2.2 混凝土裂缝深度检测：

1 一般规定：

1) 大体积混凝土构件（顶面或斜立面）裂缝深度检测，应符合本规程第 6.3 节单面平测法相关规定。当裂缝深度估算值（ h_e ）大于 500mm 时，应按本节相关规定进行检测；

2) 根据本章 7.2.1 条，大体积混凝土裂缝深度检测也可分为孔—孔法和孔一面法。如图 7.2.2-2 所示，当采用孔一面法检测时，除了在顶面布置声测孔外，对应的外立面应布置网格测点。基于孔—孔法和孔一面法检测基本相同，本节以孔—孔法为代表。

2 检测方法：

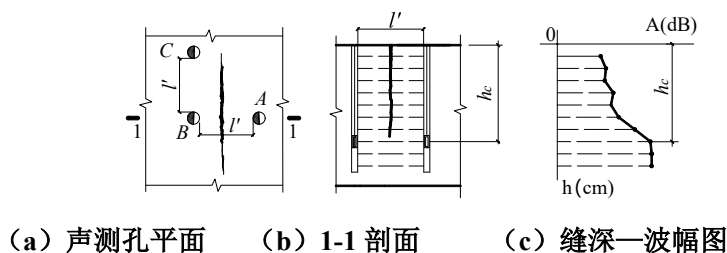


图 7.2.2-1 孔—孔法裂缝深度检测示意图

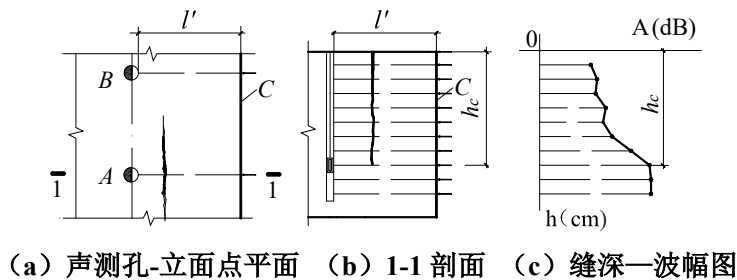


图 7.2.2-2 孔一面法裂缝深度检测示意图

1) 按图 7.2.2-1 所示钻取 3 个声测孔（编号依次为 A、B、C），且应保持孔中心线基本平行，A~B、B~C 孔间距基本相等，一般取 1000mm~2000mm。其中 A、B 孔为跨缝孔；B、C 孔为不跨缝孔，位于裂缝同侧，作为对比点；声测孔钻取深度（ H_d ）须满足 $H_d \geq h_e + 200\text{mm}$ ；

2) 检测时分别按跨缝 (A~B)、不跨缝 (B~C) 以同高度、等间距从上至下同步移动换能器, 并记录每处深度 (h_i), 测读对应的声时 (t_i)、波幅 (A_i) 等参数值。

3 数据处理和裂缝深度检测值 (h_c) 确定:

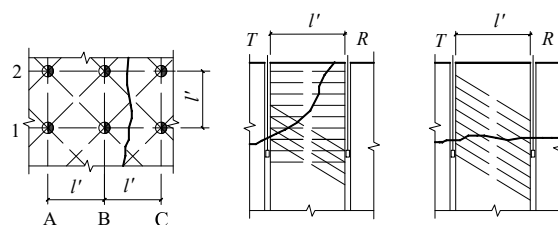
根据图 7.2.2-1 (c) 所示的深度 (h_i) ~ 波幅 (A_i) 曲线:

1) 当发现该曲线上某深度处波幅值开始随深度逐渐变大, 当波幅值至最大且基本保持不变时, 波幅值至最大对应的深度为裂缝深度检测值(h_c);

2) 当发现该曲线波幅值不存在以上变化或其变化不明显时, 应以另外两孔不跨缝测点为对比点, 采用本规程第 5 章对比法确定裂缝深度检测值(h_c)。

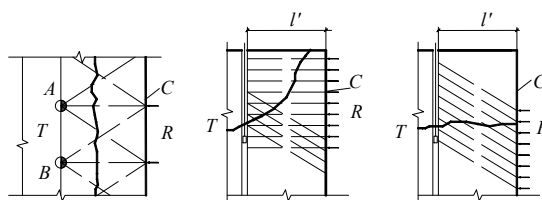
7.2.3 混凝土结合面缺陷检测:

1 检测方法:



(a) 声测孔平面 (b) 斜结合面立面 (c) 水平结合面立面

图 7.2.3-1 孔一孔法检测结合面示意图



(a) 声测孔平面 (b) 斜结合面立面 (c) 水平结合面立面

图 7.2.3-2 孔一面法检测结合面示意图

1) 大体积混凝土结合面缺陷检测与一般混凝土构件基本相同。检测时, 除了符合本规程第 6.4 节相关规定外, 还应符合本条相关规定;

2) 一般大体积混凝土结合面覆盖范围较大, 宜根据现场条件选取有代表性部位选用孔一孔法或孔一面法进行检测;

3) 检测时, 应根据结合面倾斜角度采用斜测法、对测法或将该两种方法并用;

4) 如图 7.2.3-1 和图 7.2.3-2 所示, 分别按结合面走向布置测点。被测结合面应至少抽检 2 个部位 (即 2 个检测剖面), 其间距宜为 500mm~1000mm。如图 7.2.3-1 中 1、

2 点处纵向检测剖面，图 7.2.3-2 中 A、B 点处纵向检测剖面。每个检测剖面应确保通过结合面的测点连线不少于 3 条，不通过结合面测点连线不少于 2 条，作为对比点。此外，对于竖向结合面缺陷，其检测方法与上述斜结合面基本相同。

2 数据处理和异常值判定：

采用波幅、声时（或声速）和波形变化系数等参数，并根据同条件测点连线与结合面位置的相交关系，按本规程第 5 章对比法或概率法判定结合面测点数据是否异常，如发现某些测点数据异常，可进一步确定结合面缺陷大致范围。

7.2.4 混凝土内部不密实区和空洞检测：

1 检测方法：

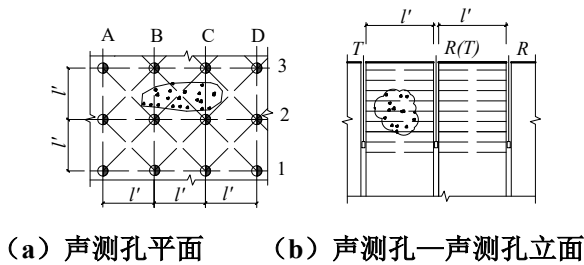


图 7.2.4-1 孔—孔法内部缺陷检测示意图

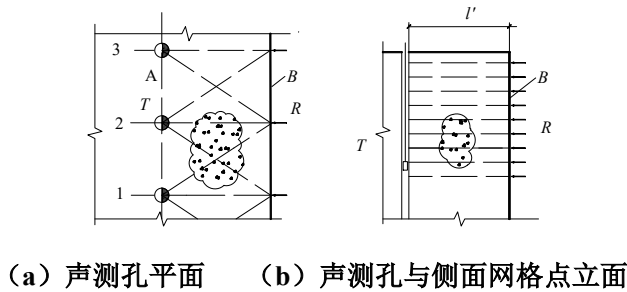


图 7.2.4-2 孔一面法内部缺陷检测示意图

- 1) 大体积混凝土内部不密实区和空洞检测与本规程一般混凝土构件基本相同。检测时，除了符合本规程第 6.2 节相关规定外，还应符合本条相关规定；
- 2) 大体积混凝土内部不密实区和空洞常与结合面缺陷并存，检测时应根据缺陷怀疑部位、大小范围选用孔—孔法或孔一面法，并优先采用高度方向上、下斜测法；
- 3) 在布置测点时，测区应覆盖内部缺陷怀疑范围。如图 7.2.4-1 所示的怀疑部位被 1、3 点处纵向检测剖面 and A、D 点处横向检测剖面包围；图 7.2.4-2 所示的怀疑部位被 1、3 点处纵向检测剖面、A 点处横向检测剖面 and B 外立面包围；
- 4) 检测时应记录检测剖面位置和测试顺序。以某两个声测孔或一个声测孔和外

立面某列网格测点的连线为检测剖面，对每个检测剖面由上至下逐点进行测读；

5) 当发现某一检测剖面测点数据异常时，除了复检或多角度检测外，可在构件顶面（或斜立面）增加声测孔，或在对应的外立面加密网格测点进行检测。加密后的声测孔间距不宜大于 500mm。

2 数据处理及异常值判定：

1) 采用波幅、声时（或声速）和波形变化系数等参数，并根据测点连线空间位置关系，按本规程第 5 章概率法或对比法，对同条件测点数据是否异常进行综合分析判定；

2) 若发现某些测点数据异常时，可进一步确定不密实区、空洞位置和大致范围。必要时可在异常值判定区域钻芯取样或采用内窥镜等方法进行验证。

7.3 灌注桩混凝土缺陷检测

7.3.1 一般规定：

1 本节适用于桩径（或边长）不小于 0.6 m 的灌注桩桩身混凝土缺陷检测。灌注桩桩身混凝土缺陷主要包含构件断面颈缩、夹泥、夹砂及内部不密实区等缺陷；

2 检测时应利用事先预埋的超声检测管（以下简称声测管），采用一对径向振动式换能器进行检测；

7.3.2 检测前准备

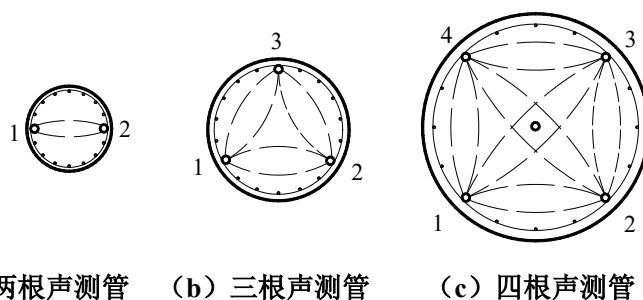


图 7.3.2 声测管埋设平面示意图

1 埋设声测管：

1) 如图 7.3.2 所示，根据桩径大小预埋声测管。声测管一般采用铁管和 PVC 管。当桩径为 0.6m~1.0m 时，沿桩直径方向预埋 2 根管；当桩径为 1.0m~2.5m 时，按内接等边三角形预埋 3 根管；当桩径大于 2.5m 时，按内接正方形预埋 4 根管，必要时可在

灌注桩中心附加 1 根管。各声测管中心线应基本保持平行；

2) 以上布设的声测管，其内径应大于径向振动式换能器外径；对于较长的声测管需要分段时，应在分段连接处外加套管并保持通直。管下口应封闭，上口应采用木塞子封堵；

3) 声测管的埋设深度应与灌注桩底部齐平；上端外露高度宜相同且高于灌注桩顶不少于 300mm；

4) 一般声测管固定在灌注桩钢筋笼内侧，按 2m 间距设一个固定点；对于素混凝土桩（无钢筋笼）可采用钢筋支架固定声测管。

2 检测前，应向声测管内注满清水，然后采用一段直径略大于换能器的圆形铁棒疏通声测管，并逐根检查声测管畅通情况和实际深度；此外，应测量每根灌注桩各声测管中心连线内边缘距离及外露高度；

3 检测时根据实际桩径大小设置仪器参数，确保检测的灵敏度。并在同批桩检测过程中不得随意改变。

7.3.3 检测方法

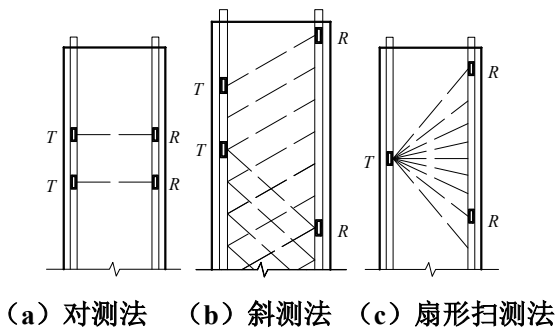


图 7.3.3 灌注桩检测方法剖面示意图

1 如图 7.3.2 所示，首先对灌注桩不同位置声测管进行编号，以同根桩的两个声测管连线为一检测剖面，以每一检测剖面作为测点的主序号，分别对所有检测剖面进行逐点测试；

2 检测时，将发射换能器（T）和接收换能器（R）分别置于两个声测管同一高程或同一高程差位置，按等间距由上至下（或由下至上）同步移动，并逐点测读每个检测剖面测点数据，同时记录换能器相应深度位置。一般沿高程方向相邻测点间距宜为 100mm~500mm；

3 如图 7.3.3 所示，灌注桩常用的检测方法有对测法、斜测法及扇形扫测法等；

4 在检测中,若发现某检测剖面测点数据异常时,除对该部位应复测外,还应加密补测或多角度检测。

7.3.4 数据处理及异常值判定:

1 曲线法异常值判定:

根据同一检测剖面测试数据,绘制某参数值(x_i)~深度(h_i)曲线。 x_i 可代表声时(t_i)、声速(v_i)、波幅(A_i)、波形变化系数(D_i)和参数(Z_i)。其中参数(Z_i)可按下式进行计算:

$$Z_i = K \cdot \Delta t_i \quad (7.3.4)$$

式中: Δt_i ——相邻测点声时差(μs), $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$;

K ——为 $t_i \sim h_i$ 曲线斜率,即相邻测点声时差(Δt_i)和深度差(Δh_i)比值, $K = \Delta t_i / \Delta h_i$,

$$\Delta h_i = h_i - h_{i-1}。$$

根据 $x_i \sim h_i$ 曲线图,若某参数值(x_i)在相应深度(h_i)产生明显变化,如 t_i 、 D_i 、 Z_i 明显变大,或 v_i 、 A_i 明显变小,则可判定该深度除某参数测点数据为异常值;

2 对于同一检测剖面,采用波幅、声时(或声速)和波形变化系数等参数,结合 $x_i \sim h_i$ 曲线图,按本规程第5章概率法和对比法对同条件测点数据是否异常进行综合分析判定。

3 经以上以上各检测剖面测点数据综合分析判定,若发现某些测点数据为异常,可进一步确定内部缺陷部位和大致范围,必要时可采用地质钻进行取样验证。

8 钢—混凝土组合结构缺陷检测

8.1 一般规定

8.1.1 钢—混凝土组合结构是钢管混凝土和钢骨混凝土（也称型钢或劲性混凝土）结构的总称。本章适用于钢管混凝土构件和钢骨混凝土构件缺陷检测，如钢管混凝土柱、剪力墙及钢骨混凝土梁、柱和剪力墙等。

8.1.2 对于内部设有纵向肋板或横向隔板的钢管混凝土构件，或桥梁工程中钢管混凝土桥柱、桥拱等缺陷检测，可参照本章相关规定执行。

8.1.3 检测前应进行现场和资料调查，具体调查内容见本规程 4.1.1 条。

8.1.4 钢—混凝土组合结构缺陷检测，除了按本章相关规定执行外，还需符合本规程第 6 章相关规定。

8.1.5 钢—混凝土组合构件同条件测点不同于第 6 章一般混凝土构件，必须满足测试距离、角度和距构件边缘距离相同外，测点连线通过型钢或钢管的某一部位也须相同。

8.1.6 钢—混凝土组合结构缺陷检测受钢材等因素影响，有条件宜模拟与现场同条件的构件，对可能出现的混凝土缺陷进行对比检测。

8.2 钢管混凝土缺陷检测

8.2.1 一般规定：

1 钢管混凝土截面形状有圆形、矩形和其它形状。本节适用于实心钢管混凝土内部不密实区、结合面缺陷以及管壁与混凝土脱空缺陷检测。

2 钢管混凝土结合面缺陷检测可按本节和本规程第 6.4 节相关规定执行；

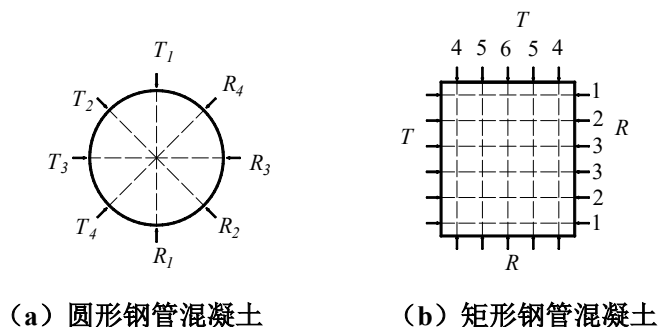
3 检测前应事先调查钢管和混凝土材料使用环境和施工工艺，并预估混凝土、钢管材料声速。必要时可利用现场钢管或余料、混凝土试块检测其声速；

4 在检测钢管混凝土内部缺陷前，应采用敲击法初步判定管壁是否脱空。若发现某测点部位管壁脱空，应采取灌缝等处理措施；

5 检测时钢管表面（换能器接触面）应光洁，无严重锈蚀层；必要时可除锈或进行磨光处理。

8.2.2 检测方法：

1 钢管混凝土内部缺陷应优先采用对测法：



8.2.2-1 钢管混凝土测点布置平面示意图

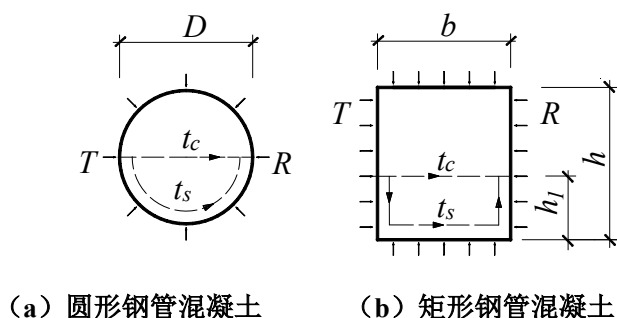


图 8.2.2-2 钢管混凝土声波传播路径平面示意图

1) 圆形钢管混凝土构件应采用径向对测法，按图 8.2.2-1 (a) 所示的检测面上布置网格测点。将钢管外壁周长等分成若干条母线，沿钢管高度方向（或中心线方向）等分出若干条环向线；母线、环向线间距宜为 100mm~300mm；T、R 换能器连线应与钢管中心线相交。检测时以环向或高度方向的测点连线为检测剖面，按其顺序逐点测读声时、波幅等参数值；

2) 矩形钢管混凝土检测与本规程第 6 章一般混凝土构件基本相同，直接采用对测法，按图 8.2.2-1 (b) 所示的检测面上布置网格测点；图 8.2.2-1 (a)、(b) 中的数字或字母代表某一方向测点连线所在位置的检测剖面；

3) 对测法理论声时计算（或估算）：

如图 8.2.2-2 所示，采用对测法时声波通过钢管混凝土构件的传播路径至少有 2 条：一条是沿直线通过管内混凝土（声时为 t_c ），另一条是沿钢管壁按“弧形”或“U 形”路径传播（声时估算值为 t_s ）。声波沿 2 条路径传播的理论声时可按以下公式计算（或表达）：

$$\text{对于圆形钢管混凝土: } t_c = \frac{D}{v_c}, t_s = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot v_s} \quad (8.2.2-1)$$

$$\text{对于矩形钢管混凝土: } t_c = \frac{b}{v_c}, \quad t_s = \frac{b+2h_1}{v_s} \quad (8.2.2-2)$$

式中: t_c ——直线通过内部混凝土声时 (μs);

t_s ——沿钢管壁传播的声时估算值 (μs);

v_c ——混凝土声速 (km/s);

v_s ——钢管壁声速 (km/s);

D ——圆形钢管外径 (mm);

b 、 h ——分别为矩形钢管截面宽度、高度 (mm);

h_1 ——某测点至矩形钢管混凝土构件边缘距离 (mm)。

2 钢管混凝土构件斜测法:

1) 该斜测法应以对测法为基础。即沿构件高度方向 (或中心线方向) 进行上、下斜测, 以作为对测法的补充; 同时也适用于钢管混凝土构件水平结合面缺陷检测;

2) 圆形钢管混凝土构件斜测时, 须保证测点连线与钢管中心线相交; 矩形钢管混凝土构件斜测时, 除了符合本规程第 6 章相关规定外, 测点连线的投影线必须与矩形钢管某方向板材的平面垂直。

3 对于内部构造和形状复杂的钢管混凝土竖向构件, 有条件可在钢管混凝土内部预埋或钻取不少于 2 个声测管或声测孔, 采用径向式换能器按本节和本规程第 7 章相关规定进行检测。

8.2.3 数据处理和异常值判定:

1 采用对测法时:

1) 若仪器测读的声时 (t_i) 接近或大于管壁声时估算值 (t_s) 时, 可直接判定该测点部位管壁与混凝土脱空;

2) 若仪器测读的声时 (t_i) 明显小于管壁声时估算值 (t_s) 时, 可采用声时 (或声速)、波幅和波形变化系数等参数, 结合测点连线的位置关系, 按本规程第 5 章概率法或对比法对异常值进行综合分析判定。

2 采用斜测法时:

首先应以对测法判定结果为基础, 然后按本规程第 5 章概率法或对比法对同条件斜测时的测点数据是否异常进行分析判定。

基于综合以上判定结果, 若发现某些测点数据为异常, 可进一步确定内部缺陷位置

和大致范围。

8.3 钢筋混凝土缺陷检测

8.3.1 一般规定：

1 钢筋是置于混凝土构件内部的钢构件，其截面形状有工字形、十字形、L形、圆形和矩形等。本节适用于钢筋混凝土梁、柱、剪力墙等构件内部不密实区、结合面缺陷检测。

2 钢筋混凝土结合面缺陷检测可按本节和本规程第 6.4 条相关规定执行；

3 检测前应进行现场和资料调查，确认钢筋混凝土构件中的钢筋截面形状、构造特点以及在构件内部的具体位置；

4 钢筋混凝土构件表面（换能器接触面）应平整，无表面裂缝等外观质量缺陷。

8.3.2 检测方法：

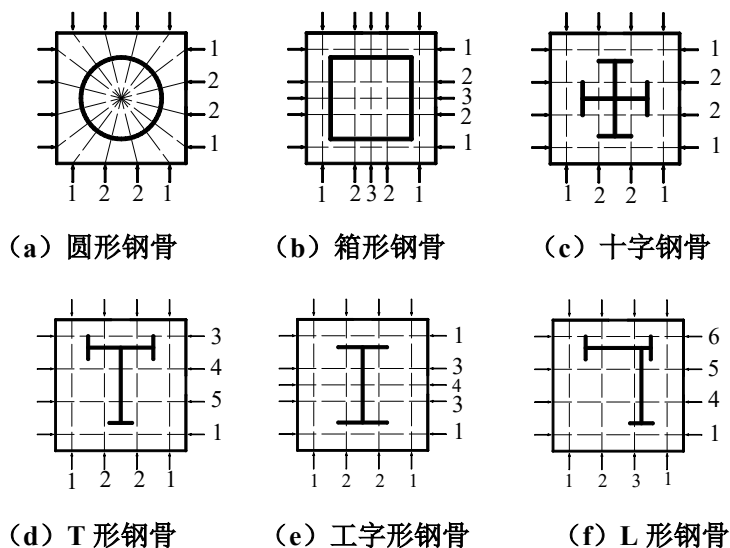


图 8.3.2-1 钢筋混凝土柱测点布置平面示意图

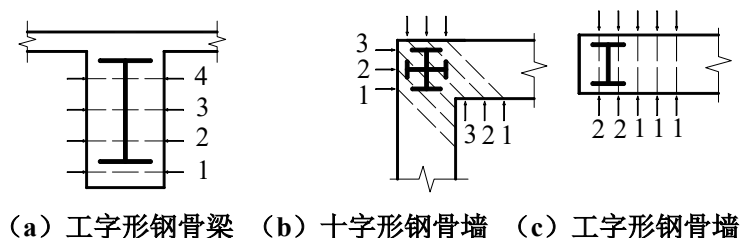


图 8.3.2-2 钢筋混凝土梁、剪力墙测点布置平面示意图

钢筋混凝土构件测点布置基本与一般混凝土构件相同，除符合本规程第 6 章相关规

定，还须符合本节相关规定：

1 当被测构件有两个相互平行的检测面时，应优先采用对测法或径向检测法：

1) 圆形钢骨混凝土构件应采用径向检测法。如图 8.3.2-1 (a) 所示，在其相互平行的检测面上布置网格测点，同水平面测点连线应与内部圆形钢骨中心线相交；

2) 非圆形钢骨混凝土构件（如矩形、工字形或十字形等），可直接采用对测法。如图 8.3.2-1 (b) ~ (f) 和图 8.3.2-2 (a)、(c) 所示，在相互平行的检测面上布置网格测点。同水平面测点连线应垂直于钢骨某一方向钢板平面，且避免与另一方向钢板平面重合；

2 当测点布置受限制或需要检测水平结合面缺陷时可采用斜测法：

1) 圆形钢骨混凝土构件斜测，宜沿高度方向进行上、下斜测，且不同高度测点连线应与内部圆形钢骨中心线相交；

2) 非圆形钢骨混凝土构件（如矩形、工字形或十字形等）斜测分为以下两种：

一是优先采用沿高度方向进行的上、下斜测，且保证高度方向测点连线的投影线垂直于钢骨某一方向钢板平面，并避免与另一方向钢板平面重合；二是同水平面的斜测。图 8.3.2-2 (b) 所示，同水平面测点连线始终与钢骨某方向钢板平面相交成锐角。

3 在检测时，以每个检测剖面为同条件测点的主序号，按本规程第 6 章相关规定逐点测读声时、波幅等参数值。在图 8.3.2-1 和图 8.3.2-2 所示的钢骨混凝土构件中 1~6 数字，分别代表测点连线所处位置的检测剖面；

4 对于大型或较为复杂的钢骨混凝土竖向构件，必要时可根据构件内部构造和断面尺寸在其内部预埋不少于 2 个声测管或钻取不少于 2 个声测孔，利用径向振动式换能器对内部混凝土缺陷进行检测。具体检测方法应符合本节和本规程第 7 章相关规定。

8.3.3 数据处理和异常值判定：

圆形钢骨混凝土构件采用声时（或声速）、波幅和波形变化系数等参数，非圆形钢骨混凝土构件采用波形变化系数并辅以声时或声速、波幅等参数值变化或逆变化，结合测点连线的位置关系，按本规程第 5 章概率法或对比法对同条件测点数据是否异常进行综合分析判定。若发现某些测点数据为异常，可进一步确定内部缺陷位置和大致范围。

9 装配式混凝土结构缺陷检测

9.1 一般规定

9.1.1 本章适用于装配式混凝土结构缺陷检测，检测内容主要包含以下两个方面：

1 预制构件后浇混凝土或灌浆料、坐浆料等内部缺陷、结合面缺陷检测，主要包含以下三个方面：

- 1) 预制剪力墙、柱底部接缝后浇灌浆料或坐浆料内部缺陷检测；
- 2) 预制双面叠合剪力墙空腔后浇混凝土内部缺陷、叠合面缺陷检测；
- 3) 预制混凝土叠合梁、叠合板上部后浇混凝土内部缺陷、叠合面缺陷检测。

2 预制剪力墙竖向钢筋连接部位套筒（以下简称套筒）、钢筋搭接连接用浆锚孔道（以下简称浆锚孔道）的灌浆饱满度检测。

9.1.2 被测构件表面（换能器接触面）应基本平整、无外观质量缺陷。在正常环境下测试龄期：混凝土不宜低于 14d，灌浆料不宜低于 7d。

9.2 后浇混凝土或灌浆料缺陷检测

9.2.1 预制构件后浇混凝土或灌浆料、坐浆料等内部缺陷、叠合面缺陷等检测，除了满足本节相关规定外，尚需符合本规程第 6 章相关规定。

9.2.2 预制框架柱、剪力墙底部接缝后浇灌浆料或坐浆料内部缺陷检测：

- 1** 根据测试条件，宜采用辐射面直径不大于 20mm，或带有辐射倾角、标称频率为 250kHz~500kHz 的厚度振动式换能器；
- 2** 检测方法：采用同水平面对测法或斜测法。布置测点时应避开预埋线管等部位，相邻测点间距宜为 50mm~150mm；
- 3** 检测过程中若发现某测点数据异常，可进行复测或在其周边加密测点补测；
- 4** 数据处理和异常值判定：可按本规程第 5 章对比法进行异常值判定，并确定缺陷位置和大小范围。

9.2.3 预制双面叠合剪力墙空腔后浇混凝土内部缺陷、叠合面缺陷检测：

- 1** 采用标称频率为 100kHz 的厚度振动式换能器；
- 2** 检测方法：宜采用对测法或斜测法。测点布置和检测方法按本规程第 6 章相关

规定执行；

3 检测过程中，若发现某测点数据异常，应进行复测或加密测点补测；

4 数据处理和异常值判定：

1) 采用声时（或声速）、波幅和波形变化系数等参数，并结合测点连线的位置关系，按本规程第 5 章概率法或对比法进行异常值综合分析和判定；

2) 若发现某些测点数据为异常，可进一步确定缺陷部位和大致范围；

3) 考虑到双面叠合剪力墙空腔内部混凝土缺陷与叠合面缺陷可能同时存在，若对判定结果有怀疑时可局部钻取芯样进行验证。

9.2.4 预制叠合梁、叠合板上部后浇混凝土内部缺陷、叠合面缺陷检测：

1 预制叠合梁、预制板上部后浇混凝土缺陷检测方法可分为阵列超声法和对测法。当现场测试条件和仪器具备时，应优先考虑阵列超声法；

2 阵列超声法：

阵列超声法采用超声成像扫描仪，以预制叠合梁、叠合板上部后浇混凝土顶面为检测面，底面为反射面进行数据采集、缺陷成像分析处理的系统化方法。该方法可直观显示混凝土缺陷及其叠合面缺陷的位置和大小范围。其基本原理参见《装配式混凝土结构检测标准》T/CECS 1189 规程相关条文。该方法检测要点如下：

1) 被测构件检测面（顶面）应大致平整，表面粗糙度不宜大于 5mm，检测面和构件底部应基本平行；

2) 检测前应对所测部位混凝土声速进行标定，同时调试仪器工作频率、增益等参数；

3) 根据仪器扫查面积和提供的参数布置测点。测点宜连续布置。连续布置时相邻测点的检测区域应有一定重叠，最外侧测点距被测构件边缘距离不宜小于构件厚度；

4) 检测时，首先将仪器中心对准第一个测点，并沿构件某一边向对边进行扫测，待第 1 个测点测试结束后，依次按下一个测点从初始位置按同方向进行扫测，直至扫完被测区域；

5) 数据处理和异常值判定：

当采用单点测试时，能直接从仪器显示屏上读取可显示缺陷的二维图像，若图像中存在除底面反射以外的其它反射信号时，可判定该测点部位存在可疑缺陷；

当采用连续测试时，可通过仪器自带的分析软件，显示缺陷的三维图像。进一步对图形进行剖切可得到叠合面缺陷分布图、纵截面成像的缺陷尺寸。

3 对测法：

1) 即本规程第 6 章所采用的检测方法。检测时宜采用标称频率 100kHz 的厚度振动式换能器，在已浇筑混凝土的预制叠合梁、叠合板的表面和底面布置网格测点进行检测。测点布置和检测方法按本规程第 6 章相关规定执行；

2) 数据处理和异常值判定应按本规程第 6.2 节相关规定执行。

9.3 钢筋连接部位套筒或浆锚孔道灌浆饱满度检测

9.3.1 一般规定：

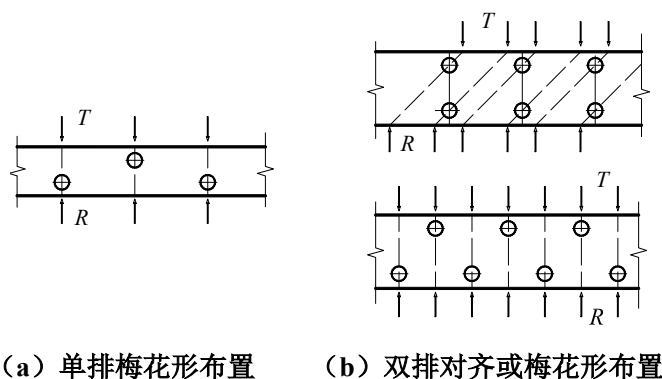
1 本节适于用厚度不大于 300mm 的预制剪力墙竖向钢筋连接用套筒、浆锚孔道灌浆饱满度检测；

2 检测前应事先进行现场和资料调查，确认被测钢筋连接部位套筒或浆锚孔道所用材质、内部构造特点以及在构件内部的具体位置；

3 检测时宜采用辐射面直径不大于 10mm、标称频率不小于 500kHz 的厚度振动式换能器。

4 被测部位构件表面要求同本章第 9.1.3 条。

9.3.2 检测方法：



(a) 单排梅花形布置 (b) 双排对齐或梅花形布置

图 9.3.2-1 套筒或浆锚孔道测点布置平面示意图

1 按图 9.3.2-1 和图 9.3.2-2 所示布置测点。以一个独立的套筒或浆锚孔道为检测对象。测点应位于套筒或浆锚孔道的进浆口与出浆口之间，最上或最下测点应靠近出浆口或进浆口，确保 T、R 换能器连线与套筒或浆锚孔道中心线相交。对于单排、双排按梅

花形布置的套筒或浆锚孔道，可直接采用对测法；对于双排按对齐方式布置的套筒或浆锚孔道，可采用同水平面斜测法；

2 测点数不宜少于 5 个（奇数点）。对于半灌浆套筒或量大的全灌浆套筒或浆锚孔道的全数检测，测点数应不少于 3 个，并按上、中、下布点。测点间距为 20mm~50mm，最大不超过 100mm；

3 对于同一批灌浆套筒或浆锚孔道，检测时无论采用对测法还是同水平面斜测法，每测试部位上、下测点测读顺序应保持一致；

4 检测中若初步判定某部位测点数据异常时应进行复测，同时应检查耦合是否良好，测点表面是否平整；

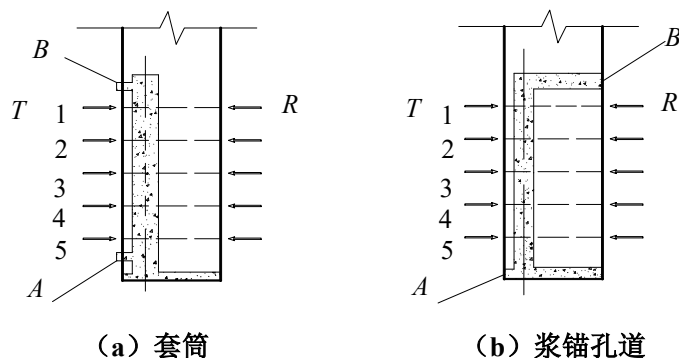


图 9.3.2-2 套筒或浆锚孔道饱满度检测立面示意图

A—进浆口；B—出浆口；1~5—测点编号

5 套筒或浆锚孔道灌浆饱满度检测，宜在实体结构预留未灌浆、灌满浆的套筒或浆锚孔道部位，或制作与实际结构同条件的未灌浆、灌满浆的模拟试件进行对比检测。

9.3.3 数据处理和灌浆饱满度判定：

1 采用波形变化系数（被选样本波形长度取首波起跳点至不少于 5 个周期连续波形长度）按本规程第 5 章对比法判定套筒或浆锚孔道（灌浆后）测点数据是否异常；

2 若判定某些测点数据为异常，可根据异常点部位确定套筒或浆锚孔道灌浆饱满度（缺陷长度）。如对以上判定有怀疑时，可在异常点部位钻孔采用内窥镜法进行验证。

10 混凝土缺陷处理意见

10.1.1 经原设计或有资质单位复核，对于超出设计或规范要求的，或不满足结构安全使用的混凝土缺陷，应采取返修、置换和加固等处理措施。

10.1.2 对于设计或规范允许范围内的混凝土裂缝，可根据耐久性要求，采取封闭、修补或补强处理。

10.1.3 对于检测发现的混凝土低强度区、疏松状或蜂窝状不密实混凝土、空洞等缺陷，若缺陷最大尺寸大于构件断面最小边的 $1/10$ ，或大于 100mm 的，应征得原设计单位确认后采用置换等方法进行修补处理。

10.1.4 当检测发现混凝土结合面缺陷，或构件表面损伤层厚度大于钢筋混凝土保护层厚度时，宜采用水泥基灌浆料等材料进行置换修补处理。

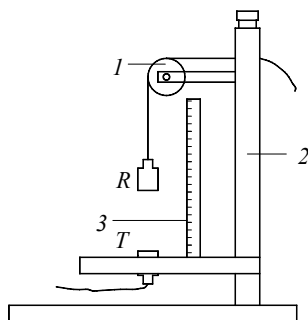
10.1.5 当检测发现表面损伤层厚度小于钢筋混凝土保护层厚度，可采用渗透性较强的修补材料或采取其它方法进行处理。

10.1.6 当检测发现钢筋连接部位套筒或浆锚孔道灌浆不饱满时，应及时进行补灌，确保灌浆饱满度达到 100%。

附录 A 仪器计时系统校准

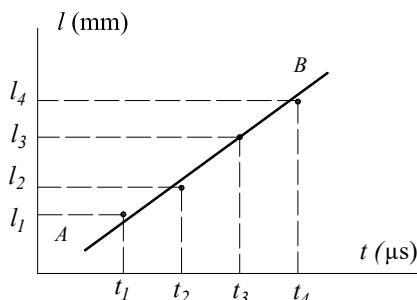
A.1 测试步骤

A.1.1 将一对标称频率为 50kHz 的厚度振动式换能器连接到仪器，并按图 A.1.1 所示悬挂放置于空气中。若两换能器置于水平地面，应在其下面垫以海绵或泡沫塑料。无论采用哪种方式，应尽量保证两个换能器辐射面对准且平行。



A.1.1-1 两换能器悬空放置测试示意图

1—定滑轮；2—测试支架；3—刻度尺



A.1.1-2 空气声速测量用时—距坐标图

A.1.2 测量：

- 1 测量两换能器辐射面之间的不同距离，如测距 l_1 、 l_2 、 l_3 、...、 l_n 依次取 50mm、100mm、150mm、.....。测量误差不大于 $\pm 0.5\%$ ；
- 2 在保持首波幅度基本不变的条件下，依次读取不同测距 l_1 、 l_2 、 l_3 、...、 l_n 对应的声时 t_1 、 t_2 、 t_3 、...、 t_n 。测点数（ n ）： $n \geq 10$ ；
- 3 测试环境空气温度（ T_k ）测量，准确至 0.5°C 。

A.2 空气声速测量值和标准值计算

A.2.1 空气声速测量值（ v_m ）计算：

根据测试距离 (l_i) 和声时 (t_i) 求得以下回归直线方程:

$$\hat{l} = bt + a \quad (\text{A.2.1})$$

式中: $\hat{l}$ ——回归直线方程测距估计值, 图 A.1.1-1 中回归直线 AB 的纵坐标值;

a ——回归常数, 图 A.1.1-1 中回归直线 AB 的截距 (mm);

b ——回归系数, 图 A.1.1-1 中回归直线 AB 的斜率, 空气声速测量值 (v_m):

$$v_m = b, \text{ 精确至 } 0.1\text{m/s}.$$

A.2.2 空气声速的标准值 (v_k) 按下式计算:

$$v_k = 331.4 \sqrt{1 + 0.00367 \cdot T_k} \quad (\text{A.2.2})$$

式中: v_k ——空气声速标准值 (m/s);

T_k ——测量环境空气温度 (°C)。

A.2.3 空气声速测量值 (v_m) 与空气声速标准值 (v_k) 相对误差 (γe) 按下式计算:

$$\gamma e = \frac{v_m - v_k}{v_k} \times 100\% \quad (\text{A.2.3})$$

根据上式计算结果, 若 v_m 与 v_k 相对误差的绝对值 $|\gamma e| \leq 0.5\%$, 即可表明仪器计时系统正常, 否则应维修或重新检定。

附录 B 声时初读数测量

B.1 一般规定

B.1.1 本附录适用于仪器连接不同类型换能器的声时初读数测量，测量方法有两种：一种是仪器连接一对厚度振动式换能器声时初读数测量；另一种是仪器连接一对径向振动式换能器声时初读数测量。

B.1.2 若仪器连接了一只厚度振动式换能器和一只径向振动式换能器时，声时初读数测量值应由以上两种类型换能器声时初读数测量值和的一半来确定。

B.1.3 声时初读数测量值输入到仪器并确认后，仪器会自动扣除声时初读数（以下简称零声时），直接得到并显示混凝土声时，该操作过程称为清零。

B.2 连接一对厚度振动式换能器零声时测量

B.2.1 自动测量：

根据仪器操作使用说明书，选用自动测读零声时模式，将两换能器辐射端面直接耦合，按“零声时”采样键，当首波声时测读光标位于首波起跳点时，停止采样、保存，即得到零声时测量值（ t_0 ）。

B.2.2 手动测量可分以下两种：

- 1 将两换能器辐射面直接耦合，测其声时（ t ），按下式计算零声时测量值（ t_0 ）：

$$t_0 = t'_0 + t \quad (\text{B.2.2-1})$$

- 2 将两换能器耦合于标准棒两端，测其声时（ t ），按下式计算零声时测量值（ t_0 ）：

$$t_0 = t'_0 + t - t_b \quad (\text{B.2.2-2})$$

式中： t_0 —零声时测量值（ μs ）；

t'_0 —测量前仪器初始零声时（ μs ）；

t —两换能器直接耦合或耦合于标准棒两端测读的声时（ μs ）；

t_b —被标定过的标准棒声时（ μs ）。

- 3 将手动测量得到的零声时测量值（ t_0 ）输入到仪器“零声时”对话框，经确认即可完成零声时测量。

B.3 连接一对径向振动式换能器零声时测量

B.3.1 仪器连接一对径向振动式换能器时，其零声时测量值（ t_{00} ）由两部分组成：一是仪器设备系统（含仪器、信号线和换能器等）产生的声时（ t_1 ），二是仪器设备系统以外其它介质（如水耦合层或声测管管壁等）产生的声时（ t_2 ）， $t_{00} = t_1 + t_2$ 。

B.3.2 仪器设备系统产生的声时（ t_1 ）测量：

将一对径向振动式换能器置于清水中同一水平高度，并保持其轴线平行。先后调节两个换能器，测量其中心连线内边缘间距，如取 $l_a=200\text{mm}$ ， $l_b=100\text{mm}$ 分别读取相应声时 t_a 和 t_b 。则声时(t_1)按下式计算：

$$t_1 = \frac{l_a \times t_b - l_b \times t_a}{l_a - l_b} \quad (\text{B.3.2})$$

式中： t_1 —仪器设备系统产生的声时（ μs ）；

l_a 、 l_b 和 t_a 、 t_b —分别为径向振动式换能器在水中两个不同位置的测距（mm）和对应的声时（ μs ）。

B.3.3 仪器设备系统以外其它介质产生的声时（ t_2 ）按下式进行计算：

$$\text{采用声测孔时：} t_2 = \frac{d_1 - d}{v_w} \quad (\text{B.3.3-1})$$

$$\text{采用声测管时：} t_2 = \frac{d_2 - d_1}{v_s} + \frac{d_1 - d}{v_w} \quad (\text{B.3.3-2})$$

式中： t_2 —设备系统以外其它介质产生的声时（ μs ）；

d —径向振动式换能器直径（mm）；

d_1 、 d_2 —分别为预埋声测管内径（或声测孔直径）和外径（mm）；

v_w —声测孔或声测管中水的声速（km/s），由表 B.3.3 确定；

v_s —预埋声测管材料声速估算值（km/s），当采用钢管取 5.80km/s，采用 PVC 管时取 2.35km/s。

表 B.3.3 水的声速与其温度之间关系

水温（℃）	5	10	15	20	25	30
水的声速 v_w （km/s）	1.45	1.46	1.47	1.48	1.49	1.50

B.3.4 将上述计算得到的零声时（ t_{00} ）测量值输入到仪器“零声时”对话框，经确认即可完成零声时测量。

本规程用词说明

1 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”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 《装配式混凝土建筑技术标准》 GB/T 51231
- 《钢—混凝土组合结构施工规范》 GB50901
- 《装配式混凝土结构技术规程》 JGJ 1
- 《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》 JGJ 355
- 《装配式混凝土结构检测标准》 T/CECS 1189
- 《建筑基桩检测技术规范》 JGJ106

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

T/CECS 21-2024

条 文 说 明

编制说明

《超声法检测混凝土缺陷技术规程》T/CECS21-2024，经中国工程建设标准化协会2024年X月X日以第XXX号公告批准、发布。

本规程是在《超声法检测混凝土缺陷技术规程》CECS21:2000的基础上修订而成。上一版规程的主编单位是陕西省建筑科学研究设计院、上海同济大学；参编单位是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；规程主要起草人为张治泰、李乃平、李为杜、林维正、张仁瑜、罗骐先、濮存亭和林文修。

本规程主要修订的内容有：1. 取消了模拟式混凝土超声波检测仪相关内容；2. 取消了附录C空洞尺寸估算方法；3. 增加了波形变化系数判定参数；4. 修订了数据处理和异常值判定方法；5. 修订并完善了钢—混凝土组合结构缺陷检测方法；6. 增加了装配式混凝土结构缺陷检测方法；7. 修订并完善了大体积混凝土构件和灌注桩缺陷检测方法，取消了灌注桩完整性等级评定方法；8. 增加了混凝土缺陷处理意见。

本规程在修订过程中，编制组在广泛调查和征求意见基础上，吸收了国内外超声波检测仪最新技术，认真总结了二十多年建设工程混凝土缺陷检测的应用成果和经验，使超声法检测混凝土缺陷的内容更为全面。

为了便于检测、设计、施工、科研、监理和学校等单位有关人员在使用本规程时能正确理解和执行条文规定，《超声法检测混凝土缺陷技术规程》编制组按章、节、条顺序编制了本规程的条文说明，包含了规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项。但是，本条文说明不具备与规程正文同等法律效力，仅供使用者理解或把握规程相关规定时参考。

目 次

1	总 则	(50)
2	术语和符号	(50)
3	超声波检测设备	(51)
3.1	超声波检测仪技术要求	(51)
3.2	换能器技术要求	(51)
3.3	检定、校准和保养	(51)
4	声学参数测量和计算	(52)
4.1	一般规定	(52)
4.2	声学参数测量	(52)
4.3	声学参数计算	(53)
5	数据处理和异常值判定方法	(54)
5.1	一般规定	(54)
5.2	对比法异常值判定	(55)
5.3	概率法异常值判定	(55)
6	一般混凝土构件缺陷检测	(57)
6.1	一般规定	(57)
6.2	内部不密实区和空洞的检测	(57)
6.3	裂缝深度检测	(58)
6.4	结合面缺陷检测	(59)
6.5	表面损伤层检测	(60)
7	大体积混凝土构件和灌注桩缺陷检测	(62)
7.1	一般规定	(62)
7.2	大体积混凝土构件缺陷检测	(62)

7.3 灌注桩混凝土缺陷检测	(64)
8 钢—混凝土组合结构缺陷检测	(66)
8.1 一般规定	(66)
8.2 钢管混凝土缺陷检测	(66)
8.3 钢骨混凝土缺陷检测	(68)
9 装配式混凝土结构缺陷检测	(70)
9.1 一般规定	(70)
9.2 后浇混凝土或灌浆料缺陷检测	(70)
9.3 钢筋连接部位套筒或浆锚孔道灌浆饱满度检测	(71)
10 混凝土缺陷处理意见	(73)
附录 A 仪器计时系统校准	(74)
附录 B 声时初读数测量	(75)

1 总 则

1.0.1 混凝土缺陷超声法检测是一种非破损检测方法，它具有测试距离大，测试准确性和精度较高、使用方便等优点。它在我国建工、市政、铁路和公路等系统得到广泛应用，且受到各界认可。

1.0.2 本规程规定了超声法检测混凝土缺陷的具体内容。为适应我国建设工程发展需要，在原规程基础上增加并完善了大体积混凝土结构、钢—混凝土组合结构和装配式混凝土结构混凝土缺陷的检测内容。

1.0.3 结构构件混凝土是一种由多相成分组成的弹粘塑性的非均质材料，超声脉冲波（以下简称为超声波，或声波）通过混凝土均会产生一定程度的扩散、吸收和散射衰减。

对于正常混凝土，当材料组成和工艺条件、质量情况及测试距离、角度等不变的前提下，声波通过不同部位的混凝土，其传播声时（或声速）、幅度和主频等声学参数值不会有较大差异；当声波通过混凝土内部不密实区、空洞和裂缝等缺陷时，因混凝土材料的整体性、连续性被破坏，声波传播的声时、波幅、主频及波形将产生较大变化。

超声波检测混凝土缺陷正是基于以上原理，对同条件下各测点的声时、波幅、主频和波形变化系数等参数值的变化进行对比分析，以判定混凝土缺陷情况。

1.0.4 本规程将涉及高空等作业。在现场检测混凝土缺陷时，安全防范措施和劳动保护等均应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1.5 样本波形是根据声波遇混凝土缺陷可能产生的波形变化在时域区间选取的一段波形，采用样本波形数据可计算波形变化系数。

2.1.7 波形变化系数是本次修订新增加的混凝土缺陷判定参数，它弥补了波形参数一直不能量化的空白。

3 超声波检测设备

3.1 超声波检测仪技术要求

3.1.1 近二十多年来，我国已研制并生产了技术性能良好、功能强大的数字式混凝土超声波检测仪（以下简称数字式超声仪）。为了适应混凝土缺陷检测技术发展，满足工程需要，本次修订不再使用模拟式超声波检测仪，要求采用数字式超声仪。

数字式超声仪是将接收的脉冲信号，经高速 A/D 转换为离散的数字量并直接输入到仪器计算单元，通过相关软件分析处理，自动测读和显示声时、波幅和主频值。它具有对数字信号采集、处理和存储等功能。在一般低信噪比情况下也能准确测读首波声时。

为了确保检测数据的可靠性，数字式超声仪应严格进行质量检定，每项指标均应达到现行行业标准《混凝土超声波检测仪》JG/T 5004 规定的质量要求，方可投入使用。

3.1.2 目前国内市场上绝大部分数字式超声仪技术性能都很高。基于此，本次修订对仪器主要技术指标相对原规程均有所提高。

本次修订采用换能器标称频率为 20kHz~500kHz，对于数字式超声仪的接收放大器，在此频响范围可以满足电气性能要求。

本次修订编制组已要求厂家提供仪器可调用的波形数据文件，这样可利用波形数据计算波形变化系数，这对于本次规程修订至关重要，也为以后超声波测缺技术进一步研发提供了基础。

3.2 换能器技术要求

3.2.1 一般根据测距、混凝土质量和被怀疑的缺陷大小，在能确保首波信号可分辨的前提下，应尽量选用标称频率较高的换能器。

3.2.3 若换能器的实测频率与标称频率差异过大，易造成信号鉴别和数据对比混乱。

3.3 检定、校准和保养

3.3.1~3.3.3 仪器检定、校准和保养是整个检测工作的重要环节，检测过程中不得忽视。经检定（或校准）合格的仪器必须持有相应的检定报告，或留存校准记录才能使用。

4 声学参数测量和计算

4.1 一般规定

4.1.1、4.1.2 根据调查结果和检测方案,选取混凝土质量缺陷有争议或怀疑的部位进行检测,是判定混凝土质量缺陷的关键。

4.1.3、4.1.4 当采用厚度振动式换能器,应避免换能器接触面不平整或表面缺陷对测试数据的影响;当采用黄油等材料耦合时,耦合层不得夹杂泥沙或空气,否则将导致声时延长、波幅降低,对真实反映内部混凝土质量带来影响。当采用径向振动式换能器,一般以水为耦合剂,不存在耦合不良的问题。

4.1.5 声波在混凝土中传播衰减除了与混凝土质量、传播距离有关外,还与发射换能器的标称频率有关。频率越高,缺陷检测的灵敏度也越高;但声波在混凝土(非均匀介质)中的传播除了扩散衰减外,也会随着发射频率增大带来较大的吸收或散射衰减,使首波信号微弱难以分辨测读,影响混凝土缺陷判定。即发射换能器的标称频率不宜太高。此外,在发射换能器标称频率不变情况时,提高仪器发射电压可提高首波信号的识别度。

4.1.6 对于同一构件或同一批构件,检测过程所用仪器设备系统和参数设置应保持不变,这样才能保证同条件测点数据具有可比性。

4.2 声学参数测量

4.2.1 仪器声时测读一般随接收信号首波幅度高低会有所不同,当测距较大时可以忽略其差异。但对于较小尺寸构件或进行仪器校准时,为减小声时测量误差,可将首波幅度调至某一固定高度进行测读。

波幅可反映同条件测点声波在混凝土传播中能量大小。当声波遇混凝土空洞或蜂窝状不密实混凝土时,将在缺陷界面产生较为复杂的折射、反射和散射现象,从而造成声能衰减,首波幅度下降,并伴随声时延长、波形或主频产生有不同程度的变化。

4.2.2 主频在反映疏松状或低强度不密实混凝土较为敏感。当声波通过该不密实区时,主要因声波的吸收、散射现象导致超声脉冲波的高频成分发生了较大衰减(相当于滤波),相对正常混凝土,接收波形主频变小,声时变长(或波速变小)和波形也发生明显变化。

但主频在混凝土缺陷判定中不常用,一般作为参考参数。主要因为主频测量一般是

通过仪器自带的频谱分析软件，对设定的一定采样长度的时域波形经频谱分析计算得到。若波形在其时域范围出现了超屏，得到的主频误差很大。有时也采用手动测量来估算接收波形的主频，但基于对首波一个完整周期波形的估算，未考虑因缺陷可能产生的后续波形变化，即存在一定的局限性。

如果主频可避免上述影响因素，也可作为混凝土缺陷的判定参数。

4.2.3 在波形数据采集过程中，若被选样本波形在其长度范围出现了超屏，波形数据会失真，由此计算的波形变化系数误差较大，对判定结果带来影响。

4.3 声学参数计算

4.3.2 混凝土声速是根据测距、声时公式算得到的参数值。对于同一测区，若测点测距不相等时，常采用声速来评价混凝土质量。对于同条件测点，无论采用声速还是声时，对混凝土缺陷判定结果是一致的。

4.3.3 为了计算某测点波形变化系数，首先必须根据样本波形长度、采样间隔计算波形数据总个数；然后依次计算基准波、第*i*点波形数据的平均值和标准差。需要强调的是基准波和第*i*点波形均属同条件样本波形。

4.3.4 采用波形变化系数是基于声波遇混凝土缺陷使接收信号波形发生了变化。利用该变化可判定混凝土缺陷。一般来讲，若混凝土内部有缺陷，其波形必然会发生变化；但波形变化并不一定代表混凝土内部就有缺陷，如受构件边缘影响，或本规程第8章中声波遇内部钢板等非缺陷介质影响等，也会使波形发生变化。

某测点波形变化系数是相对于同条件基准波形，通过标准化欧氏距离公式计算的数值，它反映了两组有序数据之间变化大小。如某测点波形变化系数越小，即表明该测点波形变化不大，该测点部位混凝土质量越接近正常混凝土；反之，亦然。

5 数据处理和异常值判定方法

5.1 一般规定

5.1.1 基于原规程，本次修订将对比法异常值判定（以下简称对比法）和概率法异常值判定（以下简称概率法）归为一章，便于本规程各章节采用，避免内容重复。

5.1.2、5.1.3 本次修订对同条件测点、对比点做了定义。若测点不属于同条件，其数据没有可比性。

5.1.4 基于混凝土缺陷类型和实际缺陷的复杂性，一般情况下宜采用多参数进行异常值判定，即在一定程度可弥补单参数判定带来的不足，且每个判定参数都有各自优缺点。

对于主频，如本规程第 4.2.2 条所述，对于疏松状或低强度不密实混凝土缺陷敏感性较高，但同时该参数分析计算误差较大，一般情况不宜作为判定参数，常作为参考。除非它可以准确测量或分析计算。

波幅是缺陷较为敏感的判定参数，但有时受测试表面、耦合等因素影响易使波幅值降低，产生一定的误差。

声时（或声速）是检测准确性较高的判定参数。一般声波遇混凝土缺陷声时总会变长，但对较小的混凝土缺陷敏感性不是很高。

本次修订增加的波形变化系数，适合于复杂的内部混凝土缺陷判定，可在一定程度弥补因构件表面、耦合问题对波幅值的影响。根据波形变化系数计算公式 4.3.5，只要某测点处波形不发生明显变化，构件表面或耦合等因素虽会引起首波幅度降低，但不会改变波形变化系数大小。此外，对于因混凝土缺陷导致接收信号主频变小，波形变化系数也能更好反映。

波形变化系数虽然携带了声波遇缺陷产生的波形变化数据，若被选样本波形长度不合理，也会带来缺陷变化以外的波形数据，影响波形变化系数计算结果，对异常值判定带来不利。

5.1.5 超声波检测混凝土缺陷是一种无损检测方法。由于实际混凝土内部缺陷较为复杂，采用无损检测方法在判定混凝土缺陷判时会存在一定程度的不确定性，若有必要可采用局部破损的方法进行验证。

5.2 对比法异常值判定

5.2.1、5.2.2 任何检验项目结果是否合格,都离不开检测人员的实践经验和分析判断。混凝土缺陷检测也如此。

对比法是一种经验判定方法。统计学聚类法在多数情况下,采用数理统计的方法将某一判定参数同条件测点数据按离差大小分为较大、较小两类(或两组)。使每组内数据离差较小,组间数据离差较大,以提高检测人员在异常值判定方面的可信度。

当采用聚类法判定时,如果原始测点数据离散较小(可能不存在异常值),虽将所有测点数据可分成两类,但易导致异常值误判。基于此,聚类法应与检测人员的经验对比法相结合,当测点数据较多时可与本章第 5.3 节概率法相结合,进行综合分析判定。

5.3 概率法异常值判定

5.3.1 概率法异常值判定时,测点数必须足够多,且对比点数不少于总数的 1/2。这样计算的平均值、标准差才具有更好的代表性,避免或减少异常值漏判现象。

5.3.2、5.3.3 原规程采用传统概率法进行异常值判定。即假定母体标准差已知,测点数据符合正态分布。根据 GB 4086.1 标准可以查到样本数量(n)为 20~160 时,对应异常值概率为 1.0%~5%,判定系数为 1.65~2.50。当测点数 $n=30$ 时,异常值概率为 3.3%,异常值判定系数为 1.82。

此外,GB/T 4883 标准中给出了 2 种异常值(或离群值)判定方法:一种为如奈尔临界值法:假定母体标准差已知,样本数据符合正态分布。当异常值检出水平为 5%,临界值判定系数 $R_{0.95} = 2.881, n = 30$;当异常值剔除水平为 1%时,判定系数 $R_{0.99} = 3.345, n = 30$ 。另一种为格拉布斯临界值法:假定母体标准差未知,样本数据符合 t 分布。当异常值检出水平为 5%,临界值判定系数 $R_{0.95} = 2.745, n = 30$ 。

基于此,无论母体标准差是否已知,当测点数为 30 个时,以上异常值概率或检出水平为 3.3%~5%,临界值(或异常值)判定系数为 1.82~2.88。经大量模拟试验和实际工程检测和验证,采用原规程和以上判定方法,混凝土缺陷漏判概率仍比较大。

本次规程修订概率法异常值判定系数确定方法和依据:

根据概率统计学原理,对同一构件混凝土缺陷检测,如果检测人员、现场条件、测点布置和仪器设备系统不同时,所测数据也会有所不同,即测点数据具有随机性。检测

前，被测构件（可视为母体）某参数的标准差和平均值均未知，即被测构件测点数据应基本符合 t 分布，由此计算的的平均值（ $\bar{x}$ ）和标准差(s)应分别符合 t 分布和 χ^2 分布。设 μ_p 为某参数异常值的判定值（ x_0 ）对应的分位数（ p 为异常值概率），则 x_0 可由 $\bar{x}$ 、 s 、 μ_p 的代数和表示， x_0 应符合非中心 t 分布（概率密度函数较复杂，可参见相关教科书）。

经模拟试验和大量的工程实测和验证，本次规程修订波幅、声速和主频等参数异常值概率（ p ）取 3%（下侧），声时和波形变化系数等参数异常值概率（ p ）也取 3%（上侧）；上侧或下侧判定值（ x_0 ）置信区间水平均取 90%。根据 GB/T 10094 标准，可分别查得某判定参数上侧或下侧分位数（ μ_p ）对应区间的上、下限系数（ $k_{m,1}$ 、 $k_{m,2}$ ）；取上侧或下侧各自区间上限或下限系数的较小者，即为本规程异常值判定系数（ k_m ）。基于上侧或下侧判定值均具有 90%的置信区间水平，故异常值漏判或误判的概率均为 5%。

5.3.4 在对异常值初次判定前，有时会发现原始测点个别数据存在明显偏大或偏小现象，如果将这些数据纳入参与统计计算，其平均值、标准差将在一定程度偏离母体（即代表性变差），由此会增大异常值漏判的概率。

基于此，在初次异常值判定前，将明显偏小或偏大测点数据先假定为异常，去除后利用剩余测点数据的统计量计算初次异常值的判定值，然后再对原始测点数据（含初次假定为异常、去除的数据）重新进行异常值判定，可减少或避免异常值漏判现象。

6 一般混凝土构件缺陷检测

6.1 一般规定

6.1.1、6.1.2 考虑到装配式混凝土结构和钢—混凝土组合结构缺陷检测具有特殊性，而大体积混凝土构件和灌注桩缺陷检测一般要利用声测孔或预埋声测管。故本次修订将原规程采用厚度振动式换能器的共四章检测内容“内部不密实区和空洞检测、裂缝深度检测、混凝土结合面质量检测和表面损伤层检测”合并为一章“一般混凝土构件缺陷检测”。对于本规程后面章节，若涉及相同检测内容或判定方法，可参照本章相关规定执行，以避免重复。

6.2 内部不密实区和空洞检测

6.2.1 所谓混凝土不密实区，系指因振捣不够、漏浆、石子因构件内部钢筋架空等造成的蜂窝状，或因缺少水泥或遭受意外损伤形成的疏松状混凝土区域；对于新拌混凝土因水胶比过大、水泥用量不足所产生的混凝土低强度区也属混凝土不密实区。

混凝土内部不密实区或空洞检测一般采用穿透法。它是依据同条件测点的声学参数值相对变化来判定异常值。若发现某些测点数据为异常，可根据其空间位置判定内部缺陷部位和大致范围。基于此，被测部位最好具有两对相互平行的检测面，若受条件限制，也应至少有一对相互平行或垂直的检测面。

被怀疑的内部不密实区和空洞部位，一般是根据施工方、建设方等单位提供的信息或构件外部暴露的质量缺陷，或结构使用过程中发生局部质量缺陷。检测时为避免缺陷漏检，测试范围（测区）应大于被怀疑的缺陷部位，同时应有足够数量的对比测点，保证测点数据统计量具有代表性。

6.2.2 根据被测结构构件所能提供的检测面数量和位置确定相应的检测方法，如对测法、斜测法或角测法等。若发现某些测点数据异常时，除了复测、加密测点检测外，还可采用多角度检测，这对于确定缺陷部位和大小至关重要。对于仅有一个检测面的构件，其检测方法可按本规程第7章相关规定执行。

6.2.3 基于构件内部实际混凝土缺陷具有多样性和复杂性，有时按本规程第5章概率法判定异常值并不十分有效，故将概率法和对比法相结合有利于异常值综合分析判定。

6.3 裂缝深度检测

6.3.1 对于单面平测法和双面斜测法：当被测裂缝内部积水或被泥浆等其它材料填充时，将会直接影响裂缝深度的计算和判定。

单面平测法跨缝检测或双面斜测法过缝检测时，一部分声波会通过裂缝中的填充物直接收换能器。对于单面平测法，可能会因此导致跨缝接收信号首波声时测读偏小，裂缝深度计算误差偏大；对于双面斜测法，可能会导致接收信号首波测读值与不过缝测读值差异不明显，造成裂缝深度判定困难。

6.3.2 1 采用单面平测法检测时，由于换能器声束的指向性或沿辐射方向扩散衰减较大，平测距离大于 1000mm 或裂缝深度估计值大于 500mm 时，接收到的首波信号微弱难以分辨，极易将后续波误为首波测读，导致较大的测读误差。

本次修订跨缝与不跨缝测点数均不少于 5 点（比原规程多 2 点），是为了利用不跨缝测点 (l'_i, t_i) 求得相关性更好的回归直线方程，得到混凝土声速和接近实际的测距估计值。平测距离以两换能器中心连线的内边缘为准，也有利提高回归方程的相关性，消除声波传播路径误差的影响。

在布置测点时，首先通过测量或调查得知钢筋位置和方向，以使测点连线与内部钢筋方向保持一定夹角（45 度最好）。如果测点连线与钢筋方向平行且间距较近时，跨缝检测的一部分声波将可能通过钢筋优先到达接收换能器，导致声时测读失真。

选择被测裂缝最宽部位，能更好的反映裂缝最大深度；选在 1/2 缝长部位可避免跨缝检测时声波通过裂缝长度方向的端部导致声时测读失真。

3 本次对原规程裂缝深度计算公式做了修订。即采用跨缝、不跨缝平测距离估计值根据直角三角形勾股定理推导出裂缝计算深度。跨缝、不跨缝平测距离估计值是将对应的声时分别代入回归直线方程（6.3.2-1 公式）求得。因为求得的回归直线方程测距估计值是对初测距离的估计，经回归更接近声波实际传播距离。

4 在跨缝测量中，有时会出现首波反相，即声波通过裂缝深度末端后相位发生反转现象，首波由原来波谷变为波峰。波形相位发生反转，其相位差为 180 度。

经模拟试验和工程实测的验证，首波反相对应某一测距 (l'_i) 与被测裂缝深度接近。但有时受裂缝部位钢筋、错位等因素影响难以发现首波反相，故本规程提出了两种

裂缝深度判定方法。

将各测点裂缝计算深度剔除测距 $l'_i < \bar{h}$ 和 $l'_i > 3\bar{h}$ 所对应的 h_i 数据,是因为 l'_i 与裂缝深度 h_i 相近时测得的裂缝深度较为准确,故按此进行取舍。由于跨缝检测时实际工程裂缝有可能存在短接现象,一般较小的测距反映短接处裂缝深度,较大测距反映裂缝的最大深度。若按上述方法取舍后,剩余裂缝计算深度出现较大和较小分组现象,应取较大一组数据的平均值($\bar{h}$)作为该裂缝深度检测值(h_c)。

6.3.3 1 在工程检测中常遇到混凝土构件竖向或斜向裂缝,为了检测其深度或是否贯穿,一般至少有一对相互平行的检测面,采用同条件过缝与不过缝的测点连线进行对比斜测。该方法比较直观,检测结果较为准确、可靠;

双面斜测法检测原理:当过缝检测时,由于裂缝破坏了混凝土的连续性,从而导致大部分声波在裂缝界面处产生反射出现较大衰减,穿过裂缝的首波信号变弱,幅值降低、声时变大。它与同条件不过缝的正常混凝土相比,声学参数值存在较大差异。

2 在跨缝检测时,为能反映裂缝深度或贯穿情况,过缝中应有一条测点连线与构件水平剖面的中心线相交,这样能更好的反映裂缝深度是否超过构件截面某一方向尺寸的一半。

3 双面斜测法过缝与不过缝声学参数值差异明显,采用本规程第5章对比法能够有效判定异常值并可确定混凝土裂缝深度。

6.4 结合面缺陷检测

6.4.1 采用超声法检测混凝土结合面缺陷,其判定结果与结合面粘结强度无定量关系。

6.4.2 结合面缺陷检测与本规程6.3节裂缝双面斜测法类似。需要强调的是,测点布置时,少数排对比点宜在结合面两侧布置,主要原因在实际检测中常发现结合面两侧混凝土质量存在较大差异,该差异会导致结合面缺陷误判。一般以混凝土质量较差的对比部位为异常值判定的对比点。若发现结合面某侧混凝土质量确实较差,若有必要应进行混凝土强度和密实情况检测,确保结构安全。

6.4.3 在混凝土结合面缺陷判定时,有时受结合面两侧混凝土质量影响,接收信号首波幅值、声时变化并不明显,本次修订增加了波形变化系数,有利于对结合面缺陷进行综合分析判定。

6.5 表面损伤层检测

6.5.1 采用超声波检测表面损伤层厚度，其目的为结构构件修补补强或加固处理提供依据。

基于表面损伤层检测采用了单面平测法，根据本规程 6.3.2 条文说明，检测时接收信号本身较弱。若采用较高频率的换能器，将会带来较大的吸收或散射衰减，使首波信号变弱难以分辨，声时测读误差变大，故不宜选用标称频率较高的换能器。

6.5.2 1 抽检有代表性的损伤层部位，可反映混凝土损伤的真实情况。如果表面损伤层混凝土很潮湿，会导致实测损伤层声速测值偏高（因为水比空气声速大 4 倍多），导致与未损伤混凝土声速差异变小，计算的损伤层厚度误差偏大。此外，若测试部位表面有接缝或饰面层，会导致实测损伤层混凝土声速失真。

3 为了求得损伤层混凝土声时—测距回归直线方程（或绘制时—距坐标图），有利于对较薄的损伤层厚度检测，发射换能器应置于某一位置保持不动，接收换能器每次移动的距离不宜太大，按两换能器中心连线内边缘距离 30mm 或 30mm 的整数倍逐点移动，且保证测点数应不少于 6 个。

6.5.3、6.5.4 由于表面损伤层测试数据存在不确定性，故需要对测点部位按 6.5.3 公式进行声速估算。当声速估算值存在较小、较大分组现象且每组测点数据是不少于 3 个时，即表明测点数据有效。

若测点数据有效，可利用以上声速估算值出现的较小、较大分组对应的测距（ l'_i ）、声时（ t_i ）分组，分别求出损伤、未损伤混凝土回归直线方程以及两回归直线方程的交点（ t_m ， l_m ），并按公式 6.5.4-4 计算损伤层厚度。

混凝土表面损伤层厚度 6.5.4-4 计算公式可按以下原理进行推导：

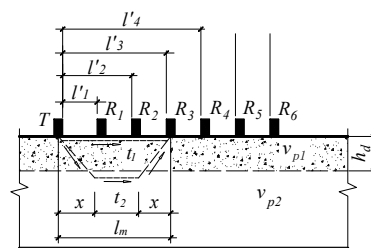


图 6.5.4 损伤层厚度检测和计算原理示意图

如图 6.5.4 所示，当 T、R 换能器距离较近时，声波直接沿损伤层传播到接收换能器；

随着 T、R 换能器间距增大，部分声波穿过损伤层沿内部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 换能器间距增大到一定距离时，穿过损伤层经未损伤混凝土到接收换能器的声波，比沿损伤层直线传播的声波早先或同时到达接收换能器。设穿过损伤层且经过未损伤混凝土传播声时为 t_2 ，沿损伤层直线传播的声时为 t_1 ，即有 $t_2 \leq t_1$ 。

1 根据图 6.5.4，声波沿 2 条传播路径的声时分别按以下公式进行计算：

$$\text{声波沿损伤层直线传播的声时： } t_1 = \frac{l_m}{v_p'} \quad (1)$$

声波先穿过损伤层再经过未损伤混凝土传播的声时：

$$t_2(x) = \frac{2\sqrt{h_d^2 - x^2}}{v_{p1}} + \frac{l_m - 2x}{v_{p2}} \quad (2)$$

若声波按以上 2 条路径同时达到接收换能器时，则有 $t_2 = t_1$ ，即得到如下公式：

$$\frac{l_m}{v_{p1}} = \frac{2\sqrt{h_d^2 - x^2}}{v_{p1}} + \frac{l_m - 2x}{v_{p2}} \quad (3)$$

2 声波先穿过损伤层再经过未损伤混凝土传播的声时 t_2 应最短（即求声时的最小值），求 $t_2(x)$ 的一阶导数，使 $t_2'(x) = 0$ ，即：

$$t_2'(x) = \frac{2x}{v_{p1}\sqrt{h_d^2 - x^2}} - \frac{2}{v_{p2}} = 0 \quad , \text{ 经整理可以得到： } x = \frac{v_{p1}h_d}{\sqrt{v_{p2}^2 + v_{p1}^2}} \quad (4)$$

再求 $t_2(x)$ 二阶导数，计算结果见下式：

$$t_2''(x) = \frac{2}{v_{p1}\sqrt{h_d^2 - x^2}} \cdot \left(1 - \frac{1}{(h_d/x)^2 + 1}\right) > 0 \quad (5)$$

根据函数极值定理， $x = x_0 = \frac{v_{p1}h_d}{\sqrt{v_{p2}^2 + v_{p1}^2}}$ 时，声波传播声时 t_2 为最短，即在 $x = x_0$

时，声时（ t_2 ）存在极小值。把 $x = x_0$ 代入（3）式，可以得到下式：

$$\frac{l_m}{v_{p1}} = \frac{2}{v_{p1}} \cdot \sqrt{h_d^2 + v_{p1}^2 h_d^2 / (v_{p2}^2 - v_{p1}^2)} + \frac{l_m}{v_{p2}} - \frac{2h_d v_{p1}}{v_{p2} \sqrt{v_{p2}^2 + v_{p1}^2}} \quad (6)$$

经整理，损伤层厚度 (h_d) 计算公式如下：

$$h_d = \frac{l_m}{2} \cdot \sqrt{\frac{v_{p2} - v_{p1}}{v_{p2} + v_{p1}}} \quad (7)$$

7 大体积混凝土构件和灌注桩缺陷检测

7.1 一般规定

7.1.1 本次修订在原规程“第9章 灌注桩混凝土缺陷检测”基础上增加了大体积混凝土构件缺陷检测，主要考虑到这些构件外形尺寸特殊，且检测时要采用径向振动式换能器，故将以上两类构件缺陷检测归并为一章。

7.1.2 基于径向振动式换能器以水为耦合介质，为保证声波有一定穿透能力，确保首波信号清晰可辨能测读，须采用频率较低的径向振动式换能器。若仪器采用了一只径向振动式换能器和一只厚度振动式换能器，厚度振动式换能器的标称频率也不宜太高，一般采用 50kHz 标称频率。

7.1.3 不同类型的换能器、不同耦合条件，仪器声时初读数会有所不同，故检测前应按附录 B 进行声时初读数测量。

7.2 大体积混凝土构件缺陷检测

7.2.1 1、2 工程建设和大型设备的基础、水坝和桥墩等大体积混凝土构件常见的缺陷与一般混凝土构件基本相同。但缺陷出现的位置有时会相对特殊、隐蔽。检测前调查缺陷产生原因、可能出现的位置、类型和大小范围、有无声测孔和可用检测面等，对制订检测方案至关重要。

3 本次修订提出的两种检测方法：孔—孔法和孔—面法。系根据被怀疑的缺陷部位与某一外立面远、近关系，或可采用的检测面及其个数来确定。

对于孔—孔法，当检测面仅有水平顶面时，所钻声测孔为竖向孔；若检测面仅有一个倾斜的外立面（如水利大坝的斜立面等），所钻声测孔为斜孔，为保证斜向声测孔在满水情况下检测，需要在声测孔下部设置挡水围堰或采取其它措施。

4 对于大体积混凝土一般事先很少预埋声测管，当怀疑某部位存在混凝土缺陷时，才会考虑钻取声测孔。所钻声测孔中心线应保持平行，以避免 T、R 换能器间距变化影响声学参数值对比分析。

声测孔中若有粉末碎屑，充水后便形成悬浮状易造成声波散射衰减，导致首波信号减弱难以分辨测读。

大体积混凝土测试距离不能过大。测距过大会导致混凝土缺陷检测的灵敏度降低，另一方面会造成首波信号减弱难以分辨测读；若测距太小，因大部分混凝土内部配有钢筋，会增加钻声测孔工作量和难度。

大体积混凝土缺陷检测，沿高度方向相邻测点间距不宜太大，否则易导致混凝土缺陷漏检。若检测深度较大时，相邻测点间距可适当增大，但不得超过 300mm。

为使换能器始终处于或接近声测孔中心位置，保持测距、测读数据一致性，在不影响换能器上下移动的情况下，可在每个换能器外部套上两个橡皮圈定位。

7.2.2 1 当大体积混凝土构件顶面（或斜立面）裂缝深度估算值大于 500mm 时，可按本节相关规定进行检测。如果裂缝深度估算值较浅，应采用本规程第 6.3 节单面平测法；若按本节规定的方法检测，会因径向振动式换能器自身长度影响导致测点数据太少，无法进行对比分析。

2 孔一孔法是目前用之较多的检测方法，该方法相对简单，它与孔一面法检测基本相同。

采用孔一孔法检测时，根据本规程第 7.2.1 条文说明，声测孔间距不宜过大；若声测孔间距过小，被测裂缝末端如有倾斜将有可能超出测距范围，无法反映裂缝真实深度。

3 裂缝深度一波幅曲线判定原理：一般混凝土裂缝宽度由表及里会逐渐变窄直至闭合。当过缝检测时，最上部裂缝宽度较大，故声波在其界面产生的反射就越大，声能衰减也越大，即接收信号首波幅度就越小。随着换能器逐渐下移，裂缝宽度也逐渐变窄，首波幅值也随之变大。当波幅达到最大且随着换能器下移基本保持不变时，T、R 换能器处于无裂缝的完好混凝土中。在深度一波幅曲线上，波幅由小开始变大至最大对应的深度即为裂缝深度检测值。

有时，根据深度一波幅曲线难以确定混凝土裂缝深度，就得根据另外两孔不跨缝测点为对比点，采用本规程第 5 章对比法进行裂缝深度判定。若裂缝判定深度与声测孔实际钻取深度基本接近时，若有必要可加深声测孔做进一步检测。

7.2.3、7.2.4 大体积混凝土结合面缺陷、内部不密实区和空洞检测与本规程第 6 章一般构件相应的检测和判定方法基本相同，它可视为一般构件补充。

在实际工程中，大体积混凝土内部不密实区、空洞和与结合面缺陷往往并存，为避免缺陷漏检，应优先采用高度方向上、下斜测法。

由于大体积混凝土结合面覆盖范围较大且内部形态复杂，一般根据调查结果抽取有代表性部位。

若大体积混凝土被怀疑的缺陷范围较大时，为提高检测效率，减少钻声测孔工作量，可将声测孔间距适当拉大，但前提须保证首波信号清晰可辨能测读。最大测距为 3000mm。当发现某些测点数据异常时，再缩小检测范围进行细测。

在以上检测中，当发现某一检测剖面数据异常时，为确定缺陷部位和大小范围，应在顶面（或斜立面）增加声测孔，或在外立面加密网格测点进行检测。加密后的声测孔间距不宜太大，一般为 500mm。

7.3 灌注桩混凝土缺陷检测

7.3.1 本节意指利用预埋声测管，对灌注桩等地下结构构件混凝土内部缺陷进行检测、分析和判定。对原规程灌注桩完整性等级评定内容，基于现行《建筑基桩检测技术规范》（JGJ106）已做了明确规定，本次修订取消其完整性等级评定内容。

根据模拟和实际工程检测结果表明，利用预埋声测管能有效检测灌注桩等地下结构混凝土内部缺陷。

7.3.2 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剖面，同时还要保证仪器能接收到清晰可辨首波信号。

声测管外加套管对接连接是为了保持管道通直，且可避免接头处内壁突出物影响。管口上、下端封闭是为了避免在施工过程水泥浆或砂土等杂物灌入堵塞声测管。

声测管上端高于桩顶，且同一根桩的声测管外露高度相同，是为方便控制换能器在声测管中高度位置。

为确保浇筑混凝土过程中声测管不变形、不移位，声测管应牢靠地固定在钢筋笼上，一般采用绑扎固定。对于钢管不宜焊接固定，焊接固定易烧穿钢管，在钢管内壁形成焊瘤，影响钢管内换能器移动的通畅性。

3 当灌注桩直径较大时，宜选择标称频率较低的换能器，且仪器发射电压调高，能保证能接收到较强的首波信号。

7.3.3 对于灌注桩每个检测剖面，将 T、R 换能器以一定高程、等距离同步向下或向上逐点移动检测。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确保

同步，避免发生未知差错。必要时还可以取出换能器，根据换能器信号线距离标识核对高度，或校准仪器系统工作是否正常。

检测过程对数据可疑的部位应进行复测，可检查检测人员操作是否有误，同时也提高了数据的可靠性；通过对测、斜测及扇形扫测等多角度检测，有利于确定内部缺处位置和大致范围。

7.3.4 根据实际工程检测经验并参照相关资料，对于灌注桩同一检测剖面采用比较直观的曲线法可判定测点数据是否异常，曲线法实质属对比法。本次修订将本规程第5章概率法和曲线法相结合更有利于异常值综合分析判定。

8 钢—混凝土组合结构缺陷检测

8.1 一般规定

8.1.1 随着钢—混凝土组合结构建筑规模愈来愈大，施工质量也被高度关注。为满足检测要求，本规程编制组在重庆设立了钢—混凝土组合结构缺陷检测专项试验小组，通过多年试验和成果总结，对原规程“第 10 章钢管混凝土缺陷检测”做了补充和完善，提出了较为全面的钢—混凝土组合结构缺陷检测方法。

8.1.4、8.1.5 根据实际工程检测和模拟试验，钢—混凝土组合结构构件，尤其是钢骨混凝土构件，从外观来看与第 6 章一般混凝土构件没有差别，但声波在钢骨混凝土中的传播十分复杂，不同于一般混凝土构件。

当混凝土构件内部设计了钢骨（钢构件）或混凝土外部设计了钢管，一般情况下声波从混凝土→钢骨→混凝土，或声波从管壁→混凝土→管壁传播。由于钢与混凝土两种材料特性声阻抗不同，故声波将在两介质界面上产生较为复杂的反射、折射或纵、横波形转化现象。即接收的波形信号为以上各种现象波形的叠加，且这一结果与钢骨或钢管形状、声波通过钢板数量、具体部位、角度等因素有关。

基于此，钢—混凝土组合结构构件的同条件测点，比一般混凝土构件更为严格。除了在同一检测剖面测试距离、角度和距构件边缘距离一致外，声波通过内部钢骨或外部钢管的具体部位也须相同。

8.1.6 基于钢—混凝土组合结构缺陷检测复杂性，内部缺陷判定难度较大，有条件可根据缺陷类型和产生的可能性，模拟与现场同条件构件进行对比检测和分析判定。

8.2 钢管混凝土缺陷检测

8.2.1 1 根据 CECS 254 等相关规范，钢管混凝土构件可分为空心 and 实心两种。本节检测的钢管混凝土构件为实心钢管混凝土构件。

2 基于钢管混凝土材料和施工工艺，钢管混凝土内部一般不会出现较大的空洞。对于混凝土结合面缺陷，由于被外部钢管隐蔽很难发现。若要检测，委托方须指定结合面具体位置，并按本节和本规程第 6.4 节相关规定执行。

3 检测前事先调查钢管和混凝土施工工艺和使用环境，熟知或预估两种材料声速，

这对于钢管混凝土缺陷检测和判定意义重大。

4 由于钢管混凝土内、外两种材料温度线膨胀系数不同，环境温度变化易使两种材料伸缩变形不一致，再加之混凝土干缩等因素，易导致管壁与内部混凝土脱空。

在检测钢管混凝土内部缺陷时，应事先采用敲击法初步判断脱空范围，布置测点应尽量避免脱空部位，确保声波通过内部混凝土。

基于此，当采用本节规定方法检测钢管内部混凝土缺陷时，应考虑在钢管混凝土施工阶段对新拌混凝土加入膨胀剂并控制水化热；在混凝土浇筑后构件外部采取防护措施，防止或减缓温差变形引起的管壁脱空。若检测时已发现钢管局部脱空，应对脱空部位注浆或采取其它措施。

5 如果钢管外壁锈层严重，若不去除，不但影响换能器耦合，也会使接收信号的波形产生变化，首波测读数据失真，影响混凝土缺陷判定结果。

8.2.2 对圆形钢管、矩形钢管内部混凝土缺陷检测，在不受检测面限制的条件下，应首先采用对测法。圆形钢管测点连线应与其中心线相交，矩形钢管测点连线应与某一对边钢板平面垂直。其目的是为了确保声波沿直线通过混凝土的接收信号先于沿钢管壁传播，以避免其它传播路径声波的干扰。此外，也有利于判定管壁与混凝土是否脱空。

根据模拟试验结果，本规程给出了两种类型钢管混凝土至少 2 条传播路径的声时理论计算方法，供数据处理和异常值判定时采用。对于外形复杂的钢管混凝土构件，也可参照该方法进行理论上的计算。

钢管混凝土也可采用斜测法，但前提须基于对测法检测，宜采用高度方向上、下斜测法，不建议采用同水平面斜测法。即圆形钢管混凝土上、下测点连线必须与钢管中心线相交，矩形钢管混凝土上、下测点连线的投影线必须与钢管某一对边钢板平面垂直。

按本节规定的钢管混凝土斜测法，也适用水平结合面缺陷检测。

8.2.3 当采用了对比法检测，若某测点管壁脱空，要么测点 T 换能器处脱空，要么 R 换能器处脱空或两者均脱空。声波将沿钢管壁传播，对应测点部位内部缺陷将无法反映。

若管壁不脱空，声波沿直线通过内部混凝土。若管内存在混凝土缺陷，其测读的声时也不会大于沿钢管壁传播的理论估算声时。在管壁不脱空的情况下采用声时、波幅和波形变化系数等参数可有效判定内部混凝土缺陷。

需要强调的是，当采用斜测法做了补充检测，再次进行判定时，必须以前次（对测

法)判定结果为基础。

8.3 钢筋混凝土缺陷检测

8.3.1 1、2 钢筋混凝土构件中的钢筋有实腹式和虚腹式之分，本规程给出了实腹式钢筋混凝土构件缺陷检测方法。对于虚腹式钢筋混凝土构件缺陷检测可按本节相关规定执行。

对于钢筋混凝土构件缺陷检测，如无特殊需要一般不考虑检测其内部钢筋与混凝土脱空缺陷（也称脱粘）。因为构件内部的钢筋被钢筋混凝土完全包裹，即在正常环境下很难因温差或干缩变形导致钢筋与混凝土脱空。但常因施工疏忽大意或拌合料流动性较差等因素，导致内部混凝土不密实、空洞和结合面缺陷等。

3 检测前应重点调查被测构件钢筋在构件内部的具体位置和细部构造，这对于测点布置和异常值判定意义重大。

8.3.2 1 根据工程检测和模拟试验结果：

圆形钢筋混凝土构件缺陷检测，一般采用同水平面径向检测法（类似对测法）和高度方向的上下斜测法。即须保证同高度或不同高度测点连线与圆形钢筋中心线相交，以避免声波沿多种路径传播对接收信号的影响。

对于非圆形钢筋混凝土构件（如工字形、十字形、L形和矩形等形状的钢筋），一般优先采用同水平面对测法和高度方向上下斜测法。即测点连线或其投影线垂直于钢筋某方向钢板平面，以利于大部分声波通过内部混凝土，减少声波因钢板与混凝土界面产生复杂的反射、折射以及波形转换化现象，减少非缺陷介质对接收信号波形的影响。

考虑到大多数非圆形钢筋一般均有两个相互垂直的钢板，当测点连线垂直于某一方向钢板平面时，必然与另一个方向钢板平面平行。根据模拟试验，当测点连线与某方向钢板平面平行时，测点连线与该方向钢板平面间距越小，则声时就越小，波幅就越大；若测点连线与钢板平面完全重合，则声时就更小（即一部分声波沿钢板传播，钢材声速大于混凝土声速），波幅也就越大。这种重合状态易导致内部混凝土缺陷漏检，不利于混凝土缺陷检测。基于此，对于非圆形钢筋混凝土构件在测点布置时，在满足测点连线或其投影线垂直于钢筋某方向钢板平面的同时，不能与钢筋另一方向钢板平面重合。

但有时受条件限制无法按上述方法布置网格测点，对于如图 8.2.2-2 (b) 所示的钢

骨混凝土墙角柱等类似构件，只能采用同水平面斜测法。这种斜测法往往因声波入射角度为锐角，可能还会通过多个钢板界面，即产生的声波现象很复杂，导致接收信号变化无常，给声学参数值测读带来不确定性。对此，若检测条件允许不建议采用同水平面斜测法。

8.3.3 根据大量的实际工程检测和模拟实验：

对于圆形钢骨混凝土构件，基于声波传播路径和界面相对固定不变，采用声时（或声速）、波幅和波形变化系数等参数可按本规程第 6.2 节进行异常值判定；

对于非圆形钢骨混凝土构件，无论测点连线或其投影线是否与钢骨某一方向钢板平面垂直，声波遇混凝土缺陷波形均会产生明显变化，主要以波形变化系数为异常值判定参数。

对于非圆形钢骨混凝土构件，若测点连线或其投影线与钢骨某一方向钢板平面垂直（与另一方向钢板平面不重合）时，声波遇混凝土缺陷除了波形产生明显变化外，声时或变小（声速或变大），波幅或变大。即表明部分声波绕过内部混凝土缺陷沿最捷径路径（即沿平行于钢骨某方向钢板平面）传播，导致了该缺陷部位的声时、波幅发生了逆变化。

9 装配式混凝土结构缺陷检测

9.1 一般规定

9.1.1 装配式混凝土结构中预制梁、板、柱、剪力墙连接部位或后浇部位施工质量需要检测和验收。为满足装配式混凝土结构检测需要，本规程编制组在江苏昆山成立了装配式混凝土结构缺陷检测专项试验小组，经多年的试验研究和成果总结，本次修订增加了“装配式混凝土结构缺陷检测”一章。

装配式混凝土结构缺陷主要包括两方面内容：一是后浇混凝土、灌浆料或坐浆料内部缺陷和结合面缺陷检测；二是预制剪力墙竖向钢筋连接用套筒（以下简称套筒）、钢筋搭接连接浆锚孔道（以下简称浆锚孔道）灌浆饱满度检测。前者与本规程第6章混凝土缺陷检测方法基本相同；后者属装配式结构钢筋连接部位施工缺陷检测，也是装配式混凝土结构检测的重点。目前用以检测钢筋连接部位套筒、浆锚孔道灌浆饱满度的方法较多，应用最广的是钻孔内窥镜法。本章将采用超声法检测。

9.1.2 对于测试龄期要求，主要考虑到后浇混凝土、灌浆料早期收缩较大，若测试龄期过短，难以发现后浇与预制构件混凝土叠合面缺陷。

9.2 后浇部位混凝土或灌浆料缺陷检测

9.2.2 预制剪力墙底部接缝后浇灌浆料或坐浆料缺陷检测，须考虑底部接缝空间尺寸和内部多种填充材料的影响。

预制剪力墙底部接缝未填充前为一段连通空隙。它以每段剪力墙为单位，空隙长度同剪力墙长，宽度同剪力墙厚度，高度一般为20mm；接缝内部除灌浆料外，还有竖向钢筋、线管和一定数量用以定位接缝高度的垫块。接缝周边采用高强水泥砂浆封堵。底部接缝大多数采用高强无收缩水泥基灌浆料灌注，少数采用坐浆法施工。

基于剪力墙底部接缝空间尺寸较小，且内部有多种材料填充，为提高对局部空间小缺陷检测的灵敏度，本节提出了小直径、较高频率的厚度振动式换能器，同时测点间距由一般100mm~300mm减小为50mm~150mm。

9.2.3 预制双面叠合剪力墙类似于“夹心饼干”。若沿厚度方向剖开，可分为内层、中间层和外层。其中内、外层为叠合剪力墙的两部分（均为预制），通过桁架钢筋连接；

中间层为空腔，厚度一般为 100mm，现场安装完后向其空腔浇筑自密实混凝土，使之成为实心剪力墙。即在浇筑过程时易产生内部混凝土缺陷或叠合面缺陷。

9.2.3 叠合梁、叠合板上部后浇混凝土内部缺陷、叠合面缺陷检测可分为对测法和阵列超声法。对测法是本规程传统的检测方法；阵列超声法采用超声成像扫描仪，具有干耦合、检测方便、高效等特点，是目前一种较为先进的超声检测方法。本次修订将其纳入本规程，意在拓展超声波检测技术向更高水平发展。

阵列超声法采用了超声成像扫描仪，其检测原理参见《装配式混凝土结构检测标准》T/CECS 1189 相关条文。

超声成像扫描仪天线阵列由点接触干耦合式传感器组成，无需耦合剂。每个传感器都有一个独立的弹簧悬架，以确保在不平坦的表面上进行测试（适用于粗糙表面）。仪器配置主频为不大于 100kHz 的宽频带探头，3dB 带宽不宜小于 20kHz，接收放大器频率响应范围（0~500）kHz，总增益不宜小于 60dB。超声成像扫描仪具有数据采集和合成孔径处理的完全独立测量单元，即每个通道轮流发送声波，其它通道接收回波，并使用合成孔径聚焦技术实时显示检测结果。该测量单元具有陶瓷耐磨头的低频宽带干耦合换能器的阵列（如 Pundit 250 Array 超声仪 8 通道 24 个换能器；A1040 MIRA 超声仪 8 通道 48 个换能器）。此外，该仪器具备 A 扫描、B 扫描和 C 扫描察看功能，或可通过其它辅助设备获取三维显示功能。

9.3 钢筋连接部位套筒或浆锚孔道灌浆饱满度检测

9.3.1 目前竖向钢筋连接部位套筒或浆锚孔道灌浆饱满度检测方法很多，如声波反射法、预埋钢丝拉拔法、预埋传感器法、X 射线成像法和钻孔内窥镜法等。这些方法都有各自的优缺点。其中内窥镜法是目前应用较多、检测结果直观、很少发生错判或漏判的局部破损法。

对于超声法检测，国内不少检测人员采用声时、波幅等声学参数检测并判定套筒或浆锚孔道灌浆饱满度，但效果并不理想。这除了与仪器设备系统有关外，也与长期以来超声波检测仪一直未能提供可调用的接收波形数据文件有关。本规程修订采用高频率、小直径厚度振动式换能器，并根据接收波形的数据变化，采用波形变化系数，可有效判定套筒或浆锚孔道灌浆饱满度。

对于厚度大于 300mm 的预制剪力墙或框架柱竖向钢筋连接部位套筒或浆锚孔道灌

浆饱满度检测可参照本节相关规定执行。

预制剪力墙竖向钢筋连接部位套筒或浆锚孔道可分为双排和单排，布置方式有梅花形和对齐方式；钢筋连接用套筒又分为全灌浆套筒和半灌浆套筒。同一检验批应为同规格、同测试条件的套筒或浆锚孔道。

2 调查套筒或浆锚孔道在构件中具体位置、细部构造等信息对测点布置和异常值判定十分重要。

3 本规程采用辐射端面较小（直径不大于 10mm）、标称频率较高（不小于 500kHz）的厚度振动式换能器，其原因：一方面换能器辐射面直径小于被测套筒或浆锚孔道直径，有利于大部分声波透过套筒或浆锚孔道内的浆料沿直线传播，减少声波绕射；另一方面换能器标称频率较高，有利于声波在浆料空隙部位产生较强的散射现象，以使接收信号波形产生较大变化，提高小缺陷检测的灵敏度。

9.3.2 1 由大量的模拟试验表明，无论采用对测法还是斜测法，T、R 两换能器应在同水平面，必须以一个单独的套筒或浆锚孔道为基本检测对象，测点连线必须与套筒或浆锚孔道中心线相交，不可对套筒或浆锚孔道沿高度方向上、下斜测。

本规程规定最上面测点尽量靠近出浆口，为了避免灌浆缺陷漏检；测点数为奇数，是为了更好的评估灌浆饱满度（即灌满部分所占的比例）。

5 在实体结构预留未灌浆、灌满浆两种状态套筒或浆锚孔道部位，或制作与实际结构同条件的两种灌浆状态的模拟试件进行对比检测，可以避免在不同高度声波通过套筒或浆锚孔道在传播路径上，因环境介质、套筒或浆锚孔道内部构造不同对接收波形的影响。

9.3.3 在判定套筒或浆锚孔道灌浆缺陷时，采用同条件测点的波形变化系数，比声时（或声速）、波幅等参数更为有效。需要强调的是被选样本波形长度应从首波起跳点至不少于 5 个周期的连续波形长度，这样才能有利于判定灌浆缺陷。

10 混凝土缺陷处理意见

10.1.1~10.1.6 在对各类构件混凝土缺陷检测后，业主方或委托方除了关心检测结果外，对检测发现的混凝土缺陷是否需要修补或加固处理，或采取何种方法进行处理非常关注。基于此，本次修订增加了不同类型混凝土缺陷，提出相应的处理意见。

附录 A 仪器计时系统校准

该附录规定了一种仪器声时系统计量的校准方法。它是根据测量的空气声速与空气声速标准值相对误差计算结果来判定仪器计时系统是否正常。

附录 B 声时初读数测量

基于原规程，本次修订在附录集中了采用一对厚度振动式换能器、一对径向振动式换能器，或采用两种类型换能器的仪器声时初读数（以下简称零声时）测量方法，便于检测人员测量。零声时测量目的是为了消除该值对实测混凝土声时的影响。

当采用一对厚度振动式换能器，一般情况下可直接采用自动模式进行零声时测量，但有时想了解在检测过程中仪器声时测读是否稳定、准确，故零声时手动测量必不可少。