



T/CECS 21-2024

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



中国建筑工业出版社

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/CECS 21 - 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：2 0 2 5 年 5 月 1 日

中国建筑工业出版社

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/CECS 21-2024，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》CECS 21:2000 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

《超声法检测混凝土缺陷技术规程》(以下简称规程)是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)的要求进行编制。规程编制组根据我国建设工程混凝土缺陷检测实际需要和国内外超声波检测仪最新技术,经深入调查和试验研究,认真总结工程检测经验,并在广泛征求意见的基础上,修订本规程。

本规程共分 11 章和 2 个附录,主要内容包括:总则、术语和符号、基本规定、超声波检测设备、声学参数测量与计算、数据处理和异常值判定、普通混凝土构件缺陷检测、大体积混凝土缺陷检测、灌注桩混凝土缺陷检测、钢-混凝土组合结构缺陷检测、装配式混凝土结构连接缺陷检测等。

本规程是对《超声法检测混凝土缺陷技术规程》CECS 21:2000 的修订。

本次修订内容主要包括:

1. 取消了模拟式混凝土超声波检测仪有关内容、空洞尺寸估算方法、灌注桩完整性等级评定方法;
2. 增加了基本规定、波形不相似系数判定参数、大体积混凝土缺陷检测方法、装配式混凝土结构连接缺陷检测方法;
3. 修订了数据处理和异常值判定方法、普通混凝土构件和灌注桩混凝土缺陷检测方法、钢-混凝土组合结构缺陷检测方法。

本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利,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,邮编:710082,邮箱:1770157378@qq.com)。

主 编 单 位: 陕西省建筑科学研究院有限公司

参 编 单 位: 同济大学

中国建筑科学研究院有限公司

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

北京海创高科科技有限公司

北京宇通时代检测技术有限公司

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

北京市建设工程质量第一检测所有限责任公司

浙江省建筑科学设计研究院有限公司

北京市建设工程质量第三检测所有限责任公司

上海立胜工程检测技术有限公司

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 来朝辉 任辰昊 郭 栋

刘欣洋 张 彬 郭晓潞 张仁瑜 顾 盛

晏维江 童寿兴 何国胜 管 钧 林文修

陈忠华 杨利刚 孙刚柱 姚选社 张 旻

冯映雪 翟延波 陆 进 凡 俊 彭国荣

黄建东 颜丙山 苏定勤

主要审查人: 陈忠飏 牛荻涛 李智斌 李杰成 袁海军

路彦兴 王文明 邹道金 张 晓

目 次

1	总则	(1)
2	术语和符号	(2)
2.1	术语	(2)
2.2	符号	(5)
3	基本规定	(9)
4	超声波检测设备	(14)
4.1	超声仪	(14)
4.2	换能器	(14)
4.3	使用要求	(15)
5	声学参数测量与计算	(17)
5.1	声学参数测量	(17)
5.2	声学参数计算	(18)
6	数据处理和异常值判定	(20)
6.1	一般规定	(20)
6.2	对比法异常值判定	(20)
6.3	概率法异常值判定	(21)
7	普通混凝土构件缺陷检测	(25)
7.1	内部不密实区和空洞检测	(25)
7.2	单面平测法裂缝深度检测	(26)
7.3	双面斜测法裂缝深度检测	(29)
7.4	结合面缺陷检测	(30)
7.5	表面损伤层检测	(31)
8	大体积混凝土缺陷检测	(35)
8.1	一般规定	(35)
8.2	内部不密实区和空洞检测	(35)

8.3	裂缝深度检测	(37)
8.4	结合面缺陷检测	(38)
9	灌注桩混凝土缺陷检测	(40)
9.1	一般规定	(40)
9.2	检测方法	(40)
9.3	数据处理和判定	(42)
10	钢-混凝土组合结构缺陷检测	(44)
10.1	一般规定	(44)
10.2	钢管混凝土构件缺陷检测	(44)
10.3	钢骨混凝土构件缺陷检测	(47)
11	装配式混凝土结构连接缺陷检测	(49)
11.1	后浇部位缺陷检测	(49)
11.2	套筒或浆锚孔道灌浆饱满度检测	(51)
附录 A	声时初读数测量	(54)
附录 B	仪器计时系统校验	(57)
用词说明		(60)
引用标准名录		(61)
附：条文说明		(63)

Contents

1	General provisions	(1)
2	Terms and symbols	(2)
2.1	Terms	(2)
2.2	Symbols	(5)
3	Basic requirements	(9)
4	Ultrasonic testing equipment	(14)
4.1	Ultrasonic instrument	(14)
4.2	Transducers	(14)
4.3	Requirements of use	(15)
5	Measurement and calculation of acoustic parameters ...	(17)
5.1	Measurement of acoustic parameters	(17)
5.2	Calculation of acoustic parameters	(18)
6	Data processing and abnormal value determination	(20)
6.1	General requirements	(20)
6.2	Abnormal value determination by the comparative method ...	(20)
6.3	Abnormal value determination by the probability method	(21)
7	Defect detection of ordinary concrete components	(25)
7.1	Detection of concrete undense areas and cavities	(25)
7.2	Detection of concrete crack depth by single sided method	(26)
7.3	Detection of concrete crack depth by double sided method	(29)
7.4	Detection of concrete joint surface defect	(30)
7.5	Detection of concrete surface damage layer	(31)
8	Defect detection of large volume concrete	(35)
8.1	General requirements	(35)
8.2	Detection of concrete undense areas and cavities	(35)

8.3	Detection of concrete crack depth	(37)
8.4	Detection of concrete joint surface defect	(38)
9	Defect detection of cast-in-place pile concrete	(40)
9.1	General requirements	(40)
9.2	Detection method	(40)
9.3	Data processing and determination	(42)
10	Defect detection of steel-concrete composite	(44)
10.1	General requirements	(44)
10.2	Defect detection of concrete-filled steel tube members	(44)
10.3	Defect detection of steel reinforced concrete members	(47)
11	Connection defect of prefabricated concrete structure	(49)
11.1	Defect detection of post casting site	(49)
11.2	Detection of grouting fullness for sleeve or rebar lap grouting anchor holes	(51)
Appendix A	Measurement of acoustic sound-time initial reading	(54)
Appendix B	Calibration of instrument timing system	(57)
	Explanation of wording	(60)
	List of quoted standards	(61)
	Addition; Explanation of provisions	(63)

1 总 则

1.0.1 为规范超声法检测混凝土缺陷技术的应用，做到技术先进、安全可靠、经济合理、使用方便，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于超声法检测混凝土缺陷。

1.0.3 超声法检测混凝土缺陷技术的应用除应符合本规程规定外，尚应符合国家现行有关标准和现行中国工程建设标准化协会有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 超声法 ultrasonic method

使用数字式超声仪（简称超声仪），通过测量或采集超声波在混凝土中传播时间、速度、接收信号首波幅度、主频和波形数据等参数值，并根据这些参数值或计算值的相对变化判定混凝土缺陷的方法。

2.1.2 混凝土缺陷 concrete defects

混凝土连续性、完整性、均质性等遭到明显破坏，并降低结构安全性和耐久性的内部不密实区、空洞、低强度区、裂缝、结合面结合不良以及表面损伤等质量异常现象。

2.1.3 混凝土声速 concrete velocity of sound

超声波通过混凝土单位时间传播的距离。

2.1.4 波幅 amplitude

超声波通过混凝土接收信号首波的幅度。

2.1.5 衰减 attenuation

超声波在混凝土中传播时，因扩散、吸收和散射等因素导致的声强减弱现象。

2.1.6 主频 main frequency

接收信号的时域波形经频谱分析后，频域幅度谱中幅度最大的频率值。

2.1.7 声参量 acoustic parameter values

接收信号首波声时、声速、波幅、主频和波形不相似系数等声学参数测量值或计算值的总称。

2.1.8 声时初读数 sound-time initial reading

采用厚度振动式换能器时，由仪器、换能器和信号线等仪器设备系统产生的声时；采用径向振动式换能器时，为仪器设备系统产生的声时与系统外部换能器辐射面与被测对象接触的耦合层、声测管等耦合介质声时值的总和。声时初读数也称零声时。

2.1.9 同条件测点 detection point under same condition

对普通混凝土构件、大体积混凝土和灌注桩，为仪器设备系统及设置参数、测试距离、角度和距构件边缘距离相同的测点；对钢-混凝土组合构件，为除符合前述条件外，测点连线与型钢、钢管或钢板相交位置一致的测点，包括缺陷怀疑部位测点和对比点。

2.1.10 样本波形 sample waveform

由接收信号首波起跳点起抽取的、特定长度的时域波形片段。

2.1.11 基准点波形 reference waveform

同条件测点中，某一远离缺陷怀疑区域的正常混凝土样本波形。

2.1.12 波形不相似系数 waveform unsimilar coefficient

同条件测点中，任一测点波形相对于基准点波形，以相同的样本波形长度通过标准化欧氏距离公式计算的数值。

2.1.13 单面平测法 single-sided detection method

被测裂缝位于构件一个检测面，且裂缝深度估计值不大于500mm时，利用一个检测面检测混凝土裂缝深度的方法。

2.1.14 双面斜测法 double-sided detection method

被测裂缝位于构件一个检测面或位于两个检测面且对称时，利用两个相互平行的检测面检测混凝土裂缝深度的方法。

2.1.15 混凝土结合面缺陷 concrete joint surface defects

两次浇筑的混凝土在接触面上存在的缝隙、疏松层或杂物等缺陷。

2.1.16 混凝土表面损伤层 concrete surface damage layer

结构构件因冻害、高温或化学腐蚀等引起的表面混凝土损伤,或因施工工艺、材料配合比不当导致的表面混凝土疏松。

2.1.17 声测孔法 acoustic test hole method

通过钻取声测孔,采用径向振动式换能器检测大体积混凝土缺陷的方法。

2.1.18 孔-孔法 hole-hole method

被怀疑的大体积混凝土缺陷距构件外立面较远,且仅有一个顶面或斜立面可测,利用可测面钻取声测孔,采用一对径向振动式换能器检测混凝土缺陷的方法。

2.1.19 孔-面法 hole-surface method

被怀疑的大体积混凝土缺陷有一个顶面,且距构件某一外立面较近;利用顶面钻取声测孔、外立面布置网格测点,采用一只径向振动式换能器和一只厚度振动式换能器检测混凝土缺陷的方法。

2.1.20 灌浆饱满度 grouting plumpness

预制剪力墙、柱竖向钢筋连接部位套筒或浆锚孔道在灌浆结束且稳定后,内部灌浆料顶部界面到达排浆口位置的程度。

2.1.21 预制构件底部接缝 bottom joint of precast component

预制剪力墙、柱底部与下部构件之间预留的水平间隙。

2.1.22 预制构件后浇材料 post-casting material for precast smember

预制构件底部接缝二次灌注的灌浆料或铺设的坐浆料,或预制叠合梁、板和双面叠合剪力墙二次浇筑的混凝土等材料的统称。

2.1.23 叠合面 combined interface

预制构件与后浇材料形成的接触界面。

2.1.24 阵列超声法 array ultrasonic method

通过阵列式排布的超声探头实现超声波的发射与接收,采用合成孔径聚焦技术实时显示检测结果,识别混凝土内部缺陷的

方法。

2.2 符 号

2.2.1 测距

l ——测距；

l_i ——第 i 点测距；

l'_i ——第 i 点平测距离；

$\hat{l}$ ——测距估计值；

$\hat{l}_{1i}$ ——第 i 点跨缝平测距离估计值；

$\hat{l}_{2i}$ ——第 i 点不跨缝平测距离估计值。

2.2.2 声时

t ——声时；

t_{bb} ——标准棒声时；

t_e ——混凝土声时估算值；

t_g ——沿管壁传播声时估算值；

t_i ——第 i 点混凝土声时；

t_u ——两换能器辐射面直接耦合或耦合于标准棒两端声时实测值；

t_0 ——连接一对厚度振动式换能器声时初读数，或仪器设备系统产生的声时；

t_{00} ——连接一对径向振动式换能器声时初读数；

t_{1i} ——第 i 点跨缝声时；

t_{2i} ——第 i 点不跨缝声时；

t'_0 ——测量前仪器初始零声时；

t''_0 ——设备系统以外耦合介质产生的声时。

2.2.3 声速

v ——声速；

v_e ——混凝土声速估算值；

v_g —— 钢材声速估算值；
 v_i —— 第 i 点混凝土声速；
 v_k —— 空气声速标准值；
 v_m —— 空气声速测量值；
 v_p —— 混凝土平测声速；
 v_{pl} —— 损伤层混凝土平测声速；
 v_{p2} —— 未损伤混凝土平测声速；
 v_{sg} —— 预埋声测管材料声速估算值；
 v_w —— 水的声速；
 v'_i —— 第 i 个相邻测点平测声速估算值。

2.2.4 波形数据计算相关参数

D —— 波形不相似系数；
 D_i —— 第 i 点波形不相似系数；
 $D_{1,i}$ —— 被测套筒或浆锚孔道第 i 点波形以未灌浆对应测点波形为基准点波形，根据本规程式 (5.2.3) 计算的波形不相似系数；
 $D_{2,i}$ —— 被测套筒或浆锚孔道第 i 点波形以灌浆满浆对应测点波形为基准点波形，根据本规程式 (5.2.3) 计算的波形不相似系数；
 N —— 样本波形数据总数；
 $a_{i,k}$ —— 第 i 点波形数据序列中第 k 项数据；
 $a_{0,k}$ —— 基准点波形数据序列中第 k 项数据；
 $\bar{a}_i$ —— 第 i 点波形数据的平均值；
 $\bar{a}_0$ —— 基准点波形数据的平均值；
 s_i —— 第 i 点波形数据的标准差；
 s_0 —— 基准点波形数据的标准差；
 t_s —— 样本波形长度；
 Δt —— 采样间隔。

2.2.5 高度、深度和厚度

H_i ——第 i 点换能器移动深度；
 h ——矩形钢管混凝土构件截面高度；
 h_c ——裂缝深度检测值；
 h_i ——第 i 点裂缝计算深度；
 h_s ——表面混凝土损伤层厚度；
 $\bar{h}$ ——裂缝深度平均值。

2.2.6 异常值判定相关参数

S ——某判定参数测点数据的标准差；
 X ——某判定参数，可代表 A 、 t 、 v 、 f 和 D 等参数；
 $\bar{X}$ ——某判定参数测点数据的平均值；
 X_i ——第 i 点某判定参数测点数据，或声参量；
 X_0 ——某判定参数测点数据异常值判定值；
 $X_{0.1}$ ——初次异常值判定值；
 $X_{0.2}$ ——二次异常值判定值；
 Z_i ——第 i 点参数 Z 计算值；
 k_m ——某判定参数 m 个测点异常值的判定系数。

2.2.7 回归常数项和回归系数

a ——回归常数项；
 a_1 ——损伤层混凝土回归常数项；
 a_2 ——未损伤混凝土回归常数项；
 k ——回归系数；
 k_1 ——损伤层混凝土回归系数；
 k_2 ——未损伤混凝土回归系数。

2.2.8 其他参数

A ——波幅；
 D_g ——圆形钢管混凝土构件外径；
 T_k ——检测环境温度；
 b ——矩形钢管混凝土构件截面宽度；

- d —— 换能器直径；
 d_0 —— 声测孔孔径；
 d_1 —— 预埋声测管内径；
 d_2 —— 预埋声测管外径；
 f —— 主频；
 h_1 —— 测点距矩形钢管混凝土构件边缘最小距离；
 l_m —— 损伤层、未损伤混凝土回归直线方程交点的纵坐标值；
 δ —— 空气声速的测量值与标准值的相对误差。

3 基本规定

3.0.1 超声法检测混凝土缺陷现场作业和安全管理应符合现行行业标准《建筑与市政工程施工现场临时用电安全技术标准》JGJ/T 46 和《建筑施工高处作业安全技术规范》JGJ 80 的有关规定。

3.0.2 检测前应做现场和资料调查，调查宜包括下列内容：

- 1 工程概况、检测内容、委托要求和目的；
- 2 被测构件设计施工图纸、施工相关资料；
- 3 被测构件环境、检测条件，混凝土外观质量以及被怀疑缺陷的成因、类型、位置和范围；
- 4 被测构件类型、相关尺寸、构造和特殊部位等；
- 5 被测构件材料种类、强度等级以及施工日期、工艺和养护情况等。

3.0.3 应根据调查结果制定检测方案，并确定缺陷的检测范围（简称测区）。

3.0.4 各类构件常见缺陷检测项目见表 3.0.4。

表 3.0.4 各类构件常见缺陷检测项目

类别	缺陷检测项目
普通混凝土构件	内部不密实区和空洞、低强度区、混凝土裂缝深度、结合面缺陷、表面损伤层等检测。低强度区检测可归并到内部不密实区检测，裂缝深度检测分为单面平测法和双面斜测法
大体积混凝土	内部不密实区和空洞、裂缝深度、结合面缺陷等检测
混凝土灌注桩	桩身断面颈缩、夹泥或夹砂、底部沉渣、内部不密实区等检测

续表 3.0.4

类别	缺陷检测项目
钢-混凝土组合结构	钢管混凝土构件：内部不密实区、管壁与混凝土脱空缺陷等检测 钢骨混凝土构件：内部不密实区、裂缝深度、结合面缺陷等检测
装配式混凝土结构连接部位	后浇部位缺陷、套筒或浆锚孔道灌浆饱满度或缺陷等检测。后浇部位缺陷检测包括后浇材料内部缺陷、叠合面缺陷检测

3.0.5 检测前在满足接收信号首波可识别的条件下，应优先选用标称频率较高的换能器。

3.0.6 普通混凝土构件和钢-混凝土组合结构的缺陷检测，采用厚度振动式换能器的标称频率宜为 50kHz~250kHz；其中表面损伤层检测，换能器标称频率宜为 100kHz。

3.0.7 大体积混凝土和灌注桩的缺陷检测，换能器应符合下列规定：

- 1 采用径向振动式换能器时，标称频率宜为 20kHz~60kHz；
- 2 采用一只径向振动式和一只厚度振动式换能器时，径向振动式换能器宜作发射，厚度振动式换能器宜作接收且标称频率不宜高于 50kHz。

3.0.8 装配式混凝土结构连接缺陷检测时，采用厚度振动式换能器应符合下列要求：

- 1 预制框架柱、剪力墙底部接缝缺陷检测，换能器标称频率宜为 250kHz~500kHz，辐射面直径不宜大于 15mm；预制双面叠合剪力墙空腔、预制叠合梁、板上部后浇部位缺陷检测，换能器标称频率宜为 100kHz~250kHz；
- 2 套筒或浆锚孔道灌浆饱满度检测，换能器标称频率不宜小于 500kHz，辐射面直径不宜大于 15mm。

3.0.9 仪器设备系统和参数设置应符合下列规定：

1 检测前应根据换能器类型、耦合方式测量声时初读数，并应符合本规程附录 A 的规定；

2 同一构件或被视为同批构件应使用同一台仪器设备，并根据被测对象设置仪器发射电压、采样长度和采样间隔等参数，采样间隔不应大于声时测量误差 $\pm 1.0\%t_e$ 的绝对值， t_e 为混凝土声时估算值；

3 当测试距离大于 3m 或接收信号较弱时，可提高仪器发射电压，或在仪器接收端加装前置放大器；

4 检测过程中除了仪器增益、延时参数外，其他参数设置不得随意改变。

3.0.10 采用厚度振动式换能器检测时，构件表面耦合应符合下列规定：

1 测点部位的混凝土表面应清洁、平整，当存在凹凸不平或发现蜂窝、麻面等外观缺陷时可采用砂轮等工具磨平，或采用补偿收缩的高强水泥砂浆等材料修补平整；

2 被测部位为钢管或钢板时，表面应光洁，无锈蚀层，当有锈层时应除锈或做磨光处理；

3 耦合剂宜为黄油、浆糊、凡士林和牙膏等；检测同一构件宜使用同一种耦合剂，且保持换能器辐射面与测点表面紧密接触；耦合剂中不得夹杂粉尘、泥砂等杂质。

3.0.11 被测构件测点布置应符合下列规定：

1 采用厚度振动式换能器检测时，应在发、收换能器所在的检测面上布置网格测点，相邻测点水平、竖向间距宜为 50mm~300mm；测点距构件边缘的最小距离：矩形钢管或钢板混凝土构件宜为 100mm 加外部钢板厚度，其他矩形构件宜为 60mm 加最外层钢筋保护层厚度；

2 采用径向振动式换能器检测时，沿高度方向相邻测点间距宜为 100mm~500mm，同一水平面任意两个声测孔或声测管

的间距宜为 500mm~3000mm。

3.0.12 各类构件在正常气温环境下测试龄期应符合下列规定：

1 混凝土结合面或预制构件叠合面缺陷检测，不宜少于 14d，灌浆料或坐浆料不宜少于 7d；

2 其他类型缺陷检测，混凝土不宜少于 7d，灌浆料不宜少于 3d。

3.0.13 普通混凝土构件内部缺陷和装配式混凝土结构后浇部位缺陷检测，除了采用本规程规定的方法外，也可采用阵列超声法。阵列超声法检测混凝土缺陷应符合协会标准《装配式混凝土结构检测标准》T/CECS 1189-2022 附录 B 的有关规定。

3.0.14 对于较为复杂的结构构件，可参照本规程规定的一种或多种方法进行综合检测：

1 预埋声测管的椭圆形、矩形等地下混凝土结构构件内部缺陷检测，可参照本规程灌注桩混凝土缺陷检测的有关规定执行；

2 钢管混凝土桥柱、桥拱或内部设有纵向或横向隔板的钢管混凝土构件内部缺陷检测，可参照本规程钢骨、钢管混凝土构件缺陷检测的有关规定执行；

3 大体积、外形和内部构造复杂的竖向钢-混凝土组合结构缺陷检测，可在构件内部预埋或钻取不少于 2 个声测管或声测孔，并参照本规程钢骨、钢管混凝土构件、大体积混凝土、灌注桩混凝土缺陷检测的有关规定执行。

3.0.15 当检测发现混凝土缺陷时，应及时通知委托方，并根据检测结果提出相应的处理建议；处理方案应征得设计、监理、业主等有关单位的同意。

3.0.16 混凝土缺陷处理应符合下列规定：

1 经原设计或有资质单位复核，对超出设计或标准规定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；

2 检测中发现疏松状、蜂窝状不密实混凝土、空洞、低强度区等缺陷，应征得原设计单位确认后，可采取置换修补等处理；

3 对设计或标准允许范围内的混凝土裂缝，可根据耐久性等方面要求，采取封闭、修补或补强等处理；

4 检测中发现的混凝土结合面缺陷，或构件表面损伤层厚度大于主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；当构件表面损伤层厚度不大于主筋混凝土保护层厚度时，可采用渗透性较强的材料进行修补等处理；

5 当检测发现钢筋连接部位套筒或浆锚孔道灌浆不饱满时，应及时补灌至 100%，补灌后应通过二次检测确认。

4 超声波检测设备

4.1 超 声 仪

4.1.1 超声仪性能指标应符合现行行业标准《混凝土超声波检测仪》JG/T 5004 的有关规定。

4.1.2 超声仪应符合下列规定：

- 1 具有波形清晰、显示稳定、操作方便的显示屏；
- 2 具有手动和自动声参量测读功能，且在自动测读时应有首波声时、波幅测读的定位游标；
- 3 具有自动化采集、存储和输出波形数据的功能；波形最大采样长度不应小于 2k；
- 4 采样间隔宜为 $0.05\mu\text{s}\sim 3.20\mu\text{s}$ ，声时测量宜为 $0\mu\text{s}\sim 9000\mu\text{s}$ ，分辨力不应大于 $0.05\mu\text{s}$ ；在测试条件不变时，1h 内每隔 5min 测读一次声时，声时示值重复性差异不应超过 ± 2 个采样间隔；
- 5 波幅测量宜为 1dB~100dB，分辨力不应大于 1dB；
- 6 在信噪比为 3 : 1 时，仪器接收灵敏度不应大于 $30\mu\text{V}$ ；
- 7 接收信号系统的频带宽度不应小于 10kHz~500kHz；
- 8 具有对接收信号波形智能化处理、频谱分析等功能。

4.1.3 超声仪正常工作应符合下列规定：

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

4.2 换 能 器

4.2.1 换能器可分为厚度振动式和径向振动式换能器，并应符

合下列规定：

1 厚度振动式换能器标称频率宜为 20kHz~500kHz，径向振动式换能器标称频率宜为 20kHz~100kHz；换能器直径宜为 10mm~40mm；

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、检测项目要求进行选择。

4.2.2 换能器的实测主频与标称频率允许偏差应为 $\pm 10\%$ ；水中作业用换能器，水密性应在 1MPa 水压下不渗漏。

4.3 使用要求

4.3.1 超声仪存在下列情况之一时，应做检定或校准：

- 1 新购仪器启用前；
- 2 超过检定或校准规定有效期；
- 3 仪器经维修或校验结果不正常；
- 4 检测过程发现声参量异常或读数不稳定。

4.3.2 超声仪计时系统校验时，应按本规程附录 B 的规定求得空气声速测量值，并与测量环境空气声速标准值相比较，二者的相对误差不大于 0.5%时，可判定仪器计时系统正常。

4.3.3 超声仪波幅校验时应符合下列规定：

1 将两换能器辐射面对准并间隔一定距离，调节仪器增益使首波波峰或波谷与显示屏第一道波幅高度线重合时停止采样，测读并记录波幅数据，波幅高度记作 h_1 ；保持仪器各参数不变，手动调节波幅测读游标至第二道波幅高度线，测读并记录波幅数据，波幅高度记作 h_2 ； h_1 、 h_2 均从声时基线算起；

2 当 $h_1 > h_2$ 且 $h_2 = h_1/2$ ，或 $h_1 < h_2$ 且 $h_2 = 2h_1$ ，前后两次测读波幅值相差 $\pm 6\text{dB}$ ，误差为 $\pm 1\text{dB}$ 时，可判定仪器波幅计量系统正常。

4.3.4 超声仪保养应符合下列规定：

- 1 仪器在搬运过程中应采取减振防护措施，仪器停用期间

宜每月至少开机通电 1 次，且单次通电时间不宜少于 1h；

2 仪器使用后应及时清理表面灰尘或油污，晾干后放入箱内，存放于通风、阴凉干燥处。

5 声学参数测量与计算

5.1 声学参数测量

5.1.1 在自动模式下声时、波幅测量应符合下列规定：

1 当声时测读游标未对准首波起跳点，或波幅测读游标偏离首波峰顶或谷底时，应调节仪器直至声时、幅度测读游标至正确标记位置，方可停止采样保存；

2 当首波声时、波幅测读游标难以标记正确位置，应切换为手动模式测读，测读方法应符合仪器操作要求；

3 声时测量精确至 $0.1\mu\text{s}$ ，允许偏差应为 $\pm 1.0\%$ ；波幅测量精确至 0.1dB ，允许偏差应为 $\pm 1\text{dB}$ 。

5.1.2 主频测量应符合下列规定：

1 自动模式下，仪器采样长度设定后应自动将接收信号的时域波形通过频谱分析计算，得到主频值；

2 手动模式下，采用声时游标测读首波一个完整周期的声时差（称为周期），周期的倒数为手动测量的主频值；

3 主频测量精确至 0.1kHz 。

5.1.3 样本波形采集应符合下列规定：

1 当首波声时、波幅测读游标能正确标记且样本波形幅度不超屏时，可停止采样保存。

2 当首波声时、波幅测读游标难以正确标记，或能正确标记但难以保证样本波形幅度不超屏时，应按下列规定操作：

1) 按本规程 5.1.1 条的规定测读首波声时、波幅并保存，作为首次测读数据；

2) 二次采样：在自动模式下调节仪器增益使样本波形幅度不超屏时停止采样，然后切换为手动模式，使声时

游标测读与首次声时数据相等时保存。

5.1.4 超声波传播距离（简称测距）测量应符合下列规定：

1 宜采用不低于二级精度的直尺或钢卷尺测量，测距精确至 1mm，允许偏差应为 $\pm 1.0\%$ ；

2 采用厚度振动式换能器检测时，对测或斜测时的测距应为两换能器测点连线之间的距离，平测时的测距应为测点连线两换能器辐射面内边缘间距；采用径向振动式换能器检测时，测距应为测点连线两换能器辐射面内边缘间距，或声测孔、声测管内边缘间距。

5.2 声学参数计算

5.2.1 混凝土声时、声速计算应符合下列规定：

1 检测前按本规程附录 A 有关规定，将测得的声时初读数输入到仪器零声时对话框并确认，检测时仪器将自动扣除声时初数直接得到第 i 点混凝土声时 t_i ；

2 混凝土声速应按下式计算：

$$v_i = l_i / t_i \quad (5.2.1)$$

式中： v_i ——第 i 点混凝土声速 (km/s)，精确至 0.01km/s；

l_i ——第 i 点测距 (mm)；

t_i ——第 i 点混凝土声时 (μ s)。

5.2.2 波形数据计算应符合下列规定：

1 样本波形数据总数应按下式计算：

$$N = t_s / \Delta t \quad (5.2.2-1)$$

式中： N ——样本波形数据总数 (个)，取整数；

t_s ——样本波形长度 (μ s)；

Δt ——采样间隔 (μ s)。

2 基准点、第 i 点波形数据分别构成下列 N 个有序数据的数列：

$$\text{基准点波形数据: } a_{0,1}, a_{0,2}, \dots, a_{0,k}, \dots, a_{0,N} \quad (5.2.2-2)$$

第 i 点波形数据: $a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,k}, \dots, a_{i,N}$ (5.2.2-3)

式中: $a_{0,1}, a_{i,1}$ ——分别为基准点、第 i 点波形数据序列中第 1 项数据或首项数据, 即首波起跳点的波形数据;

$a_{0,N}, a_{i,N}$ ——分别为基准点、第 i 点波形数据序列中第 N 项数据或末项数据, 即样本波形长度 t_s 对应的波形数据;

k ——波形数据序号, $k = 1 \sim N$ 。

3 基准点、第 i 点波形数据的统计量应分别按下列公式计算:

$$\bar{a}_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N a_{0,k} \quad (5.2.2-4)$$

$$\bar{a}_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N a_{i,k} \quad (5.2.2-5)$$

$$s_0 = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (a_{0,k} - \bar{a}_0)^2} \quad (5.2.2-6)$$

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (a_{i,k} - \bar{a}_i)^2} \quad (5.2.2-7)$$

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

s_0, s_i ——分别为基准点、第 i 点波形数据的标准差;

$a_{0,k}, a_{i,k}$ ——分别为基准点、第 i 点波形数据序列中第 k 项数据。

5.2.3 基于本规程第 5.2.2 条的计算结果, 同条件第 i 点波形不相似系数应按式计算:

$$D_i = \sqrt{\sum_{k=1}^N \left(\frac{a_{i,k} - \bar{a}_i}{s_i} - \frac{a_{0,k} - \bar{a}_0}{s_0} \right)^2} \quad (5.2.3)$$

式中: D_i ——第 i 点波形不相似系数, 即第 i 点相对于基准点波形数据, 采用标准化欧氏距离公式计算的无量纲数值, $D_i \geq 0$, 精确至 0.0001。

6 数据处理和异常值判定

6.1 一般规定

6.1.1 测点数据处理和异常值判定可采用对比法和概率法；当测点数据少于 20 个时宜采用对比法；不少于 20 个时应优先采用概率法，必要时可结合对比法进行综合判定。

6.1.2 测点数据异常值判定应以同条件测点数据为基本判定单元，且应包括一定数量的对比点；对比点包含基准点，且均为同条件正常混凝土测点。

6.1.3 判定参数选用应符合下列规定：

1 普通混凝土构件、大体积混凝土、灌注桩和装配式混凝土结构后浇部位等测点数据异常值判定，应采用声时、声速、波幅和波形不相似系数等参数；当涉及混凝土内部缺陷，应以波形不相似系数为主要判定参数；

2 钢-混凝土组合结构构件、装配式混凝土结构钢筋连接部位套筒或浆锚孔道饱满度测点数据异常值判定，应以波形不相似系数为主要参数，其他为辅助参数；

3 采用波形不相似系数判定测点异常值时，样本波形长度应根据接收信号遇混凝土缺陷可能产生的波形变化范围确定；当难以确定样本波形长度时，宜取首波起跳点起不少于 1 个完整周期的波形长度。

6.1.4 当对判定结果怀疑时，除了复检和再次判定外，必要时可通过钻芯取样或采用内窥镜检查验证。

6.2 对比法异常值判定

6.2.1 采用对比法判定测点数据异常值时，同条件测点总数不得

少于 5 个, 其中对比点数不应少于总点数的 1/3, 且不应少于 2 个。

6.2.2 对比法异常值判定应符合下列规定:

1 将同条件某测点可疑数据与对比点数据比较, 若与对比点数据存在明显差异时, 可直接判定测点数据为异常值;

2 当发现某测点与对比点数据存在差异但难以判定时, 可采用统计学系统聚类法分类对比判定: 将同条件所有测点数据分成较大、较小两类或两组; 当某一测点与对比点数据不属一类时, 可判定测点数据为异常值。

6.3 概率法异常值判定

6.3.1 测点数据统计量计算应符合下列规定:

1 设 X 为某判定参数, 可代表声时、声速、波幅、主频或波形不相似系数等参数, 同条件下 n 个测点数据为 $X_1, X_2, \dots, X_n$;

2 同条件测点数据平均值、标准差应按下列公式计算:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (6.3.1-1)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (6.3.1-2)$$

式中: $\bar{X}$ ——某判定参数测点数据的平均值;

n ——测点总数, 不宜少于 30 个, 当测点布置受限时不应少于 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;

S ——某判定参数测点数据的标准差。

6.3.2 同条件测点异常值判定值计算应符合下列规定:

1 采用声速、波幅和主频等参数时, 应按下式计算:

$$X_0 = \bar{X} - k_m \cdot S \quad (6.3.2-1)$$

式中: X_0 ——某判定参数测点异常值判定值;

$\bar{X}$ ——某判定参数测点数据的平均值;

k_m ——某判定参数测点异常值判定系数； k_m 由本规程表 6.3.3 确定， m 为参与异常值判定的测点数；
 S ——某判定参数测点数据的标准差。

2 采用声时、波形不相似系数等参数时，应按下式计算：

$$X_0 = \bar{X} + k_m \cdot S \quad (6.3.2-2)$$

式中： X_0 ——某判定参数测点异常值判定值；

$\bar{X}$ ——某判定参数测点数据的平均值；

k_m ——某判定参数测点异常值判定系数； k_m 由本规程表 6.3.3 确定， m 为参与异常值判定的测点数；

S ——某判定参数测点数据的标准差。

6.3.3 异常值判定系数的确定应符合表 6.3.3 的规定。

表 6.3.3 异常值判定系数

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
≤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	1.660
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	—	—

注：表中未列数值可采用内插法求得，精确至 0.001。

6.3.4 异常值判定方法应符合下列规定:

1 应将某判定参数 X 同条件下 n 个测点数据由小到大按下式排序:

$$X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_{k-1} \leq X_k \leq X_{k+1} \leq \dots \leq X_n \quad (6.3.4)$$

2 在异常值判定前, 原始测点数据处理和统计量计算应符合表 6.3.4 的规定。

表 6.3.4 原始测点数据处理和统计量计算

判定参数	原始测点数据处理和统计量 $\bar{X}$ 、 S 计算
波幅、声速和主频等参数	原始测点数据未发现明显偏小数据时, 应根据本规程第 6.3.1 条中的公式计算 $\bar{X}$ 、 S ; 发现时, 宜将明显偏小或第 5% 分位数之前对应的测点数据假定为异常, 去除后再计算 $\bar{X}$ 、 S
声时、波形不相似系数等参数	原始测点数据未发现明显偏大数据时, 应根据本规程第 6.3.1 条中的公式计算 $\bar{X}$ 、 S ; 发现时, 宜将明显偏大或第 95% 分位数之后对应的测点数据假定为异常, 去除后再计算 $\bar{X}$ 、 S

3 将表 6.3.4 确定的 $\bar{X}$ 、 S 以及由本规程表 6.3.3 确定的 k_m 代入式 (6.3.2-1) 或式 (6.3.2-2) 可计算出初次异常值判定值, 记作 $X_{0.1}$; 参与初次异常值判定的测点数等于原始测点总数。

4 波幅、声速和主频等参数异常值判定应符合下列规定:

1) 将 $X_{0.1}$ 与 $X_1 \sim X_n$ 排序靠前的某测点数据比较, 其中 $X_1 \sim X_n$ 包含初次假定异常的测点数据; 当第一个测点数据 X_1 存在 X_1 大于 $X_{0.1}$, 应判定 $X_1 \sim X_n$ 测点无异常值; 当第 k 个测点数据 X_k 存在 X_k 不大于 $X_{0.1}$, 应判定 $X_1 \sim X_k$ 测点数据为异常值。

- 2) 将 $X_1 \sim X_k$ 异常数据去除后利用 $X_{k+1} \sim X_n$ 测点数据计算 $\bar{X}$ 、 S ，查本规程表 6.3.3 得到 k_m ，一并代入式 (6.3.2-1)，得到二次异常值判定值，记作 $X_{0.2}$ ；参与二次判定的测点数 m ， $m = n - k$ 。
 - 3) 将 $X_{0.2}$ 与 $X_{k+1} \sim X_n$ 排序靠前的某测点数据再次比较，重复以上操作，直至最后判不出异常值为止。
- 5 声时、波形不相似系数等参数异常值判定应符合下列规定：
- 1) 将 $X_{0.1}$ 与 $X_1 \sim X_n$ 排序靠后的某测点数据比较，其中 $X_1 \sim X_n$ 包含初次假定异常的测点数据；当第 n 个测点数据 X_n 存在 X_n 小于 $X_{0.1}$ ，应判定 $X_1 \sim X_n$ 测点无异常值；当第 k 个测点数据 X_k 存在 X_k 不小于 $X_{0.1}$ ，应判定 $X_k \sim X_n$ 测点数据为异常值。
 - 2) 将 $X_k \sim X_n$ 异常数据去除后利用 $X_1 \sim X_{k-1}$ 测点数据计算 $\bar{X}$ 、 S ，查本规程表 6.3.3 得到 k_m ，一并代入式 (6.3.2-2) 得到二次异常值判定值，记作 $X_{0.2}$ ；参与二次判定的测点数 m ， $m = k - 1$ 。
 - 3) 将 $X_{0.2}$ 与 $X_1 \sim X_{k-1}$ 排序靠后的某测点数据再次比较，重复以上操作，直至最后判不出异常值为止。

7 普通混凝土构件缺陷检测

7.1 内部不密实区和空洞检测

7.1.1 内部不密实区和空洞检测应符合下列规定：

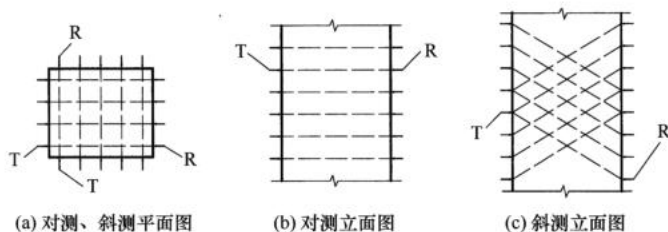
1 被测部位应至少有一对相互平行或相邻的检测面；测区范围应覆盖内部缺陷怀疑区域；

2 宜采用概率法判定，同条件测点总数、对比点数应符合本规程第 6.3.1 条的规定；

3 对于梁柱节点等钢筋密集部位检测，除应符合本节有关规定外，应保证同条件测点的测试距离、角度和距构件边缘距离相同，测点连线通过钢筋密集区的部位宜一致。

7.1.2 内部不密实区和空洞检测方法应符合下列规定：

1 构件具有一对或两对互相平行的检测面时，宜采用对测法或斜测法布置网格测点（图 7.1.2-1）；

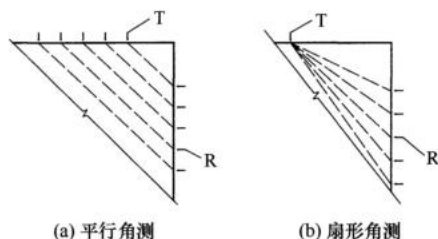


T—发射换能器；R—接收换能器

图 7.1.2-1 对测法或斜测法示意图

2 构件仅有两个相邻的检测面时，宜采用角测法布置网格测点；角测法可分为平行角测和扇形角测（图 7.1.2-2）；

3 检测时应记录测点位置、测试顺序，宜使同条件测点为



T—发射换能器；R—接收换能器
图 7.1.2-2 角测法平面或立面图示意图

网格测点的某行或某列；

4 检测中，当发现某测点数据可疑时，除复测或加密补测外，宜在原测区基础上采用多角度检测。

7.1.3 数据处理和判定应符合下列规定：

1 同条件测点数据异常值判定，应采用声时、声速、波幅和波形不相似系数等参数，按本规程概率法或结合对比法进行综合判定；

2 当某测点数据为异常时，应根据网格测点连线的位置关系进一步确定内部缺陷位置和范围。

7.2 单面平测法裂缝深度检测

7.2.1 单面平测法检测混凝土裂缝深度应符合下列规定：

1 被测裂缝位于一个检测面，且裂缝深度估计值不大于 500mm 时，可利用一个检测面检测混凝土裂缝深度；

2 被测裂缝内部不得积水，不得含泥浆或其他填充物；

3 检测时跨缝、不跨缝的测点数均不得少于 5 个，当测点布置受限时测点数均不得少于 3 个；平测距离不宜大于 1000mm；

4 测点布置应使测点连线与钢筋中心线保持一定夹角，并应避免测试部位其他细小裂缝和外观缺陷；

5 跨缝测点连线宜与裂缝无错位、宽度较大的位置相交；裂缝长度较短时宜与缝长 1/2 位置相交。

7.2.2 检测方法应符合下列规定：

1 采用不同测距按跨缝、不跨缝分别布置测点，不跨缝测点发、收换能器位于裂缝同侧，跨缝测点发、收换能器位于裂缝两侧；跨缝与不跨缝测距应保持一一对应。

2 设跨缝、不跨缝各测点平测距离均为 $l'_1, l'_2, \dots, l'_i, \dots, l'_n$ ，如依次取 100mm、150mm、200mm、 $\dots$ ，并分别测读跨缝声时 $t_{11}, t_{12}, \dots, t_{1i}, \dots, t_{1n}$ 和不跨缝声时 $t_{21}, t_{22}, \dots, t_{2i}, \dots, t_{2n}$ 。

3 根据不跨缝各测点平测距离和声时绘制时-距坐标图（图 7.2.2-1），或求得回归直线方程，测距估计值应按下式计算：

$$\hat{l} = kt + a \quad (7.2.2-1)$$

式中： $\hat{l}$ ——测距估计值（mm），图 7.2.2-1 中回归直线 AB 纵坐标值；

t ——声时（ μs ），图 7.2.2-1 中回归直线 AB 横坐标值；

k ——回归系数（km/s），图 7.2.2-1 中回归直线 AB 的斜率，即混凝土平测声速；

a ——回归常数（mm），图 7.2.2-1 中回归直线 AB 的截距。

4 单面平测法裂缝深度应按式计算（图 7.2.2-2）：

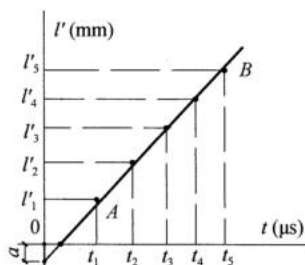


图 7.2.2-1 单面平测法时-距坐标图

$$h_i = \frac{1}{2} \sqrt{\hat{l}_{1i}^2 - \hat{l}_{2i}^2} \quad (7.2.2-2)$$

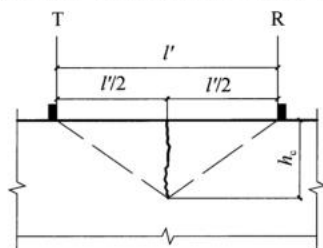
式中: h_i ——第 i 点裂缝计算深度 (mm);

$\hat{l}_{1i}$ ——第 i 点跨缝平测距离估计值 (mm), 按式 (7.2.2-

1), t 取 t_{1i} 时 $\hat{l}_{1i}$ 为 $kt_{1i} + a$;

$\hat{l}_{2i}$ ——第 i 点不跨缝平测距离估计值 (mm), 按式

(7.2.2-1), t 取 t_{2i} 时 $\hat{l}_{2i}$ 为 $kt_{2i} + a$ 。



T—发射换能器; R—接收换能器

图 7.2.2-2 跨缝检测超声波传播路径示意图

5 裂缝深度平均值应按下式计算:

$$\bar{h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \quad (7.2.2-3)$$

式中: $\bar{h}$ ——裂缝深度平均值 (mm);

n ——测点总数;

h_i ——第 i 点裂缝计算深度 (mm)。

7.2.3 基于本规程式 (7.2.2-2) 计算结果, 裂缝深度检测值 h_c 确定应符合下列规定:

1 跨缝检测未发现首波反相时, 剔除测距 $l'_i < \bar{h}$ 和 $l'_i > 3\bar{h}$ 对应测点的裂缝计算深度; 按本规程第 6.2.2 条的有关规定, 当剩余测点裂缝计算深度可分成较大、较小两组时, 取较大一组数

据的平均值作为 h_c ；不可以分成两组时，取剩余测点裂缝计算深度的平均值作为 h_c ；

2 跨缝检测当发现第 i 点测距首波反相时，可初步确定 h_c 为 $0.5 l'_i \sim l'_i$ 。根据反相点的相邻测点 $t_{1(i-1)}$ 、 $t_{1(i+1)}$ 和 $t_{2(i-1)}$ 、 $t_{2(i+1)}$ 分别按式 (7.2.2-1) 和式 (7.2.2-2)，求得 $h_{(i-1)}$ 、 $h_{(i+1)}$ ，并取平均值 $\bar{h}$ ，当 $\bar{h}$ 满足 $0.5 l'_i < \bar{h} < l'_i$ 时， $h_c = \bar{h}$ ；当 $\bar{h} \leq 0.5 l'_i$ 时， $h_c = 0.5 l'_i$ ；当 $\bar{h} \geq l'_i$ 时， $h_c = l'_i$ 。

7.3 双面斜测法裂缝深度检测

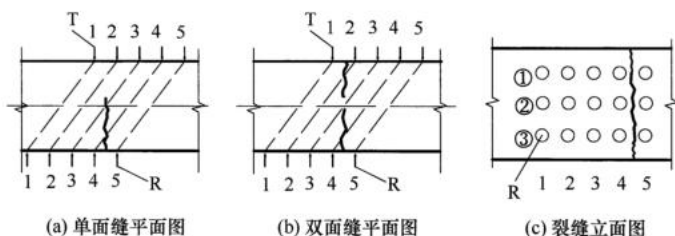
7.3.1 双面斜测法检测混凝土裂缝深度应符合下列规定：

1 被测裂缝应符合本规程第 7.2.1 条第 2 款的规定，且应有两个相互平行的检测面；

2 被测裂缝可为单面裂缝或双面对称裂缝；采用本节规定的方法可检测裂缝深度或沿构件断面的贯穿范围。

7.3.2 检测方法应符合下列规定：

1 布置测点时，被测裂缝假定沿构件断面贯穿，且在两个检测面上对称，应在裂缝所在的两个检测面上布置测点 (图 7.3.2)；



T—发射换能器；R—接收换能器；1、2、3、4、5—每排测点编号

图 7.3.2 裂缝双面斜测法示意图

2 沿缝长方向布置测点不得少于 2 排, 每排间距宜为 200mm~500mm (图 7.3.2c);

3 检测时, 将发、收换能器分别置于两个检测面对应的 1、2、3、……测点位置。使每排不少于 3 条测点连线穿过裂缝断面, 其中 1 条与裂缝断面 1/2 位置斜交, 且保证每排至少有 2 条测点连线不穿过裂缝断面作为对比;

4 宜以图 7.3.2 (c) 所示的①~③排号为测点主序号, 逐排逐点测读声时、波幅等声参量。

7.3.3 裂缝深度检测值确定应符合下列规定:

1 同条件测点数据异常值判定应采用声时、声速、波幅和波形不相似系数等参数, 按本规程对比法判定;

2 当穿过裂缝断面的测点数据为异常时, 应根据测点连线与裂缝断面相交的位置关系, 确定裂缝深度检测值及贯穿范围。

7.4 结合面缺陷检测

7.4.1 混凝土结合面缺陷检测应符合下列规定:

1 混凝土结合面可分为水平、倾斜和竖向结合面;

2 检测时应具备两个相互平行的检测面, 且能保证部分超声波穿过结合面。

7.4.2 检测方法应符合下列规定:

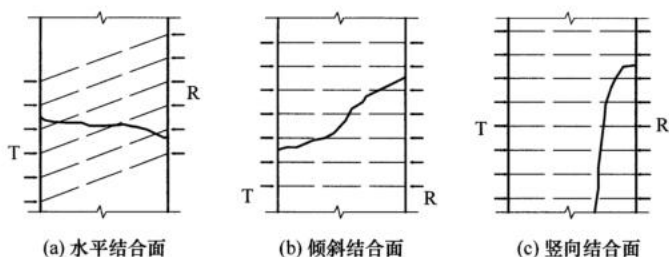
1 测点布置宜根据结合面类型采用对测法或斜测法;

2 在发、收换能器所在的检测面上布置网格测点, 宜使穿过结合面的测点连线不少于 3 条; 不穿过结合面的测点连线不少于 2 条, 且分别位于结合面两侧作为对比 (图 7.4.2);

3 检测时各测点的测试距离、角度应一致, 并逐排逐点测读声时、波幅等声参量;

4 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, 可采用多角度检测。

7.4.3 数据处理和判定应符合下列规定:



T—发射换能器；R—接收换能器

图 7.4.2 结合面检测立面示意图

1 同条件测点数据异常值判定应采用声时、声速、波幅和波形不相似系数等参数，按本规程对比法判定；

2 当结合面某测点数据为异常时，应根据测点连线与结合面相交的位置关系确定缺陷范围；当对判定结果怀疑时，可钻芯取样进行验证。

7.5 表面损伤层检测

7.5.1 混凝土表面损伤层检测应符合下列规定：

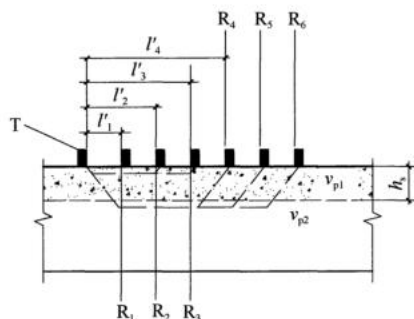
1 表面损伤层厚度估计值不宜大于 100mm，被测损伤层部位表面宜平整，并应处于干燥自然状态，同时应符合本规程第 7.2.1 条第 4 款的规定；

2 应选取有代表性损伤层部位，当表面损伤层厚度分布不均匀或检测数据无效时，应增加测试部位，且不少于 1 处。

7.5.2 检测方法应符合下列规定：

1 检测时将发射换能器置于某一测点且保持不动，然后将接收换能器以边缘间距 30mm 起，按 30mm 的整数倍依次置于 R_1 、 R_2 、 R_3 、…对应的测点位置（图 7.5.2）；

2 测量平测距离 l'_1 、 l'_2 、…、 l'_i 、…、 l'_n ，如取 30mm、60mm、



T—发射换能器；R₁、R₂、R₃、R₄、R₅、R₆—接收换能器的不同位置

图 7.5.2 损伤层厚度检测示意图

90mm、…，并测读对应点声时 t_1 、 t_2 、…、 t_i 、…、 t_n ， n 为测点总数且不应少于 6 个。

7.5.3 测点数据有效性判定应符合下列规定：

1 相邻测点平测声速估算值应按下式计算：

$$v'_i = (l'_{i+1} - l'_i) / (t_{i+1} - t_i) \quad (7.5.3)$$

式中： v'_i ——第 i 个相邻测点平测声速估算值 (km/s)， i 取 1 ~ n ；

l'_i ——第 i 点平测距离 (mm)；

t_i ——第 i 点声时 (μ s)。

2 测点数据有效性判定应符合下列规定：

- 1) 将式 (7.5.3) 计算得到的 $n-1$ 个平测声速估算值由小到大排序： v'_1 、 v'_2 、…、 v'_{i-1} 、 v'_i 、 v'_{i+1} 、…、 v'_{n-1} ；
- 2) 按本规程第 6.2.2 条的有关规定，当 $v'_1 \sim v'_{n-1}$ 可分成较小值和较大值两组，且各组测点数均不少于 3 个，可断定测点数据有效；
- 3) 当 $v'_1 \sim v'_{n-1}$ 不能分成较小值和较大值两组，或可分组

但各组测点数少于 3 个，且经增加测点补测仍不满足本款第 2) 项要求，可断定测试部位损伤层厚度太小，或检测数据无效。

7.5.4 表面损伤层厚度计算应符合下列规定：

1 当测点数据有效时，可根据两组对应的平测距离和声时，绘制时—距坐标图（图 7.5.4），或分别求得损伤层、未损伤混凝土回归直线方程；回归常数、系数计算应符合下列规定：

1) 损伤层混凝土回归常数、系数应按下式计算：

$$\hat{l} = a_1 + k_1 t \quad (7.5.4-1)$$

式中： $\hat{l}$ ——测距估计值（mm），图 7.5.4 纵坐标值；

a_1 ——损伤层混凝土回归常数（mm），图 7.5.4 中回归直线 BM 的截距；

k_1 ——损伤层混凝土回归系数（km/s），图 7.5.4 中回归直线 BM 的斜率，即损伤层混凝土平测声速 v_{p1} ；

t ——声时（ μs ），图 7.5.4 横坐标值。

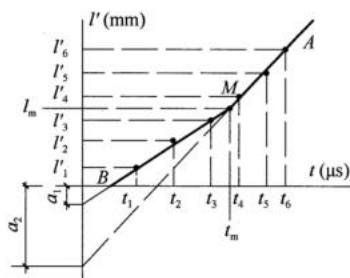


图 7.5.4 损伤层、未损伤混凝土时—距坐标图

2) 未损伤混凝土回归常数、系数应按下式计算：

$$\hat{l} = a_2 + k_2 t \quad (7.5.4-2)$$

式中： $\hat{l}$ ——测距估计值（mm），图 7.5.4 纵坐标值；

a_2 ——未损伤混凝土回归常数 (mm), 图 7.5.4 中回归直线 MA 的截距;

k_2 ——未损伤混凝土回归系数 (km/s), 图 7.5.4 中回归直线 MA 的斜率, 即未损伤混凝土平测声速 v_{p2} ;

t ——声时 (μs), 图 7.5.4 横坐标值。

2 由式 (7.5.4-1) 和式 (7.5.4-2) 可求出交点 M 坐标 (t_m, l_m), t_m 为横坐标值, l_m 为纵坐标值。 l_m 应按下式计算:

$$l_m = (a_1 \cdot v_{p2} - a_2 \cdot v_{p1}) / (v_{p2} - v_{p1}) \quad (7.5.4-3)$$

式中: l_m ——损伤层、未损伤混凝土回归直线方程交点的纵坐标值 (mm);

a_1 ——损伤层混凝土回归常数 (mm);

v_{p2} ——未损伤混凝土平测声速 (km/s);

a_2 ——未损伤混凝土回归常数 (mm);

v_{p1} ——损伤层混凝土平测声速 (km/s)。

3 表面混凝土损伤层厚度应按下式计算:

$$h_s = \frac{l_m}{2} \sqrt{(v_{p2} - v_{p1}) / (v_{p2} + v_{p1})} \quad (7.5.4-4)$$

式中: h_s ——表面混凝土损伤层厚度 (mm);

l_m ——损伤层、未损伤混凝土回归直线方程交点的纵坐标值 (mm);

v_{p2} ——未损伤混凝土平测声速 (km/s);

v_{p1} ——损伤层混凝土平测声速 (km/s)。

4 表面损伤层厚度检测结果宜通过钻芯取样, 并根据芯样表面混凝土湿度变化进行验证。

8 大体积混凝土缺陷检测

8.1 一般规定

8.1.1 大体积混凝土缺陷检测采用的声测孔法可分为孔-孔法和孔-面法。

8.1.2 声测孔钻取应符合下列规定：

1 声测孔宜采用风钻或水钻成孔，孔径宜为换能器直径加10mm~20mm，且应保持各声测孔中心线平行；

2 孔中粉末应采用高压水清理干净，测试前孔中应注满清水，并保证径向振动式换能器上下移动通畅。

8.2 内部不密实区和空洞检测

8.2.1 大体积混凝土内部不密实区和空洞检测除应符合本节有关规定外，还应符合本规程第7.1.1条的有关规定。

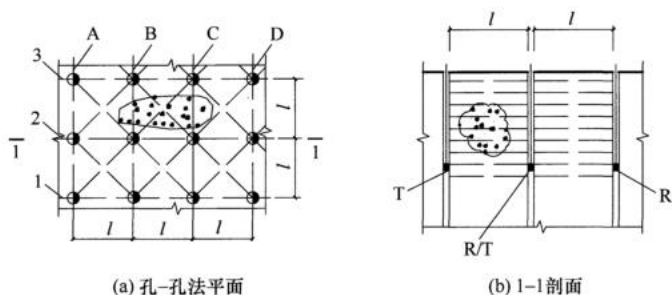
8.2.2 检测方法应符合下列规定：

1 宜沿高度方向采用上下斜测法；

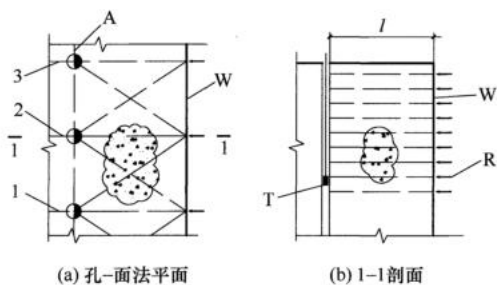
2 测区应覆盖被怀疑的缺陷部位，并按下列方式布置：按图8.2.2-1所示以1、3点纵向检测剖面 and A、D点横向检测剖面构成测区；按图8.2.2-2所示以1、3点纵向检测剖面、A点横向检测剖面 and W外立面构成测区；

3 检测过程应记录测试顺序和检测剖面位置，并以两个声测孔或一个声测孔和外立面测点连线为检测剖面，由上至下逐点测读声时、波幅等声参量；

4 当发现某一检测剖面测点数据可疑时，除应复测或多角度检测外，宜在构件顶面或斜立面增加声测孔，或在外立面加密网格测点；加密的声测孔间距不宜大于500mm。



1、2、3—3个纵向检测剖面位置；
A、B、C、D—4个横向检测剖面位置；
T—发射换能器；R—接收换能器
图 8.2.2-1 孔-孔法检测内部缺陷示意图



1、2、3—3个纵向检测剖面位置；
A—横向检测剖面位置；W—外立面；
T—发射换能器；R—接收换能器
图 8.2.2-2 孔-面法检测内部缺陷示意图

8.2.3 数据处理及判定应符合下列规定：

1 同一检测剖面测点数据异常值判定，按本规程第 7.1.3 条第 1 款的规定执行；

2 当某测点数据为异常时，应根据各检测剖面测点连线的

位置关系确定内部缺陷位置和范围；必要时，对可疑部位采用钻芯取样或内窥镜检查进行验证。

8.3 裂缝深度检测

8.3.1 大体积混凝土裂缝深度检测应符合下列规定：

1 大体积混凝土顶面或斜立面裂缝深度检测除应符合本节规定外，尚应符合本规程第 7.2.1 条第 2 款的规定；

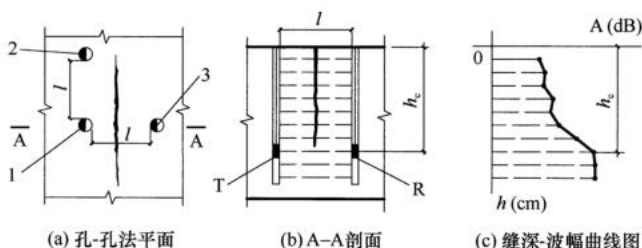
2 被测裂缝深度估计值不宜小于 500mm。

8.3.2 采用孔-孔法检测裂缝深度应符合下列规定：

1 按图 8.3.2 (a) 所示位置钻取 3 个声测孔，孔深不小于裂缝深度估计值加 200mm；1 号、2 号孔位于裂缝同侧作为对比；1 号、3 号孔位于裂缝两侧；1 号~2 号、1 号~3 号孔间距应相等，宜为 1000mm~2000mm；

2 检测时分别按 1 号~2 号孔不跨缝、1 号~3 号孔跨缝以等高度、等间距由上至下逐点测读声时、波幅等声参量，并记录各测点换能器上下移动深度；

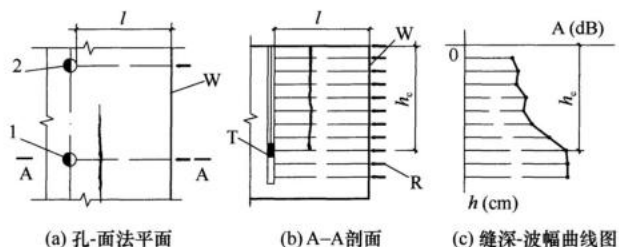
3 绘制裂缝深度-波幅曲线图（图 8.3.2c）。



1、2、3—声测孔编号；T—发射换能器；R—接收换能器

图 8.3.2 孔-孔法检测裂缝深度示意图

8.3.3 采用孔-面法时，可利用 2 个声测孔和 1 个外立面（图 8.3.3）参照孔-孔法检测。孔-面法裂缝深度-波幅曲线见图 8.3.3 (c)。



1、2—声测孔编号；W—外立面；
T—发射换能器；R—接收换能器

图 8.3.3 孔-面法检测裂缝深度示意图

8.3.4 裂缝深度检测值确定应符合下列规定：

1 根据裂缝深度-波幅曲线（本规程图 8.3.2c 和图 8.3.3c），波幅值随裂缝深度增大并逐渐增大，到达最大值后基本保持不变；将波幅首次为最大对应的裂缝深度，即为裂缝深度检测值；

2 当发现裂缝深度-波幅曲线不存在第 1 款变化或变化不明显时，应以同条件不跨缝的测点数据为对比，按本规程对比法确定裂缝深度检测值；

3 当裂缝深度检测值接近钻孔深度时，必要时可加深声测孔再次检测和判定。

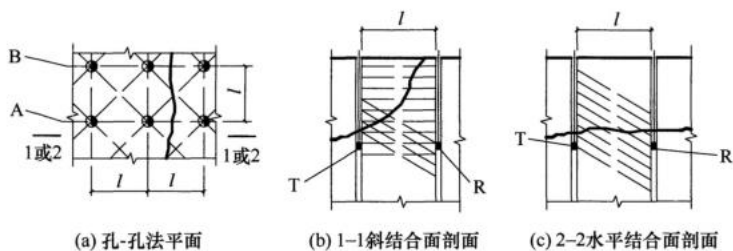
8.4 结合面缺陷检测

8.4.1 大体积混凝土结合面缺陷检测，除应符合本节规定外，尚应符合本规程第 7.4.1 条的有关规定。

8.4.2 检测方法应符合下列规定：

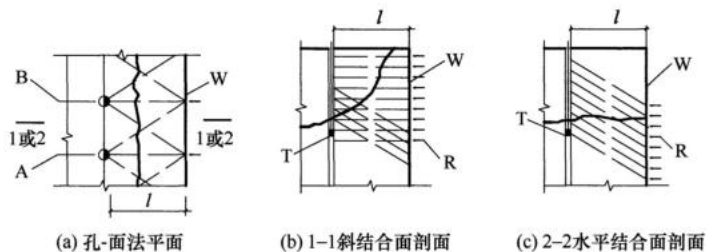
1 应根据结合面倾斜角度采用斜测法或对测法；

2 结合面缺陷应抽取不少于 2 个测试部位，如 8.4.2-1 和图 8.4.2-2 所示 A、B 点 2 个纵向测试部位；间距宜为 500mm～2000mm。



T—发射换能器；R—接收换能器

图 8.4.2-1 孔-孔法检测结合面缺陷示意图



W—外立面；T—发射换能器；R—接收换能器

图 8.4.2-2 孔-面法检测结合面缺陷示意图

3 同一检测剖面穿过结合面测点连线不宜少于 3 条，不穿过结合面的正常混凝土测点连线不宜少于 2 条作为对比；

4 检测时以每个部位的不同测点连线划分检测剖面，按同一检测面由上至下逐点测读声时、波幅等声参量；

5 竖向结合面缺陷检测可参照斜结合面检测方法执行。

8.4.3 数据处理和判定应符合下列规定：

1 同一检测剖面测点数据异常值判定，按本规程第 7.1.3 条第 1 款的规定执行；

2 当某测点数据为异常时，应根据各检测剖面测点连线的位置关系确定结合面缺陷范围；必要时，可增加测试部位进行检测和判定。

9 灌注桩混凝土缺陷检测

9.1 一般规定

9.1.1 灌注桩混凝土缺陷检测应利用事先预埋声测管，并采用一对径向振动式换能器进行检测；桩径不宜小于 0.6m。

9.1.2 声测管宜采用外径为 40mm~60mm 的薄壁钢管，内径应比换能器直径大 10mm~20mm；声测管相关尺寸、质量和技术指标应符合现行国家标准《混凝土灌注桩用钢薄壁声测管》GB/T 31438 的有关规定。

9.1.3 当灌注桩声测管堵塞且无法疏通时，可在声测管附近补钻同深度的声测孔；声测孔钻取要求应符合本规程第 8.1.2 条的规定。

9.2 检测方法

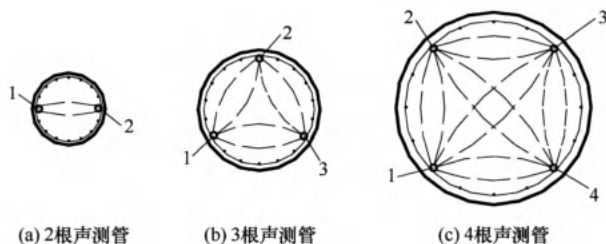
9.2.1 声测管埋设和安装应符合下列规定：

1 声测管埋设和安装，除应符合本节有关规定外，尚应符合现行行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106 的有关规定；

2 声测管埋设方式：当桩径为 0.6m~0.8m 时，宜沿桩径方向预埋 2 根（图 9.2.1a）；当桩径为 0.8m~1.6m 时，宜按圆内接等边三角形预埋 3 根（图 9.2.1b）；当桩径为 1.6m~2.5m 时，宜按圆内接正方形预埋 4 根（图 9.2.1c）；当桩径大于 2.5m 时宜增加声测管数量；

3 同根灌注桩各声测管中心线应保持平行；声测管分段时连接头应紧密相连，且应保证声测管整体通直；

4 声测管下口应封闭，宜采用铁盖焊接；上口应采用木塞



1、2、3、4—分别为不同位置声测管编号

图 9.2.1 声测管埋设平面示意图

或专用管盖封堵；

5 声测管埋深应与灌注桩底部齐平，上端外露高度宜相同且高于灌注桩桩顶不应少于 300mm；

6 声测管应采用焊接或绑扎方式固定在灌注桩钢筋笼内侧，除在声测管上下端和接头部位宜设置固定点外，其余部位宜按间距不大于 2m 设置固定点；素混凝土桩可采用钢筋支架固定声测管；

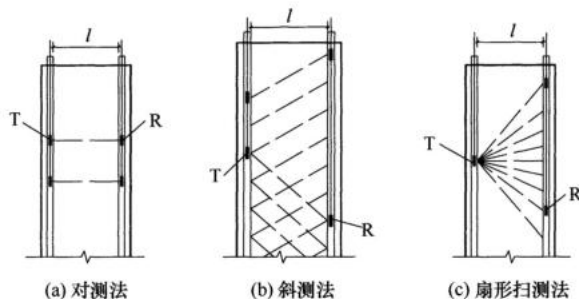
7 声测管接头、固定点采用焊接时，应避免声测管焊接烧穿或在管内壁形成焊瘤；

8 灌注桩钢筋笼整体或分段安装就位过程中应避免声测管扭曲变形；钢筋笼就位后浇筑混凝土前，应检查声测管是否漏水；此外，应采用一只与换能器类似的钢棒疏通声测管；混凝土浇筑完成后在检测前应再次疏通。

9.2.2 检测前声测管应注满清水，并逐根测量各声测管埋深、两声测管内边缘间距及外露高度。

9.2.3 灌注桩检测时，应以同根桩两个声测管连线为一检测剖面，将发、收换能器分别置于两个声测管内的同一高程或同一高差位置，按等间距由上至下或由下至上同步移动；以每个检测剖面作为测点主序号，逐点测读声时、波幅等声参量，并记录测试顺序和换能器移动深度。

9.2.4 检测中可采用对测法、斜测法及扇形扫测法（图 9.2.4）；当发现某一检测剖面测点数据可疑时，应复测、加密补测或采用多角度检测。



T—发射换能器；R—接收换能器

图 9.2.4 灌注桩检测剖面示意图

9.3 数据处理和判定

9.3.1 同一检测剖面测点数据异常值判定，应采用声时、声速、波幅和波形不相似系数等参数，按本规程对比法和概率法综合判定。

9.3.2 除按本规程对比法判定外，也可绘制深度 H_i - 声参量 X_i 曲线作为对比法辅助判定；判定时应符合下列规定：

1 X 代表声时、声速、波幅、波形不相似系数和 Z 等参数，其中 Z 参数值应按下列式计算：

$$Z_i = (t_{i+1} - t_i)^2 / |H_{i+1} - H_i| \quad (9.3.2)$$

式中： Z_i ——第 i 点参数 Z 计算值，精确至 $0.001\mu s^2/mm$ ；

t_i ——第 i 点声时 (μs)；

H_i ——第 i 点换能器移动深度 (mm)。

2 根据 $H_i - X_i$ 曲线，当在某深度处发现声时、波形不相似系数和 Z_i 明显变大，或声速、波幅明显变小时，可判定对应

深度测点数据为异常值。

9.3.3 当某测点数据为异常时，应根据各检测剖面测点连线的位置关系确定内部缺陷位置和范围；当对判定结果有怀疑时，可采用钻芯取样进行验证。

10 钢-混凝土组合结构缺陷检测

10.1 一般规定

10.1.1 钢管混凝土构件缺陷检测应符合下列规定：

1 构件外径或短边尺寸不宜小于 300mm；

2 检测前，可利用钢管余料、预留混凝土试块，或同条件其他部位钢材和混凝土构件测定钢材和混凝土声速，作为两种材料的声速估算值；

3 检测前应采用敲击、局部钻孔等方法初步检查和判定管脱空位置和范围；正式检测时应避开管壁脱空部位；若脱空部位无法避开时，可采用压力注浆等方法做修补处理，处理后应重新检测。

10.1.2 钢管混凝土构件缺陷检测，应根据设计图纸等相关资料核查内部钢筋截面形状、尺寸、具体位置和构造。

10.1.3 宜制作与现场同条件的钢-混凝土组合结构构件，模拟可能出现的混凝土缺陷进行对比检测。

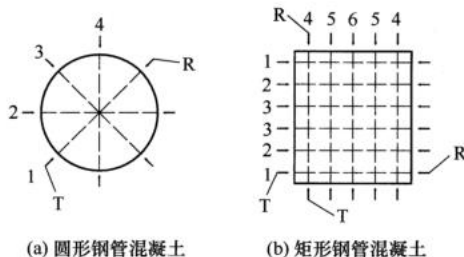
10.2 钢管混凝土构件缺陷检测

10.2.1 钢管混凝土构件内部不密实区、管壁脱空缺陷检测应首先采用对测法，并应符合下列规定：

1 圆形钢管混凝土缺陷检测（图 10.2.1a）：使圆周或母线方向的测点连线与钢管中心线在同一纵剖面垂直相交；

2 矩形钢管混凝土缺陷检测（图 10.2.1b）：使两检测面的测点连线与检测钢板平面垂直相交；

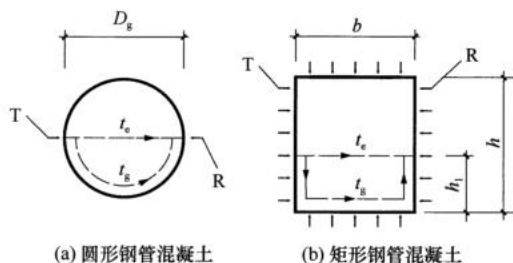
3 检测时，以网格测点连线所在断面为检测剖面，逐点测读声时、波幅等声参量。



1、2、3、3、4、5、6—代表同条件测点连线位置的检测剖面；
T—发射换能器；R—接收换能器

图 10.2.1 钢管混凝土构件对测法平面示意图

10.2.2 钢管混凝土缺陷检测采用对测法时，超声波传播路径至少有两条：一是直线通过钢管混凝土到达接收换能器，二是沿管壁传播到达接收换能器（图 10.2.2）；两种传播路径声时估算应符合下列规定：



T—发射换能器；R—接收换能器

图 10.2.2 钢管混凝土超声波传播路径平面示意图

1 圆形钢管混凝土构件：沿直线、沿管壁传播的声时估算值应按下列公式计算：

$$t_e = D_g / v_e \quad (10.2.2-1)$$

$$t_g = 1.57 D_g / v_g \quad (10.2.2-2)$$

式中： t_e ——混凝土声时估算值（ μs ），即沿直线传播声时估算值；

D_g ——圆形钢管混凝土构件外径（mm）；

v_e ——混凝土声速估算值 (km/s);

t_g ——沿管壁传播声时估算值 (μs)

v_g ——钢材声速估算值 (km/s)。

2 矩形钢管混凝土构件：沿直线、沿管壁传播的声时估算值应按下列公式计算：

$$t_e = b / v_e \quad (10.2.2-3)$$

$$t_g = (b + 2h_1) / v_g \quad (10.2.2-4)$$

式中： t_e ——混凝土声时估算值 (μs)，即沿直线传播声时估算值；

b ——矩形钢管混凝土构件截面宽度 (mm)；

v_e ——混凝土声速估算值 (km/s)；

t_g ——沿管壁传播声时估算值 (μs)；

h_1 ——测点距矩形钢管混凝土构件边缘最小距离 (mm)

v_g ——钢材声速估算值 (km/s)。

10.2.3 钢管混凝土缺陷采用斜测法时，应符合下列规定：

1 应以对测法检测结果为基础布置测点；

2 圆形钢管混凝土斜测时，沿纵向使测点连线与钢管中心线在同一纵剖面斜交；

3 矩形钢管混凝土斜测时，沿纵向使测点连线与检测钢板平面斜交，且在横断面上的投影线垂直于斜交钢板平面。

10.2.4 数据处理和判定应符合下列规定：

1 采用对测法判定应符合下列规定：

1) 异常值判定应以混凝土声时估算值小于沿管壁传播声时估算值为前提；

2) 当实测声时接近或大于沿管壁传播声时估算值时，应判定测点部位管壁与混凝土脱空；

3) 当实测声时小于沿管壁传播声时估算值时，具备内部混凝土缺陷判定条件；同条件测点数据异常值判定，应采用波形不相似系数并辅以声时、声速、波幅等声

参量的变化或逆变化,按本规程概率法或对比法判定。

2 采用斜测法判定时,应基于对测法判定结果,按本条第1款第3)项的参数和方法进行判定;

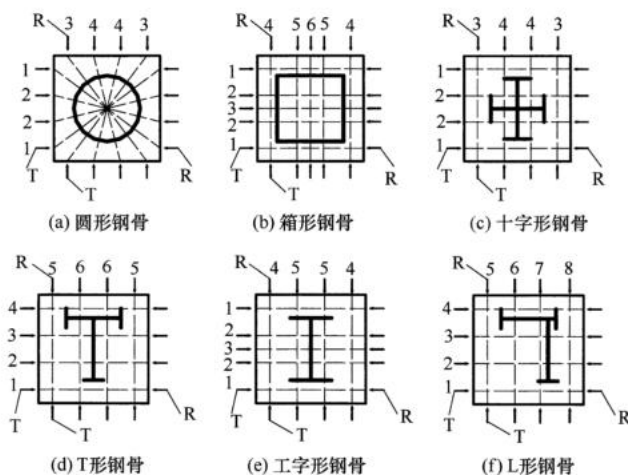
3 当某测点数据为异常时,应结合测点连线的位置关系确定缺陷位置和范围。

10.3 钢筋混凝土构件缺陷检测

10.3.1 钢筋混凝土构件内部不密实区、结合面缺陷和裂缝深度检测,除应符合本节有关规定外,尚应符合本规程第7.1节~第7.4节的有关规定。

10.3.2 钢筋混凝土构件缺陷检测,宜首先采用对测法或径向检测法,并应符合下列规定:

1 圆形钢筋混凝土构件宜采用径向检测法(图10.3.2a):沿纵向使测点连线与内部钢筋中心线在同一纵剖面垂直相交;



1、2、3、4、5、6、7、8—同条件测点连线位置的检测剖面;

T—发射换能器; R—接收换能器

图 10.3.2 钢筋混凝土构件对测法平面示意图

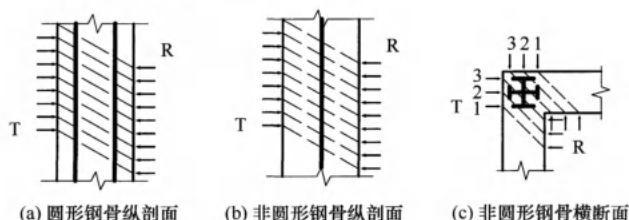
2 矩形、工字形或十字形等非圆形钢筋混凝土构件可直接采用对测法（图 10.3.2b～图 10.3.2f）：沿纵向使测点连线与内部某方向钢板平面垂直相交，且避免与另一方向钢板平面重合。

10.3.3 钢筋混凝土缺陷采用斜测法时，应符合下列规定：

1 圆形钢筋混凝土构件斜测时（图 10.3.3a）：沿纵向使测点连线与钢筋中心线在同一纵剖面斜交，且在横断面上的投影线垂直于断面圆切线；

2 非圆形钢筋混凝土构件斜测应符合下列规定：

- 1) 测点布置不受限时（图 10.3.3b）：沿纵向使测点连线与内部某方向钢板平面斜交，且在横断面上的投影线垂直于斜交钢板平面，避免与另一方向钢板平面重合；
- 2) 测点布置受限时（图 10.3.3c）：使测点连线在横断面上与内部某方向钢板平面斜交，并减少与内部多道钢板平面斜交。



T—发射换能器；R—接收换能器；

1、2、3—分别代表同条件测点连线位置的检测剖面

图 10.3.3 钢筋混凝土构件斜测示意图

10.3.4 数据处理和判定应符合下列规定：

1 同条件测点数据异常值判定，应采用波形不相似系数，并辅以声时、声速、波幅等声参量的变化或逆变化，按本规程概率法或对比法判定；

2 当某测点数据为异常时，应根据各检测剖面测点连线的位置关系确定缺陷位置和范围。

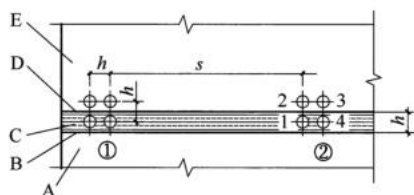
11 装配式混凝土结构连接缺陷检测

11.1 后浇部位缺陷检测

11.1.1 预制构件后浇部位缺陷检测宜包括后浇材料内部缺陷和叠合面缺陷检测，除应符合本节有关规定外，后浇材料内部缺陷检测尚应符合本规程第 7.1.1 条、第 7.1.2 条的规定，叠合面缺陷检测尚应符合本规程第 7.4.1 条、第 7.4.2 条的规定。

11.1.2 预制框架柱、剪力墙底部接缝缺陷检测应符合下列规定：

1 测点和测位布置（图 11.1.2）应符合下列规定：



A—下部构件；B—接缝下部叠合面；C—接缝；

D—接缝上部叠合面；E—上部预制构件

图 11.1.2 预制竖向构件底部接缝检测立面示意图

- 1) 测位净间距 s 为 100mm~300mm，如图 11.1.2 所示
①、②为测位编号；
- 2) 每个测位按正方形四个角共布置 4 个测点，如图 11.1.2 所示 1、2、3、4 分别为 4 个测点编号；相邻测点水平或竖向距离均为接缝高度 h ，一般为 20mm~30mm；
- 3) 测点 1、4 位于接缝高度 $1/2$ 位置，测点 2、3 位于上

部预制构件，且 1~2 测点、3~4 测点均以上部叠合面为对称。

2 接缝材料内部缺陷检测：每个测位按 1~4 测点沿水平方向斜测。

3 上部叠合面缺陷检测应符合下列规定：

- 1) 按 1~2 测点或 3~4 测点分别沿高度方向上下斜测，使测点连线穿过叠合面中心；
- 2) 按 1~4 测点、2~3 测点沿水平方向斜测，使测点连线分别通过接缝材料及上部预制构件混凝土作为对比；
- 3) 斜测距离、角度应一致。

4 检测中发现某测点数据可疑时，应复测或加密测点补测；

5 数据处理和判定应符合下列规定：

- 1) 接缝材料内部缺陷检测：同条件各测位测点数据异常值判定，应按本规程第 7.1.3 条的规定执行；
- 2) 接缝上部叠合面缺陷检测：同条件各测位测点数据异常值判定，应以接缝材料内部缺陷判定结果为基础，按本规程第 7.4.3 条的规定执行。

11.1.3 预制双面叠合剪力墙空腔、预制叠合梁、叠合板上部后浇部位缺陷检测，应符合下列规定：

1 测区应包含正常混凝土部位，测点布置应符合本规程第 3.0.9 条的规定；

2 检测方法可采用对测法或斜测法，检测中发现某测点数据可疑时，应复测或加密测点补测；

3 数据处理和判定应符合下列规定：

- 1) 后浇部位混凝土内部缺陷、叠合面缺陷检测：同条件测点数据异常值判定，应按本规程第 7.1.3 条的规定执行；
- 2) 当某测点数据为异常时，可通过局部钻芯取样验证缺陷类别。

11.2 套筒或浆锚孔道灌浆饱满度检测

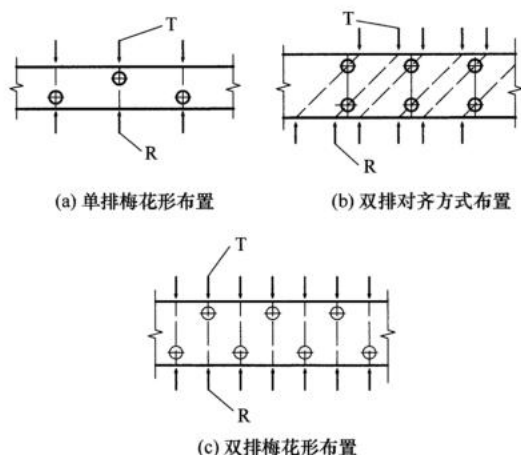
11.2.1 剪力墙钢筋连接部位套筒或浆锚孔道灌浆饱满度检测应符合下列规定：

1 对厚度不大于 300mm 预制剪力墙套筒或浆锚孔道灌浆饱满度检测，应在实体结构预留未灌浆、灌浆满两种状态的套筒或浆锚孔道部位，或制作与现场同条件的未灌浆、灌浆满两种状态的模拟试件作为对比检测；

2 检测前应事先根据现场和资料调查结果，或借助于其他检测手段，核对被测套筒或浆锚孔道所用材质、内部构造以及在构件的具体位置。

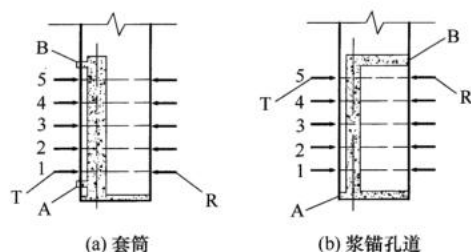
11.2.2 检测方法应符合下列规定：

1 应以剪力墙单个套筒或浆锚孔道为基本检测对象，按图 11.2.2-1 和图 11.2.2-2 所示布置测点；



T—发射换能器；R—接收换能器

图 11.2.2-1 套筒或浆锚孔道对测或斜测平面示意图



T—发射换能器；R—接收换能器；
A—灌浆口；B—排浆口；1、2、3、4、5—测点部位编号

图 11.2.2-2 套筒或浆锚孔道检测立面示意图

2 测点应位于套筒或浆锚孔道的灌浆口与排浆口之间，且最上面的测点宜靠近排浆口；使测点连线在水平面上与套筒或浆锚孔道中心线垂直相交；

3 对单排、双排以梅花形布置的套筒或浆锚孔道应采用对测法，对双排按对齐方式布置的套筒或浆锚孔道应采用水平方向斜测法；

4 上下测点数不宜少于 5 个，宜为奇数点；对于半灌浆套筒、全灌浆套筒或浆锚孔道的全数或批量检测，测点数不宜少于 3 个且按上、中、下布点，测点间距宜为 20mm~100mm；

5 同一批次灌浆套筒或浆锚孔道，测点数量、具体位置、测读顺序应始终保持一致；

6 检测中发现某测点数据可疑时应复测，并检查测点部位表面是否平整。

11.2.3 数据处理和判定应符合下列规定：

1 被测筒或浆锚孔道被视为同条件测点数据，在异常值判定时，应以波形不相似系数为主要参数，以声时、声速、波幅等参数为辅，按本规程对比法判定。

2 对于以灌满浆与未灌浆两种状态为对比的套筒或浆锚孔道，当采用波形不相似系数判定灌浆饱满度时，测点数据异常值

判定应符合下列规定：

- 1) 样本波形长度宜取首波起跳点起不少于 6 个周期连续波形长度；
- 2) 设 $D_{1,i}$ 为被测套筒或浆锚孔道第 i 点波形以未灌浆对应测点波形为基准点波形，按本规程式 (5.2.3) 计算的波形不相似系数； $D_{2,i}$ 为被测套筒或浆锚孔道第 i 点波形以灌浆对应测点波形为基准点波形，按本规程式 (5.2.3) 计算的波形不相似系数；
- 3) 当 $D_{1,i}$ 小于 $D_{2,i}$ 时，可判定被测套筒或浆锚孔道第 i 点数据为异常值， i 为套筒或浆锚孔道测点数， i 不小于 3。

3 当某测点数据为异常时，应根据异常点部位确定套筒或浆锚孔道灌浆饱满度，或缺陷位置和长度。

4 当对判定结果怀疑时，可采用协会标准《装配式混凝土结构检测标准》T/CECS 1189 - 2022 附录 E 中规定的钻孔内窥法进行验证。

附录 A 声时初读数测量

A.1 一般规定

A.1.1 仪器声时初读数（简称零声时），测量方法可分为下列两种情况：

- 1 仪器连接一对厚度振动式换能器零声时测量；
- 2 仪器连接一对径向振动式换能器零声时测量。

A.1.2 仪器连接一只厚度振动式换能器和一只径向振动式换能器时，零声时应取两种类型换能器零声时测量值的算术平均值。

A.1.3 零声时测量完成后，仪器应自动扣除零声时，直接显示被测对象实际声时。

A.2 连接一对厚度振动式换能器零声时测量

A.2.1 连接一对厚度振动式换能器，零声时由仪器、换能器和信号线等仪器设备系统产生；零声时测量支持自动和手动两种模式。

A.2.2 零声时自动模式测量：将两换能器辐射端面直接耦合，操作仪器，当声时测读游标正确标记首波起跳点时停止采样保存，自动完成零声时测量和设定。

A.2.3 零声时手动模式测量分两种情况，并应符合下列规定：

- 1 将两换能器辐射面直接耦合测得声时，并按下式计算零声时：

$$t_0 = t'_0 + t_u \quad (\text{A.2.3-1})$$

式中： t_0 ——连接一对厚度振动式换能器零声时（ μs ），允许偏差 ± 0.1 （ μs ）；

t'_0 ——测量前仪器初始零声时（ μs ）；

t_u ——两换能器辐射面直接耦合声时实测值 (μs)。

2 将两换能器耦合于标准棒两端测得声时,并按下式计算零声时:

$$t_0 = t'_0 + t_u - t_{bb} \quad (\text{A. 2. 3-2})$$

式中: t_0 ——连接一对厚度振动式换能器零声时 (μs);

t'_0 ——测量前仪器初始零声时 (μs);

t_u ——两换能器辐射面耦合于标准棒两端声时实测值 (μs);

t_{bb} ——标准棒声时 (μs)。

3 将手动测量的零声时 t_0 输入到仪器零声时对话框,经确认完成零声时设定。

A. 3 连接一对径向振动式换能器零声时测量

A. 3. 1 连接一对径向振动式换能器零声时应按下式计算:

$$t_{00} = t_0 + t''_0 \quad (\text{A. 3. 1})$$

式中: t_{00} ——连接一对径向振动式换能器零声时 (μs),允许偏差 $\pm 0.2\mu\text{s}$;

t_0 ——仪器设备系统产生的声时 (μs);

t''_0 ——仪器设备系统以外耦合介质产生的声时 (μs)。

A. 3. 2 仪器设备系统产生的声时,应按下列规定测量:

1 将一对径向振动式换能器置于水中同一高度,使两换能器中心线保持平行,测量两换能器内边缘间距,如测得 l_1 为 200mm, l_2 为 100mm 时,测得相应声时 t_1 、 t_2 ;

2 仪器设备系统产生的声时应按下式计算:

$$t_0 = (l_1 t_2 - l_2 t_1) / (l_1 - l_2) \quad (\text{A. 3. 2})$$

式中: t_0 ——仪器设备系统产生的声时 (μs);

l_1 ——第 1 点测距 (mm);

t_2 ——第 2 点声时 (μs);

l_2 ——第2点测距 (mm);

t_1 ——第1点声时 (μs)。

A.3.3 仪器设备系统以外耦合介质产生的声时,应下列规定计算:

1 采用声测孔时,耦合介质产生的声时应按下式计算:

$$t_0'' = (d_0 - d) / v_w \quad (\text{A.3.3-1})$$

式中: t_0'' ——耦合介质产生的声时 (μs);

d_0 ——声测孔孔径 (mm),精确至 0.1mm;

d ——换能器直径 (mm),精确至 0.1mm;

v_w ——水的声速 (km/s),由表 A.3.3 的规定确定。

2 采用声测管时,耦合介质产生的声时应按下式计算:

$$t_0'' = (d_2 - d_1) / v_{\text{sg}} + (d_1 - d) / v_w \quad (\text{A.3.3-2})$$

式中: t_0'' ——耦合介质产生的声时 (μs);

d_2 ——声测管外径 (mm),精确至 0.1mm;

d_1 ——声测管内径 (mm),精确至 0.1mm;

v_{sg} ——声测管材料声速估算值 (km/s),钢制声测管宜取 5.80km/s,其他材质宜按实测值采用;

d ——换能器直径 (mm),精确至 0.1mm;

v_w ——水的声速 (km/s),根据表 A.3.3 确定。

表 A.3.3 水的声速与温度之间关系

水的声速 v_w (km/s)	水温 ($^{\circ}\text{C}$)					
	5	10	15	20	25	30
	1.45	1.46	1.47	1.48	1.49	1.50

注:表中未列数值可采用内插法求得,水温精确至 1°C ,声速精确至 0.01km/s。

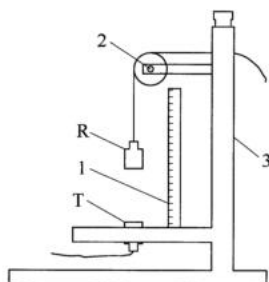
A.3.4 将计算得到的零声时 t_{00} 输入到仪器零声时对话框,经确认完成零声时设定。

附录 B 仪器计时系统校验

B.1 声 时 测 量

B.1.1 准备工作应符合下列规定：

- 1 将一对标称频率为 50kHz 的厚度振动式换能器连接到超声仪，并悬挂放置于空气中（图 B.1.1）；
- 2 当两换能器置于水平地面，应在下面垫以海绵或泡沫塑料；
- 3 应保证两个换能器辐射面对准且平行。



T—发射换能器；R—接收换能器；

1—刻度尺；2—定滑轮；3—测试支架

图 B.1.1 两换能器悬空放置测试示意图

B.1.2 数据测量应符合下列规定：

- 1 测量两换能器辐射面之间的不同测距 $l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$ 如依次取 100mm、150mm、200mm、……；
- 2 在保持首波幅度固定不变的条件下，依次测读测距 $l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$ 对应的声时 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ ，其中 n 为测点总数，且不少于 10 个；

3 测量环境温度，精确至 0.5℃。

B.2 空气声速的测量值和标准值计算

B.2.1 空气声速的测量值和标准值计算应符合下列规定：

1 空气声速测量值计算应根据测距和声时绘制时-距坐标图（图 B.2.1），或求得回归直线方程确定；空气声速测量值应按下式计算：

$$\hat{l} = a + kt \quad (\text{B.2.1-1})$$

式中： $\hat{l}$ ——测距估计值（mm），图 B.2.1 中回归直线 AB 的纵坐标值；

a ——回归常数（mm），图 B.2.1 中回归直线 AB 的截距；

k ——回归系数（km/s），图 B.2.1 中回归直线 AB 的斜率，即空气声速测量值，精确至 0.0001km/s；

t ——声时（ μs ），图 B.2.1 中回归直线 AB 的横坐标值。

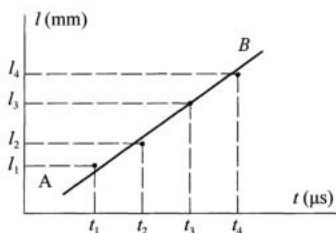


图 B.2.1 空气声速测量时-距坐标图

2 空气声速标准值应按下列式计算：

$$v_k = 0.3314 \sqrt{1 + 0.00367 T_k} \quad (\text{B.2.1-2})$$

式中： v_k ——空气声速标准值（km/s），精确至 0.0001km/s；

T_k ——测量环境温度（℃）。

B.2.2 仪器计时系统校验结果应符合下列规定：

1 空气声速的测量值与标准值相对误差应按下式计算:

$$\delta = |v_m - v_k| / v_k \cdot 100\% \quad (\text{B. 2. 2})$$

式中: δ ——空气声速的测量值与标准值的相对误差, 精确至 0.001;

v_m ——空气声速测量值 (km/s);

v_k ——空气声速标准值 (km/s)。

2 若空气声速的测量值与标准值的相对误差不大于 0.5%, 可断定仪器计时系统正常; 否则应维修并重新检定或校准。

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”。

引用标准名录

本规程引用下列标准。其中，注日期的，仅对该日期对应的版本适用本规程；不注日期的，其最新版适用于本规程。

《混凝土灌注桩用钢薄壁声测管》GB/T 31438

《建筑与市政工程施工现场临时用电安全技术标准》JGJ/T 46

《建筑施工高处作业安全技术规范》JGJ 80

《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106

《混凝土超声波检测仪》JG/T 5004

《装配式混凝土结构检测标准》T/CECS 1189

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

修 订 说 明

本规程是在《超声法检测混凝土缺陷技术规程》CECS 21:2000 的基础上修订而成。

本规程修订过程中,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 20 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、方法更为完善。

本次修订主要包括:1. 取消了模拟式混凝土超声波检测仪有关内容、附录 C 空洞尺寸估算方法、灌注桩完整性等级评定方法;2. 增加了基本规定、波形不相似系数判定参数、大体积混凝土缺陷检测方法、装配式混凝土结构连接缺陷检测方法;3. 修订了数据处理和异常值判定方法、普通混凝土构件和灌注桩混凝土缺陷检测方法、钢-混凝土组合结构缺陷检测方法。

为了便于扩大技术和管理人员在使用本规程时能正确理解和执行条款规定,《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,对条款规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项等进行了说明。本条文说明不具备与标准正文及附录同等法律效力,仅供使用者作为理解或把握标准规定的参考。

目 次

1	总则	(68)
2	术语和符号	(69)
2.1	术语	(69)
3	基本规定	(71)
4	超声波检测设备	(76)
4.1	超声仪	(76)
4.2	换能器	(77)
4.3	使用要求	(77)
5	声学参数测量与计算	(78)
5.1	声学参数测量	(78)
5.2	声学参数计算	(79)
6	数据处理和异常值判定	(80)
6.1	一般规定	(80)
6.2	对比法异常值判定	(81)
6.3	概率法异常值判定	(88)
7	普通混凝土构件缺陷检测	(91)
7.1	内部不密实区和空洞检测	(91)
7.2	单面平测法裂缝深度检测	(91)
7.3	双面斜测法裂缝深度检测	(93)
7.4	结合面缺陷检测	(94)
7.5	表面损伤层检测	(94)
8	大体积混凝土缺陷检测	(97)
8.1	一般规定	(97)
8.2	内部不密实区和空洞检测	(97)
8.3	裂缝深度检测	(97)

8.4	结合面缺陷检测	(98)
9	灌注桩混凝土缺陷检测	(99)
9.1	一般规定	(99)
9.2	检测方法	(99)
9.3	数据处理和判定	(100)
10	钢-混凝土组合结构缺陷检测	(101)
10.1	一般规定	(101)
10.2	钢管混凝土构件缺陷检测	(101)
10.3	钢骨混凝土构件缺陷检测	(103)
11	装配式混凝土结构连接缺陷检测	(105)
11.1	后浇部位缺陷检测	(105)
11.2	套筒或浆锚孔道灌浆饱满度检测	(106)
附录 A	声时初读数测量	(108)
附录 B	仪器计时系统校验	(109)

1 总 则

1.0.1 超声法检测混凝土缺陷是一种无损检测方法。它具有穿透力强、测试准确性较高等优点。近 30 多年来已在建筑、市政、铁路和公路等建设工程中得到广泛应用，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适用范围。目前超声法检测技术已逐步从普通混凝土构件、大体积混凝土、灌注桩等地下结构构件，不断延伸到钢-混凝土组合结构构件及装配式混凝土结构连接部位等缺陷的检测。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 混凝土是一种由多相成分组成的弹粘塑非均质材料。超声脉冲纵波（简称超声波）在混凝土传播过程中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、工艺条件及测试距离、角度等不变的条件下，超声波通过不同部位接收信号的波形、声时、幅度等声参量变化不大；当超声波遇到混凝土内部不密实区、空洞、低强度区和裂缝等缺陷时，因混凝土材料的连续性、均质性等遭到破坏，接收信号的波形、声时、幅度等声参量将产生较大变化。本规程基于同条件测点的声时、声速、波幅、主频和波形不相似系数等声参量的相对变化，分析和判定混凝土缺陷。

2.1.10~2.1.12 超声波遇混凝土缺陷时接收信号的时域波形会产生变化。根据波形变化涉及的长度范围，选取首波起跳点起不少于1个周期长度的波形作为样本波形；样本波形长度是各测点波形不相似系数的计算长度。计算某测点波形不相似系数时，是以同条件某一对比点波形为基准点波形。波形不相似系数是本次修订新增的混凝土缺陷判定参数，填补了长期以来时域波形参数不能直接量化的空白。

2.1.13、2.1.14 单面平测法和双面斜测法是普通混凝土构件常用的两种裂缝检测方法；当裂缝具有两个互相平行的检测面时，可优先采用双面斜测法。

2.1.17~2.1.19 孔-孔法和孔-面法是大体积混凝土缺陷检测的两种方法，统称声测孔法。采用声测孔法检测，将测距变小有利于提高大体积混凝土接收信号首波的识别度及内部缺陷的分辨率

或检出率。

2.1.21~2.1.23 预制剪力墙底部接缝属于预制构件后浇部位。预制构件后浇部位缺陷检测包含后浇材料内部缺陷和叠合面缺陷的检测。

3 基本规定

3.0.1 现场检测常涉及高空、临时用电等作业。检测前可根据国家现行有关标准和初步调查结果制定安全防护措施、管理方案和救援路线图。

3.0.2 4 对于普通混凝土构件特殊部位，包含内部钢筋密集区以及设置钢板、管件、预留空腔或孔洞、预埋铁件等的区域，在检测时这些部位将可能引起接收信号波形和其他声参量变化，需区分或予以回避。

3.0.3 制定检测方案，选取混凝土质量缺陷有争议的部位进行检测，是处理混凝土质量问题的关键。

3.0.4 本次修订共包含以下 5 类构件的缺陷检测：

(1) 普通混凝土构件系指常见的梁、板、柱和剪力墙等钢筋混凝土构件。本次修订将原规程“内部不密实区和空洞检测、裂缝深度检测、混凝土结合面缺陷检测和表面损伤层检测”共四章内容合并为一章，因检测项目主要采用常见的厚度振动式换能器。

(2) 大体积混凝土系指各类工程基础、设备基础、大坝和桥墩等。由于大体积混凝土外观尺寸较大，相对普通混凝土构件内部缺陷出现的位置较随机且隐蔽，检测时需要利用声测孔和采用径向振动式换能器检测，故本次修订增设了大体积混凝土缺陷检测章节。

(3) 混凝土灌注桩等地下结构构件需利用预埋声测管和利用一对径向振动式换能器检测混凝土缺陷。基于现行行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106 对灌注桩完整性等级评定已明确规定，本次修订取消原规程灌注桩完整性等级评定内容，重点对

原规程声测管要求和判定方法做了修订。

(4) 钢-混凝土组合结构是钢管混凝土和钢骨混凝土结构的总称,亦称钢管、型钢或劲性混凝土结构。随着钢-混凝土组合结构建筑规模扩大和设计要求的提高,其施工质量被高度关注。为满足检测需求,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,完善并提升了钢-混凝土组合结构缺陷检测项目与方法。

(5) 装配式混凝土结构连接缺陷主要检测预制叠合梁、板、柱、剪力墙后浇部位缺陷、钢筋连接部位套筒或浆锚孔道灌浆饱满度。为满足检测需求,编制组在江苏昆山设立装配式混凝土结构连接缺陷检测专项试验小组,经多年的试验研究与成果总结,增设了装配式混凝土结构连接缺陷检测章节,并首次提出采用波形不相似系数检测与判定套筒或浆锚孔道灌浆饱满度的方法。

3.0.5 当混凝土质量、测试距离、角度等条件一定时,采用较高频率的换能器可提高混凝土缺陷的分辨率或检出率。但换能器的标称频率也不宜过高,因为超声波通过混凝土随着传播随距离增加,除了扩散衰减外,还将产生较大的吸收、散射衰减,使首波信号减弱难以识别,影响波形数据采集和声参量测读。因此,针对不同检测对象选用合适频率的换能器对混凝土缺陷检测至关重要。

3.0.6 在检测混凝土表面损伤层厚度时,因发、收换能器位于构件同一检测面,接收信号会受到两换能器辐射面未正对及扩散衰减的影响。表面损伤层相当于疏松混凝土层,若换能器标称频率过高,超声波通过损伤层时将产生较大的吸收和散射衰减,使首波信号减弱难以识别,影响声时测读。

3.0.7 1 大体积混凝土和灌注桩缺陷检测采用的径向振动式换能器以水为耦合剂。检测时,超声波在水与混凝土界面将产生反射、折射现象,使声能衰减,穿透能力降低;且换能器频率越高,穿透能力降低越显著。因此,为确保接收信号首波的识别

度，选用较低频率的径向振动式换能器至关重要。

3.0.9 2 对仪器采样间隔设置主要依据现行行业标准《声波检测仪检定规程》JJG 990，其规定声时测量允许偏差为 $\pm 1.0\%$ 。采样间隔设置不当不仅产生测量误差，也将因波形过于陡峭或平缓影响波形观测。

(1) 采样间隔设置过小，波形过于平缓，自动模式下声时游标难以正确标记，且屏显范围内周期性波形过少，不利于后续波形的观测。

(2) 采样间隔设置过大，除带来声时测量误差外，屏显范围周期性波形过于密集，不利于观测波形细节。

(3) 在保证声时测量误差不超限的前提下，设置合适的采样间隔，可提高检测效率、减少声时测读误差，更重要的是通过波形观测，可识别因混凝土缺陷引起的波形变化范围，有利于辅助确定样本波形长度。

3 提高仪器发射电压或在接收端加装前置放大器，可保证在发、收换能器标称频率不变情况下，提高接收信号首波的识别度。

4 同一构件或被视为同批构件，在检测过程所用仪器设备和相关参数保持不变，以保证同条件测点数据具有可比性。

3.0.10 采用厚度振动式换能器，测点表面不平整或存在外观缺陷，将影响检测数据；若耦合剂中夹杂泥沙或空气，将导致声时延长、波幅降低，易引发异常值误判。钢管或钢板外表面锈层严重，若不去除，将使接收信号的波形、声时和幅度等声参量产生较大变化，影响判定结果。径向振动式换能器以水为耦合剂，耦合状态基本固定，不存在耦合不良问题。

3.0.11 2 采用径向振动式换能器检测，上下相邻测点间距要合适，间距过大易导致混凝土缺陷漏检；为使换能器始终位于声测孔或声测管中心，保持声参量测读一致性，在不影响换能器上下移动的情况下可在换能器外部套上橡皮圈定位。声测孔或声测

管间距过大，如大于 3.0m，不但降低混凝土缺陷的分辨率或检出率，还可能导致接收信号首波微弱难以识别带来声参量测读误差，增加漏判风险。但大体积混凝土声测孔间距也不能过小，否则将因钻孔工作量增加延误检测进度。

3.0.12 1 混凝土结合面或预制构件叠合面缺陷检测，测试龄期：混凝土不少于 14d，灌浆料不少于 7d。主要考虑到二次浇筑的混凝土、灌浆料或坐浆料早期收缩较大，测试龄期不足，有可能难以发现混凝土结合面或预制构件叠合面缺陷。

3.0.13 目前阵列超声法多用于装配式混凝土结构预制叠合梁、板和剪力墙后浇部位缺陷检测。对于预制叠合梁、板后浇部位缺陷检测：采用超声成像扫描仪，以预制梁、板上部后浇混凝土顶面为检测面，底面为反射面，沿构件某一边按同方向依次向对边扫测，直至扫完被测区域，并同时实现数据采集、缺陷成像分析处理。

阵列超声法是一种系统性的混凝土缺陷检测和判定方法，可直观显示后浇材料内部缺陷及叠合面缺陷的位置和大小范围，具有干耦合、检测方便、高效等特点，是目前较为先进的超声波检测方法。本次修订将阵列超声法纳入本规程，意在推动超声波检测技术向更高水平发展。具体检测方法和基本原理见现行协会标准《装配式混凝土结构检测标准》T/CECS 1189 的有关规定。

3.0.14 对于较为复杂结构构件混凝土缺陷检测，本规范未给出具体的检测和判定方法，但可参照本规程规定的一种或多种方法进行综合检测和判定。

3 对于体积较大、外形和内部构造复杂的竖向钢-混凝土组合结构构件，当构件内部预埋或钻取不少于 2 个声测管或声测孔时，混凝土缺陷检测需结合本规程规定的 3 种检测方法：钢筋或钢管混凝土构件缺陷检测、大体积混凝土缺陷检测及灌注桩混凝土缺陷检测。检测时，参照以上 3 种方法的有关规定合理布置测点进行交叉检测，最终按每种方法对同条件测点数据是否异常进

行综合分析判定。

3.0.15、3.0.16 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处理及采取何种方法处理，非常关注。

基于此，本次修订提出了几种类型混凝土缺陷的处理建议，以供有关单位参考。但无论采取哪一种缺陷处理方法，最终处理方案要征得设计、监理、业主等有关方的同意。

4 超声波检测设备

4.1 超 声 仪

4.1.1 近 20 年来,我国已研制出技术性能优越、功能强大的数字式超声仪。为了满足超声仪技术发展和实际工程混凝土缺陷检测需要,本规程不再使用模拟式超声波检测仪,而直接使用数字式超声仪。

数字式超声仪是将接收到的脉冲模拟信号经高速 A/D 转换为离散数字量,并直接输入仪器处理中心,通过相关软件分析处理、自动测读并显示声时、波幅及主频值。它具有对数字信号采集、处理和存储等功能,在一般低信噪比条件下仍能准确测读首波声时。

为确保仪器检测数据的稳定性和可靠性,数字式超声仪需做质量检定;在投入使用前,仪器技术指标需达到现行行业标准《混凝土超声波检测仪》JG/T 5004 规定的质量要求。

4.1.2 目前我国市场上绝大部分数字式超声仪技术性能显著,本次修订对仪器的主要技术性能指标要求较原规程均有所提高。

3 本次修订仪器厂家已提供可调用的波形数据文件,该文件可用于计算波形不相似系数以判定混凝土缺陷,同时也为未来超声波检测技术的发展提供了数据平台。波形最大采样长度不应小于 2k,2k 系指采样点数,1k=1024 点。

4 采样间隔为接收波形的声时坐标轴上两个相邻采样点声时的差值,检测前需事先设置。

7 换能器标称频率为 20kHz~500kHz。对于数字式超声仪接收放大器在 10kHz~500kHz 的频响范围可满足电气性能要求。

4.2 换 能 器

4.2.2 若换能器的实测频率与标称频率差异过大，可能导致信号鉴别和数据对比混乱。

4.3 使 用 要 求

4.3.1~4.3.4 仪器检定、校准、校验和保养是检测数据可靠性的重要保障，日常必要校验可及时发现仪器是否处于正常工作状态。

5 声学参数测量与计算

5.1 声学参数测量

5.1.1 2 声时测读一般随接收信号首波幅度不同将存在一定误差。当测距较大时可以忽略误差；对于小尺寸构件或需对仪器声时系统校验时，为减小声时测读误差，除采样间隔设置满足测量误差要求外，可将首波幅度调至某一固定高度测读声时。

波幅可反映超声波通过混凝土的能量衰减大小。当超声波通过混凝土不密实区和空洞等缺陷时，界面将产生复杂的折射、反射和波形转化现象，导致声能衰减、接收信号首波幅度降低，波形和其他声参量也随之变化。

5.1.2 1 自动模式下主频测量：一般通过仪器自带或配套用户端软件，对预设采样长度的时域波形经频谱分析计算得到。若频谱分析时窗长度不同，计算结果将存在差异。在波形采集过程中，若接收信号波形幅度超屏，也将影响主频计算结果的准确性。

2 手动模式下主频测量：基于接收信号首波的一个完整周期的测量，计算取其倒数。该方法假定超声脉冲波为周期不变的连续波，并未考虑波形实际变化，故存在一定的局限性。

5.1.3 波形数据采集过程中，当样本波形在长度范围幅度出现了超屏，所采集的波形数据将失真，波形不相似系数计算误差增大，影响判定结果。

2 二次采样时，调节仪器增益使样本波形幅度不超屏时停止采样，然后切换为手动模式。使声时游标测读与首次声时数据相等时再保存，可确保调用波形数据文件时，各测点波形数据均从首波起跳点开始。

5.2 声学参数计算

5.2.1 混凝土声速是根据式(5.2.1)计算得到的数值,常用于评估混凝土质量;对于同一构件,当测试距离相等时,采用声速或声时判定混凝土缺陷,其结果是一致的。

5.2.2 计算某测点波形不相似系数,首先根据样本波形长度及采样间隔计算波形数据总数,然后再计算基准点与第 i 点波形数据的平均值和标准差。需要强调:基准点波形与第 i 点波形均属同条件的样本波形,且在计算时各测点波形长度须保持相同。

5.2.3 某测点波形不相似系数是相对于同条件基准点波形的差异,并通过标准化欧氏距离公式计算的无量纲数值 D_i , $D_i \geq 0$ 。某测点波形不相似系数越小,即表明测点波形变化越小,该测点就越接近正常混凝土;反之亦然。第 i 点波形不相似系数可采用Excel等软件计算。

6 数据处理和异常值判定

6.1 一般规定

6.1.1 本章适用于检测数据的处理和异常值判定。对比法异常值判定简称对比法，概率法异常值判定简称概率法，本次修订将对比法和概率法合并为一章，以避免不同章节判定方法的重复。

6.1.2 超声波在构件中传播时，接收信号的声参量会受到不同介质、测试条件等因素的影响。异常值判定时，将同条件测点数据作为基本判定单元，可提高判定结果的准确性，减少误判或漏判现象。

6.1.3 1、2 基于实际混凝土缺陷类型和形态比较复杂，单一判定参数有各自的优缺点或局限性，采用多参数综合判定异常值可在一定程度弥补单参数带来的不足。

(1) 波幅是混凝土缺陷较为敏感的判定参数，但采用厚度振动式换能器时，受构件表面等耦合因素影响，波幅值时高时低出现波动，影响判定结果。

(2) 声时、声速测量准确性较高。超声波遇混凝土缺陷声时有变化，但有时对于空洞、蜂窝状混凝土缺陷或小缺陷，敏感变化并不明显。

(3) 主频的敏感性不确定。当超声波遇到混凝土疏松区或低强度区时，因吸收及散射现象导致高频成分产生较大衰减（相当于滤波），接收信号主频显著降低，其他声参量也有较大变化；当超声波遇内部空洞、蜂窝状缺陷时，接收信号的波形、声时和波幅均有较大变化，主频的敏感变化并不明显。此外，根据本规程第 5.1.2 条文说明，主频测量有时存在一定误差。基于此，主频通常作为辅助判定参数，若检测方法和分析条件满足时，也可

作为主要判定参数。

(4) 波形不相似系数适合于各类构件内部缺陷的检测和判定。采用厚度振动式换能器可在一定程度抵消因构件表面耦合不良产生的波幅测量误差。根据本规程式 (5.2.3), 只要耦合时波形不产生明显变化, 耦合问题引起的幅度高低并不影响波形不相似系数大小。

3 波形不相似系数判定混凝土缺陷, 以超声波遇混凝土缺陷可能产生的波形变化为依据。混凝土内部有缺陷波形必然产生变化, 但波形变化并不一定由混凝土缺陷引起。如超声波受构件边缘影响、钢-混凝土组合结构中不同部位钢管、型钢和钢板等不同介质界面影响都会使波形产生变化。对此, 可采用同条件测点波形不相似系数判定异常值。若波形长度选取不合理, 将混入缺陷变化以外的数据信息, 使波形不相似系数的代表性变差, 影响判定结果。根据试验结果和相关声学理论, 在一般情况下, 内部混凝土缺陷引起的接收信号波形变化从首波起跳点起至少 1 个完整周期的波形。

6.1.4 基于实际混凝土缺陷的复杂性及各声参量的敏感变化程度不同, 超声波检测和判定混凝土缺陷尚存在一定程度的不确定性, 除了复检再判定外, 采用局部破损法验证很有必要。

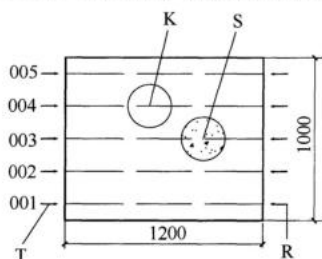
6.2 对比法异常值判定

6.2.2 任一检测项目的检验结果是否满足要求, 都要结合检测人员的经验分析和判断, 混凝土缺陷检测与判定也如此。采用对比法判定时, 可将检测人员经验判定与统计学系统聚类法分类对比判定相结合; 当测点数据不小于 20 时, 也可与本规程概率法联用实现综合分析判定。统计学系统聚类法是一种基于数据聚类的计算分析方法, 离差平方和法是系统聚类法的一种。根据相关资料和近 20 年来工程检测和模拟试验验证, 采用离差平方和法将某参数同条件测点数据分成两类或两组后, 通过分类对比可有

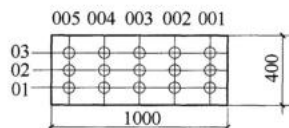
效判定测点数据是否异常。该种系统聚类法原理是通过聚类使同类中数据的离差平方和最小，不同类间数据的离差平方和最大。目前系统聚类法已有专用程序或软件实现计算分析，但当某测点与对比点数据差异较小时，采用系统聚类法分类对比判定易导致异常值误判，现通过下列算例采用对比法判定异常值做系统介绍：

算例：同条件测点波形不相似系数对比法异常值判定

(1) 在地面上浇筑一块长 1200mm、宽 1000mm、厚 400mm 的 C30 普通混凝土底板。按图 1 所示，在接近构件中部分别模拟两个圆柱状混凝土不密实区及空洞缺陷，两缺陷直径均为 200mm，高度均为 300mm。沿测距 1200mm 方向的两个相互平行的检测面上布置 5 列×3 行测点，共 15 个测点。行间距与列间距分别为 100mm 和 200mm，测点距构件边缘最小距离为



(a) 平面图



(b) 左侧面图

T—发射换能器；R—接收换能器；K—空洞；S—不密实区；

001、002、003、004、005—列编号或主序号；

01、02、03—行编号或副序号

图 1 算例被测构件混凝土缺陷对测示意图

100mm。测点详细信息见表 1。

表 1 算例被测构件 15 个测点相关信息

测点号	测距 (mm)	测点连线通过混凝土情况
001-01	1200	正常混凝土
001-02	1200	正常混凝土
001-03	1200	正常混凝土
002-01	1200	正常混凝土
002-02	1200	正常混凝土
002-03	1200	正常混凝土
003-01	1200	疏松混凝土
003-02	1200	疏松混凝土
003-03	1200	疏松混凝土
004-01	1200	空洞
004-02	1200	空洞
004-03	1200	空洞
005-01	1200	正常混凝土
005-02	1200	正常混凝土
005-03	1200	正常混凝土

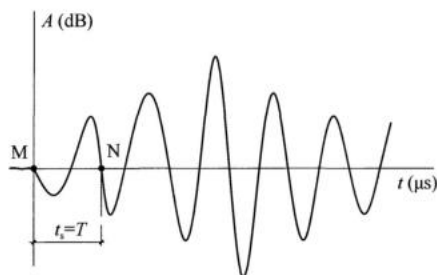
(2) 采用北京某公司生产的数字式超声仪,按本规程对测法进行检测。仪器发射电压为 500V,采样长度为 512 点,采样间隔为 $0.4\mu\text{s}$,厚度振动式换能器标称频率为 50kHz。混凝土测试龄期约 40d。

(3) 波形数据文件调用:检测结束后,将仪器保存的波形数据文件导入 Excel 软件,构件 15 个测点、每测点 512 个波形数据按列或行的方式呈现在表格中 37,供检测人员编辑或执行相关计算。

(4) 波形不相似系数按下列步骤计算:

① 样本波形长度确定:按图 2 所示计算样本波形长度 t_s 。一

般根据波形变化由正常混凝土部位测点波形确定。本算例取第 001-01 测点波形的 1 个周期 T 长度作为各测点波形计算长度， $t_s = t_N - t_M = T$ ，采样间隔 Δt 取 $0.40\mu\text{s}$ 。



M—首波起跳点，即样本波形长度的起点，M点声时为 t_M ；

N—样本波形长度的末端，N点声时为 t_N

图 2 算例接收信号时域波形示意图

② 各测点样本波形数据总数计算：总数按 $N = t_s / \Delta t$ 公式计算， $N = (292.0 - 272.8) / 0.40 \approx 49$ 个。经对各测点波形数据整理，用以计算波形不相似系数的 15 个测点、每测点 49 个波形数据汇总结果见表 2 所示。

表 2 算例被测构件 15 个测点波形数据

测点号	波形数据
001-01	-4,-5,-7,-10,-13,-15,-17,-19,-20,-21,-22,-22,-21,-20,-18,-16,-14,-12,-10,-8,-5,-2,2,7,11,15,20,26,32,39,46,51,54,56,56,55,52,48,43,37,31,26,21,17,14,11,7,3,-3
001-02	-5,-7,-10,-13,-15,-16,-18,-20,-21,-22,-22,-21,-20,-18,-16,-14,-12,-10,-9,-6,-3,1,6,11,15,20,26,33,39,45,50,54,56,56,55,52,49,44,38,32,27,22,18,15,11,7,3,-3,-10

续表 2

测点号	波形数据
001-03	-4,-5,-6,-8,-10,-11,-12,-13,-15,-16,-16,-16, -16,-15,-13,-12,-11,-9,-8,-7,-5,-2,1,4,7,10,13, 17,22,26,30,34,36,37,37,36,35,32,28,24,20,17,14,11,8,6,4,1, -3
002-01	-4,-5,-6,-7,-8,-9,-10,-12,-14,-15,-16,-17, -18,-19,-20,-21,-21,-21,-19,-17,-14,-11,-7,-3, 2,6,11,15,19,23,27,32,36,40,43,46,47,47,47,47,46,44,41,38, 34,30,25,20,14
002-02	-4,-5,-6,-7,-8,-9,-10,-11,-13,-15,-16,-17, -18,-19,-20,-21,-21,-20,-19,-17,-15,-12,-8,-3, 2,6,10,14,18,23,27,31,35,39,43,45,47,47,47,46,45,44,42,39, 35,31,26,21,15
002-03	-4,-5,-6,-7,-8,-9,-10,-12,-13,-15,-16,-18, -20,-21,-21,-21,-21,-20,-18,-16,-13,-9,-4,0,4,8, 12,16,20,25,29,33,37,41,44,46,47,48,48,47,45,42,38,34,29, 24,19,14,8
003-01	-9,-8,-6,-5,-7,-8,-9,-12,-12,-10,-9,-9,-12, -16,-16,-16,-16,-15,-17,-20,-20,-21,-23,-25, -26,-26,-26,-28,-30,-30,-29,-27,-24,-22,-18, -16,-15,-10,-5,-1,4,7,11,16,21,29,35,38,41
003-02	-5,-6,-7,-9,-11,-10,-9,-7,-6,-6,-5,-6,-12, -18,-18,-15,-15,-16,-16,-18,-23,-25,-23,-23, -26,-27,-24,-22,-25,-27,-25,-21,-19,-16,-11,-9, -9,-6,2,9,13,15,20,25,30,34,40,44,48
003-03	-10,-10,-8,-5,-4,-7,-11,-14,-14,-13,-13,-15, -17,-18,-20,-22,-23,-24,-26,-26,-24,-22,-22, -23,-22,-18,-14,-12,-8,-4,-2,1,6,10,14,19,27,34,37, 38,42,47,53,59,65,68,66,65,66

续表 2

测点号	波形数据
004-01	-6,-7,-7,-8,-9,-11,-13,-15,-17,-18,-19,-20, -22,-24,-25,-25,-25,-26,-26,-25,-24,-23,-22, -20,-17,-13,-9,-4,1,7,13,19,25,31,36,41,46,50,54,56, 57,59,61,61,60,59,58,57,54
004-02	-6,-7,-9,-11,-13,-15,-18,-20,-21,-23,-26,-29, -30,-31,-32,-33,-34,-34,-34,-33,-31,-28,-25, -21,-16,-11,-5,1,7,14,22,30,36,41,46,51,56,61,64,67,70, 73,75,76,76,75,73,71,68
004-03	-5,-7,-9,-11,-13,-15,-18,-20,-21,-23,-25,-27, -29,-31,-32,-32,-33,-34,-33,-32,-31,-29,-25, -21,-16,-11,-5,2,9,15,22,29,35,41,46,51,56,60,64,68,70, 72,74,75,76,75,73,70,65
005-01	-3,-4,-5,-6,-7,-8,-10,-11,-13,-15,-16,-18, -20,-21,-22,-23,-23,-23,-22,-20,-17,-13,-9,-5, 1,6,10,15,19,23,28,33,38,42,46,50,52,53,54,54,53,51,48,44, 39,34,28,22,16
005-02	-4,-5,-6,-7,-8,-10,-11,-13,-15,-16,-18,-19, -21,-23,-24,-24,-23,-22,-20,-17,-13,-8,-4,0,5, 10,14,18,23,28,33,38,43,47,50,52,53,54,54,53,51,48,44,39, 34,28,22,16,10
005-03	-4,-5,-6,-7,-8,-9,-10,-11,-12,-13,-14,-16, -17,-17,-17,-17,-16,-15,-13,-11,-8,-4,0,3,6,9,11, 14,18,22,25,28,31,33,35,36,36,36,35,34,32,29,26,22,18,14, 10,6,1

表注：表中波形数据必须是同一台仪器，若仪器不同波形数据也不同。

③ 各测点波形不相似系数计算：采用 Excel 等软件。以正

常混凝土部位第 001-01 测点波形为基准点波形，各测点波形数据均相对于基准点波形数据，按本规程式（5.3.2）可计算出波形不相似系数，计算结果见表 3 所示。

表 3 算例被测构件 15 个测点波形不相似系数等声参量

测点号	波形不相似系数	声时 (μs)	幅度 (dB)	测点连线通过 混凝土情况
001-01	0.0000 (基准点)	272.8	64.4	正常混凝土
001-02	0.9326	273.2	64.4	正常混凝土
001-03	0.1699	272.8	64.5	正常混凝土
002-01	3.1400	269.2	60.0	正常混凝土
002-02	3.2589	269.2	60.0	正常混凝土
002-03	2.6656	272.0	60.0	正常混凝土
003-01	10.3890	271.2	36.3	疏松混凝土
003-02	9.7948	271.6	43.1	疏松混凝土
003-03	7.4036	274.0	35.0	疏松混凝土
004-01	5.7862	272.0	45.0	空洞
004-02	5.5322	272.8	46.4	空洞
004-03	5.5116	272.8	46.4	空洞
005-01	3.4561	270.8	59.9	正常混凝土
005-02	2.6756	271.2	60.2	正常混凝土
005-03	1.8977	271.2	60.1	正常混凝土

(5) 采用对比法判定测点数据异常值：

被测构件同条件下含 9 个对比点，测点总数为 15 个，小于 20 个。按本规程第 6.1 节有关规定，采用对比法判定。在此采用系统聚类法分类对比判定：通过系统聚类法将同条件 15 个测点数据分成两类，若某测点与对比点数据不属于一类，则判定测点数据为异常值。对比法异常值判定结果见表 4 所示。

表 4 算例被构件 15 个测点数据异常值判定结果

测点号	波形不相似系数判定结果			测点连线通过 混凝土情况
	聚类结果	数据	判定	
001-01	1 类	0.0000	正常	正常混凝土
001-02	1 类	0.9326	正常	正常混凝土
001-03	1 类	0.1699	正常	正常混凝土
002-01	1 类	3.1400	正常	正常混凝土
002-02	1 类	3.2589	正常	正常混凝土
002-03	1 类	2.6656	正常	正常混凝土
003-01	2 类	10.3890	异常	不密实混凝土
003-02	2 类	9.7948	异常	不密实混凝土
003-03	2 类	7.4036	异常	不密实混凝土
004-01	2 类	5.7862	异常	空洞
004-02	2 类	5.5322	异常	空洞
004-03	2 类	5.5116	异常	空洞
005-01	1 类	3.4561	正常	正常混凝土
005-02	1 类	2.6756	正常	正常混凝土
005-03	1 类	1.8977	正常	正常混凝土

由表 4 可知：经采用系统聚类法分类对比判定，同条件测点波形不相似系数异常值判定结果与本算例模拟缺陷相符合。

6.3 概率法异常值判定

6.3.1 采用概率法异常值判定时，测点数需足够多，且对比点数不少于总测点数的 $1/2$ 。此条件下计算的平均值及标准差才具有更好的代表性，可避免或减少异常值漏判现象。

6.3.2、6.3.3 原规程概率法异常值判定基于总体标准差已知且测点数据符合正态分布。根据现行国家标准《统计分布数值表正态分布》GB 4086.1，样本数量 $n=20\sim 160$ 时，异常值判定系

数为 1.65~2.50, 对应异常值概率为 1.0%~5.0%; 测点数 $n=30$, 异常值概率为 3.3%, 异常值判定系数为 1.82。

现行国家标准《数据的统计处理和解释正态样本离群值的判断和处理》GB/T 4883 提供了以下两种异常值或离群值判定方法: 一种为如奈尔临界值法: 假定总体标准差已知且样本数据符合正态分布, 当异常值检出水平为 5% 时临界值判定系数 $R_{0.95}=2.881$, $n=30$; 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: 假定总体标准差未知且样本数据符合 t 分布, 当异常值检出水平为 5% 时临界值的判定系数 $R_{0.95}=2.745$, $n=30$ 。

综上所述, 无论总体标准差是否已知, 当样本数 $n=30$, 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 20 余年大量工程检测和模拟试验验证, 原规程及现行国家标准推荐的异常值判定系数在混凝土缺陷判定中, 仍存在较高的漏判现象。本规程概率法异常值判定系数确定依据和方法如下:

(1) 根据概率统计学原理, 同一构件混凝土缺陷检测中, 若检测人员、检测次数或仪器设备系统不同, 检测数据将存在随机偏差, 即表明来自于同一总体测点数据及其平均值和标准差为随机变量。检测前, 被测构件总体参数真值 μ 和标准差 σ 均未知, 测点数据符合 t 分布; 平均值 $\bar{X}$ 和标准差 S 分别符合 t 分布和 χ^2 分布。设某判定参数 X 的分位数为 x_p , p 为分布概率, 则 x_p 符合非中心 t 分布。

(2) 基于测点数据的分布特性及 20 年来大量实测工程经验总结, 某参数异常值的判定系数 k_m 、判定值或临界值 X_0 可按下列方法确定:

① 对于波幅、声速和主频等参数: 测点数据异常值概率 p 设为 3%, 分位数 $x_{0.03}$ 的置信水平 $1-\alpha=90\%$, 显著水平 $\alpha=10\%$ 。根据国家标准《正态分布分位数与变异系数的置信限》GB/T

10094-2009 附录 A 查取双侧置信区间上、下限系数 $k_{0.05}$ 、 $k_{0.95}$ ，异常值判定系数 k_m 取上限系数 $k_{0.05}$ 。异常值判定值 X_0 ： $X_0 = \bar{X} - k_m S$ ，当某参数测点数据不大于 X_0 ，可判定测点数据为异常，反之亦然。

② 对于声时和波形不相似系数等参数：测点数据异常值概率 p 设为 3%，分位数 $x_{1-0.03}$ 置信水平 $1-\alpha=90\%$ 。显著水平 $\alpha=10\%$ 。根据国家标准《正态分布分位数与变异系数的置信限》GB/T 10094-2009 附录 A 同样查取双侧置信区间上、下限系数 $k_{0.95}$ 、 $k_{0.05}$ 。异常值判定系数 k_m 取下限系数 $k_{0.05}$ 。异常值判定值 X_0 ： $X_0 = \bar{X} + k_m S$ 。当某参数测点数据不小于 X_0 ，可判定测点数据为异常值，反之亦然。

6.3.4 本次修订的异常值判定方法参照了罗曼诺夫斯基准则。即对异常值初次判定前，当发现个别测点数据明显偏大或偏小时，若将这些数据纳入统计量计算，则计算结果将偏离总体，易导致测点异常值漏判。在初次异常值判定前，首先将明显偏小或偏大的测点数据假定为异常，剔除后利用剩余测点数据计算统计量，并确定初次异常值判定值。在初次异常值判定时，对含初次假定为异常值在内的所有测点数据逐一判定，再次确认被假定为异常的测点数据是否真正为异常，这样可减少异常值漏判。随后，再按本规程第 6.3.4 条的第 4 款或第 5 款的后续步骤进行判定，直至判不出异常值为止。

7 普通混凝土构件缺陷检测

7.1 内部不密实区和空洞检测

7.1.1 混凝土不密实区系指因振捣不够、漏浆或石子受构件内部钢筋架空等造成的蜂窝状混凝土区域，或因水泥缺少、意外损伤形成的疏松状混凝土区域。新拌混凝土因水胶比过大、水泥用量不足导致的混凝土低强度区，也可归到混凝土不密实区。

2 内部不密实区和空洞检测要有足够的测点，保证测点数据的统计量具有代表性。一般被怀疑的缺陷部位由施工方、建设方等单位提供，或构件外部已暴露混凝土外观质量缺陷，或结构使用过程中出现局部质量缺陷。测区范围应大于被怀疑的缺陷区域，避免混凝土缺陷漏检。

3 对框架梁柱节点等钢筋密集部位内部混凝土缺陷检测，测点受边缘条件、内部钢筋密集部位的影响，接收信号波形往往比较复杂。划分同条件测点可减少特殊部位混凝土缺陷误判或漏判现象。

7.1.2 根据被测结构构件具有的检测面数量及位置选取相应的检测方法，如对测法、斜测法或角测法等。发现某些测点数据可疑时除了复测、加密测点补测外，多角度检测对于提高检测数据可靠性、确定混凝土缺陷位置和范围至关重要。

7.1.3 实际构件内部混凝土缺陷具有多样性或复杂性，有时按本规程概率法判定并非十分有效，将概率法和对比法相结合，更有利于异常值的综合分析判定。

7.2 单面平测法裂缝深度检测

7.2.1 1~3 单面平测法检测混凝土裂缝深度将受裂缝深度估

计值、测试距离、填充物等因素影响。在单面平测法检测裂缝深度时，由于两换能器在同一检测面，辐射面并未对正且超声波沿辐射方向扩散衰减较大，当平测距离大于 1000mm 或裂缝深度估计值大于 500mm 时，接收信号的首波微弱难以识别，易将后续波误为首波，导致声时测读失真，影响裂缝计算结果。被测裂缝内部积水或被泥浆等其他材料填充时，跨缝检测时部分超声波将通过裂缝中的填充物直达接收换能器，导致接收信号的首波声时测读失真。裂缝深度估计值可根据现场初步调查结果确定。

此外，跨缝与不跨缝测点数均不少于 5 点，是为了利用不跨缝测点的平测距离和声时求得相关性更好的回归直线方程，得到更接近实际的平测距离（即测距估计值）。测距以测点连线两换能器辐射面内边缘为准，可消除超声波传播路径的误差。

4 在布置测点时，采用其他辅助检测手段或调查结果确定钢筋位置和方向，以使测点连线远离内部钢筋或与钢筋中心线保持一定夹角，如 45° 角，可避免钢筋对声时测读的影响；如果测点连线与钢筋方向平行且距离较近时，将有可能使部分超声波通过一段钢筋后到达接收换能器，导致声时测读失真。

5 选择裂缝最宽部位检测，能更好地反映裂缝最大深度；选在 $1/2$ 缝长部位可避免跨缝检测时超声波通过裂缝长度末端，导致声时测读失真。

7.2.2 4 本次对平测法裂缝深度的计算公式做了修订，本规程式（7.2.2-2）是根据直角三角形勾股定理计算。边长取跨缝、不跨缝平测距离估计值的 $1/2$ ，是因为平测距离估计值更接近超声波实际传播距离。

7.2.3 1 裂缝深度检测值确定：当跨缝检测未发现首波反相时，测距过小或过大将带来较大的声时测量误差，按本款规定予以剔除。在实际工程检测中，由于裂缝内部可能存在短接或错位现象。在跨缝检测时较小的测距反映短接或错位处裂缝深度，较大测距反映较深裂缝深度。根据本规程第 6.2.2 条的规定，若剔

除后剩余裂缝计算深度可分成较大值、较小值两组，取较大一组数据的平均值作为裂缝深度检测值，可反映裂缝的真实深度。

2 跨缝检测当发现首波反相时，接收信号的波形将产生反转，相位差为 180 度，首波由原来波谷变为波峰。经模拟试验和大量工程实试验证，首波反相测点的平测距离为被测裂缝深度的 1~2 倍。接收信号首波反相时的声时不易测读，或测读误差较大，本次修订采用首波反相点前、后 2 个相邻测点声时、测距计算裂缝深度，取平均值后再进一步确定裂缝深度检测值。

7.3 双面斜测法裂缝深度检测

7.3.1 1 双面斜测法检测混凝土裂缝深度将受裂缝内部填充物的影响。若被测裂缝内部积水或被泥浆等其他材料填充，过缝检测时，部分超声波将通过裂缝中的填充物直达接收换能器，导致接收信号的声参量与不过缝的声参量差异不大，对裂缝深度判定带来一定难度。

2 实际工程检测中常遇到普通混凝土构件竖向或斜向裂缝。采用双面斜测法检测混凝土裂缝深度的原理如下：当超声波斜穿裂缝时，由于裂缝破坏了混凝土的连续性，导致大部分超声波在界面产生反射，使声能衰减，接收信号变弱、波幅值明显降低，声时有所变大。这与同条件正常混凝土相比声参量存在较大差异。

7.3.2 1、2 双面斜测法在布置测点时，布置一条测点连线与假定裂缝深度的 $1/2$ 位置相交，以便更准确反映裂缝深度是否超过构件断面尺寸的 $1/2$ 。

7.3.3 双面斜测时，过缝与不过缝声参量差异明显。按本规程对比法可有效判定异常值，并确定混凝土裂缝深度检测值或沿构件断面的贯穿范围。

7.4 结合面缺陷检测

7.4.1 混凝土结合面缺陷检测结果，与结合面粘结强度无定量关系。

7.4.2、7.4.3 不穿过结合面的测点连线不少于 2 条，且分别布置在结合面两侧，是因为在实测工程中常发现结合面两侧混凝土质量存在较大差异。结合面缺陷判定时，以某一侧混凝土质量较差的测点数据作为对比可避免误判；结合面某一侧混凝土质量较差，可采用钻芯等方法检测混凝土抗压强度。

7.5 表面损伤层检测

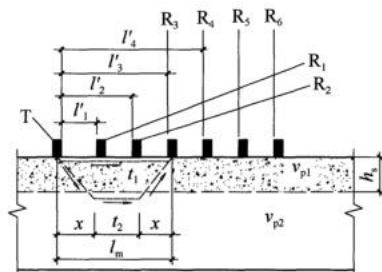
7.5.1 1 混凝土表面损伤层检测受表面混凝土湿度影响。由于水的声速约为空气声速的 4 倍，若表面损伤层潮湿，将使实测损伤层混凝土声速偏高，与未损伤混凝土声速差异变小，影响损伤层厚度计算结果。此外，损伤层厚度估计值可根据现场初步调查结果确定。

7.5.2 求得损伤层混凝土测距和声时回归直线方程，有利于计算较小的损伤层厚度。为此，发射换能器置于某一位置保持不动，接收换能器每次移动距离要小，如以换能器内边缘间距 30mm 或其整数倍逐点移动，并测读首波声时。

7.5.3 由于表面损伤层测试数据存在不确定性，需要通过计算相邻测点平测声速估算值以判定检测数据是否有效。按本规程第 6.2.2 条的有关规定，若相邻测点声速估算值可分成较小、较大两组，且每组测点数不少于 3 个时，可判定检测数据有效。由此表明，较小一组测点数据代表超声波通过损伤层，较大一组测点数据代表超声波通过未损伤混凝土。

7.5.4 损伤层检测数据有效时，方可求出损伤层与未损伤混凝土回归直线方程，从而得到两个回归直线方程的回归系数、常数及交点，进一步计算损伤层厚度。混凝土表面损伤层厚度计算公

式可按图 3 所示的超声波传播路径, 可采用数学方法进行推导, 具体步骤如下:



T—发射换能器; R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 、 R_5 、 R_6 —接收换能器不同位置

图 3 损伤层厚度推算原理示意图

当发、收换能器距离较近时, 超声波沿直线通过损伤层到达接收换能器; 随着发、收换能器间距增大, 部分超声波传播路径变为: 发射换能器、损伤层、内部未损伤混凝土、损伤层、接收换能器。当发、收换能器移动间距增大到一定距离时, 通过损伤层且经过内部未损伤混凝土的超声波较直线通过损伤层的超声波早先或同时到达接收换能器。设通过损伤层且经过内部混凝土传播声时为 t_2 , 直线通过损伤层的传播声时为 t_1 , 且 $t_2 \leq t_1$ 。

超声波沿 2 条传播路径的声时分别按下列公式计算:

$$t_1 = l_m / v_{p1} \quad (1)$$

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

按以上 2 条路径同时达到接收换能器时, $t_2 = t_1$, 并得到下式:

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

t_2 为最短, 即求 t_2 的最小值, 求 $t_2(x)$ 的一阶导数, 并使 $t_2'(x) = 0$, 见下式:

$$t_2'(x) = \frac{2x}{v_{p1} \sqrt{h_s^2 + x^2}} - \frac{2}{v_{p2}} = 0, \text{ 经整理 } x = \frac{v_{p1} h_s}{\sqrt{v_{p2}^2 + v_{p1}^2}} \quad (4)$$

求 $t_2(x)$ 二阶导数, 见下式:

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

根据函数极值定理, t_2 在 $x = x_0 = \frac{v_{p1} h_s}{\sqrt{v_{p2}^2 + v_{p1}^2}}$ 取得极小值,

即 t_2 为最短; 把 $x = x_0$ 代入 (3) 式得到下式:

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

经对上式整理可得到表面损伤层厚度计算下式, 见下式:

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

8 大体积混凝土缺陷检测

8.1 一般规定

8.1.1 大体积混凝土的孔-孔法和孔-面法，系根据被怀疑缺陷部位与某一外立面的距离远近、可测面数量确定。

8.1.2 1 大体积混凝土声测孔分为斜孔和竖向孔：当顶面为水平面时为竖向孔；对于如水利大坝等结构，外立面倾斜，声测孔为斜孔。为保证斜向声测孔在满水情况下检测，需要在斜孔下部设置挡水围堰或采取其他措施。此外，各声测孔中心线应保持平行，以保证发、收换能器间距一致，避免测距偏差过大，影响测点数据一致性。

2 声测孔中存在粉末碎屑时，充水后易形成悬浮物，导致超声波散射衰减、接收信号首波减弱，带来声参量测读误差。

8.2 内部不密实区和空洞检测

8.2.1、8.2.2 当大体积混凝土被怀疑的缺陷涉及范围较大时，为提高检测效率、减少钻孔工作量，在保证首波信号可识别的条件下，可将声测孔间距拉大，最大至 3000mm 进行粗测；当发现某些测点数据异常时，再加密声测孔或网格测点进行细测。

此外，由于大体积混凝土内部不密实区和空洞常与结合面缺陷并存，为提高缺陷的检出率，可优先采用沿高度方向的上下斜测法。

8.3 裂缝深度检测

8.3.1 大体积混凝土顶面或斜立面裂缝深度估计值小于 500mm 时，可采用本规程第 7.2 节的单面平测法检测；若采用本节规定

的方法检测，将因径向振动式换能器自身长度的限制，将导致测点数据不足，难以判定混凝土裂缝真实深度。

8.3.2 孔-孔法是日前裂缝深度检测中应用较多的方法；孔-面法可参照孔-孔法检测。采用孔-孔法检测时，根据本规程第3.0.11条文说明，声测孔间距不宜过大，但也不宜过小，如小于1.0m，被测裂缝末端若有倾斜将可能超出测距范围，无法反映裂缝的真实深度。

8.3.4 利用裂缝深度-波幅曲线判定混凝土裂缝深度的原理如下：

一般混凝土裂缝宽度表面最宽，由表及里将逐渐变窄直至闭合。当跨缝检测时，裂缝上部宽度较大，超声波在界面反射较大、声能衰减也大，接收信号的首波幅度降低；随着换能器下移，裂缝深度加大，宽度变窄，界面反射减小、声能衰减减弱，首波幅值逐渐变大。当波幅至最大且随着换能器下移基本保持不变时，表明发、收换能器处于无裂缝的正常混凝土中。此时，将波幅首次达到最大对应的换能器深度作为裂缝实际深度，即裂缝深度检测值。

8.4 结合面缺陷检测

8.4.2、8.4.3 大体积混凝土结合面通常涉及范围较大，当抽取2个测试部位后发现结合面缺陷，必要时，可扩大范围继续检测，直至未发现混凝土结合面缺陷为止。

9 灌注桩混凝土缺陷检测

9.1 一般规定

9.1.2 根据近 10 年灌注桩混凝土缺陷检测经验和钢制声测管应用成果, PVC 声测管声学性能虽然不差, 但因水化热易导致与混凝土脱空, 使接收信号声参量产生异常, 影响缺陷判定; 此外, PVC 声测管和接头强度较低, 绑扎固定后易导致接头拔脱、堵塞或倾斜, 影响灌注桩缺陷检测。本次修订取消原规程 PVC 声测管, 直接采用钢制薄壁声测管。

目前钢制薄壁声测管已被广泛应用, 它具有声学性能良好、安装固定方便等优点。现行国家标准对钢制薄壁声测管的尺寸、质量和技术指标都有明确规定。

9.1.3 在实际工程检测中, 当灌注桩声测管发生堵塞且无法疏通时, 根据现行行业标准《建筑工程地质钻探技术标准》JGJ 87, 可采用工程地质钻补钻声测孔, 通过声测孔-声测孔或声测孔-声测管实施检测。由此将涉及两种声时初读数测量方式, 可按本规程附录 A 的有关规定执行。

9.2 检测方法

9.2.1 2 声测管埋设数量较多时, 可保证沿灌注桩横断面有足够多的检测剖面, 减少扫测盲区、避免缺陷漏检, 但需要确保接收信号首波可识别。本规程给出了 3 种声测管埋设方式, 可根据现场情况和要求合理选用, 但声测管数量只能多不能少。

3 目前常见的钢制薄壁声测管接头包括钳压式、螺旋式、套筒式和承插式等。在声测管分段连接时, 这些接头强度较高、连接紧密, 可保证声测管整体通直。

4 声测管上下口封闭,以防止施工过程中水泥浆或砂土等杂物灌入,导致堵塞。

5 声测管上端应高于桩顶,且同一根桩的声测管外露高度保持一致,以便控制换能器在声测管中上下移动位置。

6 采用绑扎或焊接固定方式将声测管固定在钢筋笼内侧,可确保钢筋笼安装就位或浇筑混凝土过程中声测管不变形、不移位。

7 声测管接头或固定部位在焊接时,若烧穿管体、接头或在其内壁形成焊瘤,将影响声测管的密封性和换能器移动的通畅性。

8 钢筋笼在安装过程若扭曲变形,将可能使声测管变形;在分段安装钢筋笼时声测管未对准、接头连接不牢靠,将影响声测管的密封性和通直性,或造成声测管堵塞,给检测带来不利。钢筋笼就位后、浇筑混凝土前,若声测管的密封性、通直性和底部深度不满足要求,应及时进行整改。

9.2.3 对灌注桩同一检测纵剖面,将发、收换能器沿一定高程、等距离向下或向上同步移动并逐点测试时,若某相邻测点数据存在明显差异且不属于混凝土内部缺陷所致,需要及时调整或核对换能器深度以确保同步,避免发生未知差错;若非上述原因,应对仪器进行校验,以检查仪器工作系统是否正常。

9.2.4 检测过程中对数据可疑部位进行复测,一方面能够检查检测人员操作是否有误,另一方面可确保测试数据可靠性;通过对测、斜测、扇形扫测或其他角度检测,有利于确定灌注桩桩身内部混凝土缺陷位置和范围。

9.3 数据处理和判定

9.3.1 本次修订将对比法和概率法相结合,有利于异常值综合分析判定。

9.3.2 根据实际工程检测经验并参考相关资料,对同一检测纵剖面绘制深度-声参量曲线,并根据曲线变化判定测点数据是否异常,是一种辅助性的对比法判定方法。

10 钢-混凝土组合结构缺陷检测

10.1 一般规定

10.1.1 2 对钢材和混凝土声速估算时,除了优先按本条规定的方法外,也可参照相关资料采用经验法估算。

3 由于钢管混凝土构件内外两种材料温度线膨胀系数不同,环境温度变化或内部水化热易使两者伸缩变形不一致,导致管壁与内部混凝土脱空。在正式检测前,采用敲击等方法初步判定管壁脱空部位和范围,并在布置测点时避开,以确保管内混凝土检测数据有效。若测点布置无法避开脱空部位,可采用注浆或采取其他处理措施预先处理。

为满足钢管混凝土内部缺陷检测条件,不受管壁脱空影响,在施工期间,混凝土拌合料中加膨胀剂、控制水化热,并在浇筑完混凝土构件外部采取保温防护措施,可在一定程度防止或减少钢管混凝土脱空现象。

10.1.2 在检测前核对内部钢筋截面形状、尺寸、具体位置和构造,据此布置测点,可有效避免或减少内部钢筋不同形态对接收信号波形和其他声参量造成的不利影响。

10.2 钢管混凝土构件缺陷检测

10.2.1 根据现行协会标准《实心与空心钢管混凝土结构技术规程》CECS 254 的有关规定,钢管混凝土构件分为空心 and 实心两种,本节适用于实心钢管混凝土构件缺陷检测。

基于钢管混凝土施工工艺和特点,管内混凝土不密实区等缺陷被外部钢管遮挡难以发现,检测时通常以单个钢管混凝土构件为基本检测对象。钢管或钢筋混凝土构件均属钢-混凝土组合结

构构件，其缺陷检测和判定方法无明显差异，并基于以下原理：

(1) 钢材声阻抗是混凝土 3 倍~4 倍，且声速大于混凝土，超声波通过钢管或钢骨混凝土构件时，将在两介质界面产生复杂的反射、折射及纵横波形转换现象。

(2) 根据大量工程检测和模拟试验，当超声波通过构件正常混凝土区域，若测点连线与钢管或钢骨某方向钢材平面或弧面间距不同，或与其相交的角度、部位、数量不同，接收信号的波形及其他声参量也随之不同。

(3) 超声波通过钢管或钢骨混凝土构件的正常部位或内部缺陷时，将可能沿钢材平面或弧面以多条路径或其他复杂路径传播，导致接收波形产生叠加，其他声参量也随之变化。

(4) 超声波因钢、混凝土两种介质不同或遇混凝土内部缺陷时，将产生不同程度的频散现象，导致接收信号的波形发生变化。

基于以上原理，钢管或钢骨混凝土构件缺陷检测不同于普通混凝土构件，在检测和判定时，需合理布置测点并以同条件测点为基本判定单元，尽量避免上述因素对接收波形和其他声参量的不利影响，或将这些因素影响降到最低，以确保检测和判定结果有效、可行。

10.2.2 根据模拟试验，本规程给出了两种类型钢管混凝土声时估算方法；对于外形规整的其他钢管混凝土构件可参照本条有关规定进行声时估算。

10.2.3 钢管混凝土缺陷斜测宜按本条规定的方法执行，不建议采用其他斜测法，主要基于本规程第 10.2.1 条文说明。

10.2.4 1 在采用对测法判定时，需满足混凝土声时估算值小于沿管壁传播的声时估算值，这样才能保证按本条文对管壁是否脱空作出有效判定。若混凝土声速较低，即声时估算值接近或大于管壁声时估算值，易导致管壁脱空误判；当被测构件混凝土声速确实较低，为避免管壁脱空误判，可采用波形不相似系数进行

判定。工程检测和模拟试验结果表明，脱空部位测点波形与未脱空部位存在较大差异。

某测点管壁脱空情形：发射换能器部位脱空、接收换能器部位脱空，或两换能器部位均脱空。当钢管混凝土未脱空时，才能确保按本条规定的参数和方法对内部混凝土缺陷进行判定。

2 采用斜测法判定时，以对测法判定结果为基础，是因为对测法测点布置受钢管介质影响最小，缺陷判定更直观、有效。

10.3 钢筋混凝土构件缺陷检测

10.3.1 根据现行行业标准《钢筋混凝土结构技术规程》YB 9082 的有关规定，钢筋混凝土构件可分为实腹式和虚腹式两类，截面形状包括工字形、十字形、L 形、圆形和矩形等。本节适用于实腹式钢筋混凝土构件缺陷检测，虚腹式钢筋混凝土构件缺陷检测可参照本节的有关规定执行。

钢筋混凝土构件缺陷检测如无特殊需要，通常不检测内部钢筋与混凝土脱空缺陷。因为内部钢筋被外部钢筋混凝土包裹，在正常环境或内部水化热作用下，两种材料的温差变形很难导致钢筋与混凝土脱空；但会因施工疏忽，或混凝土拌合料流动性较差或养护不良等因素，将导致混凝土内部不密实区、裂缝和结合面缺陷。

10.3.2 本条规定的检测方法主要基于本规程第 10.2.1 条文说明。根据工程检测和模拟试验进一步表明，对于矩形、工字形或十字形等非圆形钢筋，通常有两个相互垂直的钢板，若测点连线垂直于钢筋某一方向钢板平面时，则必然与钢筋另一个方向钢板平面平行。当测点连线与钢筋某方向钢板平面平行且距离较近时，首波声时将变小，波幅将变大；当与钢筋某方向钢板平面重合时，声时就更小，波幅就更大。对于测点连线与钢板平面重合的情形，在布置测点时尽可能避免。

10.3.3 对钢筋混凝土墙、柱、梁等构件可采用沿构件纵向斜测

法，通常不建议采用沿横断面方向斜测法，主要基于本规程第10.2.1条文说明。根据工程检测和模拟试验进一步表明，当超声波发、收换能器连线与内部型钢斜交且穿过内部钢板数量越多时，波形变化就越复杂，这对于采用波形不相似系数判定混凝土缺陷十分不利。

10.3.4 根据大量工程检测和模拟试验进一步表明，超声波遇到构件内部钢筋部位混凝土缺陷时，将绕过缺陷沿测试方向的内部某一钢材平面或弧面传播，波形产生明显变化，声时或减小，波幅或增大，产生了逆变化；当内部混凝土缺陷远离内部钢筋时，波形虽存在变化，但波幅、声时等声参量符合正常变化。

11 装配式混凝土结构连接缺陷检测

11.1 后浇部位缺陷检测

11.1.2 预制框架柱、剪力墙底部接缝属后浇部位，检测时需考虑底部接缝空间尺寸大小和内部不同填充材料对检测和判定结果的影响。预制剪力墙底部接缝未填充前为一段连通空隙，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、高度通常为 20mm~30mm。接缝内部包含灌浆料、竖向钢筋、线管和一定数量定位接缝高度的垫块；周边采用高强水泥砂浆封堵；后浇材料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。为提高接缝部位缺陷的分辨率，换能器标称频率要高，辐射面直径要小。对此本规程第 3.0.8 条做了相应规定。

基于底部接缝狭小且后浇材料内部缺陷将影响叠合面缺陷判定，故叠合面缺陷判定时，应以同一部位后浇材料无内部缺陷为前提。此外，在判定接缝部位后浇材料内部缺陷或上部叠合面缺陷时，尚需考虑内部预埋线管等不同介质对接收波形和其他声参量的影响。

11.1.3 预制双面叠合剪力墙剖面构造类似夹心结构，沿厚度方向剖开分为内层、中间层和外层：内、外层为预制叠合剪力墙两部分，通过桁架钢筋连接，中间层为空腔，厚度为 100mm，现场安装完后向空腔浇筑自密实混凝土成为实心剪力墙。

基于预制双面叠合剪力墙空腔、预制叠合梁、板后浇部位混凝土内部缺陷与叠合面缺陷作为一个整体检测，当测点数据为异常时，可通过钻芯取样对缺陷类型进行验证和区分。

11.2 套筒或浆锚孔道灌浆饱满度检测

11.2.1 目前检测钢筋连接部位套筒或浆锚孔道灌浆饱满度的方法较多,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法等,这些方法都有各自的优缺点。其中钻孔内窥法应用较多,检测结果直观、很少发生错判或漏判,属局部破损方法。国内也有不少检测人员尝试采用声时、波幅等参数判定套筒或浆锚孔道灌浆饱满度,但效果并不理想。本次修订采用较高频率、小直径厚度振动式换能器,根据接收信号波形的相对变化采用波形不相似系数,可有效判定套筒或浆锚孔道灌浆饱满度,或缺陷位置和长度。

1 在主体结构预留未灌浆、灌满浆两种状态的套筒或浆锚孔道,或制作与结构同条件的两种灌浆状态的模拟试件作为基准进行对比检测,可避免或减少超声波在传播路径上由于内部构造,或非缺陷介质等因素对接收信号波形的干扰,并为灌浆饱满度检测和判定提供可对比的基准参考。对于厚度大于300mm的竖向预制构件套筒或浆锚孔道灌浆饱满度检测可参照本节有关规定执行。

2 根据设计图纸和其他施工资料,并借助于钢筋位置扫描仪等检测手段,核对套筒或浆锚孔道具体位置,对于测点布置和灌浆饱满度判定十分关键。

11.2.2 1 预制剪力墙竖向钢筋连接套筒或浆锚孔道布置方式可分为双排、单排梅花形或对齐方式;套筒类型分为全灌浆套筒和半灌浆套筒。

2 规定套筒或浆锚孔道最上面测点靠近排浆口,是为了避免灌浆缺陷漏检。

3 根据大量模拟试验结果,无论采用对测法还是斜测法,需以单个套筒或浆锚孔道为基本检测单位,使发、收换能器测点连线处于同一水平面,且与套筒或浆锚孔道中心线垂直相交,保

证测试数据有效，不建议沿高度方向采用上下斜测法。

4 套筒或浆锚孔道测点数为奇数，以提高判定灌浆饱满度或缺陷所占比例的精度。

5 同一批次灌浆套筒或浆锚孔道：材质、规格尺寸相同，预制构件断面尺寸、混凝土强度等级相同，且测点布置、检测及判定方法等相同。

11.2.3 2 采用波形不相似系数判定单一套筒或浆锚孔道灌浆饱满度基于灌满浆、未灌浆两种状态的波形差异，现以套筒为例对灌浆饱满度检测及判定原理做如下介绍：

根据模拟试验结果，本次修订采用辐射端面直径 10mm、标称频率 500kHz 的厚度振动式换能器检测套筒灌浆饱满度。无论被测套筒测点部位是否灌浆，超声波通过套筒中心时将在筒壁产生绕射现象：若被测部位灌满浆，部分超声波将透过套筒和内部灌浆料沿直线传播（主要表现为透射）；若被测部位未灌浆，部分超声波将在筒内浆料的空隙界面产生反射和绕射现象。故灌满浆部位接收到的形主要为绕射波和透射波的叠加，未灌浆部位接收到的波形主要为二次绕射波形的叠加。经对波形对比分析，两种灌浆状态的测点波形存在一定差异，波形变化长度从首波起跳点起不少于 6 个周期的连续波形。

基于以上检测原理，通过计算被测套筒各测点对应于基准点波形差异，即波形不相似系数，作为判定套筒灌浆饱满度的主要参数；该原理也适用于浆锚孔道灌浆饱满度检测和判定。

采用波形不相似系数判定套筒或浆锚孔道灌浆饱满度，较声时、声速和波幅等常规参数更为有效。

附录 A 声时初读数测量

A.1 一般规定

A.1.1~A.1.3 考虑到两种类型的换能器可能同时使用，本次修订将原规程声时初读数的两种测量方法集中在一起，便于检测人员操作。声时初读数测量目的是为了消除零声时对被测对象声时的影响。

A.2 连接一对厚度振动式换能器零声时测量

A.2.1~A.2.3 当采用一对厚度振动式换能器时，通常在自动模式下直接完成零声时测量和设定；但需要直观验证仪器测读数据的稳定性和测量精度时，应同步采用标准棒对声时初读数的基准进行校验。

附录 B 仪器计时系统校验

B.1 声 时 测 量

B.1.1、B.1.2 鉴于实际测量时两换能器辐射面难以保证绝对平行，为降低校验过程测距误差，本次修订将第1测点测距（起始值）调整为100mm；各测点测距取两换能器辐射面正交方向测量距离的算术平均值。

B.2 空气声速的测量值和标准值计算

B.2.1、B.2.2 本规程规定了一种仪器声时系统计量的校验方法，供检测人员自校。在仪器计时系统正常的情况下，这种校验方法也可作为检测人员操作水平的考核依据。