



T/CECS 925—2021

中国工程建设标准化协会标准

冲击弹性波法检测混凝土缺陷 技 术 规 程

Technical specification for detection of concrete
defects based on impact elastic method

中国工程建设标准化协会标准

冲击弹性波法检测混凝土缺陷
技 术 规 程

Technical specification for detection of concrete
defects based on impact elastic method

T/CECS 925—2021

主编单位：中冶建筑研究总院有限公司

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：2 0 2 2 年 2 月 1 日

2021 北 京

中国工程建设标准化协会公告

第 952 号

关于发布《冲击弹性波法检测混凝土缺陷 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 年第二批工程建设协会标准制订、修订计划〉的通知》(建标协字〔2017〕031 号)的要求,由中冶建筑研究总院有限公司等单位编制的《冲击弹性波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 925—2021,自 2022 年 2 月 1 日起施行。

中国工程建设标准化协会
二〇二一年九月三十日

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2017 年第二批工程建设协会标准制订、修订计划〉的通知》(建标协字〔2017〕031 号)的要求,规程编制组经广泛调查研究,认真总结实践经验,参考有关国内外先进标准,并在广泛征求意见的基础上,制定本规程。

本规程共分 5 章和 1 个附录,主要技术内容包括:总则、术语和符号、基本规定、检测及结果判定、检测报告等。

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,由中冶建筑研究总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,请寄送解释单位(地址:北京市海淀区西土城路 33 号,邮编:100088,传真:010-82227425)。

主 编 单 位: 中冶建筑研究总院有限公司

参 编 单 位: 中冶检测认证有限公司

国家工业建构筑物质量安全检验检测中心

铁科检测有限公司

中路高科交通检测检验认证有限公司

四川升拓检测技术股份有限公司

北京科技大学

北京智博联科技股份有限公司

福建福清核电有限公司

河南永正检验检测研究院有限公司

主要起草人: 张兴斌 张 伟 吴佳晔 张际斌 刘建磊
宿 健 陈卫红 张科超 黄正均 冯长中
张远军 代 松 张电杰 范 飞 张向礼
李季阳 王英子 李佳兴 马明山 周杰莹

赵玉超	贺俊辉	张新威	樊 贺	王 丁
田 振	王俊青	王 闯	张 森	郑德旭
董志刚	马谷剑	杜 潇		
主要审查人：石大为	宋建永	王元清	祝 磊	刘立渠
姜 勇	王 智	赵建铎	贺冬冬	

目 次

1 总 则	(1)
2 术语和符号	(2)
2.1 术语	(2)
2.2 符号	(3)
3 基本规定	(6)
4 检测及结果判定	(9)
4.1 混凝土构件厚度检测	(9)
4.2 混凝土构件内部缺陷检测	(10)
4.3 混凝土裂缝深度检测	(12)
4.4 孔道注浆密实度检测	(14)
4.5 钢管混凝土脱空检测	(18)
5 检测报告	(20)
附录 A 混凝土 P 波波速测试	(21)
本规程用词说明	(24)
引用标准名录	(25)
附:条文说明	(27)

Contents

1	General provisions	(1)
2	Terms and symbols	(2)
2.1	Terms	(2)
2.2	Symbols	(3)
3	Basic requirements	(6)
4	Detection and result determination	(9)
4.1	Detecting thickness of concrete structure	(9)
4.2	Detecting internal defects of concrete structure	(10)
4.3	Detecting crack depth of concrete structure	(12)
4.4	Detecting grouting quality of tunnel ducts	(14)
4.5	Detecting void of concrete-filled steel tube	(18)
5	Test report	(20)
	Appendix A Testing of concrete P-wave speed	(21)
	Explanation of wording in this specification	(24)
	List of quoted standards	(25)
	Addition: Explanation of provisions	(27)

1 总 则

1.0.1 为规范冲击弹性波法检测混凝土缺陷的技术方法,提高检测结果的准确性和可靠性,制定本规程。

1.0.2 本规程适用于混凝土缺陷的冲击弹性波法检测。

1.0.3 采用冲击弹性波法检测混凝土缺陷,除应符合本规程外,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 冲击弹性波 impact elastic wave

通过机械冲击或人工锤击等物理方式使得物体产生弹性形变,在内部质点间弹性力的作用下质点振动传播的运动过程。

2.1.2 冲击弹性波法 impact elastic wave method

利用冲击弹性波的频率、波速、幅值等特征,对混凝土缺陷进行识别的无损检测方法。

2.1.3 冲击弹性波速度 velocity of impact elastic wave

冲击弹性波在介质中单位时间内的传播距离。

2.1.4 主频 main frequency

对接收到的冲击弹性波信号进行频域分析时,各频率成分的幅值分布中,幅值最大处对应的频率值。

2.1.5 冲击回波法 impact-echo method

对混凝土表面产生瞬态冲击力以形成弹性波并接收反射信号,通过分析反射波的频率、波速、幅值等特征,检测混凝土缺陷的无损检测方法。

2.1.6 等效波速法 equivalent velocity method

在被测试孔道的中心线位置固定加速度传感器,采用激振锤敲击的方式产生激振,通过采集的弹性波数据计算等效反射波速,根据等效弹性波速确定孔道注浆密实度的方法。

2.1.7 振动法 vibration method

通过对构件表面冲击产生瞬态振动信号,分析信号在表层振动信号的卓越周期、持续时间等参数的变化,判断构件表面脱空情况的方法。

2.1.8 层析扫描(CT)法 computerized tomography

利用冲击弹性波的透射性能,对被测区域进行多方位扫描,重建冲击弹性波波速(或能量)图像的检测方法。

2.1.9 面波法 rayleigh wave method

利用面波的衰减特征,对混凝土开口裂缝深度进行判定的检测方法。

2.1.10 相位反转法 phase reversal method

利用纵波的相位变化,对混凝土开口裂缝深度进行判定的检测方法。

2.1.11 线性标定 linear calibration

在注浆密实或不密实孔道混凝土位置,测试确定一条与密实度检测线长度和方向一致的测线,作为孔道密实度测试的判断基准。

2.1.12 最大连续注浆缺陷长度 maximum continuous grouting defect length

预应力孔道内单个注浆缺陷的最大长度。

2.2 符 号

b ——混凝土构件厚度;

D ——注浆密实度指数;

D_e ——修正注浆密实度指数;

D_k ——单条孔道检测区段中,注浆质量较好的连续区段的注浆密实度指数;

E_i ——重心周期;

f_c ——构件测点对应的频域曲线主频;

f_i ——第 i 次检测的主频;

f_s ——参考构件测点对应的频域曲线主频;

h ——混凝土构件的实际厚度或测量值;

H_j ——第 j 点检测厚度;

- H ——测区判定厚度；
 H_L ——检测裂缝深度；
 k ——截面形状系数；
 L_a ——桥梁预应力孔道全长；
 L_2 ——两个接收传感器间的直线距离；
 L_d ——孔道注浆密实度检测时的检测区间长度；
 L_i ——测点脱空与期望值之间的距离；
 $L_{\max}$ ——最大连续注浆缺陷长度；
 n ——每个测点有效检测次数；
 N ——测区测点数；
 N_1 ——注浆密实度检测时定位检测的点数；
 N_j ——无缺陷测点数；
 N_X ——小规模缺陷测点数；
 N_D ——大规模缺陷测点数；
 N_2 ——钢管混凝土脱空检测时测区内的测点数；
 S_i ——第 i 测点的脱空指数；
 $\bar{S}$ ——检测区域内各测点脱空指数的平均值，即期望值；
 t_1 ——第一个传感器接收信号的电压基准线数值开始变化点的时间数值；
 t_2 ——第二个传感器接收信号的电压基准线数值开始变化点的时间数值；
 Δt ——两个接收装置所接收到信号的时间差；
 $\bar{T}_1$ ——测区平均卓越周期；
 $\bar{T}_2$ ——测区平均持续时间；
 T_{1i} ——第 i 测点的卓越周期；
 T_{2i} ——第 i 测点的持续时间；
 v_p ——冲击弹性波波速；
 v_r ——基准波速；
 x ——激振面波在裂缝检测中的振幅比；

σ_s ——检测区域内各测点脱空指数的标准偏差；

λ ——激振面波波长；

β ——测点的注浆状态。

3 基本规定

3.0.1 冲击弹性波法可检测混凝土厚度偏差、内部缺陷、裂缝深度、孔道注浆密实度和钢管混凝土脱空等。本规程检测的混凝土缺陷类型与所采用的具体检测方法的对应关系应符合表 3.0.1 的规定。

表 3.0.1 混凝土缺陷类型与检测方法的对应关系

混凝土缺陷类型	具体检测方法
厚度偏差	冲击回波法
内部缺陷	层析扫描法、冲击回波法
裂缝深度	相位反转法、面波法
孔道注浆密实度	冲击回波等效波速法
钢管混凝土脱空	振动法

3.0.2 冲击弹性波法检测混凝土缺陷流程宜按图 3.0.2 进行。



图 3.0.2 冲击弹性波法检测混凝土缺陷流程图

3.0.3 资料收集宜包括下列内容：

- 1 委托方和相关单位的检测目的和具体要求；
 - 2 设计资料、施工资料、监理资料、养护与维修加固资料；
 - 3 结构技术状况、相应检测条件信息等；
 - 4 辅助现场检测和数据判断的其他资料。
- 3.0.4 检测方案应包括下列主要内容：**
- 1 工程概况；
 - 2 检测目的及委托方的检测要求，包括检测范围、检测数量等；
 - 3 检测依据包括检测标准、相关技术文件等；
 - 4 检测方法 & 检测数据出现异常情况时处理措施；
 - 5 检测人员和仪器设备情况；
 - 6 检测工作进度计划；
 - 7 检测中的安全与环保措施。
- 3.0.5 检测前应对检测仪器设备进行检查。**
- 3.0.6 冲击弹性波法检测混凝土缺陷应根据构件类型、检测环境、检测范围、检测要求等，优先采用成熟、先进、专业化程度高的检测仪器。**
- 3.0.7 冲击弹性波仪应具有信号采集与数据分析功能。信号采集应包括信号激振、信号拾取、信号放大、模数转换等装置；数据分析宜包括数字信号显示、存储、分析、成像等功能。**
- 3.0.8 冲击弹性波仪信号激振装置应能激发出不同频率的弹性波。激振装置宜采用不同尺寸的钢球等作为冲击器。**
- 3.0.9 信号拾取装置宜采用加速度传感器，且应符合下列规定：**
- 1 传感器应根据检测对象、检测目的、检测方法等进行选择，且频响范围满足检测要求；
 - 2 用于反射信号频谱分析时，加速度传感器宜具有侧壁阻尼功能和控制按压力度的装置；
 - 3 同一批次测试的传感器宜具有相同耦合力度的装置；
 - 4 可以采用符合频谱特性要求的非接触式采集方式。

3.0.10 信号放大宜采用电荷放大器,且增益倍率宜为 1 倍~100 倍,放大器频带应大于传感器的有效频响范围。

3.0.11 模数转换装置分辨率不应小于 12Bit,并应适用于单通道和双通道数据采集模式。单通道工作模式下,最大采样频率不应小于 500kHz;双通道工作模式下,每个通道最大采样频率不应小于 250kHz。

3.0.12 冲击弹性波仪应具备波速、幅值、时域、频率、相位等分析的功能。

3.0.13 冲击弹性波仪应能在现场环境温度 0℃~40℃、相对湿度小于 70%的环境条件下正常工作。检测环境应无机械振动和强振幅电噪声。

3.0.14 冲击弹性波仪应在检校有效期内使用。当存在下列情况之一时,应检定或校准冲击弹性波仪:

- 1 新仪器启用前;
- 2 在更换 AD 卡、信号采集传感器、信号放大器等可能影响测试性能的信号转换配件后;
- 3 超过检定/校准有效期;
- 4 其他需要检定/校准的情况。

4 检测及结果判定

4.1 混凝土构件厚度检测

4.1.1 混凝土构件厚度检测宜采用冲击回波法。

4.1.2 冲击回波法检测混凝土构件厚度时,应确认检测部位混凝土表面平整,无蜂窝、麻面、浮浆、灰尘等异物。

4.1.3 冲击回波法检测混凝土构件厚度宜采用带侧壁阻尼的加速度传感器。

4.1.4 冲击回波法检测混凝土构件厚度时应根据检测对象厚度选择合适的激振锤,激振锤的选取宜符合表 4.1.4 的规定。

表 4.1.4 冲击回波法检测中激振锤的选取

构件厚度 b (cm)	锤头直径 (mm)
$b \leq 20$	5.0~20.0
$20 < b \leq 60$	15.0~30.0
$b > 60$	25.0~50.0

4.1.5 构件表面若有沟槽或裂缝,测点和激振点应位于沟槽或表面裂纹同侧,激振点到测点位置距离不宜大于预估厚度的 $1/4$ 。

4.1.6 构件的测区和测点应符合下列规定:

1 每个构件测区数不应少于 3 个,相邻两测区间距应控制在 2m 以内,每个测区面积不宜大于 1m^2 ;

2 每个测区不应少于 3 个测点,每个测点有效检测数据数不应少于 3 次,测点在测区内宜均匀分布,测点应避开预埋件和不易处理的表观缺陷;

3 测点离构件端部或施工缝边缘的距离不宜小于 0.2m。

4.1.7 混凝土构件厚度检测前,应对冲击弹性波波速进行标定,波速标定宜按本规程附录 A 进行。

4.1.8 混凝土构件厚度检测时,每个测点检测信号的卓越周期偏差不应大于中间值的 15%,当不满足这一要求时,应剔除离散性较大的检测信号,若剔除后有效信号少于 3 个,该测点应重测。

4.1.9 混凝土构件厚度应按现行行业标准《冲击回波法检测混凝土缺陷技术规程》JGJ/T 411 的有关规定,按下列公式计算:

$$H_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{v_p}{2f_i} \quad (4.1.9-1)$$

$$H = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N H_j \quad (4.1.9-2)$$

式中: H_j ——第 j 点检测厚度(m);

n ——每个测点有效检测次数;

v_p ——冲击弹性波波速(m/s);

f_i ——第 i 次检测的主频(Hz);

H ——测区判定厚度(m);

N ——测区测点数。

4.2 混凝土构件内部缺陷检测

4.2.1 混凝土构件内部缺陷检测宜采用层析扫描(CT)法和冲击回波法。

4.2.2 混凝土构件内部缺陷检测前,应对混凝土构件无缺陷位置进行波速标定,波速标定宜按本规程附录 A 进行。

4.2.3 混凝土构件有 2 个及以上相对临空面,且 2 个临空面距离大于 800mm 时,宜采用层析扫描法(图 4.2.3),其他情况宜采用冲击回波法。

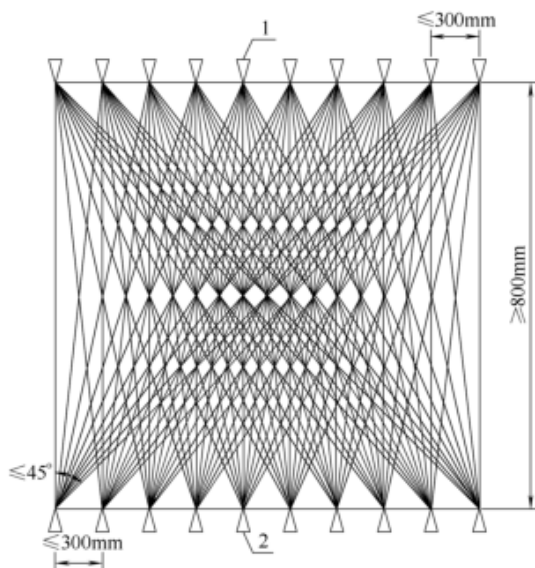


图 4.2.3 层析扫描法测量示意图

1—激振点；2—接收点

4.2.4 层析扫描法检测混凝土构件内部缺陷应符合下列规定：

1 激振点间距应与接收点间距相同，测线长度不应小于 800mm，测点间距不应大于 300mm；

2 测区布置时，平行测线应避免与构件主筋方向重合；

3 激振点与接收点的连线与激振方向夹角宜小于 45° ；

4 层析扫描图像可采用等值线、灰度、色谱等图示方法；

5 层析扫描图像应根据波速的分布规律，结合基准波速进行判定和解释。当层析扫描图像中波速低于基准波速的 10% 时，可判定混凝土构件内部相应位置存在缺陷。其中，基准波速标定宜按本规程附录 A 进行。

4.2.5 冲击回波法检测混凝土构件内部缺陷时，宜采用测点、测线、测区。

4.2.6 冲击回波法检测混凝土构件内部缺陷时除应符合本规程

第 4.1.2 条~第 4.1.5 条的规定外,尚应符合下列规定:

1 当采用单测点进行内部缺陷检测时,每个测点有效检测数据不应少于 3 个;

2 当采用测线进行内部缺陷检测时,每条测线不应少于 6 个测点,且测点间距不宜大于 200mm;

3 当采用测区进行内部缺陷检测时,测区内宜包括缺陷区域和密实区域,测区宜由测线垂直交叉构成,交叉点即为测点,且纵横测线各不少于 3 条,测线间距相等,不宜大于 300mm;

4 每个混凝土构件开始检测前宜进行预检测,应对至少 3 个采集数据进行频谱分析、检查,当所得的频谱无明显峰值时,应查明原因后再进行检测。

4.2.7 冲击回波法检测混凝土构件内部缺陷判定解释应符合下列规定:

1 基准频域曲线主频 f_0 应根据对应无缺陷构件厚度进行计算;

2 采用测点、测线进行缺陷判定解释时,根据测点频谱图,找出检测主频 f_c ,将其与基准主频 f_0 进行比较,对于主频 f_c 之外的频率应结合被检测构件形状、预埋件位置等进行综合分析判断,确定内部缺陷位置;

3 当采用测区进行缺陷判定解释时,应重建频谱或能量图像。图像可采用等值线、灰度、色谱等图示方法显示,并应根据频谱或能量的分布规律,结合基准主频进行判定和解释。

4.2.8 当冲击回波法实测信号复杂、振幅衰减缓慢、无法准确分析与判定时,宜结合其他方法进行综合检测。采用超声法检测混凝土构件内部缺陷时,可按现行协会标准《超声法检测混凝土缺陷技术规程》CECS 21 的有关规定检测。

4.3 混凝土裂缝深度检测

4.3.1 混凝土构件裂缝深度检测宜采用相位反转法或面波法。

预估深度较浅的裂缝检测宜采用相位反转法,预估深度较深的裂缝检测宜采用面波法。

4.3.2 相位反转法检测混凝土构件裂缝深度应符合下列规定:

1 预估裂缝深度宜小于 200mm,检测面边缘到裂缝的最小垂直距离大于预估裂缝深度;

2 测线应与裂缝走向垂直,激振点与接收点的测点宜对称于裂缝走向布置,测点间距相等,且不宜大于 5cm(图 4.3.2);

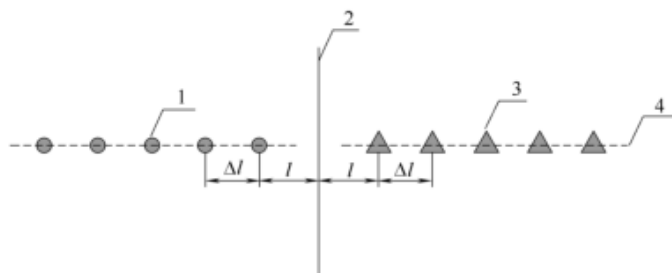


图 4.3.2 相位反转法测点布置图

1—激振点;2—裂缝;3—接收点;4—测线

3 测点离裂缝最近的距离宜小于预估裂缝深度,最远的距离宜大于预估裂缝深度;

4 相位反向的相邻两个点到裂缝距离的平均值,作为裂缝深度判定值。

4.3.3 面波法检测混凝土构件裂缝深度应符合下列规定:

1 混凝土结构形状规则,检测面较大,无脱空、蜂窝、麻面;

2 测线宜与裂缝走向垂直;

3 应采用一发双收的检测方式,两个接收点应跨裂缝对称布置,激振点与接收点应在同一条测线上,且接收点和激振点位置表面应平整;

4 面波法检测裂缝深度小于 1.3 倍波长,应根据预估裂缝深度选择合适的激振锤,激振锤可按表 4.3.3 的规定进行选取;

表 4.3.3 裂缝检测中激振锤的选取

预估裂缝深度(cm)	锤头直径(mm)
20~40	10.0~30.0
40~65	20.0~50.0
65~120	30.0~60.0
>120	橡胶锤

注:当预估裂缝深度超过 1.2m 时,应根据条件对激振锤特制。

5 检测时宜采用双方向激振(图 4.3.3-1、图 4.3.3-2);

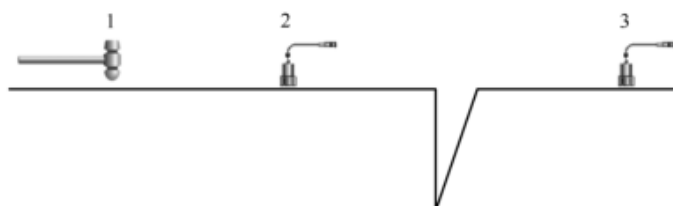


图 4.3.3-1 双方向激振(左方向)

1—左侧激振点;2—左侧接收点;3—右侧接收点

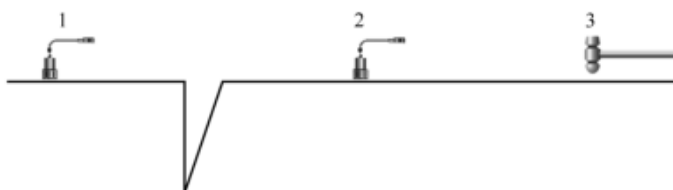


图 4.3.3-2 双方向激振(右方向)

1—左侧接收点;2—右侧接收点;3—右侧激振点

6 裂缝深度应按下列式计算:

$$H_L = -0.7429\lambda \ln x \quad (4.3.3)$$

式中: H_L ——检测裂缝深度(m);

λ ——激振面波波长(m);

x ——振幅比,具体计算方法可按现行行业标准《水工混凝土结构缺陷检测技术规程》SL 713 的有关规定。

4.4 孔道注浆密实度检测

4.4.1 冲击回波等效波速法可用于定位检测判断孔道注浆密实

度缺陷的范围及类型,应满足下列条件:

1 孔道中心间距宜大于孔道埋置深度的 0.8 倍,且孔道内径与波纹管埋置深度比宜大于或等于 0.3;

2 孔道走向及位置应确定,且在冲击回波传播方向只有一束预应力孔道,厚度不宜超过 800mm;

3 检测表面应平整且无浮浆。

4.4.2 现场检测设备安装与选用应符合下列规定:

1 传感器应安装在测点上,并确保传感器与构件表面密贴;

2 激振方向应与被测构件表面垂直,检测方向竖直时激振点应在孔道中心线的投影线上,检测方向水平时激振点应在孔道中心线的投影线上方 10mm~20mm,激振点与传感器距离应不大于被测对象厚度的 1/4;

3 根据被检结构尺寸特征按表 4.4.2 选择合适的激振锤进行激振。

表 4.4.2 冲击回波等效波速法中激振锤的选择表

构件厚度 b (cm)	锤头直径(mm)
$b \leq 20$	10.0~20.0
$20 < b \leq 60$	15.0~30.0
$b > 60$	25.0~50.0

4.4.3 冲击回波等效波速法现场检测应符合下列规定:

1 检测前应对检测仪器设备进行检查;

2 应确认检测环境无强磁场、振动等影响检测的噪声源;应确认检测部位混凝土无外观缺陷,且表面平整,无浮浆等;

3 依据设计、施工资料或采用孔道定位设备,描绘出被测预应力孔道走向,并标识出孔道中心线的投影线;应在标识的孔道中心线的投影线上布置测点,测点间距宜为 100mm~200mm;

4 填写冲击回波定位检测现场记录表,做好现场检测记录;

5 采样时间间隔宜为 $2\mu s$,采样点数宜为 4096 或 8192;

6 有效采集信号信噪比应大于 20dB;

7 冲击回波等效波速法定位检测时,应进行线性标定,同类型孔道标定不宜少于 3 条。

4.4.4 冲击回波等效波速法的检测数据分析与判定应符合下列规定:

1 检测数据分析应以频域分析为主,并辅以其他信号处理方法。

2 分析线性标定数据得到的时域频谱主峰,采用频谱等值线图表示,并以此作为判定孔道注浆密实度的基准。

3 结合预应力孔道位置、混凝土结构尺寸、管道布设、预埋件位置等参数综合分析检测孔道的注浆缺陷位置及范围。

4 具体判定方法可按协会标准《桥梁预应力孔道注浆密实度无损检测技术规程》T/CECS 879—2021 附录 B 的规定。

5 通过冲击回波定位检测判定结果,得出注浆密实度指数 D 、修正注浆密实度指数 D_c 及最大连续注浆缺陷长度 $L_{\max}$ 。

6 注浆缺陷类型应根据被检构件反射信号(IE)的强弱及注浆缺陷长度等综合判定,并按表 4.4.4-1 确定分级。

表 4.4.4-1 注浆缺陷类型分级

孔道材质	检测方向	等效波速降低率(%)	管壁反射	连续缺陷长度(m)	缺陷类型分级
金属	水平	5~10	无明显反射	≤ 0.4	小规模
		10 以上		—	大规模
	竖直	10~15		≤ 0.4	小规模
		15 以上		> 0.4	大规模
塑料 PVC	水平	5~10	无明显反射	≤ 0.4	小规模
			有一定反射	—	大规模
		10 以上	—	—	大规模
	竖直	10~15	无明显反射	≤ 0.4	小规模
		15 以上		> 0.4	大规模
		15 以上	有一定反射	—	大规模

注:表格未列出情形,判定为无缺陷。

7 检测区间采用注浆密实度指数 D 作为定位检测的评定指

标,注浆密实度指数 D 应按下列公式计算:

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \beta_i \times 100\% \quad (4.4.4-1)$$

$$D = \frac{N_J \times 1 + N_X \times 0.5 + N_D \times 0}{N} \times 100\% \quad (4.4.4-2)$$

式中: N ——定位检测的点数;

N_J ——无缺陷测点数;

N_X ——小规模缺陷测点数;

N_D ——大规模缺陷测点数;

β ——测点的注浆状态,按表 4.4.4-1 分级取值:无缺陷取值 1,小规模取值 0.5,大规模取值 0。

8 当定位检测仅为孔道的局部时,应用修正注浆密实度指数 D_e 来判定孔道的注浆密实度,修正注浆密实度指数 D_e 应按下式计算:

$$D_e = \frac{DL_d + D_k(L_a - L_d)}{L_a} \quad (4.4.4-3)$$

式中: L_d ——检测区间长度(m);

L_a ——孔道全长(m);

D_k ——单条孔道的各检测区段中,注浆质量较好的连续区段的注浆密实度指数。该连续区段的长度取检测区段的 1/2,按式(4.4.4-2)计算。

9 根据计算得到的修正注浆密实度指数 D_e ,以及最大连续注浆缺陷长度 $L_{\max}$,宜按表 4.4.4-2 判定预应力孔道注浆密实度等级,不能同时满足的降一等级判定。

表 4.4.4-2 注浆密实度等级判定

孔道注浆密实度等级	最大连续注浆缺陷长度 $L_{\max}$ (m)	修正注浆密实度指数 D_e (%)
I 类	$L_{\max} \leq 0.4$	$D_e \geq 95$
II 类	$0.4 < L_{\max} \leq 2.0$	$90 \leq D_e < 95$
III 类	$L_{\max} > 2.0$	$D_e < 90$

4.5 钢管混凝土脱空检测

- 4.5.1 钢管混凝土结合面质量检测宜采用振动法。
- 4.5.2 振动法检测钢管混凝土脱空宜采用带磁性座的加速度传感器。
- 4.5.3 激振锤型号应根据钢管壁厚度及内部填充情况选择,激振锤采用直径 6mm~10mm 的钢质球。
- 4.5.4 钢管混凝土脱空检测应采用测区判定解释,测区范围不应小于预估缺陷的区域,测点宜呈网格状布置,间距不宜大于 20cm。
- 4.5.5 现场检测时,应符合下列规定:
- 1 检测过程中,若某点波形检测出现异常,应查明原因后复测;
 - 2 采样时间间隔宜为 $4\mu\text{s}$,采样点数宜为 8192。
- 4.5.6 检测结果及整理应符合下列规定:
- 1 对已知密实位置的检测数据进行分析,确定该测点位置的卓越周期 T_1 与持续时间 T_2 ;
 - 2 测点的脱空指数 S_i 、期望值 $\bar{S}$ 及标准偏差 σ_s 应分别按下列公式确定:

$$S_i = \frac{T_{1i}}{\bar{T}_1} \cdot \frac{\bar{T}_2}{T_{2i}} \quad (4.5.6-1)$$

$$\bar{S} = \frac{1}{N_2} \sum_{i=1}^{N_2} S_i \quad (4.5.6-2)$$

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{N_2} \sum_{i=1}^{N_2} (S_i - \bar{S})^2} \quad (4.5.6-3)$$

式中: N_2 ——测区内的测点数;

$\bar{T}_1$ ——测区平均卓越周期(ms);

$\bar{T}_2$ ——测区平均持续时间(ms);

T_{1i} ——第 i 测点的卓越周期(ms);

T_{2i} ——第 i 测点的持续时间,取值宜为信号衰减到振幅最大值的 0.05 对应的时间(ms)。

3 计算各测点 S_i 与期望值 $\bar{S}$ 的距离 L_i :

$$L_i = \frac{|S_i - \bar{S}|}{\sigma_s} \quad (4.5.6-4)$$

4 根据各测点 L_i 进行脱空判断:大于 2.33 时为明显脱空;
1.65~2.33 为疑似脱空阈值;小于 1.65 为无脱空。

5 检测报告

5.0.1 检测报告应包括下列内容：

- 1 工程概况,包括工程名称、结构型式、规模及现状等;
- 2 委托单位、设计单位、施工单位及监理单位名称;
- 3 检测单位名称、检测依据、设备型号及编号等;
- 4 检测原因、检测目的、检测项目、检测方法、检测位置、检测数量等;
- 5 检测结果、评判结论,如检测结论判定为存在缺陷,应给出相关检测或处理建议;
- 6 检测日期、报告完成日期;
- 7 主检、审核和批准人员的签名;
- 8 异常情况说明等附件。

5.0.2 检测报告应结果明确、用词规范、文字简练,对容易混淆的术语和概念应以文字解释或图例、图像说明。

附录 A 混凝土 P 波波速测试

A.0.1 当可以直接测量构件厚度值或采用钻孔取芯获取被测构件(区域)厚度 H 时,采用一个接收传感器通过冲击回波法进行测试,具体标定应符合下列规定:

1 利用冲击回波法标定波速时,应满足本规程第 4.1.1 条~第 4.1.5 条的相关规定;

2 用于标定的位置或试块应无表面缺陷、内部缺陷、预埋件,且厚度明确;

3 冲击回波法标定的冲击弹性波波速可用于同配比、同等级、骨料相近的混凝土构件厚度及缺陷检测;

4 被检对象波速应按下列公式确定:

$$v_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h \cdot 2f_i \quad (\text{A.0.1})$$

式中: h ——实际厚度或测量值(m);

n ——有效检测次数, $n \geq 3$;

v_p ——冲击弹性波波速(km/s);

f_i ——第 i 次检测主频(kHz)。

5 混凝土 P 波波速测试不宜少于 3 次,每个 P 波波速与平均值的差不应超过平均值的 5%,取多次测试的 P 波波速平均值作为待测构件的混凝土 P 波波速值。

A.0.2 当构件具有 2 个相对的临空面,且距离大于 80cm 时,可以采用透射法进行构件 P 波波速测定。采用透射法进行测试时,应符合下列具体规定和方法:

1 用于标定的位置应无表面缺陷、内部缺陷、预埋件等;

2 透射法测定的冲击弹性波波速可用于同配比、同等级、骨

料相近的混凝土构件内部缺陷 CT 检测判定基准；

3 被检对象波速应按下式确定：

$$v_p = \frac{L_2}{\Delta t} \quad (\text{A. 0. 2})$$

式中： L_2 ——两个接收传感器间的直线距离(m)；

Δt ——两个接收装置所接收到信号的时间差(ms)。

4 混凝土 P 波波速测试不宜少于 3 次，每个 P 波波速与平均值的差不超过平均值的 5%，取多次测试的 P 波波速平均值作为内部缺陷判定基准值。

A. 0. 3 当构件所测区域厚度不能测量或不便获取构件所测区域厚度的情况下，采用两个接收传感器(图 A. 0. 3)进行 P 波波速测试，具体步骤应符合下列规定：

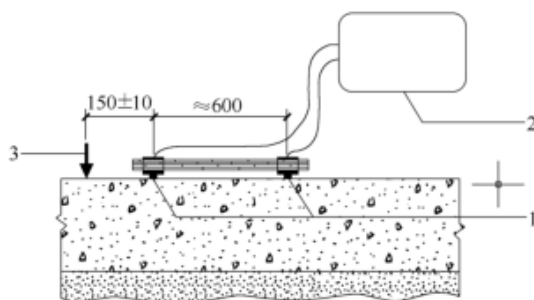


图 A. 0. 3 冲击回波法测试混凝土 P 波波速示意图

1—接收传感器；2—数据采集和分析系统；3—冲击源(器)

1 按图 A. 0. 3 将冲击弹性波检测仪的两个接收传感器置于结构或构件表面，在两传感器连线的外侧激发冲击弹性波。

2 安装好仪器，检查获取的波形，若从两个传感器获取的波形均有效，则将其存储以便后期分析；当纵波无法分辨，应在同一点重复进行测试，或者在传感器和混凝土接触良好的另一个位置重新进行测试。

3 数据采集系统屏幕上应在同一时间坐标中显示从两个传

传感器分别接收到的两段时域波形。

4 确定纵波平直段的时间。分别读取并记录两个传感器接收电压的基准线数值开始变化点的时间数值 t_1 和 t_2 , 计算纵波到达的时间差 Δt , 即为传播时间。 Δt 可采用下式计算:

$$\Delta t = t_1 - t_2 \quad (\text{A. 0. 3-1})$$

5 该方法测试纵波在混凝土中传播的 P 波波速值可采用下式计算:

$$v_p = k \frac{L}{\Delta t} \quad (\text{A. 0. 3-2})$$

式中: v_p ——混凝土 P 波波速(m/s), 精确至 1m/s;

L ——两个接收传感器间的直线距离(m), 精确至 0. 001m;

k ——截面形状系数, 对于板状结构(混凝土板、墙等)可取 0. 96, 对于其他截面几何形式可通过现场试验确定。

6 混凝土 P 波波速测试不宜少于 3 个测点, 每个 P 波波速与平均值的差不超过平均值的 5%, 取多次测试的 P 波波速平均值作为待测构件的混凝土 P 波波速值。

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

《冲击回波法检测混凝土缺陷技术规程》JGJ/T 411

《水工混凝土结构缺陷检测技术规程》SL 713

《超声法检测混凝土缺陷技术规程》CECS 21

《桥梁预应力孔道注浆密实度无损检测技术规程》T/CECS 879

中国工程建设标准化协会标准

冲击弹性波法检测混凝土缺陷
技 术 规 程

T/CECS 925—2021

条 文 说 明

目 次

1	总 则	(31)
2	术语和符号	(32)
3	基本规定	(33)
4	检测及结果判定	(35)
4.1	混凝土构件厚度检测	(35)
4.2	混凝土构件内部缺陷检测	(37)
4.3	混凝土裂缝深度检测	(37)
4.4	孔道注浆密实度检测	(39)
4.5	钢管混凝土脱空检测	(40)

1 总 则

1.0.1 本条阐述了本规程的编制目的。

1.0.2 本条规定了本规程的适用范围。冲击弹性波法检测混凝土缺陷指冲击弹性波在混凝土结构中传播时,根据冲击弹性波的波速、幅值、时域、频率、相位、反射时间等对结构内部质量进行判定。

本规程所指混凝土缺陷包括混凝土厚度偏差、内部空洞、不密实、裂缝等,也包括预应力构件管道内注浆的空洞、注浆不密实,以及钢管混凝土脱空等。

1.0.3 本条阐述了本规程与其他相关标准的关系。应遵守协调一致、互相补充的原则使用本规程和其他相关标准。

2 术语和符号

本规程采用的术语及其定义,根据下列原则确定:

(1)本规程的术语是从冲击弹性波法检测混凝土缺陷技术方法的角度赋予其含义的,但不一定是术语的定义;

(2)本规程引用了部分现行工程建设国家标准已做规定的术语定义;

(3)本规程给出了相应的推荐性英文术语,但该英文术语不一定是国际上通用的标准术语,仅供参考。

3 基本规定

3.0.2 本条规定了冲击弹性波法检测混凝土缺陷的一般流程,具体实施时应根据检测任务具体要求和目的对相关工作进行细化。

3.0.3 调查和收集相关资料在前期的准备工作中是非常重要的,有利于综合分析产生质量问题的原因,为编制检测方案提供依据,有助于检测过程的实施。本条规定检测人员在开展检测工作之前应掌握有关基本情况,有利于开展现场调查、方案制定等工作。目前检测方法很多,但每一种方法都有其适用性和局限性,较详细地掌握工程资料信息,有利于检测方法的选取,也有利于对检测数据综合分析,给检测结果判定提供参考、佐证。

3.0.4 检测方案应根据检测的目的、前期的调查资料等来制定。

3.0.5 检测前确保检测设备在检校有效期内,检测设备运行正常是开展现场检测工作的前提条件。按本规程进行检测操作、结果分析都是技术性较强的工作,尤其结果处理和判断对人员的要求较高,操作人员如未经技术培训,将影响检测结果的可靠性。

3.0.6、3.0.7 本条对冲击弹性波检测仪做了最基本的要求,即检测仪必须具备的装置或功能,否则影响相关检测工作的开展,在此基础上允许进行检测仪器功能扩容。

3.0.8 冲击器的正确选择直接影响检测效率,试验时应根据构件的厚度及实际的回波信号来选择冲击器,进而容易得到有效的频谱。根据检测构件厚度的不同,冲击器应激发不同频率的冲击弹性波。

冲击器的冲击方向以及冲击能量对检测信号的品质有很大的影响,设计良好的冲击装置能提高检测效率并减少人为误差。为降低人为因素对检测结果的影响,冲击方式可以根据接收装置配

置不同尺寸的冲击锤,宜为 5mm~50mm 直径的钢质小球。当被检对象厚度较大时,应更换较大直径的钢质小球。

3.0.9 加速度传感器是一种可接收表面法向位移、加速度等振动信号的宽频带传感器,能够探测到冲击产生的纵波沿表面传播引起的微小变形。实际应用时需考虑加速度传感器的灵敏度参数,同时,为减小测量信号的失真,还应考虑加速度传感器的频响范围。

侧壁阻尼功能对传感器提供了一个侧向阻尼并对传感器的侧向位移加以限制,减小了动态误差;控制按压力度改善了频响特性,可不使用耦合剂。

3.0.10 冲击弹性波检测技术通过波速、幅值、时域、频率、相位等参数进行混凝土结构缺陷的检测判定,因此检测仪需具备对相关参数分析的功能。

3.0.11 冲击弹性波检测仪只有使系统处于标准状态,才能保证检测结果的可靠性。新设备启用需要对“标准状态”进行检定/校准,设备关键配件如 AD 卡、传感器、信号放大器等更换可能使“标准状态”改变,因此也需要检定/校准后方可使用,一般情况下仪器检定/校准有效期为 1 年,超出该期限应进行检定/校准。冲击弹性波检测仪可通过对混凝土波速的检验进行校准。采用具备一定强度的密实混凝土板作为标准件来标定波速,检验混凝土的计算厚度与实际厚度是否相符来验证仪器的可靠性和稳定度。

4 检测及结果判定

4.1 混凝土构件厚度检测

4.1.1 本规程所指的冲击回波法是基于弹性波的一种检测结构厚度、缺陷的无损检测方法。通过瞬时冲击产生弹性波并在结构中传播,当遇到缺陷或界面时被反射,冲击面或缺陷及界面间的多重反射引起瞬时共振状态,根据共振频率的大小来确定结构是否完好无损或确定缺陷的位置。因此,在实际应用中,可通过分辨振幅谱中的共振频率来确定内部缺陷的深度或构件的厚度。

本规程适用于检测界面声阻抗有明显差别的构件,混凝土构件至少具备一个形状规则的可测面。本规程不适用陶粒混凝土、加气混凝土等轻质混凝土的检测。由于机械振动和高振幅电噪声会传入数据采集系统并干扰检测结果,故本规程对于机械振动和高振幅电噪声情况下的检测不适用。

4.1.2 混凝土表面状态会改变冲击回波响应特征并影响混凝土质量的检测结果,为保证检测数据的有效性及检测结果的准确性,应通过打磨和清除表面粉末、碎屑等杂物,来保证混凝土表面的平整与清洁。

4.1.3 加速度传感器测量的是被测表面法线方向上(或加速度传感器的轴线方向上)的位移,而侧壁阻尼功能对加速度传感器侧向方向有阻尼作用,会限制传感器的侧向位移,因此,侧壁阻尼功能可减小测量的动态误差。

4.1.4 激振锤通过瞬态冲击在物体表面产生冲击弹性波,冲击弹性波在物体上下表面多重反射,其中往返一次的时间为冲击弹性波的自振周期。该自振周期与弹性波速乘积的一半对应物体的壁厚(对应壁厚)。对于混凝土结构,激振锤得到的弹性波自振周期

及对应壁厚如表 1 所示。

表 1 激振锤锤头直径、自振周期和对应壁厚的对应关系

激振锤锤头直径(mm)	D6	D10	D17	D22	D30	D50
自振周期(ms)	0.021	0.034	0.058	0.076	0.103	0.172
对应壁厚(m)	0.043	0.069	0.118	0.154	0.210	0.351

4.1.5 经过测试,在边界影响区域外(测点或测区中的测线距构件边缘不小于所测构件实际厚度的 0.3),可以获得比较稳定的测试结果,典型测试结果图例见图 1。在边界影响区域内,所测板构件的测试结果普遍偏大,典型测试结果图例见图 2,测试结果存在误判可能。

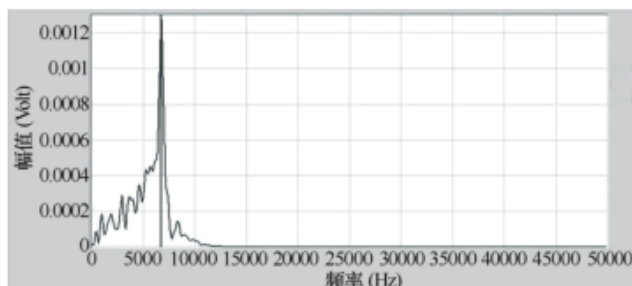


图 1 典型边界影响区域外的测试结果

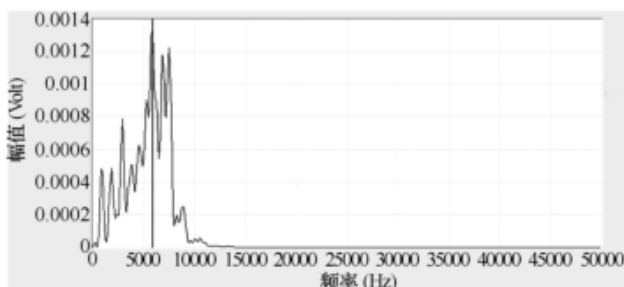


图 2 典型边界影响区域内的测试结果

4.1.6 本条规定了冲击弹性波厚度检测时构件的测区和测点要求,由于构件边角引起的边界效应会产生伪频,容易误判构件的缺

陷,检测时测点离构件端部或施工缝边缘的距离不宜小于 0.2m。

4.1.8 为避免因数据不稳定导致结果误差较大的情况,混凝土构件厚度检测时应保证信号的稳定性及可重复性。

4.2 混凝土构件内部缺陷检测

4.2.1 混凝土构件内部缺陷包含大体积混凝土内部缺陷,也包括一般混凝土构件内部小范围缺陷。因此,实际检测应用时应根据检测对象和现场检测条件合理选择检测方法。

4.2.3 本条规定了层析扫描(CT)法或冲击回波法的适用条件,层析扫描法要求结构至少有 2 个临空面,以保证可以通过 2 个传感器进行对测。而冲击回波法适用于只有 1 个临空面的结构。

4.2.4 当激振方向与测线方向的夹角过大时,检测得到的 P 波波速有偏小的倾向。因此,该夹角最好不超过 45° ,当结构过大时,可以分段测试,也可以做部分交叉测试,即激振点与接收点不一一做测试线。

4.3 混凝土裂缝深度检测

4.3.1 混凝土裂缝深度的检测方法有多种。根据检测条件,可采用单面平测法、双面斜测法和钻孔法等。其中,单面平测法应用最为广泛。本规程采用了单面平测法中的“相位反转法”和“面波法”检测混凝土裂缝深度。相位反转法利用冲击弹性波(主要利用 P 波成分)的相位特征检测裂缝深度,检测裂缝深度一般不大于 500mm。面波法,又叫瑞利波法或表面波法,利用冲击弹性波(主要利用 R 波成分)的幅值衰减特性(即能量衰减)检测裂缝深度。面波法检测裂缝深度最深能够达到激振波长的 1.3 倍,理论上可通过增大激振锤锤头直径或使用软质材料的激振器来增加检测深度。但裂缝的预估深度超过 2m 时,检测前宜进行适应性测试。

4.3.2 相位反转法的原理是当弹性波(包括声波、超声波)在混凝土内传播并穿过裂缝时,在裂缝端点处产生衍射,其中衍射角与裂

缝深度具有一定的几何关系。将激振点与接收点沿裂缝对称放置,由近到远逐步移动,当激振点到裂缝的距离与裂缝深度相近时,接收信号的初始相位会发生反转。相位反转法原理示意图如图 3 所示。

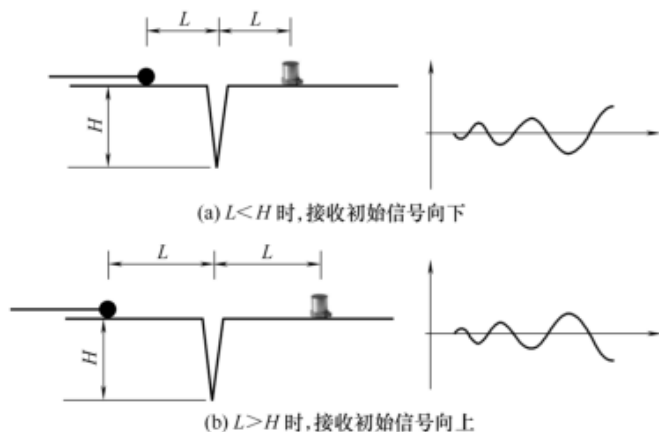


图 3 相位反转法示意图

该方法只需移动冲击锤或换能器,确定首波相位反转临界点与裂缝的距离,就可得到混凝土的裂缝深度,与其他混凝土裂缝深度检测方法相比具有简单直观的特点,因此具有较强的实用价值。

4.3.3 双方向激振方法是根据瑞利波的衰减特性检测混凝土裂缝深度。瑞利波是由 P 波和 S 波在介质边界面上相互作用而形成,其传播速度比 S 波稍小,且主要集中于介质表面和浅层部分。双方向激振方法的检测范围大,受充填物、钢筋、水分的影响小,因此,适合检测较深的裂缝。

双方向激振方法适用于检测形状规则、检测面较大的混凝土构件(如坝面等近似半无限平面体),最大检测裂缝可达数米,而且受填充物和水分的影响较小。由于表面波受边界条件(边角、侧壁等)影响较大,因此本方法不适合狭窄结构的混凝土构件。

4.4 孔道注浆密实度检测

4.4.1~4.4.3 预应力管道的大小、混凝土板的截面形式(高宽比)、管道埋置深度(波纹管的保护层厚度)、管道间距、预应力分布及波纹管材质等因素都会对检测结果产生影响。宜反复进行检测及综合分析来进行判定。

冲击回波等效波速法定位检测不适用于管道上方有缺陷、混凝土与管道外壁黏结不良及脱空情况下的预应力管道缺陷检测。这是由于当管道上方有缺陷或混凝土与管道外壁黏结不好甚至脱空时,会造成冲击弹性波在缺陷或脱空上方反射,从而无法准确地对管道和管道内部进行检测,进而不能判断其内部压浆情况。

相比于金属管道,塑料预应力管道对冲击弹性波的作用使得冲击弹性波更趋向绕行管道到达板底,因此,塑料预应力管道板的检测频率相较于金属管道板的检测频率偏低。但是,预应力管道的壁厚一般为 $1\text{mm}\sim 2\text{mm}$,对冲击回波响应的影响较小,可忽略不计,故本规程未对所测的预应力管道壁厚做出规定。

4.4.4 当测得的构件厚度与无预应力管道部分的构件厚度基本相同,且仅出现一个与构件厚度对应的频率峰值 f 时,可判定管道内压浆密实。

当对应的构件厚度频率峰值向低频漂移,或向低频漂移的同时出现另一个高频峰值,且其等效波速变慢或计算厚度变大时,可判定管道内压浆不密实。

当对应的构件厚度频率峰值明显小于无预应力管道部分构件厚度的频率值,且较压浆不密实、有孔洞情况时的有所减小,并出现另一个高频峰值时,可判定管道内未注浆。

D_k 为单条孔道的各检测区段中,注浆质量较好的连续区段的注浆密实度指数。这里需要有前提条件,即测试时由最容易出问题的位置向最不容易出问题的位置测试,若最容易出问题位置的检测质量较好,那么其他未检测位置的质量就可以推定较好。若

测试位置采用随机抽取方式时,或测试位置不是最容易出问题的位置,那么不能用不容易出问题的检测结果推定容易出问题位置的质量。

4.5 钢管混凝土脱空检测

4.5.1 振动法适用于测定混凝土浅层(0.1m 以内)的剥离(脱空)和空洞,也适用于钢管与混凝土结合面质量的检测。

4.5.2 本规程所指振动法是当锤击钢管混凝土结构表面时会诱发结构本身振动,该振动会压缩/拉伸空气形成声波。因此,除采用加速度传感器测量结构表面振动信号的方式外,还可以采用工业拾音器(麦克风)拾取声波信号(在此称为“打声法”或“声振法”)。