

UDC

中华人民共和国行业标准



P

JGJ/T 411 - 2017

备案号 J 2378 - 2017

冲击回波法检测混凝土缺陷技术规程

Technical specification for testing of concrete
defects by impact echo method

2017 - 05 - 18 发布

2017 - 11 - 01 实施

中华人民共和国住房和城乡建设部 发布

中华人民共和国行业标准

冲击回波法检测混凝土缺陷技术规程

Technical specification for testing of concrete
defects by impact echo method

JGJ/T 411 - 2017

批准部门：中华人民共和国住房和城乡建设部

施行日期：2 0 1 7 年 1 1 月 1 日

中国建筑工业出版社

2017 北 京

中华人民共和国住房和城乡建设部 公 告

第 1560 号

住房和城乡建设部关于发布行业标准 《冲击回波法检测混凝土缺陷技术规程》的公告

现批准《冲击回波法检测混凝土缺陷技术规程》为行业标准，编号为 JGJ/T 411-2017，自 2017 年 11 月 1 日起实施。

本规程由我部标准定额研究所组织中国建筑工业出版社出版发行。

中华人民共和国住房和城乡建设部

2017 年 5 月 18 日

前 言

根据住房和城乡建设部《关于印发〈2014年工程建设标准规范制订、修订计划〉的通知》(建标[2013]169号)的要求,规程编制组经广泛调查研究,认真总结实践经验,参考了有关国际标准和国外先进标准,并在广泛征求意见的基础上,编制了本规程。

本规程的主要技术内容是:1 总则;2 术语和符号;3 冲击回波仪;4 现场检测及结果判定。

本规程由住房和城乡建设部负责管理,由江苏金土木建设集团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,请寄送江苏金土木建设集团有限公司(地址:江苏省常熟市东环路1号,邮编:215500)。

本 规 程 主 编 单 位:江苏金土木建设集团有限公司
河北建设集团有限公司

本 规 程 参 编 单 位:江苏省建筑工程质量检测中心有限
公司

国家建筑工程质量监督检验中心

江苏武进建工集团有限公司

福建省建筑科学研究院

深圳市莫尼特仪器设备有限公司

中南林业科技大学

河北天博建设科技有限公司

石家庄铁道大学

安徽省水利部淮河水利委员会水利科
学研究院

上海苏科建筑技术发展有限公司

四川升拓检测技术有限责任公司
林芝市住房和城乡建设局
常熟市建设工程质量监督站
苏州市建设工程质量安全监督站
华煜建设集团有限公司

本规程主要起草人员：张亚挺 孙正华 崇金玲 温惠清
滕 斌 高秋利 史东库 魏晓斌
杨丙文 严 骏 王 艳 刘永奇
姚志玉 徐教宇 曹 旦 徐立强
胡晓泉 吴佳晔 钟嘉辉 王智丰
田党信 江厚权 刘尧军 林立军
陈 松 崔德密 张今阳 吴 俊
季 育 朱纪刚 朱传娣 朱 郁
张 余 顾文明 陈定方 刘加贝
本规程主要审查人员：陈 凡 郭正兴 傅 翔 赵荣欣
刘晓光 徐凯燕 吴 瑾 罗 斌
彭建和 王自福 费毕刚

目 次

1	总则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	3
3	冲击回波仪	4
3.1	技术要求	4
3.2	校准	4
4	现场检测及结果判定	5
4.1	一般规定	5
4.2	混凝土构件厚度及内部缺陷检测及结果判定	6
4.3	有粘结后张法预应力孔道灌浆缺陷检测及结果判定	8
4.4	隧道衬砌背后注浆缺陷检测及结果判定	8
4.5	混凝土结合面质量检测及结果判定	9
4.6	检测报告	9
附录 A	冲击回波仪校准方法	11
附录 B	混凝土表面波速测试	12
附录 C	冲击回波法检测混凝土厚度和缺陷记录表	15
	本规程用词说明	16
附：	条文说明	17

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms and Symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	3
3	Impact echo Instrument	4
3.1	Technical Requirements	4
3.2	Verification	4
4	Testing Technology and Test Results	5
4.1	General Requirements	5
4.2	Detecting Thickness and Internal Defects of Concrete Structures and Test Results	6
4.3	Detecting Grouting Quality of Tendon Ducts and Test Results	8
4.4	Detecting Grouting Quality of Tunnel Lining and Test Results	8
4.5	Detecting the Density of Concrete bonding Surface and Test Results	9
4.6	Test Report	9
Appendix A	Impact Echo Instrument Calibration Method	11
Appendix B	Measurement of Concrete Apparent Wave Speed	12
Appendix C	Testing Record of Concrete Thickness and Inner Flaw by Impact Echo	15
	Explanation of Wordings in this Specification	16
	Addition; Explanation of Provisions	17

1 总 则

1.0.1 为规范冲击回波法检测混凝土缺陷的技术方法，保证检测的准确性和可靠性，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于混凝土结构构件内部缺陷的冲击回波法检测。

1.0.3 采用冲击回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 冲击回波法 impact echo method

通过冲击方式产生瞬态冲击弹性波并接收冲击弹性波信号，通过分析冲击弹性波及其回波的波速、波形和主频频率等参数的变化，判断混凝土结构的厚度或内部缺陷的方法。

2.1.2 主频 main frequency

在接收回波各频率成分的振幅分布中，振幅最大处对应的频率值。

2.1.3 冲击弹性波 impact elastic wave

冲击作用下的质点以波动形式传播在弹性范围内产生的运动，亦称应力波。

2.1.4 纵波 primary wave

质点的振动位移方向平行于波的传播方向，波传播时会产生拉应力或压应力。

2.1.5 测区 testing zone

可以进行冲击回波法施测的构件表面区域，一个构件可指定或随机布置一个或若干个测区。

2.1.6 测线 testing line

在被测构件表面按一定方向布置的测点组成的线。

2.1.7 测点 testing point

测区内或测线上的检测点。

2.1.8 表观波速 apparent wave speed

纵波在半无限固体介质中传播时的速度。

2.2 符 号

- f ——振幅谱图中构件厚度对应的主频；
- f_c ——根据无缺陷构件厚度计算对应的频域曲线主频；
- f_s ——孔道内灌浆密实时，可能出现的另一个高频峰值；
- f_v ——孔道内灌浆不密实时，可能出现的另一个高频峰值；
- Δf ——频率采样间隔；
- H ——混凝土结构构件的实际厚度；
- k ——截面形状系数；
- L ——两个接收传感器间的直线距离；
- T ——混凝土结构构件的厚度计算值；
- Δt ——两个接收装置所接收到信号的时间差；
- v_p ——混凝土表观波速。

3 冲击回波仪

3.1 技术要求

3.1.1 冲击回波法检测可采用单点式或扫描式冲击回波仪。

3.1.2 冲击回波仪应符合下列规定：

- 1 应配置钢球型冲击器或电磁激振的圆柱型冲击器；
- 2 应配置测量表面振动的宽频带接收传感器，可为位移传感器或加速度传感器，带宽宜为 800Hz~100kHz；
- 3 数据采集仪应具备信号放大功能，且增益可调；
- 4 数据采集仪宜配有不少于 2 通道的模/数转换器，转换精度不应低于 16 位，采样频率不应低于 100kHz 且采样点数可调；
- 5 仪器应能实时显示冲击时传感器的输出时域信号，并应具有频率幅值谱分析功能。

3.1.3 冲击回波仪工作环境温度宜为 0℃~40℃，不宜在机械振动和高振幅电噪声干扰环境下使用。

3.2 校准

3.2.1 冲击回波仪应定期进行校准，周期不宜超过 1 年。

3.2.2 仪器更换配件或维修后，冲击回波仪应校准后方可使用。

3.2.3 冲击回波仪校准方法应符合本规程附录 A 的规定。

4 现场检测及结果判定

4.1 一般规定

- 4.1.1 检测前应进行下列准备工作：
- 1 调查、收集检测项目的相关资料；
 - 2 制定检测方案；
 - 3 核查仪器设备状态。
- 4.1.2 调查、收集的资料宜包括下列内容：
- 1 工程名称及设计、施工、监理、建设和委托单位名称等；
 - 2 被检测结构构件的名称、设计图纸、设计变更、施工记录、施工验收等；
 - 3 混凝土原材料品种和规格、配合比、浇筑和养护情况、设计强度等级等；
 - 4 构件、结构所属环境条件、使用期间的加固情况；
 - 5 明确委托方检测目的和具体要求；
 - 6 结构构件外观质量及存在的问题。
- 4.1.3 检测方案应根据实际被测对象进行制定，可包括下列主要内容：
- 1 工程概况、结构构件设计及施工情况；
 - 2 检测依据、目的及委托方要求；
 - 3 检测人员及仪器设备；
 - 4 测区划分、测线布置；
 - 5 测试方法、步骤、数量、位置及进度；
 - 6 其他配合工作。
- 4.1.4 受检构件测区外缘距构件的变截面或侧表面的最小距离，应大于沿冲击方向的构件厚度。
- 4.1.5 检测部位混凝土表面应清洁、平整，且不应有蜂窝、孔

洞等外观质量缺陷。当表面不平时，应打磨平整。

4.1.6 当检测中出现可疑区域或测点时，应对其复测或加密检测；当仍不能确定时，可取芯验证。

4.1.7 结构构件缺陷及厚度测试所采用的表观波速值，可按本规程附录 B 的方法确定。

4.1.8 测区范围应大于预估缺陷的区域，并应有进行对比的同条件正常混凝土部位，测区应标明各自的编号和位置。

4.1.9 当采用单点式冲击回波仪检测时，应符合下列规定：

1 每个测区的测点，应按等间距网格状布置，且不应少于 20 个测点；

2 应标明测点的编号和位置；

3 传感器和混凝土测试表面应处于良好的耦合状态；

4 冲击点位置与传感器的间距应小于设计厚度的 0.4 倍；

5 当检测面有沟槽或表面裂纹时，传感器和冲击器应位于沟槽或表面裂纹同侧。

4.1.10 采用扫描式冲击回波仪检测时，应符合下列规定：

1 测线的位置和测线网格的疏密应根据预估缺陷的位置和大小确定。对于预应力混凝土构件孔道灌浆缺陷，宜垂直于预应力孔道的走向进行检测；对于隧道衬砌背后注浆缺陷，宜沿隧道纵向与环向分别布置测线进行检测。测线的布置不应横跨沟槽或表面裂纹。

2 扫描器应紧贴混凝土表面匀速滚动，移动速率不宜大于 0.1m/s。

4.1.11 检测时，应观察时域和频域的波形变化，可选择低通或高通滤波方式进行波形处理。当无法获得有效波形时应进行复测。

4.1.12 检测原始记录宜按本规程附录 C 填写。

4.2 混凝土构件厚度及内部缺陷检测及结果判定

4.2.1 非预应力混凝土构件及预应力构件中，无预应力孔道区

域的厚度与内部缺陷检测可分别根据实测频域曲线的主频和主频漂移情况判定。

4.2.2 当构件厚度已知时，应采用已知厚度对表观波速进行标定。

4.2.3 混凝土结构构件厚度检测应符合下列规定：

1 在构件测区内应按本规程第 4.1 节要求布置测点或测线，每测点应取 3 个有效波形，并应分析各有效的主频 (f)。主频 (f) 与平均值的差不应超过 $2\Delta f$ ，测点的振幅谱图中构件厚度对应的主频 (f) 应为 3 个有效主频的算术平均值。

2 结构构件厚度应按下式计算：

$$T = \frac{v_p}{2f} \quad (4.2.3)$$

式中： T ——结构构件的厚度计算值 (m)；

v_p ——混凝土表观波速 (m/s)；

f ——振幅谱图中构件厚度对应的主频 (Hz)。

4.2.4 混凝土结构构件内部缺陷判定应符合下列规定：

1 频域曲线主频 f_c 应根据对应的无缺陷构件厚度进行计算。

2 根据实测的波形频谱图，找出主频 f ，与计算主频 f_c 进行比较。对于主频 f 之外的频率应结合检测结构构件形状、钢筋直径、保护层厚度、管线布设、预埋件位置等情况进行综合分析判断，确定内部缺陷位置。

4.2.5 当冲击回波仪具备三维图、厚度-距离图分析功能时，可根据下列情况进行缺陷分析：

1 当振幅谱图中只有单峰形态且主频 f 与计算主频 f_c 差值不超过 $2\Delta f$ ，厚度-距离图显示构件厚度值随测试的距离无明显变化时，可判定混凝土密实。

2 当振幅谱图中主频 f 与计算主频 f_c 相差较大，振幅谱中频率峰呈多峰形态，且向低频漂移时，可判定混凝土内部有

缺陷。

3 实测波形信号复杂、振幅衰减缓慢、无法准确分析与评价时，宜结合其他检测方法进行综合测试。对于判别困难的区域可采取钻芯核实。

4 内部缺陷位置估算值可按本规程第 4.2.3 条计算确定，其中主频 f 值应取振幅谱缺陷波峰对应的频率值。

4.3 有粘结后张法预应力孔道灌浆缺陷检测及结果判定

4.3.1 测线宜垂直于预应力孔道走向布置；当有双层孔道时，宜从两个侧面进行检测。

4.3.2 测线上各测点的间距应小于 0.5 倍的孔道直径，冲击点和接收器间的距离宜小于测点的间距。

4.3.3 预应力孔道灌浆前，宜检测预应力孔道位置及混凝土构件的内部缺陷。

4.3.4 现场检测宜在灌浆 7d 后进行。

4.3.5 当测得的构件厚度频率峰值 f 与无预应力孔道部分的构件厚度频率峰值 f 基本相同，或向低频轻微漂移并出现另一个高频峰值 f_s ，可判断孔道内灌浆密实。

4.3.6 当测得的构件厚度频率峰值 f 明显小于无预应力孔道部分的构件厚度频率值，或向低频明显漂移并出现另一个高频峰值 f_v ， f_v 约为 2 倍 f_s ，可判断孔道内灌浆不密实。

4.4 隧道衬砌背后注浆缺陷检测及结果判定

4.4.1 对隧道管片、二次衬砌背后的注浆不密实缺陷，可根据检测部位测得的相对振幅与相对振幅阈值作比较后进行判定。

4.4.2 检测前宜通过计算或现场敲击试验确定最优的弹性波频率及相应的激振锤。注浆完全密实和完全脱空条件下的相对振幅阈值应通过现场试验确定。

4.4.3 检测区域可布置网格状测点，检测数据应采用频谱分析进行处理，并应根据不同频率绘制检测区域不同深度的相对振幅

图。根据测点测得的相对振幅，绘制检测区域平面内的相对振幅平面成像图。

4.4.4 注浆情况宜根据不同深度的相对振幅图，并结合相对振幅平面成像图，综合分析后判定。当检测部位的相对振幅大于或等于完全脱空条件下的相对振幅阈值时，可判定该部位存在明显的注浆缺陷；当检测部位的相对振幅小于完全脱空条件下的相对振幅阈值但大于完全密实条件下的相对振幅阈值时，可判定该部位为注浆缺陷疑似部位。

4.5 混凝土结合面质量检测及结果判定

4.5.1 板状构件新旧混凝土和钢-混组合结构构件的结合面分层空鼓检测，可根据时域信号分析判定。

4.5.2 混凝土结合面缺陷测试时，测试面宜平行于结合面。

4.5.3 有下列情况之一，可判断结合面分层、空鼓：

1 冲击弹性波的反射时间明显长于无空鼓区域时。

2 通过厚度-距离图、三维图、振幅谱图的综合分析得出的测试构件厚度为表层结构厚度时。

4.5.4 混凝土结合面缺陷判定，应标识典型空鼓部位，绘制空鼓分布示意图，计算空鼓区域比例。

4.6 检测报告

4.6.1 检测工作完成应出具检测报告，宜包括下列主要内容：

1 委托单位名称；

2 工程概况，包括工程名称、结构类型、规模、施工日期及现状等；

3 建设单位、设计单位、施工单位及监理单位名称；

4 检测原因、检测目的；

5 检测项目、检测方法 & 检测依据；

6 仪器设备名称、型号、校准日期；

7 抽样方法、检测数量与检测的位置；

- 8 检测日期，报告完成日期；
- 9 数据采集系统使用的参数；
- 10 检测数据分析；
- 11 检测结论。

附录 A 冲击回波仪校准方法

A.0.1 校准试件应按下列要求制备：

- 1 混凝土抗压强度不应小于 20MPa；
- 2 厚度不应小于 150mm，长宽尺寸均不应小于厚度的 6 倍；
- 3 不得有内部缺陷。

A.0.2 校准时，每次选取的测点位置应一致。

A.0.3 校准试件的测试厚度，应按本规程第 4.2.3 条的规定进行测试，且应满足下式要求：

$$\left| \frac{T-H}{H} \right| \times 100\% \leq 5\% \quad (\text{A.0.3})$$

式中： H ——直接量测的校准试件的实际厚度（m）；

T ——校准试件测试厚度的算术平均值（m）。

附录 B 混凝土表观波速测试

B.0.1 当构件所测区域厚度不能量测时，可采用两个接收传感器（图 B.0.1）进行表观波速测试。表观波速测试步骤进行应符合下列规定：

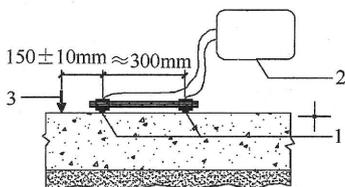


图 B.0.1 冲击回波法测试结构构件混凝土表观波速示意图

1—接收传感器；2—数据采集和分析系统；3—冲击源（器）

1 应将冲击回波仪的两个接收传感器置于结构构件表面，在两个传感器连线的外侧激发冲击弹性波。

2 当从两个传感器获取的波形都有效时，可存储波形，进行分析。当纵波无法分辨时，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 从两个传感器分别接收到的两个时域波形应在同一时间坐标中显示。

4 应分别读取并记录第一个和第二个传感器接收信号在电压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 $\Delta t = t_2 - t_1$ 。

5 混凝土构件纵波传播的表观波速值可按下式计算：

$$v_p = \frac{10^6 L}{\Delta t} k \quad (\text{B.0.1})$$

式中： v_p ——混凝土表观波速（m/s）；

L ——两个接收传感器间的直线距离（m）；

- Δt ——两个接收传感器所接收到信号的时间差 (μs)；
 k ——截面形状系数，可通过现场试验确定。

6 应通过改变采样时间间隔对同一测点重复进行两次测试，当该测点上两次测得的传播时间相同时，则可进行其他测点的测试。当两次测试的信号时间差不同时，应进行第三次测试，取与前两次值相同的值作为传播时间的测试值。当三个数据都不同时，应检查原因，排除故障后再继续进行测试。

7 混凝土表观波速测试不宜少于 3 个测点，测试结果与平均值的差不超过平均值的 5%，取多次测试的表观波速平均值作为待测构件的混凝土表观波速值。

B. 0. 2 在能直接测量构件厚度值及采用钻孔取芯直接测量被测构件（区域）厚度值的情况下，可采用一个接收传感器，测试步骤应符合下列规定：

1 应在平整混凝土表面进行检测，观察数据采集系统中时域图和振幅谱图的波形变动情况，当出现与厚度值 H 对应的一个有效波形的振幅谱只有单主峰值时，读取频域曲线图中主频值 f ；

2 混凝土表观波速值可按式计算：

$$v_p = 2Hf \quad (\text{B. 0. 2})$$

式中： v_p ——混凝土表观波速 (m/s)；

H ——混凝土结构构件直接量测的实际厚度 (m)；

f ——振幅谱中构件厚度对应的频率值 (Hz)。

3 混凝土表观波速测试不宜少于 3 个测点，测试结果与平均值的差不应超过平均值的 5%，可取多次测试的表观波速平均值作为待测构件的混凝土表观波速值。

B. 0. 3 检测原始记录宜按表 B. 0. 3 填写。

表 B.0.3 混凝土表面波速测试记录表

委托编号			工程名称				
测试日期			检测依据				
施工日期			设计强度等级				
构件名称			检测环境/构件表面状态				
仪器设备	型号:		编号:				
	参数	采样频率= kHz; 采样点数= 点; 滤波方式:					
<input type="checkbox"/> 方法一 (B.0.1)	$v_p = \frac{10^6 L_k}{\Delta t}$						
	次数	第1次(点)		第2次(点)		第 <i>i</i> 次(点)	
		1	2	1	2	1	2
	<i>L</i>						
	$t_2; t_1; \Delta t$						
	<i>k</i>						
	v_p						
构件的混凝土表面波速值 (m/s):							
<input type="checkbox"/> 方法二 (B.0.2)	$v_p = 2Hf$						
	次数	第1次 (点)	第2次 (点)	第3次 (点)	第 <i>i</i> 次
	<i>H</i>						
	<i>f</i>						
	v_p						
构件的混凝土表面波速值 (m/s):							
测试位置示意图:							

测试:

记录:

第 页 共 页

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，可采用“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”。

中华人民共和国行业标准

冲击回波法检测混凝土缺陷技术规程

JGJ/T 411 - 2017

条文说明

编制说明

《冲击回波法检测混凝土缺陷技术规程》JGJ/T 411 - 2017, 经住房和城乡建设部 2017 年 5 月 18 日以第 1560 号公告批准、发布。

本规程编制过程中, 编制组进行了广泛的调研, 开展了大量的试验研究、结合了不断总结的工程实践经验, 吸收了国内外的有关成果, 取得了冲击回波法检测混凝土缺陷的重要技术方法及参数。

为便于广大工程设计、施工、监理、检测、咨询、科研、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, 《冲击回波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, 对条文规定的目的、依据、注意事项等进行了说明。但是, 本条文说明不具备与规程正文同等的法律效力, 仅供使用者作为理解和把握本规程规定的参考。

目 次

1 总则	20
3 冲击回波仪	24
3.1 技术要求	24
3.2 校准	25
4 现场检测及结果判定	27
4.1 一般规定	27
4.2 混凝土构件厚度及内部缺陷检测及结果判定	28
4.3 有粘结后张法预应力孔道灌浆缺陷检测及结果判定	33
4.4 隧道衬砌背后注浆缺陷检测及结果判定	36
4.5 混凝土结合面质量检测及结果判定	38
附录 A 冲击回波仪校准方法	40
附录 B 混凝土表观波速测试	41

1 总 则

1.0.1、1.0.2 本规程所指的冲击回波法，是通过瞬时力学冲击产生瞬时应力波，应力波在结构中传播，当遇到缺陷或界面时被反射，通过冲击面与缺陷及界面间的多重反射，引起瞬时共振状态，识别并能确定结构是否完好无损或确定缺陷位置的方法；适用于如板、墙类等构件。冲击回波测试系统检测混凝土构件示意图如图 1 所示。

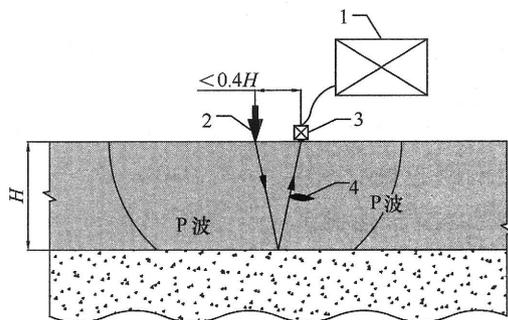


图 1 冲击回波测试系统检测混凝土构件示意图

1—数据采集分析系统；2—冲击点；3—传感器；4—缺陷位置

冲击回波法检测混凝土构件的厚度、不密实度及空洞是根据在混凝土表面利用一个短时的机械冲击激发低频冲击弹性波，冲击弹性波传播到结构内部，被缺陷表面或构件底面反射回来。因此，冲击弹性波在构件表面、内部缺陷表面或底面边界之间来回反射产生瞬态共振，其共振频率能在振幅谱（通过快速傅立叶变换，从波形中得出的频率与对应振幅的关系图）中辨别出，用于确定内部缺陷的深度和构件的厚度。冲击回波法检测混凝土内部缺陷的原理示意图如图 2 所示。冲击回波法适用于检测界面声阻

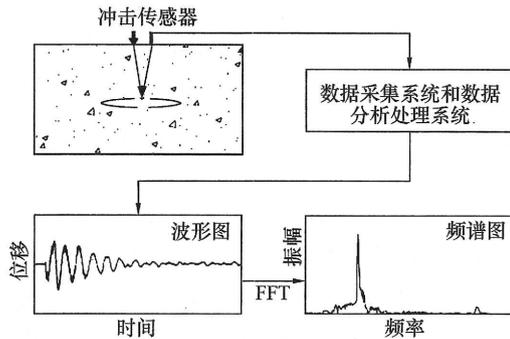


图 2 冲击回波法检测混凝土内部缺陷的原理示意图

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，而陶粒混凝土、加气混凝土等轻质混凝土构件则不适用于采用冲击回波法；同时，机械振动和高振幅电噪声会对传入数据采集系统造成检测结果的误判，故在采用冲击回波法进行检测时，周围环境不应有机械振动和高振幅电噪声。

本规程所指内部缺陷为混凝土结构的空洞、不密实情况；预应力构件孔道内的灌浆不密实情况；隧道衬砌背后脱空、注浆不密实情况及混凝土结合面空鼓缺陷。

随着混凝土强度等级的提高，表观波速在混凝土中的传播值会升高，相应的冲击弹性波传播、反射的速度会相应增大，频率也相应增大，因此测得的混凝土厚度基本一致，且大量文献及本规程编制组试验证明混凝土的强度对检测结果影响不大，只要混凝土构件与其他介质界面声阻抗有足够明显的差别，能够产生可测得的反射波即可，因此，本规程未规定被检构件混凝土的抗压强度。

编制组通过采用冲击回波法对厚度 200mm~1200mm 的试件进行测试，测试结果表明：冲击回波法对厚度 200mm~1000mm 的试件测厚均能较好适应，特别适用于板厚为 200mm~600mm 的薄板测厚。对于更厚一些的构件，由于混凝土为非匀质材料，内部存在着固有的微型孔洞或缝隙，会引起冲击能量的快速衰减，

测试时需要较大直径的钢球以较大能量冲击，表面波（R波）的存在与较大振动带来的附加影响会导致信号采集困难，降低振幅谱分析的准确性，引起厚度实测值与实际设计值的偏差较大。

一般情况下，从小直径（小于25mm）钢筋处反射回来的应力波在振幅谱中不会产生明显峰值。但是，大直径（不小于25mm）的钢筋，会出现从钢筋处反射回来的冲击弹性波将在振幅谱中产生峰值，条件允许下宜避开钢筋进行检测，可采用钢筋探测仪器或查阅图纸确定其位置。同时，试验证明当冲击接触时间适当增大时，振幅谱中钢筋的影响将减小甚至难以辨别，所以可考虑采取加大冲击接触时间的方法来避开普通钢筋的影响。

冲击回波法的原理本质上是通过竖向回波特性计算被测物体的厚度。但是事实上由于冲击弹性波是一种体波，波前是以球面的形式向外扩散。当冲击点靠近弹性体的边界时，边界的回波会影响构件检测对应面的回波特性，造成测试的误判。构件本身存在一定的边界，构件与构件连接处附近都会产生边界影响，为了消除边界的影响，需要在测试的时候回避这类边界影响区域，距离边界相应的距离。

规程编制组经过测试，在边界影响区域外（受检构件的检测区域外缘距构件的变截面或侧表面的最小距离不宜小于预估最大测深），可以获得比较稳定的厚度测试结果的效果，测试结果典型图例见图3，而在边界影响区域内，所测构件的测试结果普遍偏大，测试结果典型图例见图4，测试结果存在误判可能。

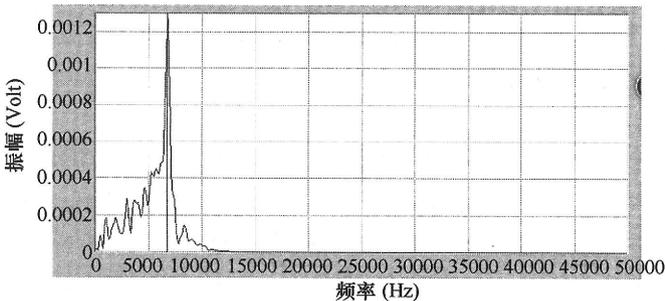


图3 边界影响区域外的测试结果

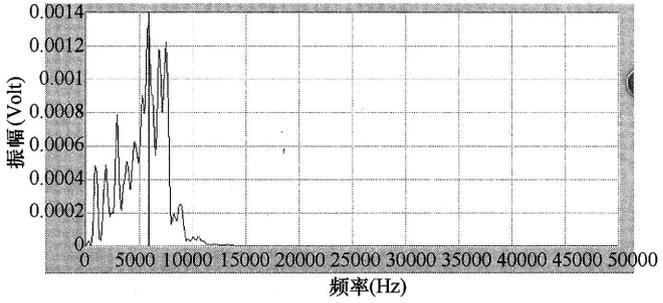


图 4 边界影响区域内的测试结果

3 冲击回波仪

3.1 技术要求

3.1.1 单点式冲击回波仪为单点冲击、单点接收回波信号。扫描式冲击回波仪为冲击器与接收传感器一体化设计，滚动扫描冲击、连续接收回波信号。

单点式冲击回波仪适用于精确测试和特殊位置测试，该方法对测试面平整度要求较低，使用灵活。扫描式冲击回波仪具有滚动式扫描测试探头，扫描探头安装有可调冲击频率的螺线管电磁自动敲击振动器和轮式接收传感器，可沿直线以固定间隔进行快速测试，适用于对大面积结构构件进行检测，测试效率高。

3.1.2 为减少人为因素对测试结果的影响，冲击方式可以根据接收装置配置不同尺寸的弹击锤，宜为 3mm~25mm 直径的钢质小球。当接收信号较弱时，应更换为较大直径的钢质小球。

电缆应具有屏蔽层，以减小电噪声。冲击回波仪由冲击器、接收传感器、数据采集仪、分析软件、连接电缆和接头组成。

1 单点式冲击回波仪的冲击器多为一系列不同直径的钢质球型锤头，检测机构可根据检测部位厚薄选用合适的冲击器，且在检测前应进行验证。扫描式冲击回波仪的扫描探头配有电驱动的螺线管冲击器，触发后弹击混凝土构件表面，其冲击能量和冲击持续时间可调。冲击回波仪的冲击器的正确选择对于检测的效果很重要，试验时应根据构件的厚度及具体的回波信号来选择冲击器以确保能够传送足够的能量到被测结构，进而容易得到单一主峰的频率幅值谱。

冲击器应根据检测构件厚度的不同，激发不同频率的脉冲。冲击器的冲击方向以及冲击能量对测试信号的品质有很大的影响，设计良好的冲击装置能提高测试效果及减少人为误差。

2 接收传感器为接收表面法向位移、加速度等振动信号的宽频带传感器，必须有合适的灵敏度，能够探测到冲击产生的纵波沿表面传播引起的微小变形。同时，还应有合适的频响范围，以减少振动信号的测试失真。扫描式冲击回波系统的接收传感器是按一定间距均布在滚动轮上，以实现连续冲击接收的功能。

3 传感器输出的信号需经过放大后做后续的处理分析。相关参数（如频率范围、增益等）需要与传感器、数据采集卡以及测试信号的特性相匹配。

4 数据采集系统用于采集、记录、处理传感器的输出信号，是配有双通道或者多通道数据采集卡的便携式电脑，或者是便携式双通道或者多通道波形分析仪。该系统中，一个通道可作为触发通道触发信号，另外的通道可作为接收通道。数据采集仪的电压范围和电压分辨率应该与传感器的灵敏度相匹配，以确保能准确测量纵波的到达时间以及幅值。

5 采集分析软件实时显示传感器输出时间域波形，通过FFT快速傅立叶转换把波形从时域转换为频域，在幅值（频）谱中，通过选择厚度对应的主频值，计算得出厚度值。

连接接头质量拆装宜容易，能保证电缆紧密连接采集仪及冲击接收器，电缆具有屏蔽层以减小电噪声对传感器输出信号的干扰。

3.1.3 冲击回波仪由于电子元器件众多，应避免在低温及高温环境下使用，工作温度范围宜在 $0^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 。

3.2 校 准

3.2.1 检测机构可制作一定强度等级的密实钢筋混凝土板块且预埋缺陷作为校准扫描式冲击回波系统的标准块，以该标准块进行每年的仪器校准和平常现场检测前后作为验证仪器是否运行稳定的依据。可参考本规程给出的方法进行自校准。

对冲击回波仪进行校准或自校准是为保证其在正常状态下进行检测，仪器的标准状态是统一仪器性能的基础，是冲击回波检

测的关键所在，只有使冲击回波系统处于标准状态，才能保证检测结果的可靠性，一般情况下仪器校准周期为 1 年。

3.2.3 冲击回波仪的校准或者自校准是对混凝土波速的检验校准。可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性。

4 现场检测及结果判定

4.1 一般规定

4.1.1 检测前的准备工作是为了更好完成检测及后期的数据分析与判定。

4.1.2 调查和收集相关资料在前期的准备工作中是非常重要的，是为了综合分析产生质量问题的原因及为编制检测方案提供依据，有助于检测过程的实施，同时有利于综合分析测试结果。

4.1.3 检测方案应根据检测的目的、前期的调查资料来制定。

4.1.5 反映混凝土质量的测试参数及冲击回波响应特征容易受混凝土表面状态及内部钢筋分布的影响。为了保证测试结果的准确性，检测数据的真实性，必须避免表面状况对检测的影响，应磨平并清除残留的粉末或碎屑，保证混凝土的清洁与平整性。

4.1.6 根据冲击回波法的基本原理，该方法受各影响因素及人员经验主观性的影响较大，故而有一定的局限性，因此当结果产生异议的时候，建议采用钻芯这种较为直接的取样方法进行验证。

对于预应力孔道构件灌浆缺陷的检测，由于孔道灌浆状态及界面方位的影响（如注浆不密实情况下，注浆界面不可能完全垂直于测试表面）在注浆不密实与未注浆的判定中，各点的测试结果会有一定的差距。应在检测出有缺陷的地方，重复测试且加密测试，再进行具体判定。

其他方法有：局部破损、超声法、雷达法等。

4.1.7 在检测不同强度或不同配合比混凝土前，进行混凝土表面观波速测试。

4.1.9 为保证传感器与混凝土测点表面紧贴，根据传感器与混凝土表面紧贴情况可采用耦合剂粘结。使用耦合剂可以使传感器与混凝土紧密结合在一起，传感器能准确记录混凝土质点的振

动。因此在实际测试时，传感器与混凝土之间的耦合剂应当尽量薄。耦合剂同时有一定的滤波作用，选择耦合剂时不宜选用有很强滤波作用的材料作为耦合剂。传感器和混凝土之间是否使用耦合剂主要根据传感器的类型和工作原理确定。

4.1.10 扫描仪的冲击器和接收器应与测试面接触良好，而且使其一直滚动。如果一个或者多个轮脱离表面，或者压力过小，测得的信号都可能因过小而失真。

4.1.11 若判定为无效波段，应及时检查混凝土表面、仪器等影响因素是否满足本规程的相关要求，之后再次进行测试，直到获取有效波段及振幅谱图。

4.2 混凝土构件厚度及内部缺陷检测及结果判定

4.2.1 影响冲击回波法探测缺陷限值的主要因素有：缺陷的类型和方位、被测缺陷的深度、冲击的接触时间（有效冲击弹性波的频率）等。

平行于激振面的空洞和连续性缺陷较容易被检出。对于蜂窝等不连续缺陷，检测精度会有所降低。

当混凝土-空气界面与检测面平行时，空隙能较容易地被检测到；当这个界面与构件表面垂直时，在某些情况下的检测结果会不理想。

研究学者 Sansalone 和 Streett 通过分析和实验室研究发现一般缺陷截面尺寸大于等于 $1/4$ 结构厚度时，可以发现缺陷的存在。如果平面空隙的横向尺寸超过其埋深的 $1/3$ ，缺陷的深度就能检测出来，其振幅谱图将会出现两个峰值：一个是向低频漂移了的构件厚度对应的频率波峰，另一个是缺陷深度频率波峰（表 1）。如果横向尺寸超过埋深的 1.5 倍，则缺陷就相当于一个无限界面，所测到的响应结果是：板的厚度频率与缺陷埋深频率一样，故可以检出缺陷，但无法检出底板（即检测面的对应面）反射对应的频率。同时，缺陷检测的最小尺寸约为混凝土材料声波波长的 $1/2$ 。冲击接触时间是指用来产生应力波的冲击器与测试

表面接触的时间。实际测试过程中，冲击接触时间取决于冲击器的类型和冲击点混凝土的条件。光滑、坚硬的表面冲击接触时间短于粗糙表面的冲击持续时间。根据对应的表面波到达的部分波形，获得一个冲击接触时间的近似测试。一个波形中部分表面波和近似的冲击接触时间的实例如图 5 所示。

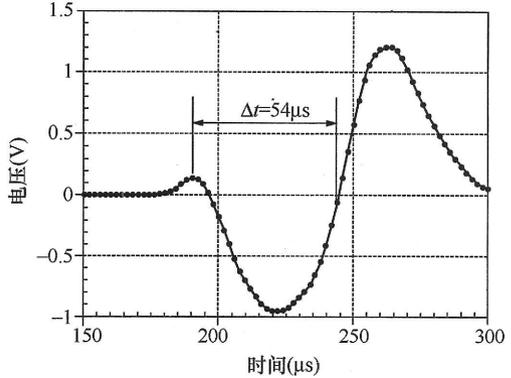


图 5 一个波形中的部分表面波的展开图（显示出表面波信号的宽度作为一个近似的冲击接触时间）

4.2.2 冲击回波法测试结构构件内部缺陷是基于阻抗变化测试的。

4.2.3~4.2.5 测试系统具备厚度-距离图分析功能，可显示厚度值随测试距离的明显变化。

参考本规程公式（4.2.3）确定与厚度值 T 对应的频域曲线主频 f (Hz)。在未知构件实际厚度的情况下，按本规程 4.2.3 条款确定振幅谱图中构件厚度对应的主频 f (Hz)。

检测接收到的波形以及对应的振幅谱图。在对波形的有效性进行评价的过程中，检查对应的表面波波形部分是否有正确的形状，以及对应构件的边界多次反射的表面波周期振荡。有效波形的幅值有单一的主峰值频率值，其对应构件的厚度值。理想状态下混凝土板测试的有效时间域波形及其对应的振幅谱示图如图 6 所示，采样间隔为 $4\mu\text{s}$ ，完整的波形（未显示）中包含的点数为 2048 个。

如果已获得有效的波形和幅值谱，对其进行存储。为证实结果的准确性，重复进行测试。如果结果是可重复的和有效的，再进行下一点测试。如果波形和振幅谱图是无效的，检查测试表面的灰尘和碎片以及传感器与测试面之间是否正确耦合。同时，也

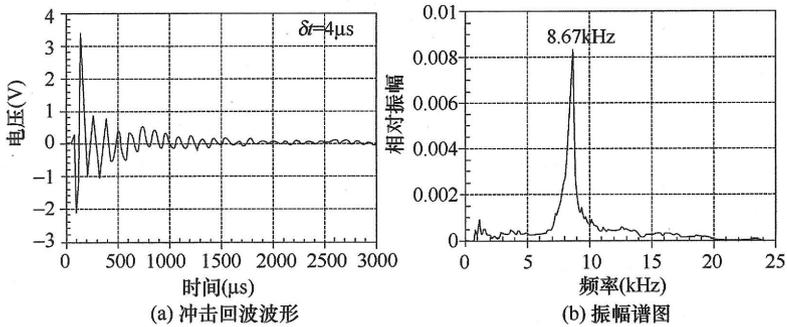


图 6 250mm 厚混凝土板的有效冲击回波波形和振幅谱示图

要检查冲击点是否平整、有无灰尘，以及冲击器的尺寸是否合适。重复测试，直到获得有效的波形和幅值谱。无效的冲击回波测试结果示图如图 7 所示，波形中缺少周期性振荡，振幅谱图不包含有单一主频率峰值。

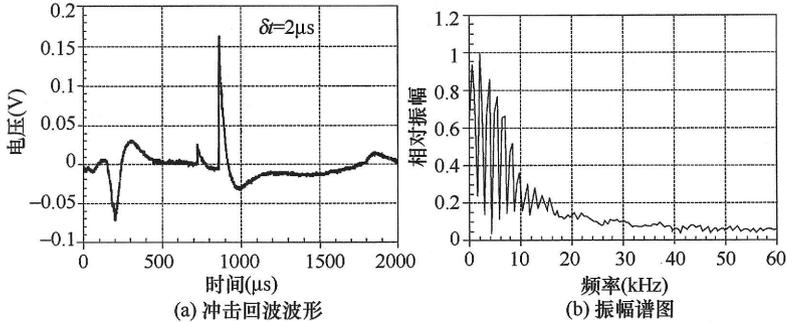


图 7 无效的冲击回波检测示图

(波形未显示周期性振荡，幅值谱中无单一主频率峰值)

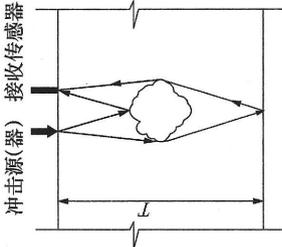
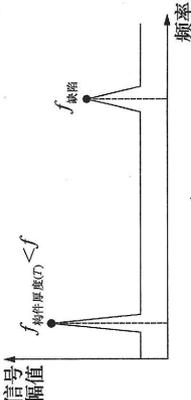
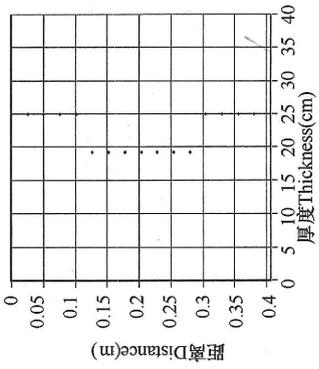
当内部存在缺陷时，往往不是孤立的一个点，所以，单点判定易出现漏判、误判，为提高缺陷范围判定的准确性，对异常数据的判别、缺陷可疑点的判定及概率保证方法参考《超声法检测混凝土缺陷技术规程》CECS 21：2000。同时，宜进行网格状布点测试，对图像进行立体分析。

混凝土构件内部缺陷的判断与推定如表 1 所示。

表 1 混凝土构件内部缺陷的判断与推定示意图

测试 结果示意图	构件示意图	频率—信号幅值曲线/ 振幅谱示意图	厚度—距离示意图
内部无缺陷			
内部小缺陷 (窝或空洞 尺寸较小)			

续表 1

测试 结果示意图	构件示意图	频率—信号幅值曲线/ 振幅谱示意图	厚度-距离示意图
<p>内部存在 较大空洞</p>			

注：本示意图表中缺陷的横向尺寸大于缺陷埋深的 0.3 倍且小于 1.5 倍。

4.3 有粘结后张法预应力孔道灌浆缺陷检测及结果判定

4.3.1 不适用于孔道上方有缺陷或混凝土与孔道外壁粘结不良或空鼓情况下的预应力孔道注浆缺陷检测。预应力孔道的大小、混凝土板的截面形式（厚宽比）、孔道埋深、孔道间间距、预应力布置情况及波纹管材质等因素都会对冲击回波法检测孔道内缺陷情况产生影响。宜反复测试，综合分析进行判定。

塑料预应力孔道对冲击弹性波的阻碍超过金属孔道，会使得冲击弹性波更趋向绕行塑料孔道到达底板，从而让塑料孔道板的厚度频率较金属孔道板的厚度频率向低频发生更大漂移，试验验证含塑料孔道板的波峰频率值均小于含相同尺寸金属孔道的板的相应波峰频率值。但一般预应力孔道的壁厚为 1mm ~ 2mm，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孔道壁厚做出说明。

孔道上方有缺陷，或混凝土与孔道外壁粘结不好而空鼓时，都会造成冲击弹性波在缺陷或空鼓上方反射，从而无法正确地对孔道和孔道内部进行检测，不能判断其内部灌浆情况。

总之，需要根据显现的不同波形反复测试，必要的时候结合三维图具体分析进行判定。

若测线布置沿预应力孔道，则检测前，宜采用雷达检测法等其他非破损检测方法进行预应力孔道的定位。为提高冲击回波检测的重复性和可靠性，同时减少精确定位孔道的要求，测线或测点宜采用沿垂直孔道方向进行检测。

4.3.3 对于未安装预应力筋及灌浆前空孔道位置的检测，不适用于孔道埋深过深或过浅条件下进行。法国的 Odile Abraham 和 Philippe Cote 试验证明：当孔道的混凝土保护层厚度小于或等于 3 倍的孔道直径时，孔道才能被检测到，因此当孔道埋深大于 3 倍的管径时，无法得到孔道的深度频率；当孔道埋深小或是孔道直径较大而埋深不大时，孔道顶部的混凝土覆盖层厚度就会很薄，这样薄的孔道混凝土保护层厚度所对应的孔道深度频率就非

常高，冲击回波法无法得到浅埋孔道的频率；若空孔道位于厚度方向的中部，即孔道埋深与构件厚度之比为 0.5，当孔道的直径大于 0.2 倍的构件厚度时，厚度频率变化值就会超过 10%，从而就能检测出空孔道的存在。

4.3.4 灌浆料龄期太短，灌浆材料未充分硬化，强度低，会给检测结果带来一定的误差，难以检测灌浆不密实缺陷。

4.3.5、4.3.6 冲击回波法检测预应力预留孔灌浆质量的一般原理，如图 8 所示：

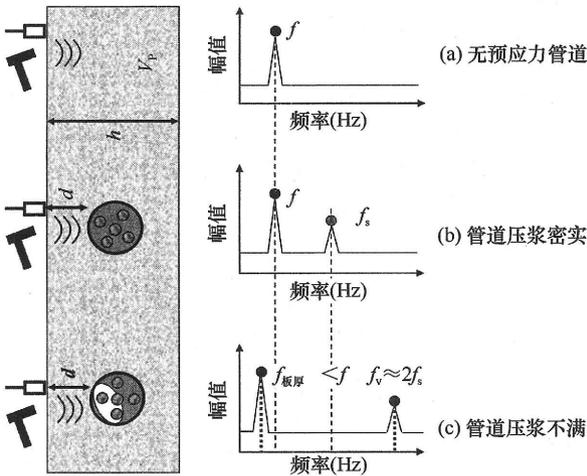


图 8 冲击回波法检测预应力预留孔灌浆质量的一般原理示意图

从混凝土板中无预应力孔道部分、满浆孔道及未压满浆孔道试件采集到的冲击回波信号，会显示出不同的特征。

无预应力孔道部分：这与采用冲击回波法测试混凝土厚度的原理完全一样，由冲击所产生的冲击弹性波首先沿板的厚度方向传播，当遇到对面界面时立即返回。

孔道灌浆密实：当冲击弹性波经过灌浆密实且固化后的孔道时，冲击回波响应对应的振幅谱图中应有一个主要的波峰，即冲击弹性波穿过孔道到达底板，被底板反射后再到达测试面所对应

的频率波峰。冲击弹性波传播的路程和所需的时间与无预应力孔道的板基本相同。由于现场实际情况，检测结果会出现以下现象：

(1) 水泥浆中的冲击弹性波波速比混凝土中的要小，而钢束中的冲击弹性波波速比混凝土中的要大。因此，冲击回波仪所测得的构件厚度值会受到孔道内钢束及水泥浆的多少、布置情况等的影响。冲击弹性波在穿行孔道的路径中，若通过钢束的比例较大，那么冲击回波仪所测得的构件厚度值就会偏小；反之，如果较多的是通过水泥浆，冲击回波仪所测得的构件厚度值就偏大。

(2) 如果位于孔道侧面的钢束能紧贴为一个整体，就几乎可以在孔道侧面形成上下贯穿的钢层，冲击弹性波便能沿钢束快速传播通过孔道，因此构件厚度对应的频率偏大，对应计算得出的构件厚度也就偏小，反之亦然。

(3) 由于很多因素，振幅谱图中不会只有对应构件厚度频率的单个波峰。如钢束紧贴成一个整体，形成有效的冲击弹性波反射面，那么冲击回波响应中就会包含钢束信息，振幅谱图中就会有对应钢束的高频波峰。

孔道灌浆填充不密实、孔道未灌浆：当冲击弹性波经过未灌浆或存在灌浆不密实的孔道时，冲击回波响应对应的振幅谱图中有两个主要的波峰：一个是冲击弹性波到达波纹管或者灌浆缺陷处反射回测试面所对应的频率波峰；另一个是冲击弹性波绕行空孔道到达底板，被底板反射后再绕行相同的路程后到达测试面所对应的频率波峰，总路程显然大于两倍构件厚度，时间延长，即所得到的构件厚度频率也就会向低频发生漂移。

判断是否有灌浆缺陷时，要注意判断高频峰是否为伪峰。当测试得到的振幅谱中存在两个明显的峰值，而且有一个峰值的频率恰好是另一个峰值频率的 2 倍时，该峰值可能是由于振幅谱分析时产生的伪峰（即所谓的“倍频效应”）。此时，可改变激振频率进行重测或采用其他的振幅谱分析方法（如采用基于相关分析为基础的振幅谱分析方法）。

对于灌浆不密实时，会出现孔道内空洞与灌浆界面处于非平行状态，会在孔道内同时形成混凝土/空气和混凝土/钢反射界面，冲击弹性波不但能从板底反射回测试面，还能被孔道内两种界面反射，因此在振幅谱图中，就会出现多重波峰，需要反复测试进行分析。

根据上述理论可以综合判定孔道灌浆密实性。

测得的构件厚度频率峰值 f 由于冲击弹性波的绕射路径有所增加而向低频明显漂移，并因遇到空洞截面发生反射而出现另一个高频峰值 f_v ，该高频峰值基本等于 $2f_s$ ，此时，可判断孔道内灌浆不密实。

当缺陷横向尺寸超过埋深的 1.5 倍时，对应的构件厚度频率峰值会向高频漂移。

4.4 隧道衬砌背后注浆缺陷检测及结果判定

4.4.1、4.4.2 检测隧道背后注浆密实性前，应对隧道管片、现浇混凝土衬砌质量进行检测。检测前宜确认隧道管片、混凝土衬砌层的实际厚度，不能直接测量的情况下，可按本规程第 4.2.3 条通过现场测试计算厚度，再进行背后注浆情况的检测。

可以根据注浆层、衬砌的厚度、弹性模量参数计算出反射率与入射频率间的关系。从中选取空鼓面反射率与注浆层反射率比值最大的频率为理想激振频率。另一方面，弹性波的激振频率取决于激振锤的直径和质量。计算时可根据测试对象的详细状况包括管片、衬砌的厚度及弹性模量，注浆材料的弹性模量等。

管片的弹性模量一般较高，而注浆材料的弹性模量一般较低。因此，无论是否空鼓或有缺陷，激振的弹性波信号在注浆界面上均会产生反射，给区别注浆不密实区域和密实区域带来困难。然而，不同频率的弹性波对缺陷的反射和界面的反射比例是不同的，所以通过反射率计算可选取最合适的激振方式，这样就能较为容易地区分开两种状态。

4.4.3、4.4.4 为了提高检测的分辨力和稳定性，频谱分析时，

除采用 FFT 以外，还可选用 MEM（最大熵法）等方法进行分析以提高对频谱位置的分辨率。以下图形是对管片与注浆层间的检测结果例图。图 9 是检测区域不同深度的 MEM 频谱分析幅值例图（横坐标是时间，纵坐标是距离），可以看出在局部存在灌浆缺陷。图 10 是对管片施加水平推力使其与注浆层间发生滑移后的检测区域不同深度的 MEM 频谱分析幅值例图，可以看出在分界面上有明显的反射。图 11 是检测区域平面内的相对振幅平面成像例图。图中有编号的部分是空鼓可能性较大的位置。

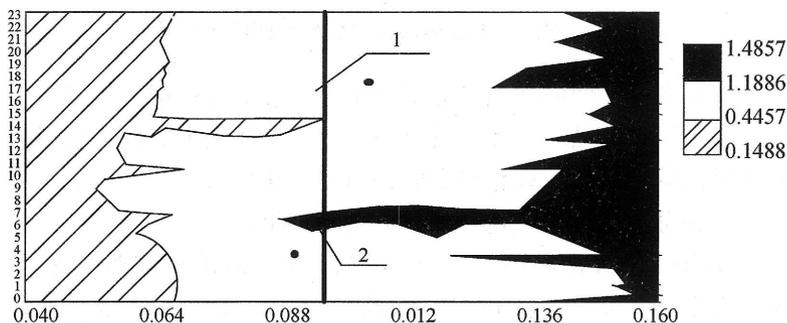


图 9 检测区域不同深度的相对振幅（时间——距离）示意图
1—管片底部反射时间位置；2—局部缺陷

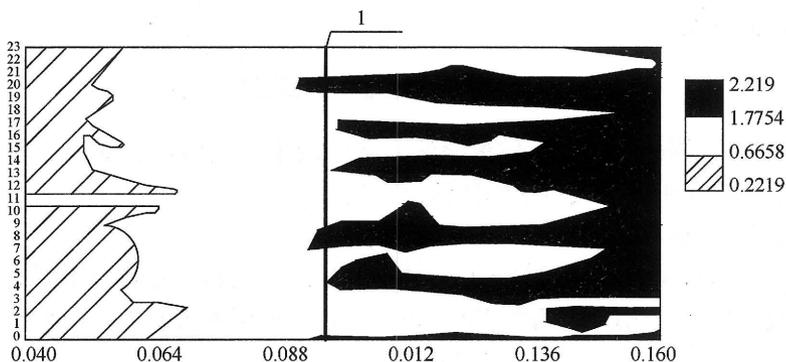


图 10 滑移后检测区域不同深度的相对振幅（时间——距离）示意图
1—注浆层与管片错动

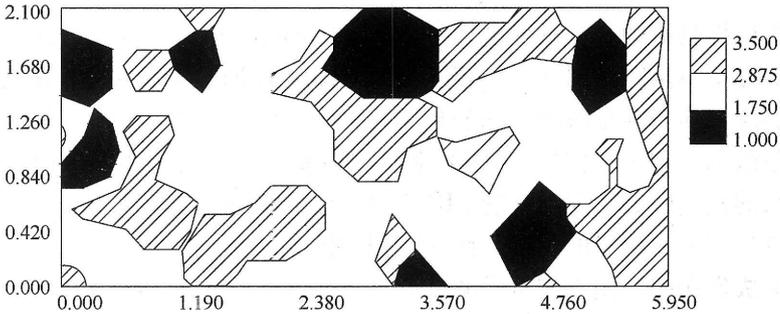


图 11 检测区域平面内的相对振幅平面成像示意图

考虑到冲击回波法频谱分析的结果对应的是幅值，且其与反射率间有线性关系，因此，反射率可以用频谱图上对应于反射点的相对振幅来代替。该相对振幅是对归一化信号（即以入射信号振幅为分母进行了归一化）频谱分析的结果。

反射的相对振幅越大，该位置出现空鼓的可能性也就越大。对于判定空鼓的阈值，可以利用对完全脱空和完全密实区域的测试结果进行分析。当相对振幅大于完全脱空时的反射相对振幅时，显然存在明显的缺陷；当小于完全密实时相对振幅时，显然是无缺陷的。而当位于两者之间时，则可认为存在疑似脱空。

4.5 混凝土结合面质量检测及结果判定

4.5.1 混凝土结合面质量检测应在混凝土上层厚度已知或保证上部混凝土层无质量缺陷的情况下进行。

4.5.3 典型时程图见图 12、图 13。

当混凝土结合面空鼓时，冲击弹性波不能够穿越混凝土界面继续传递，到达界面时即进行边界反射，采用冲击回波法所得到的深度值为上层混凝土结构的厚度。

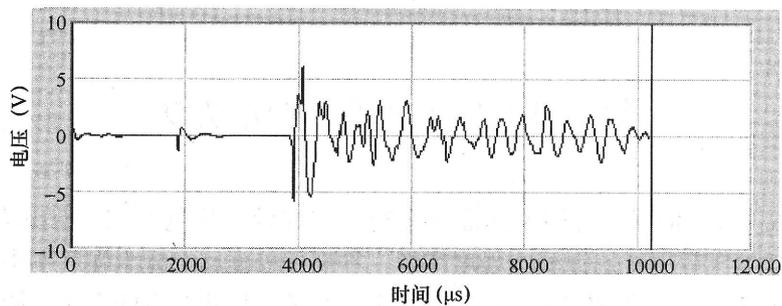


图 12 典型结合面空鼓冲击回波时程图

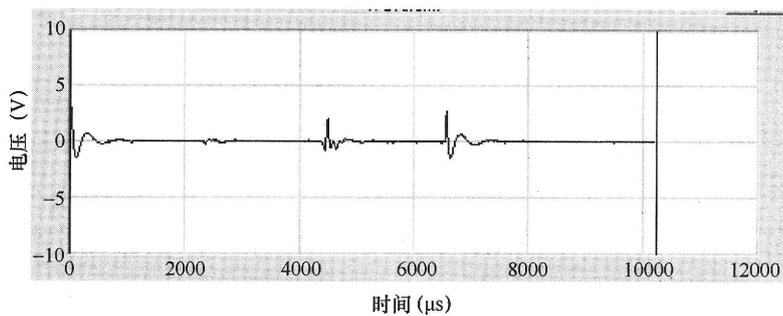


图 13 典型结合面完好冲击回波时程图

附录 A 冲击回波仪校准方法

A.0.1 依据现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010，建筑工程的常用混凝土强度范围，本规程校准用混凝土强度不小于 20MPa，按照 ASTM 1383 第 3.2.2 条对板状构件的定义：侧向尺寸为厚度的 6 倍。可采用超声法检测校准试件的内部缺陷。

附录 B 混凝土表观波速测试

B.0.1 本条参考《Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness Concrete Plates Using the Impact-Echo Method》ASTM 1383 - 2004，传感器与冲击源的间距可根据仪器的不同进行多次试验确定。保证纵波到达第一个传感器前，就有足够的时间同 S 波和 R 波分离开，但同时要保证纵波到达第二个传感器时所引起的位移振幅要足够强，以便容易地识别其波至时间，测量精度取决于采样间隔和距离 L 。距离 L 越大，测量精度越高；但由于波的衰减，如果 L 太大，会导致质点的位移太小难于探测。大量文献及试验表明最佳距离 L 为 0.300m，这个距离同时满足测试的精确性和可靠性要求。

冲击回波依赖于波的多次反射在结构单元中激起的瞬时共振产生的频率及转换形成的振幅谱是由构件的几何形状和材料（混凝土）中冲击弹性波的波速决定的。每个几何类型单元都有一个特有的响应，同时有不同的与截面几何形态相关的一个系数值，即构件横截面形状系数，该值均可通过试验确定，参考国内外相关研究：板类（长、宽为厚度的 6 倍）可取 0.96，圆柱类可取 0.92，方形梁可取 0.87，长方形梁或柱可取 0.90，空心圆筒类可取 0.96。

纵波速度测试的精度取决于传感器的间距、时间差和数字化采样速度，故该方法在测试过程中要求保持传感器的高度稳定、无干扰。

如果传感器采集到的波形有效，则储存数据，用于后续分析。如果不能确定纵波的到达时间，在相同的位置重复进行测试或是移动到其他的位置，确定传感器和混凝土之间达到更好的耦合后，再进行测试。通过方法一（B.0.1）获得波形的实例如图

14 所示，用箭头标注点的位置，在波形中，对应于纵波的到达，说明波形的有效段开始的位置。通过放大波形，识别纵波的到达。计算得到的纵波波速为 $(0.300/76) \times 106 \times 0.96 = 3789\text{m/s}$ ，作为一个合理值。

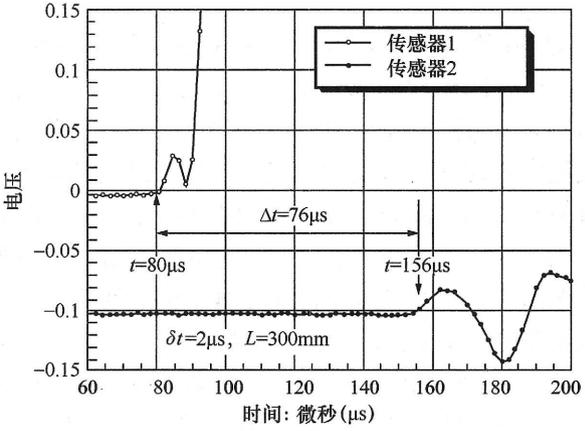


图 14 通过方法一获得波形的实例（仅绘制出波形的早期部分）

时间差 Δt 可按下列方法分析得出：屏幕上显示数据采集系统中两个传感器的波形图，并以相同的时间轴进行绘制。在每个波形中，识别直接的纵波到达时间。可辨认出纵波到达的位置作为第一个点，在该点的位置，电压的改变从基准线值开始。根据纵波到达该点的电压和时间读数，确定每个波形中，纵波到达两个传感器之间的时间差 Δt 。该时间差即为传输时间。波形中，设置自动检测纵波到达，可提供纵波到达之前稳定的波形（不含有噪声）。

B.0.2 用本方法测量纵波速度的误差取决于构件厚度及采样间隔，因此检测区域构件厚度测量的准确度及采样间隔的选取很重要。