

ICS 93.040

CCS P 66

团 体 标 准

T/JSJTQX 26—2022

冲击弹性波法预应力孔道压浆 密实度检测技术规程

Technical specification for testing compactness of prestressed
duct grouting by impact elastic wave method

2022-04-15 发布

2022-05-01 实施

江苏省交通企业协会

发布

目 次

前 言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 符号 3

5 基本要求 4

 5.1 一般规定 4

 5.2 检测频率 4

6 检测仪器 5

 6.1 一般规定 5

 6.2 激振锤 5

 6.3 拾振器 5

 6.4 信号采集及软件系统 5

7 检测准备 6

 7.1 一般规定 6

 7.2 方案和资料准备 6

 7.3 仪器准备 6

 7.4 现场准备 7

8 定性检测 7

 8.1 定性检测、解析方法选择 7

 8.2 仪器安设 7

 8.3 基准波速测试 8

 8.4 基准振幅与频率特征测试 8

 8.5 基准卓越周期及持续时间 9

 8.6 数据采集 9

 8.7 数据分析 10

 8.8 竖向、单端孔道定性检测 11

9 定量检测 12

 9.1 一般规定 12

 9.2 仪器安设 12

 9.3 孔道位置确定 13

9.4	混凝土波速标定	13
9.5	检测和解析方法的选择	13
9.6	数据采集	15
9.7	数据分析	16
10	检测报告	18
10.1	数据储存	18
10.2	报告组成	18
附 录 A	(资料性) 压浆密实度检测现场记录表	20
附 录 B	(资料性) 冲击弹性波法孔道压浆检测方法应用相关说明	22
附 录 C	(资料性) 孔道压浆密实度缺陷处理	24
	参考文献	25
	条文说明	26
1	范围	27
3	术语和定义	27
5	基本要求	29
5.1	一般规定	29
6	检测仪器	29
6.2	激振锤	29
7	检测准备	30
7.4	现场准备	30
8	定性检测	30
8.1	定性检测、解析方法选择	30
8.2	仪器安设	30
8.3	基准波速测试	30
8.4	基准振幅与频率特征测试	32
8.6	数据采集	32
8.7	数据分析	32
9	定量检测	33
9.1	一般规定	33
9.3	孔道位置确定	33
9.4	混凝土波速的标定	34

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020 给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由江苏省交通企业协会提出并归口。

本文件起草单位:江苏省交通工程集团有限公司、常州交通建设管理有限公司、江苏兆信工程项目管理有限公司、四川升拓检测技术有限公司、江苏省交通技师学院、南京工业大学、苏交科集团检测认证有限公司、华设设计集团股份有限公司、南京交通建设管理集团有限公司、江苏森淼工程质量检测有限公司。

本文件主要起草人:陈光林、薛华、薛翔、俞科峰、孙明祥、李瑞民、陈中杰、汤勤、雷松、封明祥、王柳、赵飞、陈先锋、程学文、顾曦辰、欧定福、张远军、宋建强、朱振杰、黄伯太、吴波涛、李晓辉、唐光臣、侯曙光、邢世玲、顾冕、姜云、王磊、李岩、张占宇、张玮、雍骅、陈彦之、刘新新、朱中文、王晖、曹妍、王芮文。

本文件由江苏省交通技师学院教授级高级讲师曹妍、研究员级高级工程师王芮文担任主审。

冲击弹性波法预应力孔道压浆密实度检测技术规程

1 范围

本文件规定了冲击弹性波法测试预应力孔道压浆密实度检测的基本要求、检测仪器、检测准备、定性检测、定量检测、检测报告。

本文件适用于后张法预应力预制和现浇构件孔道压浆密实度无损检测。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

JB/T 6822 压电式加速度传感器

JGJ/T 411 冲击回波法检测混凝土缺陷技术规程

JJG 338 电荷放大器

T/JSJTQX 22—2021 后张法预制构件孔道压浆施工技术规程

3 术语和定义

JGJ/T 411界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

冲击弹性波法 impact elastic wave

根据介质对冲击弹性波传播、反射等特性，在时域或者频域上对信号特征分析，进而检测结构材质、尺寸、内部缺陷等的方法。

3.2

定性检测 qualitative detecting

利用梁体两端锚具外露预应力筋进行冲击弹性波信号激发和接收，通过分析传感器采集的信号在检测对象中传播时能量、频率、波速等特征变化，定性判定桥梁预应力孔道压浆密实度的检测方法。

3.3

定量检测 positioning detecting

通过检测冲击弹性波在预应力孔道处有无反射信号或信号在检测对侧界面反射时间长短，即可判定压浆缺陷范围大小及位置。当孔道压浆存在缺陷时，反射时刻提前或因传播距离增加，时间延长。

3.4

全长波速法（FLPV） full length p-wave velocity method

根据冲击弹性波在孔道中传播速度定性判定预应力孔道压浆是否存在缺陷的解析方法。

3.5

全长衰减法 (FLEA) full length energy attenuation method

根据冲击弹性波在孔道中信号能量传播比定性判定预应力孔道压浆是否存在缺陷的解析方法。

3.6

传递函数法 (PFTF) P-wave frequency transform functions method

根据冲击弹性波在压浆孔道中传播频率变化定性判定预应力孔道压浆是否存在缺陷的解析方法。

3.7

卓越周期和持续时间 excellence cycle and duration

在信号频谱中, 能量及振幅最强的周期称为卓越周期。卓越周期延续的时间, 称为持续时间。

3.8

综合压浆指数 Integrated Filling Index

基于全长波速法、全长衰减法、传递函数法三种解析方法得到的压浆密实度定性综合指标。

3.9

压浆密实度指数 Compactness Index

孔道压浆密实长度与孔道总长之比, 分为检测区段压浆密实度指数和全孔道修正压浆密实度指数。

3.10

冲击回波法 (IE) impact echo method

通过冲击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波速、波形和主频频率等参数变化, 判断混凝土结构厚度或内部缺陷的方法。

3.11

冲击回波等效波速法 (IEEV) impact echo equivalent velocity method

根据冲击弹性波信号绕射和反射特性判断孔道压浆缺陷位置的一种解析方法。

3.12

冲击回波共振偏移法 (IERS) impact echo impact echo resonance shift method

根据冲击弹性波信号在孔道检测面正上方检测的自振周期与压浆密实位置或附近混凝土检测的自振周期的差异性来判断孔道压浆缺陷位置的一种解析方法。

3.13

线性标定 linear calibration

在构件压浆密实孔道或密实混凝土位置, 布置一条与密实度测试线长度和方向一致的测线, 利用该测线处测得的波速、振幅、频率及能量比等数据作为孔道密实度测试的判断基准。

4 符号

下列符号适用于本文件。

A_r ——接收端信号振幅；

A_s ——激振端信号振幅；

D_e ——定量检测时，修正压浆密实度指数；

D_k ——单条孔道各检测区段中，压浆质量较好的连续区段压浆密实度指数；

D ——定量检测时压浆密实度指数，在孔道长度中，压浆密实部分所占比例；

d ——为孔道直径；

F_r ——接收端信号卓越频率；

F_s ——激振端信号卓越频率；

FFT ——快速傅里叶变换；

h ——定量检测部位混凝土厚度（构件厚度）；

I_{TF} ——定性检测时，根据传递函数法 (PFTF) 得到的分项压浆指数；

I_{EA} ——定性检测时，根据全长衰减法 (FLEA) 得到的分项压浆指数；

I_{PV} ——定性检测时，根据全长波速法 (FLPV) 得到的分项压浆指数；

L_0 ——孔道长度基准值，取10m；

$L_{\max}$ ——局部缺陷点偏移的最长路径；

$L_{\min}$ ——局部缺陷点偏移的最短路径；

L_d ——定量检测区间长度（m）；

L ——孔道全长（m）；

MEM ——最大熵法；

N_J ——无缺陷测点数；

N_X ——小范围或局部缺陷测点数；

N_D ——大范围缺陷测点数，取检测区段的1/2，按式7计算；

T ——孔道埋置深度；

N ——定量检测点数；

β ——测点压浆状态，按照表6分级取值，无缺陷：1，小范围或局部缺陷：0.5，大范围缺陷：0；

X ——信号能量传播比。

5 基本要求

5.1 一般规定

5.1.1 冲击弹性波法孔道压浆密实度检测应在压浆材料强度达到80%以上且养护时间宜不少于7d的条件下进行。冬期施工时，孔道压浆检测养护期限宜为14d。如需提前检测，则当测量结果无缺陷时，可出具无缺陷结论，当测量结果有缺陷时，则应等水泥浆强度和时间均达到要求时进行复测。

5.1.2 对构件压浆情况日常抽检及当检测结果作为质量评判时应采用定量检测；当构件不具备定量检测条件，或者仅需要对预应力孔道压浆密实性进行普查时，可采用定性检测；当定性检测中发现有缺陷时，应对缺陷的位置、范围大小以及缺陷所属类型进行定量检测。

5.1.3 对老桥检测，当预应力孔道位置可确定时，应定量检测。当预应力孔道位置不明确时，定量检测结果仅可作为判断参考，不宜作为最终评判依据。

5.1.4 定量检测时，构件厚度不大于60cm单根孔道，敲击端对侧面信号反射明显，应采用IEEV法分析；测试构件厚度大于60cm，或者敲击端对侧面信号反射不明显，或冲击弹性波传播方向上有多根孔道并行排列，或孔道埋置深度不大于20cm孔道，宜采用IERS法分析。

5.1.5 冲击弹性波检测宜在预制构件两端未封锚且钢绞线露出的状态下进行。

5.2 检测频率

5.2.1 应按表1的频率采用冲击弹性波法进行构件孔道压浆密实度检测。

表1 冲击弹性波法孔道压浆密实度最低检测频率和抽检方法

项目	施工单位	监理单位	建设单位
本标段预制构件总数	按20%频率抽取预制构件。	按5%频率抽取预制构件。	按3%频率抽取预制构件。
现浇构件 (包括挂篮施工)	按现浇节段数的100%频率检测。	按现浇节段数的30%且不少于1节段频率检测。	按现浇节段数的10%且不少于1节段频率检测。
竖直孔道	按竖直孔道数量的40%频率检测，且与监理、建设单位不重复检测。	按竖直孔道数量的20%频率检测，且与施工、建设单位不重复检测。	按竖直孔道数量的10%频率检测，且与施工、监理单位不重复检测。
负弯矩孔道	按负弯矩孔道数量的60%频率检测，且与监理、建设单位不重复检测。	按竖直孔道数量的30%频率检测，且与施工、建设单位不重复检测。	按竖直孔道数量的10%频率检测，且与施工、监理单位不重复检测。
首件预制构件	所有孔道全部检测。	旁站见证检测。	旁站见证检测。
被检构件	每个构件抽检的孔道数量不应少于构件孔道总数的50%，宜选择构件中较长的孔道以及水平孔道。	每个构件抽检孔道数量不应少于构件孔道总数的40%，宜选择构件中较长孔道以及水平孔道。	每个构件抽检孔道数量不应少于构件孔道总数的20%，宜选择构件中较长孔道以及水平孔道。
当抽检的孔道中有50%以上的孔道有缺陷时，应对该班次压浆的孔道全部检测。			

5.2.2 施工中抽检压浆浆液各项指标不符合要求或者对浆液质量指标有怀疑时，应检查压浆密实度。

5.2.3 孔道压浆试件强度不符合要求或无法采用试件判断强度时，应检查压浆密实度，并应抽查局部浆体的渗水、吸水情况。

6 检测仪器

6.1 一般规定

- 6.1.1 仪器标定幅值非线性误差应在±5%范围内，电信号测量相对误差应在±1.0%范围内。
- 6.1.2 仪器的数模转换（A/D）卡通道应不少于2个，采样分辨率应不低于16bit，最大采样频率应不小于500kHz。应配备广域振动信号拾取装置提高信号拾取稳定性。
- 6.1.3 传感器应采用压电式加速度传感器，频响范围应为0.1~20kHz，符合JB/T 6822的规定。
- 6.1.4 电荷放大器最大增益倍率宜不小于40Bd，且增益倍率可调，符合JJG 338的规定。
- 6.1.5 检测仪器应能在0~45℃温度环境内使用，使用场所应无强机械振动和强电磁场。
- 6.1.6 仪器在第一次启用前、长期放置后使用、使用期间信号不稳定或维修后等，需要进行计量校准，正常使用期间，校准周期不超过1年。

6.2 激振锤

- 6.2.1 激振锤应能产生低频率、高能量弹性波。
- 6.2.2 定量检测应根据构件厚度、激振频率等特征，按表2选择适宜的激振锤。采用IEEV数据解析时，激振锤、传感器以及激振力度等相关参数需要事先组合比选，应首选最优测试组合，当需要采用定量方法验证定性检测结果或者对孔道定量复测时使用次优组合。

表2 IEEV法检测组合表

对象壁厚 (cm)	采样数据数量 (个)	最优组合		次优组合		激振力度
		激振锤	传感器/支架	激振锤	传感器/支架	
<15	4096	PB_10	S21C	PB_17	S21C	较轻
15~30	8192	PB_17	S21C	PB_10	S21C	较轻
30~60	8192	PB_17	S21C	PB_30	S21C	适中
>60	8192	PB_30	S31SC	PB_50	S31SC	适中

- 6.2.3 当孔道长度超过50m时，激振锤应采用PB_60重型锤。
- 6.2.4 当用于现场基准波速测试时，激振锤应采用PB_6、PB_10轻型锤。

6.3 拾振器

- 6.3.1 加速度传感器频带宽度宜为0.1~20kHz。
- 6.3.2 耦合装置宜采用带侧壁阻尼磁性卡座或机械装置，阻尼比宜为0.2~0.5。

6.4 信号采集及软件系统

- 6.4.1 信号增益宜采用电荷放大器，且增益倍率宜为1~100倍，放大器频带应大于传感器有效频响范

围。

6.4.2 检测设备软件应适合 2 个以上通道数据采集，具有自检和预触发功能。同时，还应具有滤波降噪功能、频响补偿功能、图像处理与输出功能及 FFT、MEM 频谱分析功能。

7 检测准备

7.1 一般规定

7.1.1 检测开始前，应收集和了解所测构件的设计图纸，了解钢筋、预应力筋、预应力孔道位置、走向和数量等基本信息。

7.1.2 应了解混凝土强度、浆液强度、现场施工记录、养生情况及施工异常情况。

7.1.3 应准备检测相关的规定、规程、图纸、文件、施工记录等文件，并准备检测记录表格。

7.2 方案和资料准备

7.2.1 孔道压浆密实度检测前应制定检测方案。检测方案应包括检测构件和数量、检测现场情况、检测依据、检测方法和判定标准、检测人员和设备、检测计划等。

7.2.2 应根据检测目的不同，确定孔道压浆密实度定性检测或定量检测方式。

7.2.3 定性检测按如下程序进行：

- 1) 制订方案；
- 2) 人员、仪器、检测现场准备；
- 3) 安设传感器；
- 4) 施测；
- 5) 数据解析；
- 6) 出具报告。

7.2.4 定量检测按如下程序进行：

- 1) 制订方案；
- 2) 人员、仪器、检测现场准备；
- 3) 定量测试位置选定、安设传感器；
- 4) 施测；
- 5) 数据解析；
- 6) 对有疑问的位置进行复测；
- 7) 对压浆质量进行评价、出具报告。

7.3 仪器准备

7.3.1 在使用前，应全面检查仪器，包括外观是否完好、电量是否充足、配件是否齐全等，且应通电试运行以检查仪器是否可用。

7.3.2 应做好仪器出库入库台帐记录。

7.4 现场准备

- 7.4.1 应根据现场条件搭设脚手架，脚手架应安全可靠，利于操作。
- 7.4.2 检测人员应佩戴安全帽，着工作服和绝缘鞋，检测作业平台高度超过 2m 时还应佩戴安全带。
- 7.4.3 施测前，应描述构件外观情况，并做好记录。如构件是否有漏浆、漏振、蜂窝、露筋等病害，锚具、夹片是否有破损、划痕，钢绞线是否有缩进等。
- 7.4.4 待检构件两端锚具应露出钢绞线，如果钢绞线未露出或者钢绞线周边不清洁，应清除钢绞线周边水泥浆、砂浆、混凝土等杂物。在清理过程中，应注意保护钢绞线和锚具、夹片，应采取措施避免钢绞线受振动过大或对锚夹具形成表面损伤。
- 7.4.5 定量检测时，应根据设计图纸和施工记录在构件上标记出被测孔道走向及测点位置，并应保证测试区域及反射面内混凝土表面平整、光洁。

8 定性检测

8.1 定性检测、解析方法选择

- 8.1.1 根据现场施测条件和拟采用的解析方法决定施测方法，能双端检测不采用单端检测。
- 8.1.2 当所测孔道两端锚具预应力钢绞线外露且长度在 3~5cm 时，或者经处理后使钢绞线外露且外露长度在 3~5cm 时，宜采用全长波速法、全长衰减法、传递函数法进行检测和数据分析。
- 8.1.3 当所测孔道为竖向预应力以及单端张拉构件时，应采用局部衰减法检测和分析。

8.2 仪器安设

- 8.2.1 对于两端张拉的预应力孔道定性检测，传感器安装时，孔道两端传感器应位于同一方位并对称，且宜位于最上一根钢绞线，传感器及磁性卡座应接近锚具且不应与锚具或夹片接触。传感器轴线应与钢绞线走向平行。见图 1。

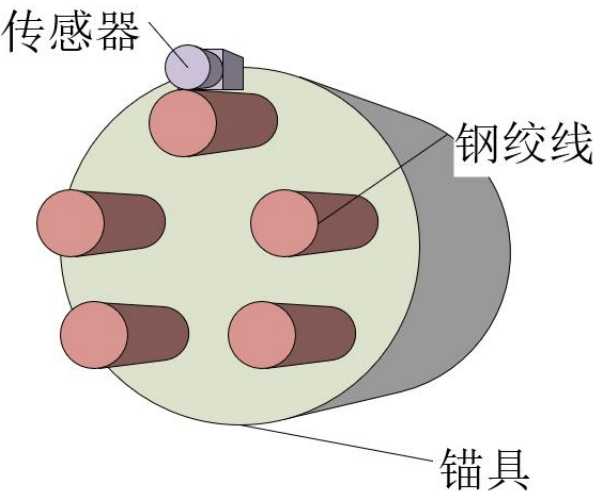


图 1 双端孔道定性检测传感器固定方式

8.2.2 单端张拉或竖向预应力构件，传感器轴线应平行于预应力筋走向。见图 2。

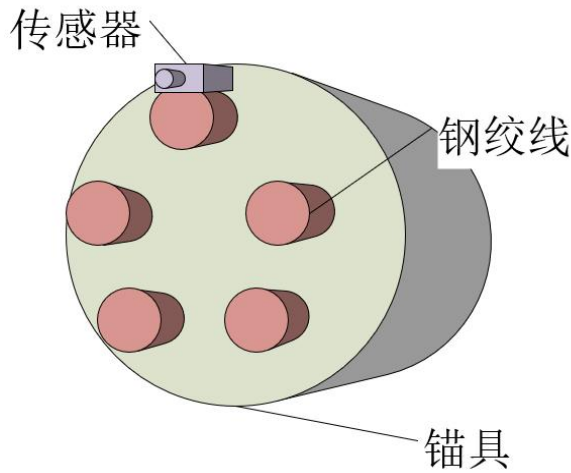


图 2 单端张拉孔道定性检测传感器固定方式

8.2.3 全长波速法、全长衰减法、传递函数法测试所需通道数为 2 个，数据通道 CH0 和数据通道 CH1 分别安设有 S31SC 传感器，激振方式为冲击锤加激振锥。

8.2.4 孔道长度在 50m 以内时，传感器固定方式及位置如图 1；孔道长度超过 50m 时，传感器固定方式及位置如图 3。

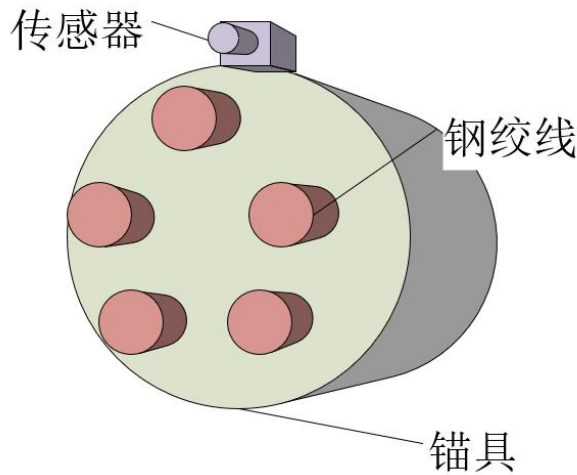


图 3 孔道长度超过 50m 时传感器的固定方式

8.3 基准波速测试

- 8.3.1 基准波速测试时，仪器连接方法与正式定性检测相同。
- 8.3.2 基准波速测试点应选择最高孔道上方混凝土位置，两端传感器安装位置应在同一水平面上。
- 8.3.3 基准波速测试应将传感器直接按压在混凝土表面，并用激振锤直接敲击混凝土表面。

8.4 基准振幅与频率特征测试

- 8.4.1 若现场具备基准振幅与频率特征测试条件，宜测试预应力孔道压浆前后振幅特征和频率特征。
- 8.4.2 若现场无基准振幅与频率特征测试条件，应按表 3 获取基准值。

表 3 压浆检测指数基准值

分项名称	项目	全压浆时值	无压浆时值
基准波速测试指数 I_{PV}	波速 (km/s)	混凝土实测波速	5.01
基准振幅测试指数 I_{EA}	信号能量传播比X	0.02	0.20
基准频率测试指数 I_{TF}	频率比 (F_r / F_s)	1.00	3.00
	受信频率 F_r (kHz)	2.0	4.0

8.5 基准卓越周期及持续时间

- 8.5.1 竖向预应力筋和单端张拉构件检测时,应标定全空及全密实状态预应力筋卓越周期及持续时间。
- 8.5.2 被检孔道长度有多种设计长度时,应标定最长及最短孔道全空和全密实两种状态预应力筋卓越周期及持续时间,标定后对参数插值法处理,得到中间各种长度预应力筋卓越周期及持续时间。检测时,被检孔道卓越周期及持续时间应采用相同长度孔道卓越周期及持续时间。

8.6 数据采集

- 8.6.1 数据采集流程为保持名称、噪声电压零点标定、采集数据、保存数据。
- 8.6.2 按不同品牌型号仪器使用说明启动设备软件,并按软件提示输入工程信息和定性检测参数设定。如混凝土波速、孔道最低和最高点高差、孔道长度、振源-近端接收点、振源-远端接收点、首波振幅比以及传感器、放大器种类等必要参数。
- 8.6.3 进行噪声电压零点标定。
- 8.6.4 按预设测试方案中激振方式对受检构件激振。如果激振后仪器采集的信号稳定且无噪音信号,则保存,否则应重新采集。
- 8.6.5 应多次采集数据,并不应少于 10 次,以消除随机误差。
- 8.6.6 同一孔道在定性检测时,应在两端 (CH0、CH1) 分别激振采集数据,并应以不同文件名称保存。
- 8.6.7 波形数据稳定则保持,否则应重新采集数据。定性检测的典型波形如图 4。

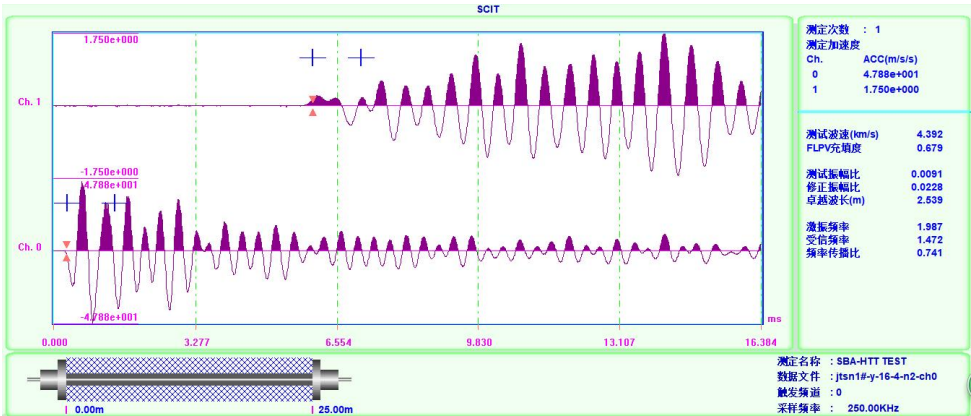


图 4 定性检测典型波形

8.6.8 如果仪器支持连续采集数据功能，宜采用连续采集数据功能采集数据。

8.6.9 数据采集应注意以下事项：

- a) 激振导向锥应与测试面紧贴且垂直，激振力度适中，以不引起较高频振动信号为宜，激振力度应不超过软件电压上限（4V）。
- b) 宜将传感器固定于顶部钢绞线，激振锥可敲击旁边一根钢绞线，当接收端信号频率较高时，传感器安装位置与敲击位置应尽量相互远离。
- c) 激振方式见图5。

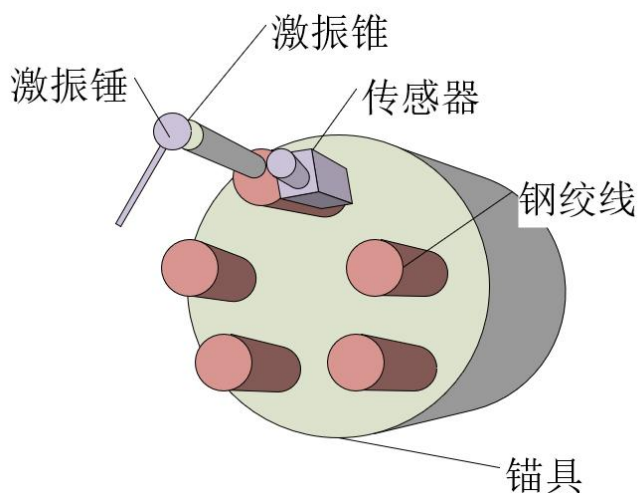


图 5 激振方式

8.7 数据分析

8.7.1 宜两次解析，第一次是对波速、能量传播比、频率传播比数据初步分析，第二次解析是对这些数据加权处理。

8.7.2 冲击弹性波定性检测采用综合压浆指数 I_f 作为评定指标，当压浆饱满时 $I_f = 1$ ，完全未压浆时 $I_f = 0$ 。

8.7.3 采用表 3 或标定的基准值，分别量化波速分项压浆指数 I_{PV} 、振幅分项压浆指数 I_{EA} 、频率分项压浆指数 I_{TF} 。

8.7.4 测试预应力孔道大于 60m，宜采用波速分项压浆指数 I_{PV} 作为压浆评价指数，见式 1。

$$I_f = I_{PV} \quad \dots\dots\dots (1)$$

8.7.5 测试预应力孔道不大于 60m，测试条件不利激振，或测试频率异常，宜采用 I_{PV} 、 I_{EA} 两个分项计算综合压浆指数，见式 2。

$$I_f = (I_{EA} \bullet I_{PV})^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

8.7.6 测试预应力孔道不大于 60m，测试条件和测试频率正常，应采用 I_{PV} 、 I_{EA} 、 I_{TF} 三个分项计算综合压浆指数见式 3。

$$I_f = (I_{EA} \bullet I_{PV} \bullet I_{TF})^{\frac{1}{3}}$$

..... (3)

8.7.7 冲击弹性波法定性检测结果采用综合压浆指数 I_f 进行判定：

- a) 当综合压浆指数 I_f 不小于0.95时，判定为压浆密实，直接出具合格报告；
- b) 当综合压浆指数 I_f 在0.80~0.95之间时，压浆基本密实或存在缺陷的可能性较小，宜针对孔道两端、最高点、拐点、水平孔道上部等位置定量检测。

8.8 竖向、单端孔道定性检测

8.8.1 对于竖向和单端张拉的预应力孔道进行检测时，应事先对密实孔道和未压浆情况进行标定，取得孔道全空状态和全密实状态下的卓越周期和持续时间，并予以记录。

8.8.2 应采用局部衰减法进行单端孔道检测，采用冲击锤的激振方式。

8.8.3 数据采集的流程为保存名称、噪声电压零点标定、采集数据、保存数据。

8.8.4 按不同品牌型号的仪器使用说明启动设备软件，并按软件提示输入工程信息和压浆密实度竖向、单端孔道检测参数设定。

8.8.5 进行噪声电压的零点标定。见图 6。

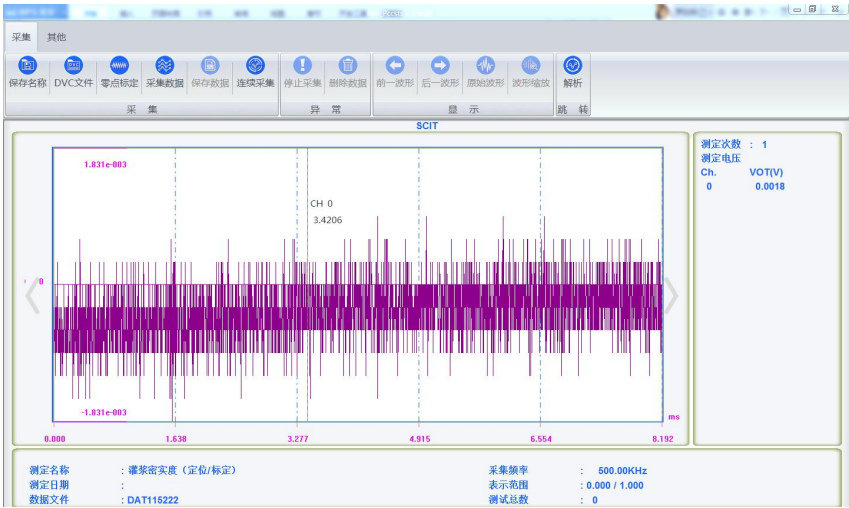


图 6 竖向检测零点标定

8.8.6 按预设测试方案中的激振方式对受检结构进行激振。如果激振后仪器采集的信号稳定且无噪音信号，则进行保存，否则应重新采集。

8.8.7 应多次采集数据，并不应少于 10 次，以消除随机误差，应将符合要求的波形数据保存。宜采用连续采集数据功能进行数据采集。

8.8.8 数据的解析可以按单次解析和批量解析的方法进行。单次解析用于获取单次测试数据分析的最

终结果。批量解析是对于批量解析，一次性实现一组测试数据预处理及解析。

8.8.9 在解析过程中，解析结果不稳定则对评定影响不大，数据错误可能严重影响评定，应执行波形数据删除。

8.8.10 解析结果波形见图 7。

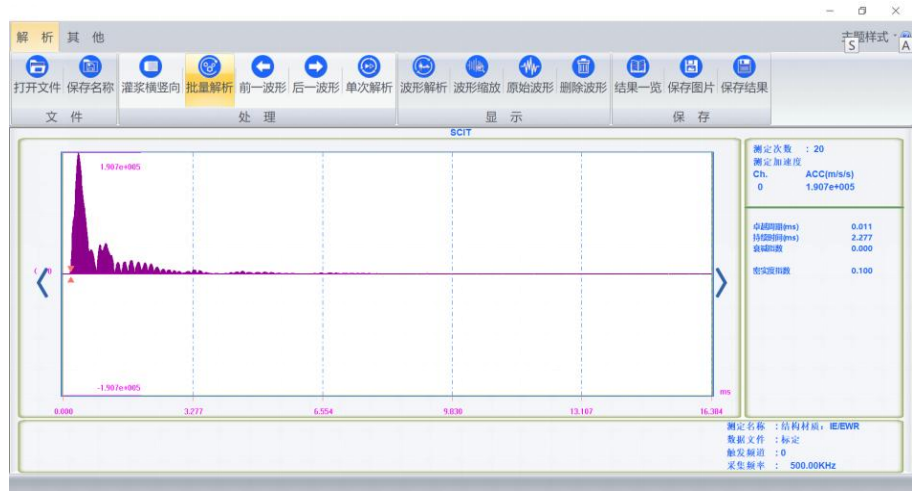


图 7 解析结果波形图

8.8.11 竖向或单端张拉的预应力孔道检测的数据处理方法见本章中相关内容。

9 定量检测

9.1 一般规定

9.1.1 定量检测适用于位置明确的预应力孔道，且一般有如下适用条件(d 为孔道直径,T 为埋置深度):

- a) 当 $0.3 < d/T < 1.5$ 时，且属于单排预应力孔道，能检测出沿测线方向缺陷的范围大小及类型；
- b) 当 $d/T \geq 1.5$ 时，或者 $0.3 < d/T < 1.5$ 属于多排（2根管及以上）预应力孔道的，仅能检测出距离测试面最近的孔道是否存在缺陷；
- c) 当 $d/T \leq 0.3$ 时，能检测出沿测线方向缺陷的范围大小，难以确定缺陷类型。

9.1.2 采用 IEEV 法数据解析时，测点位置结构厚度宜不大于 60cm，波传播方向内仅有一道预应力孔道。

9.1.3 采用 IERS 法数据解析时，激振产生的信号能够优先到达孔道位置，埋置深度宜不大于 20cm。

9.2 仪器安设

9.2.1 定量检测时，用传感器支架与构件表面耦合，支架应具有增加阻尼和控制按压力功能，传感器轴线方向应与测试面垂直，受信面应与测试面密切接触。

9.2.2 宜采用等效波速法进行数据解析，传感器布设如图 8。当纵向扫描时，传感器应由左至右连续移动侦测；当竖向扫描时，传感器应由上至下连续移动侦测。

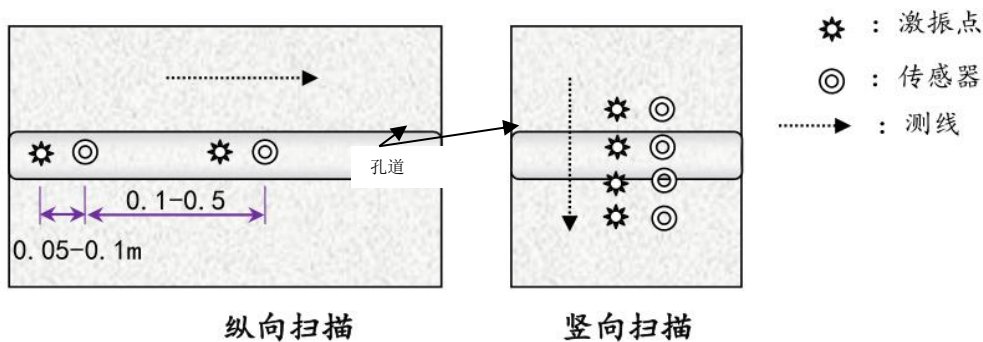


图 8 传感器及激振点布置图

9.3 孔道位置确定

9.3.1 定量检测前，应在构件上标注出孔道走向，根据设计图纸确定孔道位置，并应准确。见图 9。

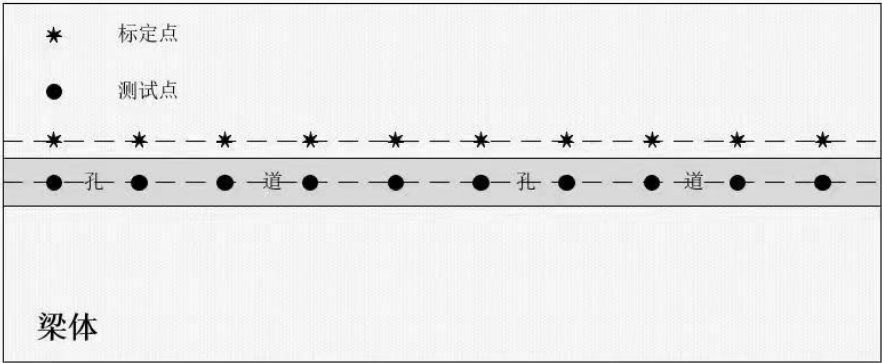


图 9 沿线定量和标定方法

9.3.2 沿孔道走向检查被检构件混凝土面平整光洁情况，测区表面应清洁、平整、干燥，不应有接缝、饰面层、粉刷层、浮浆、油垢以及蜂窝、麻面，应用砂轮清除表面杂物，表面不应有残留粉末或碎屑。测区位置表层有脱空现象时，需要将脱空区域铲除。

9.4 混凝土波速标定

9.4.1 采用 IEEV 法测试时，混凝土波速标定位置应为结构两端等厚位置，采用定点标定或线性标定方式进行，见图 9。

9.4.2 采用 IERS 法测试时，如果结构孔道位置明确，应沿孔道走向线性标定，标定时应避开孔道部位；如果孔道位置不明确，应在构件两端等厚部位定点标定。

9.5 检测和解析方法的选择

9.5.1 定量检测数据解析有冲击回波法、等效波速法和冲击回波共振偏移法 3 种方法。被检测构件内仅有 1 根孔道时，信号能够直接到达孔道部位而不被干扰，这时应优先采用等效波速法解析数据。

9.5.2 被检构件厚度大于 60cm，或反射信号不明显，或有 2 根及以上孔道并排时，则在距离孔道最近测试面采用共振偏移法解析。见图 10。

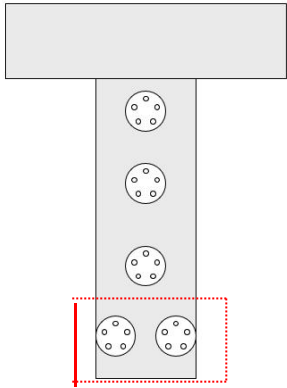
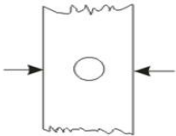
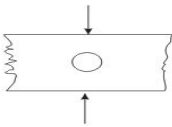
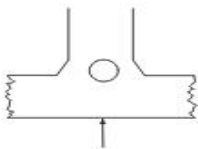
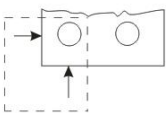
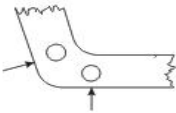
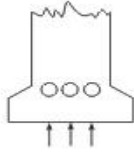
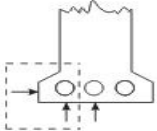
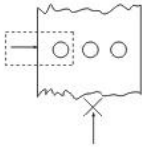


图 10 预制 T 梁并排孔道示意图

9.5.3 不同结构解析方法宜按表 4 选择。

表 4 不同结构适用的解析方法

常见结构类型	适用解析方法	检测效果	适用结构
	IEEV/IERS	可检测出缺陷的大致类型、尺寸	箱梁腹板、T梁腹板或者其他单排孔道结构
	IEEV/IERS	可检测出缺陷的大致类型、尺寸	单排结构的负弯矩，联系梁顶板等单排结构
	IERS	可检测出该处是否存在缺陷	箱梁顶板拐角处、空心板、单箱多室横隔板位置等其他类似结构
	IERS	可检测出该处是否存在缺陷	T梁马蹄部位、连续梁腹板、底板等结构
	IERS	可检测出该处是否存在缺陷	箱梁底部拐角或者其他类似结构

常见结构类型	适用解析方法	检测效果	适用结构
	IERS	可检测出该处是否存在缺陷	T梁孔道在腹板与马蹄之间的结构或者其他类似结构，侧面无激振面，尽可以从下部激振
	IERS	可检测出该处是否存在缺陷	T梁进入马蹄部位或者其他类似结构
	IERS	可检测出该处是否存在缺陷（中部孔道为测试盲区）	多排类型孔道的板式结构，其中部孔道为测试盲区无法进行定量测试，有条件可考虑定性检测

9.6 数据采集

9.6.1 数据采集流程为保存名称、噪声电压零点标定、采集数据、保存数据。

9.6.2 按仪器使用说明启动设备软件，并按软件提示输入工程信息和定量检测参数。如弹性波波速、测试对象最大壁厚、第一测点位置、测点间距、激振次数、弹性波速、孔道直径和类型、孔道位置、传感器种类、放大器种类等必要参数。

9.6.3 利用等效波速法和共振偏移法对孔道定量测试时，关键节点距激振点距离需合理，设置如图 11。

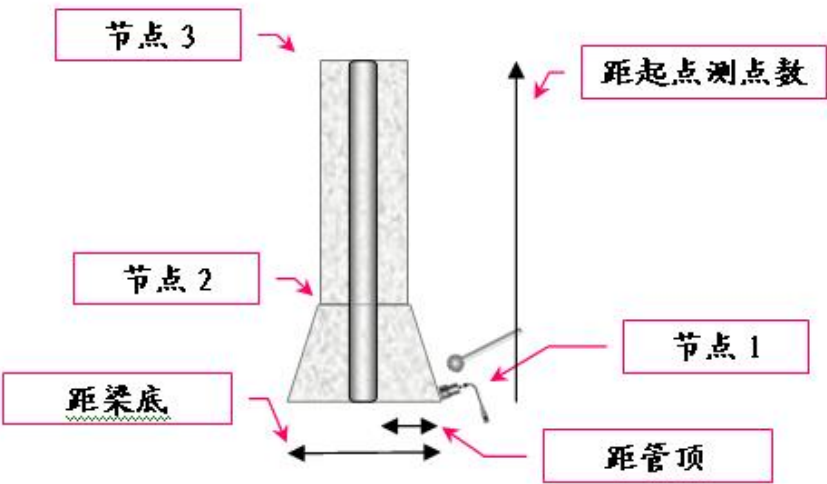


图 11 压浆定量设置说明

9.6.4 进行噪声电压零点标定。见图 12。

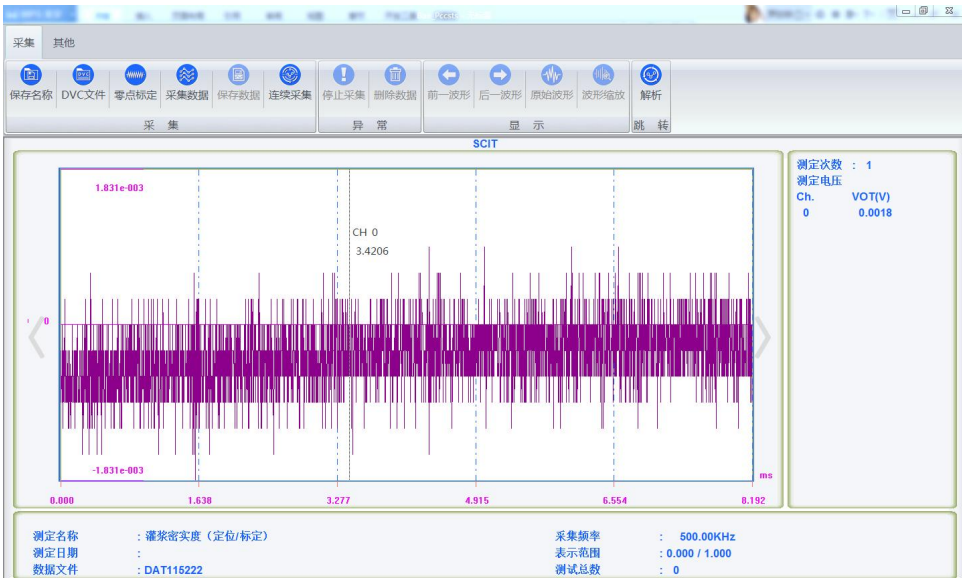


图 12 定量检测时零点标定

9.6.5 按预设测试方案中激振方式对受检构件激振。如果激振后仪器采集信号稳定且无噪音信号，则保存，否则应重新采集。

9.6.6 应多次采集数据，并不应少于 10 次，以消除随机误差。

9.6.7 保存稳定无噪声的波形数据。

9.6.8 数据采集时应注意以下事项：

- a) 选择合适的激振锤在测线上方混凝土面进行标定测试，结合生成的频谱等值线图判断底部反射信号是否明显且反射位置趋势线是否与实际吻合；
- b) 测试激振时传感器应该按压稳定不能晃动，按压力度不宜过大，激振点与传感器距离约为被检对象厚度的0.25倍；
- c) 当测试对象厚度为渐变结构时，应敲击结构厚度较大一侧，传感器放置在结构厚度较薄一侧；
- d) 被检对象测试区间腹板厚度变化过大（如厚度由50cm渐变为20cm），可在测试过程中，同一次检测中采用两种激振锤结合激振测试。

9.6.9 对梁体腹板、负弯矩区等预应力孔道进行冲击回波定量检测时，应优先选择孔道相对较高的锚具两端、负弯矩区、起弯点等不少于 2m 范围的位置。

9.6.10 采样时间间隔宜为 2 μs，采样点数宜为 4096 个或 8192 个。

9.6.11 有效采集信号信噪比应大于 20dB，否则应分析原因，排除人为和检测仪器等干扰因素，重新检测。

9.7 数据分析

9.7.1 数据分析宜采用 IEEV 法和 IERS 法。分析时，应准确地输入定位参数，以保证数据分析精度。

9.7.2 缺陷判定时，应根据等效波速滞后比率确定。见表 5。图 13 为局部缺陷测点偏移最短和最长路线，可按式 4 和式 5 计算。

表 5 典型条件下空管造成的等效波速滞后比率

径厚比d/h	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
最大滞后（%）	5.40	10.25	14.62	18.59	22.2	25.51
最小滞后（%）	0.25	0.98	2.15	3.71	5.57	7.67
评价滞后（%）	2.82	5.61	8.39	11.15	13.89	16.59

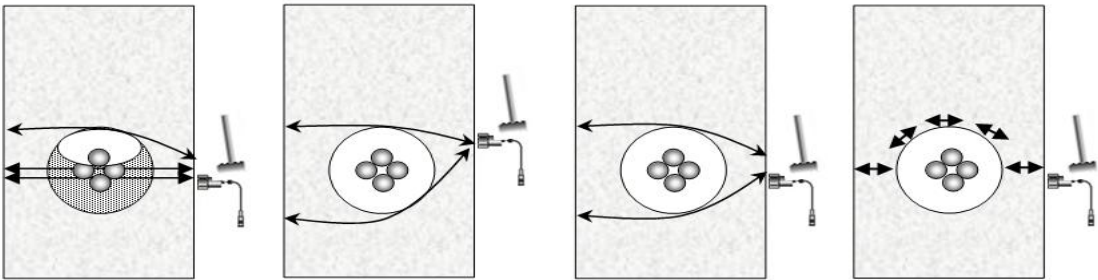


图 13 局部缺陷测点偏移最短和最长路线

最长路径

$$L_{\max} = 2h + (\pi - 2)d \dots\dots\dots (4)$$

最短路径

$$L_{\min} = h + \sqrt{h^2 + d^2} \dots\dots\dots (5)$$

9.7.4 定量检测数据分析应符合以下规定：

- a) 检测数据分析应以频域分析为主；
- b) 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压浆密实度的基准；
- c) 预应力孔道位置混凝土结构尺寸、孔道布设、预埋件位置等参数综合分析检测孔道压浆缺陷位置及范围；
- d) 根据被检构件回波延迟比值及压浆缺陷长度等按照表6对压浆缺陷类型分级。

表 6 压浆缺陷类型判定分级表

水平方向检测		竖直方向检测		缺陷类型
等效波速降低率/%	连续缺陷长度	等效波速降低率/%	连续缺陷长度	
<5%	—	<10%	—	无缺陷
5~10	≤0.4m	10~15	≤0.4m	小范围或局部缺陷
5~10	>0.4m	10~15	>0.4m	大范围缺陷
>10	—	>15	—	大范围缺陷

e) 检测区间采用压浆密实度指数 D 作为定量检测评定指标, 压浆密实度指数 D 按式6或式7计算, 其中, 式7中有 $N=N_j+N_x+N_b$:

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \beta_i \times 100\% \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$D = \frac{N_j \times 1 + N_x \times 0.5 + N_b \times 0}{N} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (7)$$

f) 当定量检测仅为孔道的局部时, 用修正压浆密实度指数 D_e 来判定孔道压浆密实度, 修正压浆密实度指数 D_e 按式8计算:

$$D_e = \frac{DL_d + D_k(L - L_d)}{L} \quad \dots\dots\dots (8)$$

9.7.5 根据计算得到孔道修正压浆密实度指数 D_e 及最大连续压浆缺陷长度 $L_{\max}$, 按表 7 判定预应力孔道压浆密实度等级, 两个以上等级按照较低等级进行判定。

表 7 压浆密实度等级判定

道压浆密实度等级	最大连续压浆缺陷长度 $L_{\max}$	修正压浆密实度指数 D_e
I 类	$L_{\max} \leq 0.4m$	$D_e \geq 95\%$
II 类	$0.4m < L_{\max} \leq 2.0m$	$90\% \leq D_e < 95\%$
III 类	$L_{\max} > 2.0m$	$D_e < 90\%$

10 检测报告

10.1 数据储存

10.1.1 检测报告中, 应附检测部位定性或定量检测相关图形及数据。

10.1.2 现场记录表见附录 A。

10.2 报告组成

10.2.1 检测报告应包括下列内容:

- a) 工程概况, 包括工程名称、结构型式、规模及现状等;
- b) 委托单位、设计单位、施工单位及监理单位名称;
- c) 检测单位名称、检测依据、设备型号等;
- d) 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;
- e) 检测结果、评判结论, 检测结论判定为存在缺陷时, 应给出相关检测或处理建议;
- f) 检测日期、报告完成日期;

g) 主检、审核和批准人员的签名；

h) 异常情况说明等附件。

10.2.2 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
(资料性)
压浆密实度检测现场记录表

A.1 压浆密实度定性检测记录表

按见表A.1的形式记录。

表 A.1 压浆密实度定性检测记录表

项目名称						建设单位					
施工单位						监理单位					
检测单位						桥名					
序号	构件编号	构件类型	孔道编号	孔道长度 (m)	梁体设计强度	CH0 桩号 (大/小)	浇筑日期	压浆方向	压浆日期	压浆方式	备注
1											
2											
3											
4											
5											
备注											

检测人：

复核人：

检测日期：

A.2 压浆密实度定性检测记录表

按见表A.1的形式记录。

表 A-2 压浆密实度定量检测记录表

项目名称					建设单位				施工单位					
监理单位					检测单位				桥名					
序号	构件编号	构件类型	压浆日期	孔道编号	桩号(大/小)	有效测试长度(m)	起点		节点 1		节点 2		节点 3	
							距离端头距离 (cm)	腹板厚度 (cm)	距离端头距离 (m)	腹板厚度 (m)	距离端头距离 (cm)	腹板厚度 (cm)	距离端头距离 (m)	腹板厚度 (m)
1														
2														
3														
4														
5														
6														
备注	压浆方式：压浆方向：													

检测人：

复核人：

检测日期：

附 录 B

(资料性)

冲击弹性波法孔道压浆检测方法应用相关说明

B.1 仪器的匹配性

仪器数据采集和传输部件由于测试梁板厚度薄,且需要在频域进行分析,因此对其要求较高,特别是传感器频谱性能对测量结果影响很大。而信号放大器增益倍率应适应长孔道定性检测,因此接收端信号 S/N 应不小于 10。

B.2 操作的技巧性

B.2.1 传感器安装方式对结果影响较大。采用人工或机械方式将传感器压在测试对象表面的方法,测试效果最高。

B.2.2 当手按传感器力度较小时对测试信号影响较小,也可得到满意的测试效果。

B.2.3 按压力过大时频阶杂乱。

B.2.4 专用支架能提供可靠的耦合力度和阻尼,信号更加稳定。

B.2.5 激振方式的选择影响测试结果。

B.3 数据分析经验性

B.3.1 仪器分析软件存在先天性误差。频谱分析中两种方法为 FFT(快速傅里叶变换)和 MEM(最大熵法)。

B.3.2 FFT 法在定量检测时存在分辨率不足问题。采样时间(间隔×采样数)以及次数决定了检测分辨率。采样时间越长、壁厚越厚,时间分辨率越大,检测分辨率越低。并且 FFT 适合于正弦波连续分析,而对于反射次数分析并不擅长。

B.3.3 MEM 法分析弥补了 FFT 的不足,但是在使用时,应特别注意:

a) MEM 是非线性解析方法。当两套数据叠加起来进行 MEM 分析时,与分别进行 MEM 分析结果叠加不一样。对测试数据进行滤波后,产生伪频谱危险性大大增加。

b) MEM 分析中,对频谱位置分辨率很高,但对其振幅分辨精度则无法保证。特别是当测试点数较少时,这种误差更加明显。

c) 对信噪比非常敏感。在低信噪比情况下,分辨率较差。因此,进行必要预处理是有意义的,而这又提高了产生伪频谱的危险。

B.4 压浆材料、制孔、施工工艺控制等

B.4.1 压浆材料龄期和固化程度对结果有很大影响。

B.4.2 孔道长度对结果有很大影响。特别是定性检测,一般长度在 50m 以内效果更好。

B.4.3 梁板厚度对定性测试方法影响较小,但对定量测试 IEEV 法影响较大。

B.4.4 孔道排列对定性测试方法影响较小，但对定量测试 IEEV 法影响较大。当有双排孔道时，尽可能从两个侧面用 IEEV 法测试。而对于有马蹄形扩幅 T 梁腹板孔道，往往需要从下部测试。

B.4.5 混凝土存在浇筑缺陷以及混凝土不均匀，会对结果造成影响。在孔道与测试面之间有钢板等异形构件时，也会产生不利影响。

B.4.6 对于金属波纹管，由于缺陷的反射与金属的反射互为逆向，有相互抵消的现象，因此，需要结合等效波速法加以综合判断。

附 录 C
(资料性)
孔道压浆密实度缺陷处理

C.1 仪器的匹配性

C.1.1 对于定性检测压浆指数偏低的构件应进行定量检测，对于定量检测后，还需进行直观验证。

C.1.2 直观验证可采用钻孔法进行。根据后续处理方案采取合适的钻孔方法，以有利于观察和后续缺陷处理而又不影响质量为宜。

C.1.3 如果缺陷位置在孔道最高点或者锚端，可按 T/JSJTQX 22—2021 中附录 D 的方法进行缺陷范围验证。

C.2 缺陷处理

C.2.1 当缺陷位于孔道最高点、端头以及水平孔道容易操作部位时，宜采用 T/JSJTQX 22—2021 中第 10 章方法处理。

C.2.2 如果缺陷在孔道中间部位，用 C.2.1 的方法无法达到效果时，应将孔道缺陷部位凿除，然后用高强灌浆料或水灰比不大于 0.25 的压浆料掺加环氧树脂材料进行孔道内人工填充，在填充时，应采用合适工具捣实。填充完成后，应加强保温保湿养生，硬化后的浆体不应出现裂缝。

参 考 文 献

- [1] 王芮文, 欧定福, 曹妍. FMECA技术在预制PC箱梁施工质量风险控制中的应用研究[J]. 施工技术. 2017(12):87-92.
- [2] 王芮文, 曹妍, 欧定福, 陆云涛. 溧高高速公路后张法预制箱梁孔道压浆施工技术研究[J]. 公路交通科技(应用技术版). 2019(08):143-146.
- [3] 王军文, 马少宁, 刘志勇, 苏木标. 钢管混凝土脱空无损检测方法试验研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版). 2021(06):38-45.
- [4] 余聪, 朱美刚. 冲击回波法混凝土空洞模型试验研究[J]. 四川建材. 2020(07):4-5.
- [5] 姜勇, 吴佳晔, 马永强, 黄伯太. 基于冲击弹性波的隧道衬砌混凝土强度检测技术研究和应用[J]. 铁道建筑. 2020(06):1-5.
- [6] 李想. 基于冲击弹性波法的预应力桥梁孔道压浆密实度检测技术[J]. 青海科技. 2019(12):51-53.
- [7] 郭旋, 杨令. 冲击弹性波无损检测预应力孔道压浆质量的研究[J]. 青海科技. 2019(08):123-126.
- [8] 马少宁. 钢管混凝土脱空无损检测技术试验研究[D]. 石家庄. 石家庄铁道大学. 2019(06).
- [9] 石明, 韩永胜. 基于冲击弹性波的预应力孔道压浆密实度检测方法及其适用范围研究[J]. 工程建设与设计. 2019(01):206-208.
- [10] 徐予晔. PC梁孔道压浆及无损检测技术的应用研究[D]. 重庆. 重庆交通大学. 2018(06).
- [11] 程宏远. 冲击弹性波技术在水环境混凝土中的检测及应用研究[D]. 重庆. 重庆交通大学. 2017(06).
- [12] 钟辉武, 江茂盛, 钟建国, 吴佳晔. 基于冲击弹性波检测预应力孔道压浆质量的评价体系研究[J]. 广东交通职业技术学院学报. 2016(12):24-28.
- [13] 江西省地方标准. DB36 / T 1197-2019, 桥梁预应力孔道压浆密实度检测规程[S]. 南昌: 江西省交通运输厅, 2019.

冲击弹性波法预应力孔道压浆密实度检测技术规程

条文说明

1 范围

本文件适用于后张法预应力预制和现浇构件孔道压浆密实度无损检测。本文件限定本方法作为质量控制手段进行的一般规定，不能用于该方法作为仲裁。

3 术语和定义

3.2

定性检测

利用梁体两端锚具外露预应力筋进行冲击弹性波信号激发和接收，通过分析传感器采集的信号在检测对象中传播时能量、频率、波速等特征变化，定性判定桥梁预应力孔道压浆密实度的检测方法。设备的连接方法见图3-1。

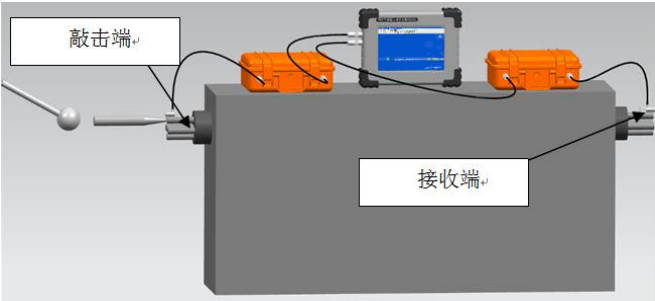


图 3-1 定性检测设备连接示意图

3.3

定量检测

通过检测冲击弹性波在预应力孔道处有无反射信号或信号在检测对侧界面反射时间长短，即可判定压浆缺陷范围大小及位置。当孔道压浆存在缺陷时，反射时刻提前或因传播距离增加，时间延长。此判断方法原理如图3-2。

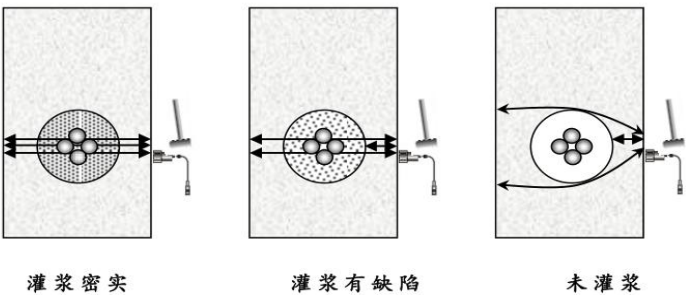


图 3-2 定量检测的原理图

3.4

全长波速法（FLPV）

根据冲击弹性波在孔道中传播速度定性判定预应力孔道压浆是否存在缺陷的解析方法。测试方案如图3-3。测试原理如图3-4。

弹性波在钢绞线内传播速度约为5.01km/s，在混凝土中的传播速度约为4.3~4.6km/s。随着压浆密实度提高，弹性波波速减小。

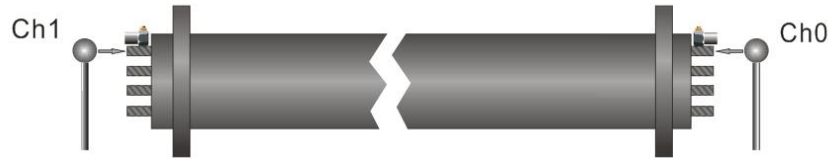


图 3-3 全长波速法、全长衰减法、传递函数法的测试方案

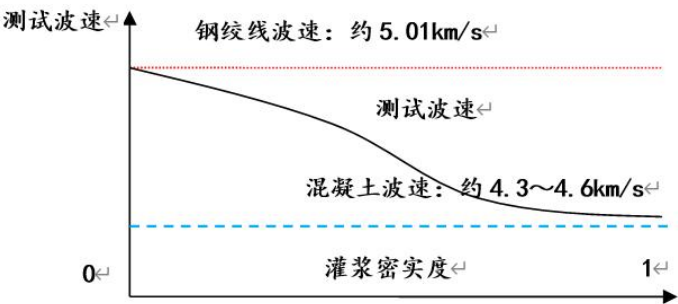


图 3-4 全长波速法测试原理

3.5

全长衰减法（FLEA）

根据冲击弹性波在孔道中信号能量传播比定性判定预应力孔道压浆是否存在缺陷的解析方法。测试方案如图3-3。全长衰减法的信号特征如图3-5。

孔道压浆越密实，其能量衰减越大。

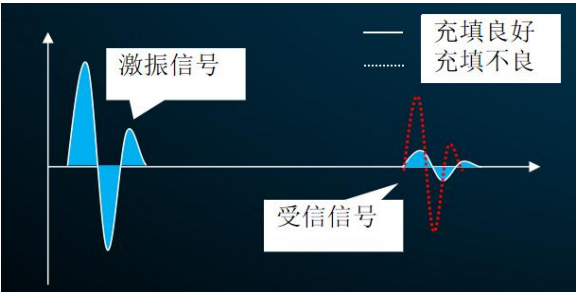


图 3-5 全长衰减法信号特征图

3.6

传递函数法（PFTF）

根据冲击弹性波在压浆孔道中传播的频率变化定性判定预应力孔道两端压浆有无缺陷的解析方法。测试方案如图3-3。测试原理如图3-6。

当孔道压浆不密实时，其频率会发生变化。

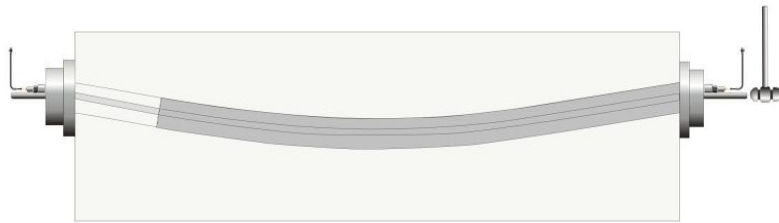


图 3-6 传递函数法测试原理

3.7

卓越周期和持续时间

在信号频谱中，能量及振幅最强的周期称为卓越周期。卓越周期所延续的时间，称为持续时间。

混凝土受到激振时，从振动源发出的振动波在混凝土中传播，经过混凝土内部界面的多次反射，将出现不同周期的振动波。若某一周期振动波与混凝土层固有周期相近，由于共振作用，这种振动波振幅将得到放大，此周期称为卓越周期。卓越周期实质是波共振，即当敲击波振动周期与混凝土结构本身自振周期相同时，由于共振作用而使混凝土表面振动加强。

5 基本要求

5.1 一般规定

5.1.1 冲击弹性波法孔道压浆密实度检测应在压浆材料强度达到 80%以上且养护时间宜不少于 7d 的条件下进行。冬期施工时，孔道压浆检测养护期限宜为 14d。如需要提前检测，则当测量结果无缺陷时，可以出具无缺陷结论，当测量结果有缺陷时，则应等水泥浆强度和时间均达到要求时进行复测。

在一般情况下，孔道压浆后 7d 即可进行冲击弹性波法检测，冬期施工受养生温度等条件影响，会存在 7d 强度低于 80%的情况，因此 14d 和 80%的双控条件。

因弹性波的振动传递与水泥浆强度有关，强度越低，弹性波能量损失越大，测量结果越不利。因此，如果水泥浆强度未达到设计强度或养生期未达到，实际上是一种最不利的情况。

6 检测仪器

6.2 激振锤

6.2.2 定量检测应根据构件厚度、激振频率等特征，按表 2 选择适宜的激振锤。采用 IEEV 数据解析时，激振锤、传感器以及激振力度等相关参数需要事先组合比选，应首选最优测试组合，当需要采用定量方法验证定性检测结果或者对孔道定量复测时使用次优组合。

激振力度较轻是指在所选组合中信号放大器 30 倍增益，最大输出电压在 0.8~1.5V；适中是指在所选组合中信号放大器 30 倍增益，最大输出电压在 1.5~2.5V。

7 检测准备

7.4 现场准备

7.4.4 待检构件两端锚具应露出钢绞线，如果钢绞线未露出或者钢绞线周边不清洁，应清除钢绞线周边水泥浆、砂浆、混凝土等杂物。在清理过程中，应注意保护钢绞线和锚具、夹片，应采取措施避免钢绞线受振动过大或对锚夹具形成表面损伤。

在进行定性检测时，需要钢绞线通过强力磁座与传感器牢固粘结耦合，当钢绞线不清洁时，会对耦合效果产生较大影响，因此，钢绞线应清理干净，钢绞线露出的长度对检测结果也有影响。定性测试时应要求孔道锚头端露出钢绞线长度控制在3~5cm范围内，最长不能超过10cm，当外露钢绞线超过10cm仅全长波速（FLPV）适合测试，并建议进行标定试验。

8 定性检测

8.1 定性检测、解析方法选择

8.1.1 根据现场施测条件和拟采用的解析方法决定施测方法，能双端检测不采用单端检测。

单端检测时，回波衰减增大，数据可靠性降低。

8.2 仪器安设

8.2.4 孔道长度在50m以内时，传感器固定方式及位置如图1；孔道长度超过50m时，传感器固定方式及位置如图3。

对于定性检测，当梁体长度超过50m后，检测精度有一定的影响。一般来说，梁长在50m之内时，定性检测的各个方法均可适用，而超过此长度后，定性检测的精度有一定影响。需要在传感器固定方式，激振位置做相应变化。

8.3 基准波速测试

8.3.2 基准波速测试点应选择最高孔道上方混凝土位置，两端传感器安装位置应在同一水平面上。

如果所测构件高度较高，则不同高度的混凝土基准波速可能会有一定的差异，通常来说是上部波速小于下部波速。为了在最不利情况下检测，因此基准波速需要尽量小。

8.3.3 基准波速测试应将传感器直接按压在混凝土表面，并用激振锤直接敲击混凝土表面。

测试系统的频响范围不仅取决于传感器的频响范围，而且与传感器的固定方法有密切关系，图8-1是自振频率在30KHz附近传感器在不同的固定方式下测得的频响范围。

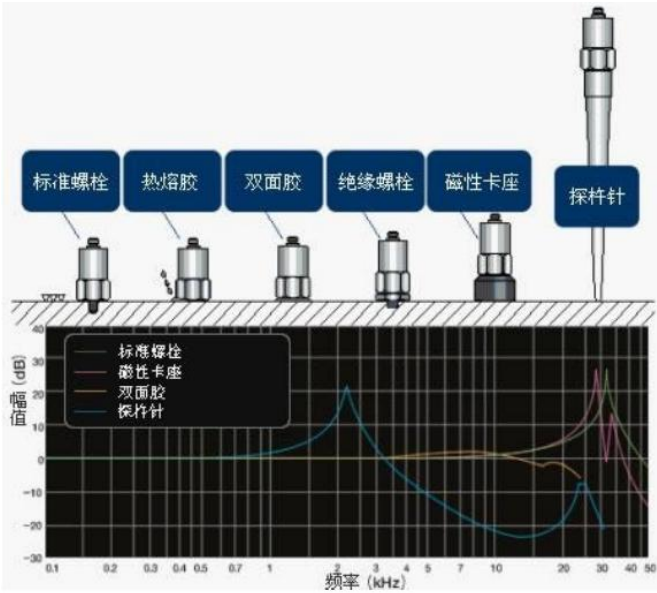


图 8-1 不同固定方法对频响曲线的影响

图 8-1 表明，采用人工或机械方式将传感器压在测试对象表面（压着式）方法，测试效率最高，因此，本规程采用压着式作为传感器的固定方式。

为了达到既快速又可靠的测试，需要传感器既要牢固地与梁体表面接触，又能够方便移动。为此，江西省地方标准 DB36 / T 1197-2019（桥梁预应力孔道压浆密实度检测规程）中指出，利用一标准试块，对如下几种压着式的测试结果进行了比较，由上至下分别是 1）专用支架套；2）手按力度小；3）手按力度大；4）热熔胶。见图 8-2。

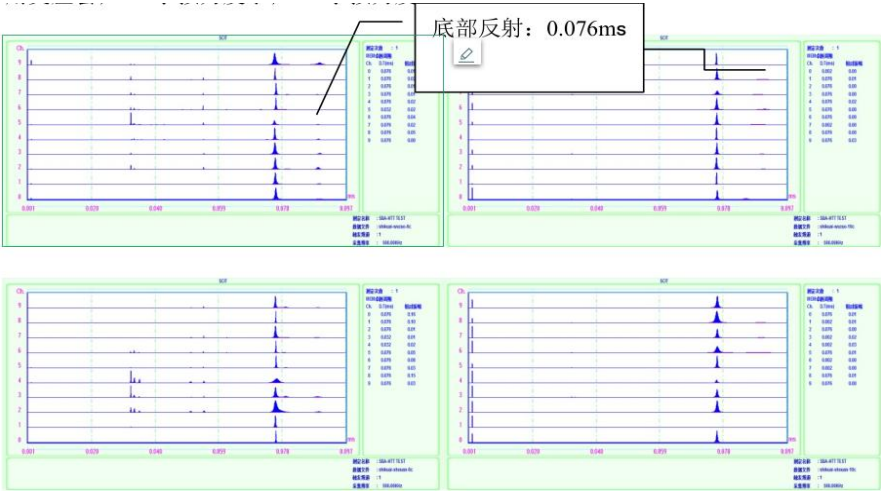


图 8-2 各种按压方式测试结果（MEM, 左侧为 PB_6 锤标准模式，右侧为 PB_10 锤标准模式）

测试结果表明：

- 1) 手按力度较小时对测试信号影响较小，也可得到满意的测试效果；
- 2) 按压力度过大时频阶杂乱，说明手按力度对测试信号的影响很大；
- 3) 热熔胶股东有附加模态，测试结果与热熔胶的厚度、温度等有关；
- 4) 专用支架套能提供稳定可靠地耦合力度和阻尼，使得测试信号更为稳定。

另一方面，可以通过合理的阻尼设计，提高传感系统的频响特征，为保证测试结果的可靠性，在有条件时宜利用混凝土标准块对耦合方式进行检验。

8.4 基准振幅与频率特征测试

8.4.1 若现场具备基准振幅与频率特征测试条件，宜测试预应力孔道压浆前后振幅特征和频率特征。

对于具备条件的测试现场，对预应力孔道压浆前后振幅和频率特征进行比对测试，是考虑压浆材料及工艺相近的孔道压浆具有几乎相同的振幅和频率特性，以利于孔道检测结果跟贴近实际情况。

8.4.2 若现场无基准振幅与频率特征测试条件，应按表 3 获取基准值。

波速分项压浆指数 I_{PV} 、振幅分项压浆指数 I_{EA} 、频率分项压浆指数 I_{TF} 分别为全长波速法、全长衰减法、传递函数法测得，其中，由于梁体不同部位的混凝土 P 波波速有一定的不同，当全压浆时，采用混凝土实测波速做基准值。在无压浆条件下，根据钢筋弹性模量（取 196GPa）推算得出基准值为 5.01km/s，此数据同时也得到实践验证。

表中的 F_r 和 F_s 分别为接收端和激振端信号的卓越频率。在此，采用 SPC-MATS 配置的激振导向器和 PB_50 激振锤而且充分张拉时的数值。

信号能量传播比 $X = \frac{A_r \bullet L}{A_s \bullet L_0}$ 。

8.6 数据采集

8.6.3 进行噪声电压的零点标定。

对测试环境的噪声电压进行标定，一方面是为了检测仪器是否能够正常工作；另一方面可以根据标定结果调整相应参数，降低环境噪声，提高信噪比，以消除其对测试结果的不利影响。如果标定电压大于 0.2V，说明环境噪声过大，不建议进行测试工作。图 8-3 中显示的【测定电压】即为标定电压。

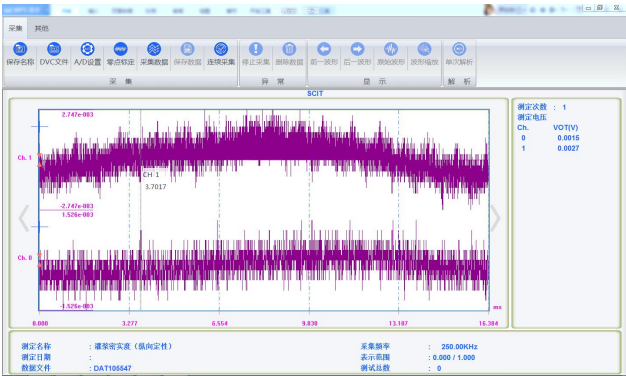


图 8-3 零点标定

8.7 数据分析

8.7.7 冲击弹性波法定性检测结果采用综合压浆指数 I_f 进行判定：

- a) 当综合压浆指数 I_f 不小于 0.95 时，判定为压浆密实，直接出具合格报告；

b) 当综合压浆指数 I_f 在 0.80~0.95 之间时, 压浆基本密实或存在缺陷的可能性较小, 宜针对孔道两端、最高点、拐点、水平孔道上部等位置定量检测。

导致 $0.80 \leq I_f < 0.95$ 结果最可能的原因有: ①锚头或者孔道最高点处有钢绞线未被浆料包裹, 且未被压浆料包裹的面积不大; ②孔道压浆的水泥浆强度不足; ③检测时, 龄期不足; ④压浆浆液凝固后气孔较多; ⑤施工中, 浆液水灰比偏大造成强度不足。在这种情况下, 施工单位应分析原因, 从工艺上予以控制。

c) 当综合压浆指数 I_f 小于 0.80 时, 存在压浆缺陷或存在缺陷的可能性较大, 应进行定量检测。

9 定量检测

9.1 一般规定

9.1.1 定量检测适用于位置明确的预应力孔道, 且一般有如下适用条件(d 为孔道直径, T 为埋置深度):

c) 当 $d/T \leq 0.3$ 时, 能检测出沿测线方向缺陷的范围大小, 难以确定缺陷类型。

定量检测要求精度较高, 因此其检测时, 构件的厚度、混凝土质量都对检测结果影响明显。

板的厚度对定性测试各方法影响相对较小, 而对定量测试 IEEV 分析方法则有较大影响。一般来说, 当管径相同时, 板厚越薄, IEEV 法的测试精度越高。

基于目前定量检测技术, 在采用 PB_30 激振锤激振时, IEEV 法一般要求梁、板厚度不超过 0.6m。而 IERS 法则要求孔道最大埋深不超过 0.2m。

采用 IEEV 对结构进行压浆定量检测时, 结构厚度变化是影响压浆检测准确性的重要因素之一, 根据该方法测试原理, 主要通过底部反射信号对压浆情况进行判断。因此准确获知腹板厚度实际厚度是准确判断的重要方面。特别是采用气囊作为预制梁内腔支撑结构, 更应注意。

对孔道压浆密实度定量检测时, 孔道附近混凝土质量对孔道压浆密实判断有一定影响, 当孔道与测试表面区域内出现混凝土缺陷时, 容易导致缺陷误判, 因此在检测时, 需要对被测孔道进行线性标定(即标定时, 在孔道上方混凝土位置沿孔道测线平行方向测试相同的测点, 以此避免混凝土缺陷对结果的判定的影响)。

根据经验, 预制梁梁体出现混凝土空洞等缺陷可能性不大, 因此在检测时, 为了提高效率, 采用在等厚位置进行定点检测混凝土的波速, 以此确定判断标准, 也可采用沿孔道走向进行线性标定, 确定混凝土的弹性波波速。

9.3 孔道位置确定

9.3.1 定量检测前, 应在构件上标注出孔道走向, 根据设计图纸确定孔道位置, 并应准确。见图 9。

定量检测需要沿孔道进行激振和测试。孔道定位的精度直接影响测试的精度和分辨力。因此孔道位置确定尤为重要。对于不同梁型, 定位方式有一定差异。预制梁(包括预制箱梁、预制 T 梁、预制空心板梁等), 孔道定位一般以设计图进行确定。连续刚构桥孔道一般以设计图为主, 设计图偏差大或遗失,

可采用其他方法（如雷达、图像放大系统、阵列超声等）确定孔道位置。

孔道位置高度一般是以水平间隔为 0.5~1m 确定孔道中心垂直高度，现场描画时，因腹板存在一定坡度，为了方便描画孔道高度，需要将设计图垂直高度转换为沿测试表面斜高。另外，水平位置确定精度将影响孔道位置描画精准度，一般以跨中为基础，确定整米或半米位置，再确定孔道位置，每一高度定位点采用直线连接，禁止将测试区域内起点与终点连接。

9.4 混凝土波速的标定

9.4.1 采用 IEEV 法测试时，混凝土波速标定位置应为结构两端等厚位置，采用定点标定或线性标定方式进行，见图 9。

预制箱梁在浇筑过程中，内膜有可能产生偏移导致腹板厚度变化，数据分析时应特别注意。因被检对象测线范围内出现厚度变化、混凝土均匀性等问题时，将对评定结果产生影响。因此，在描画参考线的时候，需要结合沿测线标定波速参考线。

标定时，应避开孔道位置，在其上方或下方标定。