**DB**

ICS

地 方 标 准

江 西 省

DB / —

桥梁预应力孔道压浆密实度检测规程

Standard for quality inspection and evaluation of Pre-stressed Concrete Bridge Construction

送审稿

201\* - \*\* - \*\*发布 201\* - \*\* - \*\*实施

江西省市场监督管理局 发 布

# 前  言

本标准由江西省交通运输厅提出并归口。

本标准起草单位：江西省交通建设工程质量监督管理局、江西交通职业技术学院、江西交苑公路工程试验检测中心、江西省交通工程质量监督站试验检测中心、抚州市起点实业有限公司

本标准主要起草人：彭东领、王立军、朱木锋、邓超、李强、宋金博、谭显峰、温永华、唐钱龙、丁海萍、赵大伟、刘吉睿、徐小信、谢理巍、魏子亮

本标准由江西省交通运输厅负责解释。

# 桥梁预应力孔道压浆密实度检测规程

1. 总则

1.1 为了加强预应力混凝土桥梁结构质量控制，规范桥梁预应力孔道压浆质量检测评定，保证工程质量制定本规程。

1.2 本规程适用于本省交通行业中，混凝土桥梁预应力孔道压浆质量检测评定，其他行业的孔道压浆质量检测评定可参照本规程执行。

1.3对混凝土梁进行预应力孔道压浆密实度检测评定时，除应遵照本规程规定外，尚应符合国家和行业现行相关标准及规范的规定。

1. 范围

本规程规定了预应力孔道压浆密实度检测的总则、范围、规范性引用文件、术语符号、基本要求、 检测工作流程和方法、质量评定、缺陷验证与数据管理等。

本规程适用于公路混凝土桥梁预应力孔道压浆密实性的检测评定，其他结构形式的预应力孔道压浆 施工质量检测评定可参照本规程执行。

1. 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文 件。凡是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。

GJB 1805 数据采集设备通用规范

JB/T 6822 压电加速度传感器

JJG 338 电荷放大器

GB/T2951 电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法

1. 术语和符号
   1. 术语
      1. 冲击弹性波 impact elasticity waves

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。

* + 1. 压浆密实度 the duct grouting compactness

固化填充粘结物（如砂浆等）在有粘结预应力孔道中的密实程度。

* + 1. 定性检测 qualitative detecting

通过对梁体两端外露的预应力筋进行激振和拾振，分别记录预应力梁两端的检测数据，进而对整个孔道的压浆密实度加以分析判断的检测方法。

* + 1. 定位检测 positioning detecting

沿预应力孔道位置的走向扫描形式逐点激振和接收信号，基于压浆缺陷部位对弹性波传播和反射特性的影响，通过测试其反射规律的变化，进而对所测位置压浆缺陷的有无及范围进行分析判断的检测方法。

* + 1. 全长衰减法（FLEA）full length energy attenuation method

根据弹性波在压浆孔道中传播的能量比定性判断孔道有无缺陷的分析方法。

* + 1. 全长波速法（FLPV）full length P-wave velocity method

根据弹性波在压浆孔道中的传播的速度定性判断孔道有无缺陷的分析方法。

* + 1. 传递函数法（PFTF）P-wave frequency transform functions method

根据弹性波在压浆孔道中的传播的频率变化定性判断孔道两端有无缺陷的分析方法。

* + 1. 综合压浆指数 integrated filling index

基于全长波速法、全长衰减法、传递函数法三种分析方法得到的定性压浆密实度的综合指标。

* + 1. 压浆密实度指数 compactness index

孔道压浆密实长度与孔道总长度的比值，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。

* + 1. 冲击回波法（IE）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。

* + 1. 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的一种方法。

* + 1. 共振偏移法（IERS）impact echo resonance shift method

孔道压浆缺陷定位检测的分析方法，根据激振弹性波信号在孔道检测面正上方检测的自振周期，与灌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的一种方法。

* 1. 符号

Ｄ-为压浆密实度指数，在孔道长度中，压浆密实部分所占的比例；

Ｄe-为检测孔道的局部时，修正压浆密实度指数；

Ｄk-为当该孔道各检测区段中，压浆质量较好的连续区段的压浆密实度；

N-为定位检测的点数；

NJ-代表健全测点数；

Nx-代表小规模缺陷测点数；

ND-代表大规模缺陷测点数；

-为测点的压浆状态；

Ld-为检测区段长度；

L0-为孔道全长；

L-是孔道长度基准值（一般取10m）；

If-定性检测综合压浆指数；

IEA-为根据FLEA法得到的分项压浆指数；

IPV-为根据FLPV法得到的分项压浆指数；

ITF-为根据PFTF法得到的分项压浆指数；

Ar、As-分别是接收端和激振端信号的振幅（m/s2）；

Fr、Fs-分别是接收端和激振端信号的卓越频率（KHz）；

1. 基本要求
   1. 一般规定
      1. 公路混凝土桥梁预应力孔道压浆施工应做好质量控制工作。施工、监理单位应按本规程的有关规定进行自检、抽检，建设单位应按本规程的规定进行抽检。
      2. 检测过程中需记录测试对象编号、孔道编号、锚头编号、桩号等能说明测试对象准确位置的信息。
   2. 设备要求
      1. 总则
         1. 检测设备应适合于冲击弹性波信号采集与分析，主要包括激振装置、传感器、耦合装置、采集系统、显示系统、数据分析系统等。
         2. 检测设备应该定期送国家认可的计量检定机构进行检定/校准，且检定/校准结果合格方可进行检测 工作。
      2. 计量性能要求
         1. 检测设备标定幅值误差应优于±5%。
         2. 声信号测量误差应优于±1.0%。
      3. 系统硬件性能
         1. 采样分辨率

检测系统分辨率应不低于16bit，最大采样频率不低于500KHz。

* + - 1. 频谱特性

接收系统频响范围应适用频率在 0.1kHz～20kHz 的信号的采样。

* + - 1. 增益性能

检测系统应适用长度为 50m 以内的预应力混凝土梁压浆密实度的定性检测，接收端信号的 S/N 比应大于 5。

* + - 1. 元器件

测试系统的主要元器件传感器应符合 JB/T 6822 的规定，放大器应符合 JJG 338 的规定，A/D卡应符合 GJB 1805 的规定，此外还应符合本规程表 1 的要求。

表 1 主要测试元器件性能要求

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 传感器 | 类型 | 加速度传感器 |
| 共振频率 | 宜大于 25kHz |
| 电荷放大器 | 频率特性 | 2Hz～30kHz ±3dB |
| 低噪电缆 | | 其产生的脉冲信号小于 5mV。 |
| A/D 卡 | 采样频道数 | 不小于2 |
| 采样频率 | 最大于 250kHz |
| 分辨率 | 16bit |

* + 1. 系统软件性能要求

软件应满足表 2 要求。

表 2 测试软件的性能要求

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 数据采集 | 自检 | 应具有仪器的基本状态自检功能 |
| 触发 | 应具有预触发功能 |
| 频道数 | 可双通道测试 |
| 信号处理 | 降噪 | 应具有滤波降噪的功能 |
| 频响补偿 | 应具有频响补偿的功能 |
| 频谱分析 | 应应具有FFT、MEM频谱分析功能 |

* 1. 传感器耦合方式
     1. 基本要求

检测时应保证传感器与被测体紧密耦合，且接触面无浮浆、灰尘等异物。

* + 1. 定性检测

传感器宜采用磁性卡座或机械装置与最上端的钢绞线耦合，并保证传感器轴线与钢绞线轴线平行。 粘接面应无灰尘等杂质，且传感器粘接稳固。

* + 1. 定位检测

将带支座的加速度传感器按压在检测对象表面，保持紧密接触，确保传感器与被检对象的接触刚性。 传感器支座应能够增加阻尼和控制按压力度。

* 1. 激振方式
     1. 定性检测

宜采用激振锥等能够激发长波长弹性波的激振方式，且避免在同批次梁体检测中更换。

* + 1. 定位检测

根据检测对象的壁厚差异，应采用不同尺寸的激振锤（见表 3）；对测试结果不明确时，应换次选激振锤再次检测分析。

表 3 定位检测激振锤的选取参考

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 对象壁厚 | <20cm | 20～40cm | 40～60cm | >60cm |
| 首选激振锤 | D10 | D17 | D17 | D30 |
| 次选激振锤 | D6、D17 | D10 | D30 | D50 |

* 1. 检测时间要求

压浆材料的强度应达到混凝土强度的 70%以上方可进行密实度检测。

* 1. 适用条件
     1. 定性检测

定性检测宜用于孔道压浆事故（如漏灌、孔道堵塞造成大面积空管等）的普查，不可用于检测小范 围缺陷和确定缺陷位置；定性检测宜用于梁体两端钢绞线露出的纵向、横向预应力孔道，波纹管长度不 宜大于 50m，大于 50m的梁需要专门研究或变更为定位检测的方式。

* + 1. 定位检测

定位检测适用于检测管道压浆缺陷的有无及其位置，以及沿测线方向缺陷的范围大小、缺陷类型。在测试对象的厚度不大于 60cm，且底端反射明显时，应优先采用冲击回波等效波速法（IEEV）；当对象厚度大于 60cm，或底端反射不明显，或测试方向存在多排孔道时，宜优先采用共振偏移法（IERS 法）；当对象厚度大于 60cm，但底端反射明显时，也可采用冲击回波等效波速法（IEEV）。定位检测要求波纹管的尺寸及位置是确定的，且一般有如下适用条件，d 为孔道直径，T 为埋置深度：

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；

当 d/T≥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。

当 d/T≤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。

* 1. 检测频率
     1. 定性检测
        1. 对预制梁（板）桥，每座桥抽检桥跨数不少于总桥跨数的 20%且不少于 5 跨，不足 5 跨时全部检测，每种梁型抽查不少于 1 跨。每跨抽检梁（板）数不得少于该跨梁（板）总数的 20%。
        2. 对现浇梁（板）桥，每座桥抽检孔道数不少于总孔道数的 20%且不少于 20 孔，当孔道总数不足 20孔时，应全部检测。
        3. 对综合压浆指数不合格的孔道须进行定位检测。
        4. 对各种梁型，改变了施工工艺或压浆材料，宜对最初施工的 3 片预制梁或第 1 跨现浇梁前10个孔道进行检测。
        5. 无法进行定性检测时应采用定位检测。
     2. 定位检测
        1. 对预制梁（板）桥，每座桥抽检桥跨数不得少于总桥跨数的 10%且不少于 3 跨，不足 3 跨时全部检测，每种梁型抽查不少于 1 跨，每跨抽检梁（板）数不得少于该跨梁（板）总数的 20%。对于预应力负弯矩区段的孔道，每座桥宜按不少于孔道总数 10%的比例进行抽检。
        2. 对现浇梁（板）桥，按照不得少于同类型孔道总数或孔道总长度的 5%的比例进行抽检。
        3. 对每个预制梁场的各种梁型，以及改变了施工工艺、压浆材料的梁体，宜对最初施工的 3 片预制梁或 第1跨现浇梁前10个孔道进行检测。
        4. 根据本批次检测对象的孔道数量计算，若检测对象中有超过 15%不合格时，应将定位检测的频率增加1倍。
  2. 抽样要求
     1. 对梁体腹板、负弯矩等预应力孔道进行定位检测时，应优先选择孔道高程相对较高的锚头两端、负弯矩、起弯点等位置。
     2. 对需要排查压浆施工事故的梁体、孔道，应逐一检测。

1. 检测工作流程和方法
   1. 检测流程

压浆密实度检测工作流程如下图1。

**检测目的**

**定性测试**

**波纹管两端头压浆缺陷测试**

**压浆指数>0.80**

**结束**

**否**

**是**

**压浆事故排查、质量抽查**

**定位测试**

**测试位置的选定**

**测试及测试结果分析**

**对有疑问位置进行复测**

**对孔道和梁压浆质量评价**

**质量抽查**

图 1 压浆密实度检测流程

* 1. 检测方法
     1. 检测前准备工作
        1. 调查工程现场，收集工程设计图纸、压浆资料、施工记录等，了解预应力孔道位置走向、压浆工艺及压浆过程中出现的异常情况等。
        2. 对于定性检测，应将预应力孔道两端封锚砂浆凿除，并将锚具与出露的预应力钢束清洁干净，使之能够通过强力磁座与传感器牢固粘结耦合。
        3. 对于定位检测，应依据设计图纸、施工记录，描绘出被测预应力孔道走向及测点位置，并使测试区域及反射面内的混凝土表面平整、光洁。
     2. 定性检测

压浆密实度定性检测的现场布置及操作步骤可参照如下方法执行。

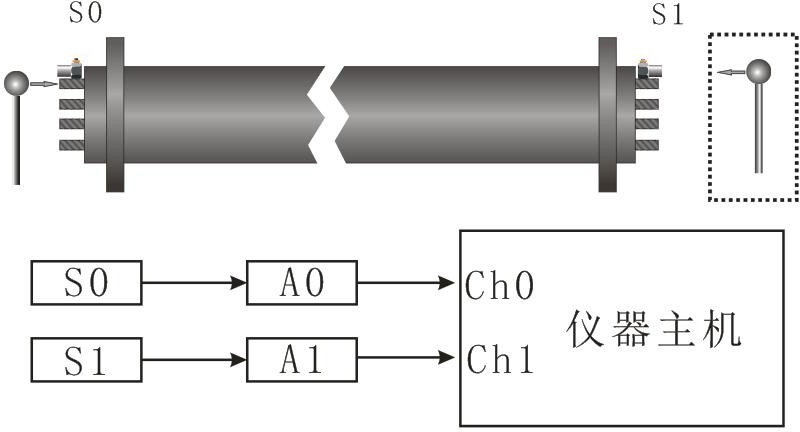


图 2 压浆密实度定性检测示意图

图2中S0和S1为两个加速度传感器，分别采用强力磁铁粘接在钢绞线的两端，A0 和A1为两个电荷放大器，Ch0和Ch1分别为主机的两个数据通道。具体步骤如下：

1. 按图 2 连接检测系统，按 5.3条的要求安装传感器，设置、标定试验参数，确认系统运行正常；
2. 在管道的一端用冲击锤激振，应使激振方向与预应力钢束走向平行，记录测试数据；
3. 调整设备参数，在管道另一端激振并记录数据；
4. 操作人员检查数据文件，确认数据完整、无异常情况后结束测试；
5. 每片梁（板）检测后，均应在其无预应力孔道的区域对波速进行标定，应取三次测量的平均值作为标定结果。
   * 1. 定位检测

压浆密实度定位检测的现场布置及操作步骤可参照如下方法执行。

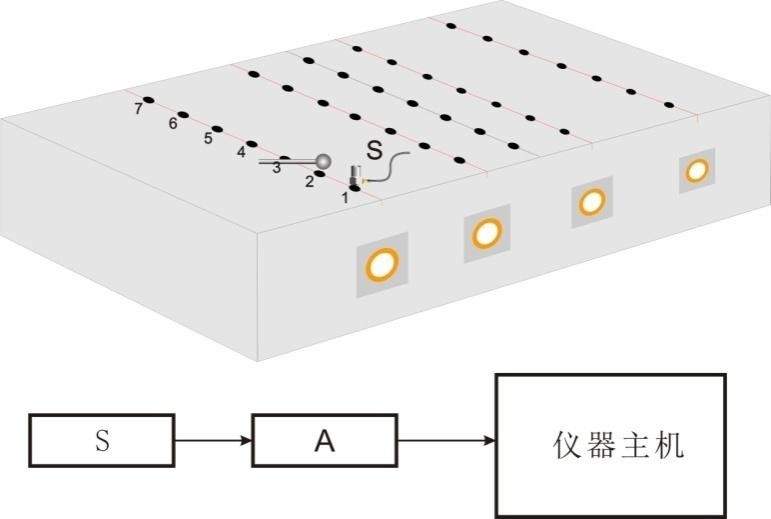


图 3 压浆密实度定位测试示意图

图 3 中 S 为加速度传感器，A 为电荷放大器。具体步骤如下：

1. 按图3连接检测系统，设置、标定试验参数，确认系统运行正常；
2. 根据设计值标注出孔道位置，以孔道中心线为测线，测点间隔可根据精度要求确定，一般选择 10cm为测点间隔；
3. 按一定的方向对每个测点进行测试，测试时按 5.3 条的要求将传感器和测试面耦合在一起，然后在传感器所在点的左侧或右侧 5cm 处激振，应使激振方向与构件表面垂直，激振点需和传感器都在测线上；
4. 将一条测线的全部测点逐一采集、保存数据后，操作人员检查数据文件，在确认数据完整、无异常情况后结束测试；
5. 在每一片梁（板）检测后，均应在其无预应力孔道的区域（宜选在两个孔道之间）进行线性标定，确定混凝土底部回波时间，应取三次测量的平均值作为标定结果。
6. 压浆质量评价
7. 1. 定性检测评价指数

采用综合压浆指数作为定性检测的评定指标，当压浆饱满时，，而完全未灌时，。综合压浆指数可以定义为：

 ……………………………(公式1)

其中，为根据FLEA法得到的分项压浆指数：

为根据FLPV法得到的分项压浆指数；

为根据PFTF法得到的分项压浆指数；

在通常情况下，各分项压浆指数可参考表５线性插值。

表５ 压浆指数的基准值

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 方法 | 项目 | 全压浆时值 | 无压浆时值 |
| 全长波速法 | 波速（km/s） | 混凝土实测波速(注-1) | 5.01(注-4) |
| 全长衰减法 | 能量比(注-2) | 0.02 | 0.20 |
| 传递函数法 | 频率比（/）（注-3） | 1.00 | 3.00 |
| 激振频率（KHz） | 2.0 | 4.0 |

注-1：梁不同部位的混凝土的P波波速有一定的不同；

注-2：能量比可按下式计算：

……………………………………（公式2）

其中，、分别是接收端和激振端信号的振幅（m/s2）

是孔道全长、是孔道长度基准值（一般可取10m）

注-3：、分别是接收端和激振端信号的卓越频率（KHz）。

注-4：根据钢绞线的模量（196GPa）推算，并结合实际测试验证。

* 1. 定位检测评价
     1. 压浆缺陷类型

预应力压浆缺陷分为大规模缺陷和小规模缺陷，可以根据 IEEV 法的底部反射波速以及波纹管壁反射（IE）信号的强弱参考表 6确定。

表 6 缺陷分级

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 管道类型 | 测试方向 | 等效波速 | 管壁反射 | 缺陷长度 | 缺陷类型 |
| 金属 | 侧向 | 降低 5～10% | - | ≤0.4m | 小规模 |
| 降低 10%以上 | - | 大规模 |
| 上下 | 降低 10～15% | ≤0.4m | 小规模 |
| 降低 15%以上 | ＞0.4m | 大规模 |
| 塑料PVC | 侧向 | 降低 5～10% | 无明显反射 | ≤0.4m | 小规模 |
| 有一定反射 | - | 大规模 |
| 降低 10%以上 | - | - | 大规模 |
| 上下 | 降低 10～15% | 无明显反射 | ≤0.4m | 小规模 |
| 降低 15%以上 | ＞0.4m | 大规模 |
| 降低 15%以上 | 有一定反射 | - | 大规模 |

* + 1. 测试区间的压浆质量

测试区间采用压浆密实度指数作为定位检测的评定指标，有：

…………………………（公式3）

其中，为定位测试的点数；为测点的压浆状态，即良好：1，小规模：0.5，大规模：0。上式也可改写成

****………………（公式4）

其中，代表健全测点数；

代表小规模缺陷测点数；

代表大规模缺陷测点数；

为总测点数，有

* + 1. 全孔道的压浆质量评价标准

当定位检测仅为孔道的局部时，用修正压浆密实度指数来判定孔道的压浆质量：

………………………………（公式5）

其中，为检测区段的压浆密实度指数；

为检测区段长度；

为孔道全长；

为当该孔道各检测区段中，压浆质量较好的连续区段的压浆密实度指数。该连续区段的长度取检测区段的1/2。

* 1. 压浆质量评价标准

由定位检测确定的综合压浆指数及由定性检测确定的压浆密实度，其压浆质量评价采用表7所示方法。

表 7 压浆质量评价标准一览表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 评价方法 | 评价参数 | 评价结果 | 说明 |
| 综合压浆指数 | ≥0.95 | I 类（优） |  |
| ≥0.8，＜0.95 | Ⅱ类（良） | 重点部位应定位复检 |
| ＜0.80 | Ⅲ类（不合格） | 应定位复检 |
| 压浆密实度 De | ≥0.95 | I 类（优） |  |
| ≥0.90，＜0.95 | Ⅱ类（良） |  |
| ＜0.90 | Ⅲ类（不合格） | 应复检，复检仍不合格，应进行局部处理 |

1. 压浆缺陷验证
   1. 一般规定

当检测方和被检方对测试结果出现争议时，应对检测存在疑问区域进行开孔验证，当验证结果与 检测结果不相符时，应分析原因，并对同批次同类型孔道的检测数据进行重新分析和判定，或进行复测。

* 1. 检测结果验证
     1. 应有一定的钻孔数量：考虑到无损检测和钻孔验证各自均有一定的误差，每个争议地点的钻孔 数量宜不少于 3 个；
     2. 钻孔口径不宜太小；
     3. 钻孔的位置应尽量位于管道的上部，且注意避开钢筋、钢绞线；
     4. 条件允许时，应从上向下钻孔，避免从下向上钻孔；
     5. 钻孔后宜用内窥镜观察，可辅以挂钩法、穿丝法；
     6. 当钻孔后未发现波纹管时，表明波纹管位置与设计位置偏差过大，应按相关规定处理。

**桥梁预应力孔道压浆密实度检测规程条文说明**

1. 总则

我省已建公路工程项目及在建项目桥梁众多，大多数为预应力结构，迫切需要对预应力孔道的压浆密实度进行检测，掌握相关情况，对预应力混凝土结构质量进行控制。项目相关单位质监部门也提出过检测意愿，但受限于省内对该检测项目的程序、方法、抽检频率、判别标准、处治措施等尚不明确和统一。本章节对制定本规程的目的，以及该规程与国家现行规程、行业规程的优先关系进行了说明。

1. 范围

本规程适用于桥梁预应力孔道压浆密实性的基于冲击弹性波法的检测。其中桥梁类型包括梁厂预制的预应力混凝土梁（板）桥和现浇的预应力混凝土梁桥；孔道材质包括塑料波纹管及金属波纹管， 孔道形状包括圆形和扁形，孔道方向包括纵向、横向和竖向。其它铁路桥梁、市政桥梁等预应力构件孔道压浆密实性的检测可参照使用。

1. 术语与符号

本章节将规程中列出的专业术语进行了详细描述，对参数计算过程中出现的符号做了规定。

1. 基本要求
   1. 一般规定
      1. 为了加强施工质量管理，本规程对各参建单位的抽样检测进行了规定。各项目也可根据实际情况，采取第三方检测、多方见证的方式进行。
      2. 为了检测数据追踪准确，对检测过程中须记录的信息也做了规定。
   2. 设备要求
      1. 总则

根据测试对象结构尺寸范围、测试信号频率范围、测试结果精度要求，为达到最好的测试效果， 对压浆密实度检测的仪器设备做了技术要求，不仅包括硬件性能参数还包括了软件分析方法等相关技术指标，对仪器设备的检定也做了明确规定。

* + 1. 计量性能要求

根据GB/T2951《电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法》及JJG 990-2004 《声波检测仪检定规程》要求和检测工作特点进行规定。

* + 1. 系统硬件性能

根据 GB／T15406-94 《土工仪器基本参数及通用技术条件》要求和检测工作特点进行规定。对于传感器，由于测试对象的梁、板较薄，且需要在频域进行分析，因此传感器的频谱特性很重要。考虑到电荷式加速度传感器具有体积小、频响范围宽等特点，因此可优先采用。对于放大器，其应与所选择的传感器参数匹配，且满足测试需求。

* + 1. 系统软件性能要求

正文中对系统软件性能的要求都是必须满足的。

规程中对频谱分析提出了两种方法，FFT（快速傅立叶变换，Fast Fourier Transform）及MEM（最大熵法，Maximum Entropy Method）。目前，在工程领域中最常用的频谱分析方法是FFT，然而FFT在定性检测的IEEV法的分析时面临以下的困难：

主要是分辨率不足的问题。 FFT分解时的频率为：



其中，为采样个数，为采样间隔。

考虑到缺陷检测的图形往往采用时间轴表示（以便与厚度对应），因此在*k*和*k+1*时刻的时间分辨率为：



可以看出，采样时间（间隔×采样数）以及次数决定了检测的分辨率。当然，采样时间越长、壁厚越厚（*k*越小），值越大，检测的分辨率也就越低。另一方面，由于FFT适合于类正弦波的连续分析，而对于反射次数的分析并不擅长。

MEM法是一种高分辨力的频谱分析方法，该方法在1967年被J.P.Burg提出，从此在各种领域取得了重要的成果。与FFT分析法相比，MEM具有以下几方面的特征。

1）频谱分辨率非常高；

2）适用于非sin/cos类信号；

3）最大熵谱估计的分辨率与序列长度N2成反比，序列长度越长，分辨率越高。相比之下，传统谱（FFT）估计的分辨率与观察时间（序列长度N）成反比；

4）解决了旁瓣泄漏问题。

但是，MEM分析法也有不少缺点,如果使用不当，会得出错误的结果。因此，使用MEM法分析数据时，需要注意以下几点：

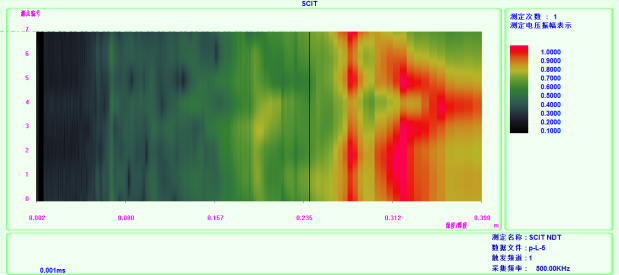
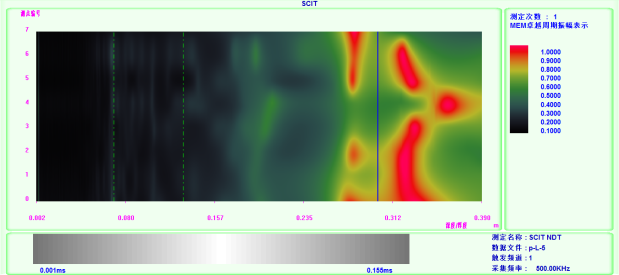
1）MEM是非线性分析方法。即两套数据迭加起来进行MEM分析的结果，与分别进行MEM分析后的结果叠加不一样的。此外，对测试数据进行BPF/HPF/LPF（带宽滤波、高通滤波、低通滤波）后，产生伪频谱的危险性会大大增加；

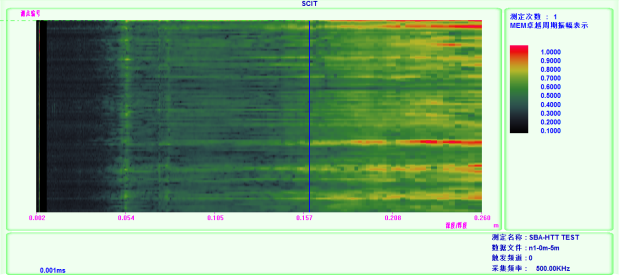
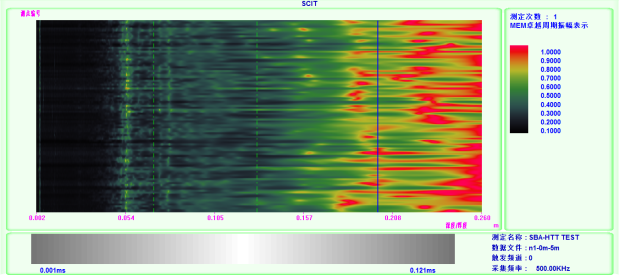
2）MEM分析中，对频谱的位置的分辨率很高，但对其振幅（高度）的分辨精度则无法保证。特别是当测试点数较少时，这种误差更加明显；

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

可采用变频（改变激振锤）、改变MEM分析模式（如采用增加稳定性模式）、利用FFT验算、及利用梁底反射波速（等效波速法）进行校核等方法来综合判定。

下图是FFT和MEM的分析结果的比较，可以看出，MEM法具有明显的优越性。

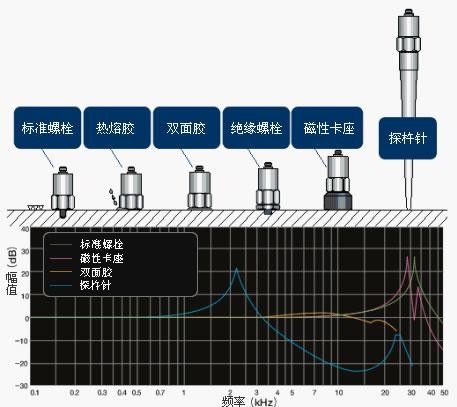
 

**图5-1 左：FFT图形，右：MEM图形**

* 1. 传感器耦合方式

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的关系。图 5-2 是自振频率在 30KHz 附近的传感器在不同的固定方式下测得的频响范围。

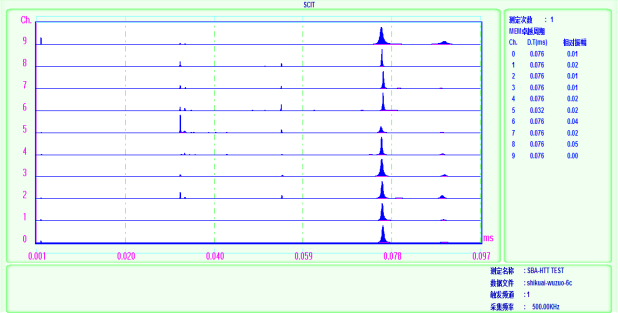
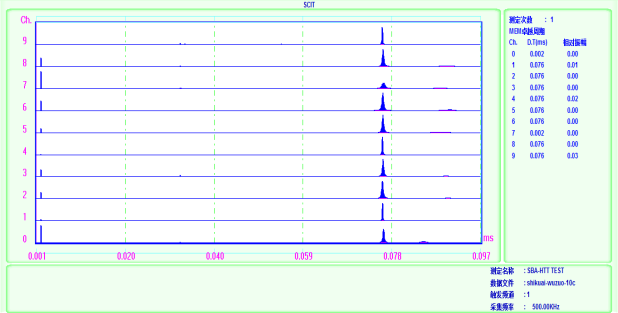


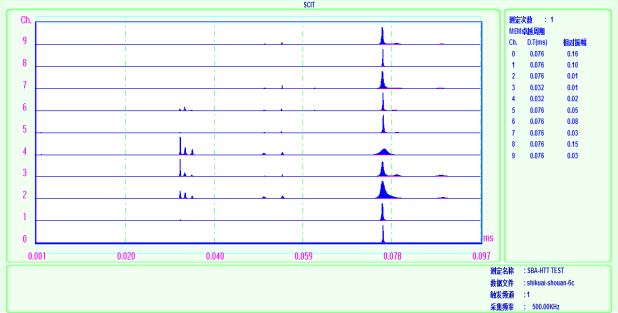
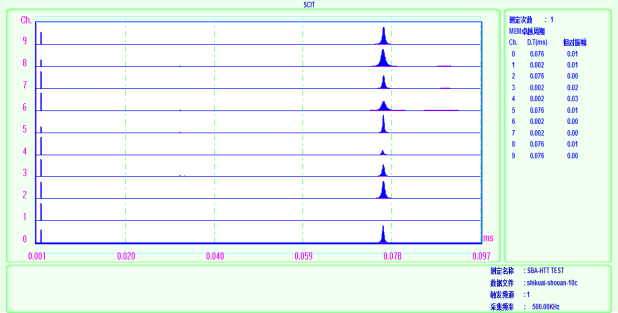
**图 5-2 不同固定方法对频响曲线的影响**

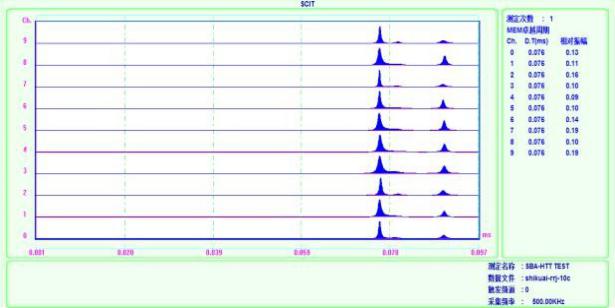
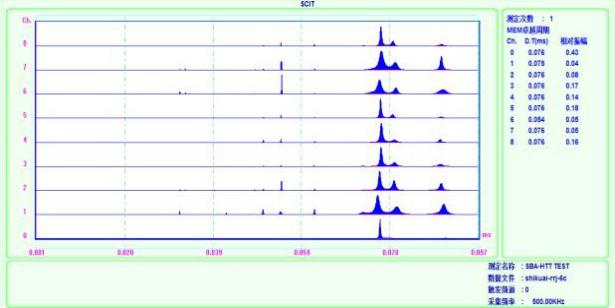
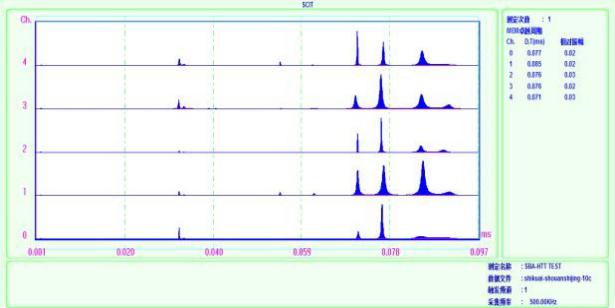
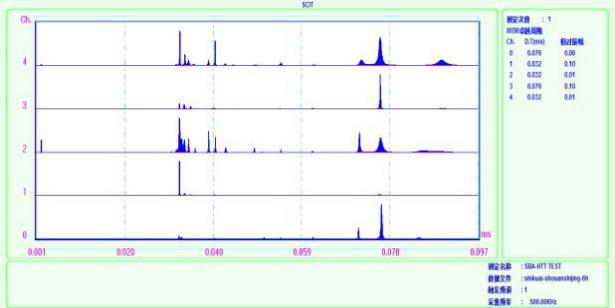
上图所示，采用人工或机械方式将传感器压在测试对象表面（压着式）的方法，测试效率最高，因此，本规程采用压着式作为传感器的固定方式。

为了达到即快速又可靠的测试，需要传感器既要牢固的与梁体表面接触，又能够方便移动。为此，我们利用一标准试块，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）专用支座套；2）手按力度小；3）手按力度大；4）热熔胶。

底部反射：0.076m**s**

**图 5-3** 测试结果（ MEM， 左： D6 锤标准模式， 右： D10 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较大；
3. 热熔胶固定有附加模态，测试结果与热熔胶的厚度、温度等有关；
4. 专用支座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。

另外一方面，可以通过合理的阻尼设计，提高传感系统的频响特性。为保证测试结果的可靠性， 在有条件时宜利用混凝土标准试块对耦合方式进行检验。

* 1. 激振方式
     1. 定性检测

在定性检测时，由于传播的距离长，信号衰减大，需要激发长波长、高能量信号。因此，应采用本身质量大、碰撞面曲率半径小的激振装置，激振锥是比较适当的。

* + 1. 定位检测

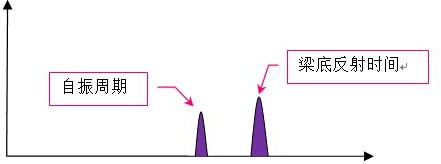
在定位检测时，需要激发适合的波长。因此，根据测试壁厚，采用不同直径的激振锤是适当的。事实上，选取的激振锤对压浆密实度检测精度和分辨力有很大的影响。激振锤激振得到的弹性波具有自振周期，该自振周期与弹性波速的乘积的一半，即为对应于自振周期的壁厚（以下简称“对应壁厚”）。对于 C50 的预应力混凝土梁，各激振锤得到的弹性波自振周期及对应壁厚约为下表所示：

表 5- 1 典型条件下对应壁厚

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 激振锤 | 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 |

根据实际壁厚与对应壁厚的关系，可以分为以下 3 种情形：

1. 当实际梁厚大于上表中的对应壁厚时，理论上在频谱图上就会出现两条线：

图 5- 4 自振周期的影响

1. 当实际梁厚接近表中的对应壁厚时，其自振信号与梁底反射信号会形成共振（也被称为“ 纵波共振”），此时在频谱上仅出现一个对应的峰值。该峰值可能偏向梁底反射时间，也可能偏向自振周期。
2. 当实际梁厚小于表中的对应壁厚时，其自振信号与梁底反射信号可能形成反向叠加，从而削弱梁底的反射。

因此，在通常情况下，选取激振锤使其对应壁厚小于实际梁厚是必要的。同时，当对应壁厚与波纹管中心位置接近时，容易引起误判。因此，应根据测试对象的壁厚，合理选取相应规格的激振锤，当对测试结果有疑虑时，换次选激振锤再次测试。

* 1. 检测时间要求

压浆材料龄期对其固化程度有很大的影响。当压浆料固化程度不足时，其在检测时的表象就类似于压浆缺陷。因此，从理论上讲，应当在压浆料的刚性接近乃至超过构件混凝土的刚性时进行检测。但这样所需的龄期往往很长，为检测、施工作业带来不便。

为此，本规程在检测总结经验的基础上，借鉴了相关规程（表 5-2 所示）对龄期的要求：

表 5- 2 不同检测规程对龄期的要求

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 发布机关 | 标准号 | 名称 | 龄期要求 |
| 国家能源局 | DL/T 5424-2009 | 水电水利工程锚杆无损检测规程 | 3 天以上 |
| 住建部 | JGJ/T 182-2009 | 锚杆锚固质量无损检测技术规程 | 7 天以上 |

压浆料的固化受温度影响很大，在检测时根据天气条件应适当增加龄期，以保证压浆材料的强度至少达到混凝土强度的 80%以上。否则压浆材料尚未充分硬化，其反应则类似缺陷，容易引起误判。

* 1. 适用条件
     1. 定性检测

定性检测的测试方法：利用露出的锚索，在一端激发信号，另一端接收信号。通过分析在传播过程中信号的能量、频率、波速等参数的变化，从而定性地判断该孔道压浆质量的优劣。该方法测试效率高，但测试精度和对缺陷的分辨力较差，因此一般适用于对漏灌、管道堵塞等压浆事故的检测。目前定性检测的分析方法有三种，但测试过程均相同：1）全长衰减法（FLEA）；2）全长波速法（FLPV）；3）传递函数法（PFTF）。各分析方法的原理及特点见 7.1 条。

梁的长度对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，定性检测的精度会大幅降低。此时，应采用定位检测。

* + 1. 定位检测

定位检测的测试方法：沿孔道轴线的位置，以扫描的形式逐点进行激振和接收信号。通过分析激振信号从波纹管以及对面梁侧反射信号的有无、强弱、传播时间等特性，来判断测试点下方波纹管内缺陷的有无及形态。该方法检测精度高、分辨力强，适用范围较广，目前使用最多。但该方法耗时较长，且受波纹管位置影响较大。目前分析方法有三种：1）改进冲击回波法（IE），通过改进频谱分析方法，提高了分辨力；2）冲击回波等效波速法（IEEV）；3）冲击回波共振偏移法（IERS）；各分析方法的原理及特点详见 7.2 条。

定位检测的主要影响因素如下：

* + - 1. 梁、板的厚度

板的厚度对定性测试各方法的影响相对较小，而对定位测试的 IEEV 法则有较大的影响。一般来说，当管径相同时，板厚越薄，IEEV 法的测试精度越高。

基于目前的定位检测的技术水平，在采用 D50 激振锤激振时，IEEV 法一般要求梁、板的厚度不超过 0.6m。而IERS 法则要求管道最大埋深不超过 0.6m。

* + - 1. 管道的排列和位置

管道的排列对定性测试各方法的影响相对较小，而对定位测试的 IEEV 法则有较大的影响。当有双排管道时，尽可能从两个侧面用IEEV 法测试。

对角落边界条件比较复杂的管道需要加密测点。有马蹄形扩幅的 T 梁腹板孔道，往往需要从下部测试。

* + - 1. 混凝土浇筑质量和钢筋

混凝土浇筑质量对检测的结果影响不大，但当混凝土存在浇筑缺陷、明显不均匀时，也会对检测结果造成不利影响。

一般来说，钢筋的影响不大，但在管道和测试面之间有钢板等异性构件时，也会产生相应的影响。

* + - 1. 管道材质的影响

对金属波纹管，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，一定要结合等效波速法（IEEV）加以综合判断。

以下是针对不同结构汇总的的适用方法及检测效果

表 5- 3 不同结构适用的分析方法参照表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 常见结构类型 | 适用结构 | | 适用分析方法 | 检测效果 | | |
|  | 箱梁腹板、T 梁腹板或者其他单排波纹管结构 | | IEEV/IE/IERS | 可检测出缺陷的大致类型、尺寸 | | |
|  | 单排结构的负弯 矩，连续梁顶板等单排结构 | | IEEV/IE/IERS | 可检测出缺陷的大致类型、尺寸 | | |
|  | 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 | | IE/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 | | IE/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 | | IE/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，尽可能从下部激振 | IE/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 | IE/IERS | | | 可检测出该处是否存在缺陷 |
|  | 多排类型波纹管的板式结构，其中部孔道为测试盲区无法进行定位测试， 有条件可考虑定性检测 | IE/IERS | | | 可检测出该处是否存在缺陷(中部孔道为测试盲区) |

综上所述，定性检测效率高，但测试精度和对缺陷的分辨力相对较差；而定位检测测试效率相对较低，但其测试精度高、分辨力强，适用范围较广，能够准确定位并一定程度量化缺陷大小。因此，根据检测目的，可以选择一种检测方法，也可以两种方法配合使用，达到效率与精度的平衡。但总体而言，在条件许可时，推荐优先采用定位检测。

* 1. 测试频率

参照已颁布的福建地方规程、山西地方规程等，以及国内其他省市执行抽检情况，综合我省地方实际情况考虑对检测比例进行了规定。施工单位自检及监理抽检频率可在此基础上适当提高，对孔道压浆质量进行过程中控制。

* 1. 抽样要求

根据实践经验和研究成果，发现影响压浆密实度的主要因素在于：

* + 1. 压浆料：压浆料的优劣对于压浆密实度的影响最大；
    2. 孔道位置：由于泌水、气泡聚集是造成压浆缺陷的直接原因。而无论是泌水还是气泡，均轻于固体化压浆料。因此，泌水、气泡容易聚集于管道的拐点和上部；
    3. 压浆工艺：压浆工艺对压浆质量的影响也不容忽视，先进的压浆工艺如真空压浆、智能压浆等有助于提高压浆质量。但需要指出的是，仅靠压浆工艺并不能保证压浆一定密实。

因此，抽样方式及测试位置主要考虑了泌水和气泡的影响。在进、出浆口；弯曲孔道的起弯点； 反弯点顶部；平直孔道的各个位置均容易出现压浆缺陷。一般定位检测的测点间距按 10cm－20cm 布置。

1. **检测工作流程和方法**
   1. 测试流程

在现场检测中，只要条件允许，应尽量采用定位检测的方法。当定性检测发现有问题或疑问时， 应进行定位检测和验证。

* 1. 测试方法
     1. 检测前准备工作

钢绞线端头清理包括长度及其清洁度的清理，钢绞线端头长度应控制在 3～5cm，太短传感器无法安装，太长影响激励信号。清洁度应该有利于传感器的安装，基本要求钢绞线上无覆浆。

定位检测采用频域分析，所需的数据时长较长。因此，如果测试表面形状不规则、不平整时， 周围边界的反射信号就可能会对测试结果产生不利影响。

* + 1. 定性检测

传感器安装应保持对称，尽量使传感器安装在同一根钢绞线上，传感器应接近锚头但不与锚头或夹片接触。另外，传感器应安装在钢绞线的上沿。在施工时如果钢绞线发生扭转，测试的钢绞线可能不是同一根钢绞线，会造成一定的测试误差。但由于激振产生的弹性波信号可以在钢绞线中相互传递，从实际的测试效果来看，其影响并不显著。当然，根据预应力施工规范，要求各钢绞线平顺，在施工中可以用标注记号的方式确保钢绞线的平顺。

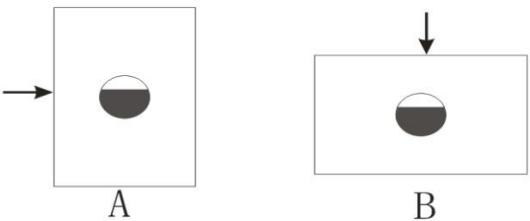
在混凝土波速标定时，如果梁体较高，则不同高度的混凝土的基准波速往往有一定的差异。通常是上面小下面大。因此，基准波速的测试最好是在波纹管的中间高程处进行。

双方向激振对提高 FLEA（全长衰减法）的精度非常有必要。全长衰减法涉及能量的衰减变化对比，因此，放大器的相关设置和传感器灵敏度应明确记录，一般数据采集软件中可以同步记录相关信息。

* + 1. 定位检测

定位检测需要沿孔道进行激振和测试。显然，孔道定位的精度直接影响测试的精度和分辨力。经了解，山西省交通科学研究院对激振点与管道的相对位置的影响进行了研究。激振点的位置分别位于孔道中心投影、中心+D/4 和中心-D/4。结果表明，无论是全空还是全满，各个激振点测试得到的有效波速相差均在 2%之内。因此，激振位置只要在孔道中心投影的±D/4 范围内，检测结果均较为准确。换言之，孔道定位的误差不应超过 D/2。当然，在孔道中心投影面上激振是最为理想的。为此，一方面可以采用电磁波雷达法定位，另一方面，通过加密测点，采用网格状的测试方法也是十分有效的。

检测方向的合理选取对提高检测精度十分必要。其原则在于尽量从上下方向检测，在管道中压浆不密实的一个重要原因是压浆材料的泌水。此时，产生的空洞主要位于管道的上方。由于形状的关系，如图 6-1 的从上往下方向定位检测的分辨力就比较高，而从侧面定位检测的分辨力就相对低一些。对于腹板的孔道，大多数只能采用 A 方式。为了提高分辨力，适当加密测点，或采用双测线是有效的。



**图 6-1 激振方向的影响**

当边界条件复杂（拐角处）或测试面有斜角（如底部有马蹄时），测试精度会受较大的影响，此时应仔细选择检测方向。



**×**

**√**

**图 6-2 马蹄形部位的测试方法**

测点间距的选取与缺陷定义有关。一般而言，当测试云图中连续有三个点出现缺陷的反应时， 其为缺陷或者大缺陷的可能性较大。

定位检测应根据测试对象结构厚度适当地设置放大器，本规程要求放大器可调，当放大倍数为

10 倍时，测试信号应控制在 2～3V 之间；当结构厚度超过 60cm 以上时应当设置在 20-50 倍范围内， 测试信号也应控制在 2～3V 之间。

在健全混凝土结构上波速的标定有助于IEEV 法的判定。一般要求定位检测标定采用线性标定， 即在孔道位置附近，结构尺寸相当，无孔道混凝土健全部位进行与定位检测类似的标定检测。条件允许标定测试间距、长度可与定位检测一致；条件不允许，可选取 2m 左右的一段进行线性标定。

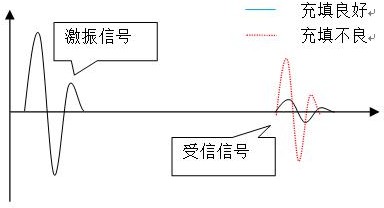
对于孔道两端，锚垫板喇叭口内的压浆质量，由于该区域钢筋密集，且有喇叭口的影响，因此对定位检测的精度影响很大。此时，需要用定性检测中的传递函数法（PFTF）进行测试。

1. 压浆质量评价
   1. 定性检测评价指数

定性检测根据原理不同可以分为三种测试分析方法，即 1）全长衰减法（FLEA）；2）全长波速法（FLPV）；3）传递函数法（PFTF），在一次测试过程中，可同时完成上述三种方法的测试。

1）全长衰减法（FLEA）

如果孔道压浆密实度较高，能量在传播过程中逸散的越多，衰减大，振幅比小。反之，若孔道压浆密实度较低，则能量在传播过程逸散较少，衰减小、振幅比大。



**图 7-1 全长衰减（FLEA）测试示意图**

因此，通过精密地测试能量的衰减，既可以推测压浆质量。在定性检测中，该方法相对而言测试范围最广。但该方法测试受传感器的接触状态、边界条件等的影响大、误差也较大，必须通过双向激振的方法来抑制误差。

1. 全长波速法（FLPV）

通过测试弹性波经过锚索的传播时间，并结合锚索的距离计算出弹性波经过锚索的波速。通过波速的变化来判断预应力管道压浆密实度情况。一般情况下波速与压浆密实度有相关性，随着压浆密实度测增加波速是逐渐减小，当压浆密实度达到 100%时，测试的锚索的 P 波波速接近混凝土中的P 波波速。

**测试波速**

**测试波速**

**钢绞线波速：约5.01km/s**

**混凝土波速：约4.3～4.6km/s**

**压浆密实度**

**0**

**1**

**图 7-2 全长波速法测试示意图**

该方法最早由日本学者镰田敏郎教授于 2001 年提出，尽管存在理论基础不严密等诸多问题， 但其作为一种较为直观的测试方法，特别是在测试压浆密实度很低的时候，仍然有一定的应用价值。因此，我们对测试理论进行了研究。

基于等效模量的方法，压浆密实度与测试波速的关系可以表达为：



其中，、分别为孔道中钢绞线的面积和孔道的面积；

、分别为钢绞线和压浆料中弹性波的波速。其中，取5.01km/s，则应通过试块加以测试。具体测试方法可参见“混凝土质量综合检测技术方案”；

、分别为钢绞线和压浆料的密度，分别可取7800和2400kg/m3；

为修正系数，反映孔道壁（PVC或铁皮）以及周围混凝土的影响，可通过压浆饱满孔道（=1）的实测波速来标定：

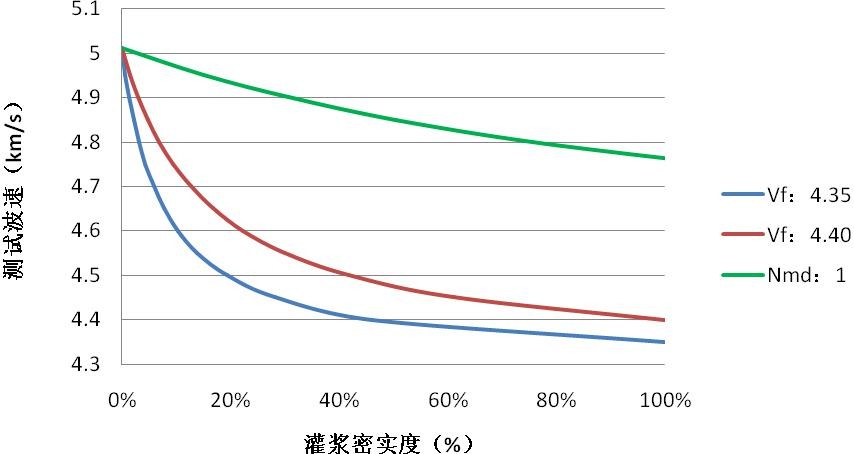


代入上式，又可以得到：



因此，只要能够实现测出和，即可容易地得到压浆密实度。此外，当时，取1。

在此，我们利用一套典型参数进行了计算。取4.30km/s和4.45（取1），分别取4.35、4.40：

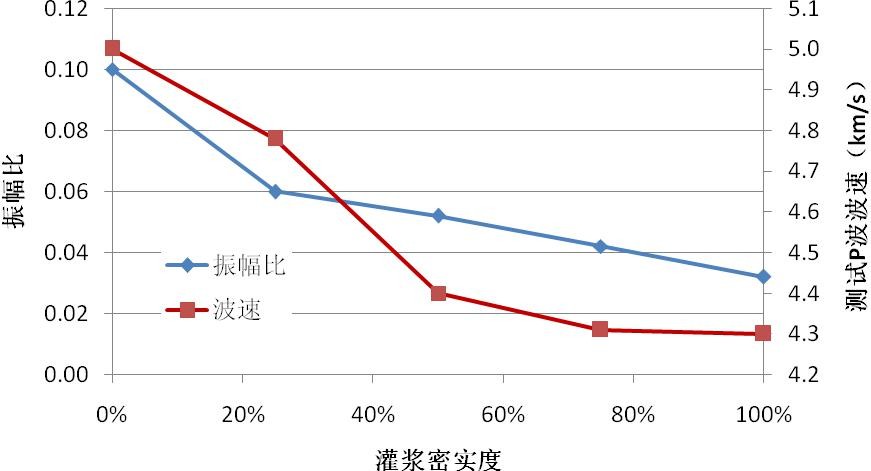


**图 7-3 全长波速法计算例**

从中可以看出,压浆密实度在 0～40%时，测试波速明显提高。但当压浆密实度超过 40%以后， 波速的变化就非常缓慢。换言之，FLPV 法仅对压浆密实度很低的工况有效，这一点要特别引起注意。

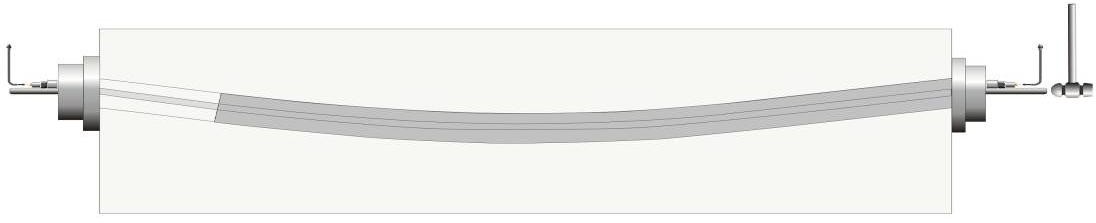
下图是基于试验的全长波速法和全长衰减法的实测结果。可以看出：

1. 随着压浆密实度的提高，测试得到的振幅比和 P 波波速均逐渐降低，因此全长衰减法和全长波速法均可以适用；
2. 在全长衰减法中，压浆密实度在 50-100%范围内，其振幅比的变化较为均匀，因此，其对压浆密实度较高的孔道较为适宜；
3. 在全长波速法中，实测结果与理论结果一致。

图 7- 4 定性测试结果

1. 传递函数法（PFTF）

在孔道的一端钢绞线上激振另一端接收时，如果端头附近存在不密实情况，会使振动的频率发生变化。因此，通过对比接收信号与激发信号相关部分的频率变化，可以判定锚头两端附近的缺陷情况。



**图 7-5 传递函数法的测试概念**

受到张拉的钢绞线，其第 1 阶自振频率 *f*1 可以由下式得到：



其中， *L* ：参与振动的钢绞线的长度；

*T* ：钢绞线的张力；

**：参与振动的钢绞线+压浆体的线密度。

在张力一定的情况下，压浆缺陷对频率的影响可归纳在下表：

**表 7-1 压浆缺陷对传递函数法的影响因素**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **指标** | | **缺陷截面积增加** | **缺陷长度增加** |
| 自振频率 | 变化趋势 | 增加 | 降低 |
| 变化幅度 | 大 | 小 |

由此可见，压浆缺陷的截面积、长度对自振频率的影响是截然相反的，因此，只要测试得到的频率有明显的变化，就说明在端头附近存在缺陷的可能性较大。同时，由于在外露钢绞线上激振和测试，其诱振范围较小，缺陷长度的影响也相对较小。因此，在大多数情况下，端头缺陷的存在使得钢绞线的自振频率增加。

压浆孔道的两端口是比较容易出现压浆缺陷的位置，因此传递函数法具有较大的实际意义。然而，钢绞线的自振频率不仅取决于压浆密实度，还与钢绞线的张力、自由段长度等有关。当钢绞线未充分张拉，或者未压浆部分过长时，其自振频率反而可能降低。因此，当自振频率过低时，也应注意是否张拉不到位或者缺陷段过长。

定性测试三种分析方法各有特色，各方法的优缺点如表 7-2 所示。

**表 7- 2 压浆密实度定性测试方法比较**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **方法名称** | **优点** | **缺点** |
| 全长衰减法  （FLEA） | 测试原理明确，对压浆缺陷较为敏感，对压浆密实度较高的孔道较为适  宜 | 测试结果离散性较大，影响因素多，必须通过双向激振的方法  来抑制误差 |
| 全长波速法  （FLPV） | 测试结果较为稳定，适合测试大范围缺陷 | 测试原理不严密，对缺陷较为钝感，仅对压浆密实度很低的工  况有效 |
| 传递函数法  （PFTF） | 能够测试锚头附近的压浆缺陷，解  析方便 | 测试范围较小 |

尽管三种分析方法原理不同，但测试方式完全一样。因此，根据一次测试采集数据可以同时进行三种方法分析，并得到各自分析结果。为了使定性测试结果能直观反映出压浆质量，从而科学指导后续工作，我们引入了综合压浆指数 *I f* 以及三个分项压浆指数：根据 FLEA 法得到的分项压浆指数 *IEA* ，根据FLPV 法得到的分项压浆指数 *IPV* ，根据PFTF 法得到的分项压浆指数 *ITF* 。

压浆指数是一个相对指标，本身没有物理意义。定义当压浆饱满时，各分项压浆指数的值为 1； 而完全未灌时，压浆指数的值为 0；若测量结果在此区间，则采用线性插值得到相应的分项压浆指数的值。同时，综合压浆指数定义为：



由上式可知，综合压浆指数的值也在 0 至 1 之间。只要某一项的压浆指数较低，综合压浆指数就会有较明显的反映。根据检测经验，综合压浆指数 *I f* 较低（小于 0.8）或者很高（大于 0.95） 时，往往能够比较鲜明地反映压浆的状况（很差或较好）。而在中间区间，则难以准确判定，因此， 该区间应谨慎判定合格，宜进行局部定位检测，再根据定位检测相关评定方法进行评定。

分项压浆指数是根据基准值线性内插计算得到的，如表 7-3。因此，基准值的选定是非常重要的。本规程相关基准值是在特定的设备（四川升拓检测技术有限责任公司生产的预应力混凝土梁多功能检测仪SPC-MATS，孔道压浆密实度质量检测仪 SBA-HTF）检测数据的基础上确定的。如果采用了其它不同类型的检测设备，则该基准值应进行相应的标定和调整。此外，不同形式的锚具、梁的形式以及孔道的位置都会对基准值产生影响，所用在条件许可时，进行相应的标定或通过大量的测试并结合数理统计的方法确定基准值是非常理想的。

**表 7-3 压浆指数的基准值**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **方法** | **项目** | **全压浆时值** | **无压浆时值** |
| 全长波速法  FLPV | 波速（km/s） | 混凝土实测波速注-1 | 5.01注-4 |
| 全长衰减法  FLEA | 能量比注-2 | 0.02 | 0.20 |
| 传递函数法  PFTF | 频率比（*/*注-3） | 1.00 | 3.00 |
| 激振频率（KHz） | 2.0 | 4.0 |

**注-1：梁不同部位的混凝土的P波波速有一定的不同；**

**注-2：能量比可按下式计算：**



**其中，、分别是接收端和激振端信号的振幅（m/s2）**

**是孔道长度、是孔道长度基准值（一般可取10m）**

**注-3：、分别是接收端和激振端信号的卓越频率（KHz）。在此，采用SPC-MATS 配置的激振导向器和D50锤激振而且充分张拉时的数值；**

**注-4：根据钢绞线的模量（196GPa）推算，并结合实际测试验证；**

* 1. 定位检测评价

本规程的定位检测以冲击回波法（IE 法）为基础，即根据在波纹管位置反射信号的有无以及梁底端的反射时间的长短，来判定压浆缺陷的有无和类型。该方法是上世纪 80 年代末发展起来的， 针对结构内部缺陷的一种非常有效的检测手段。

早在上世纪 60 年代，美国国家标准和技术研究所（The National Institute of Standards and Technology ，NIST，也被称为美国国家标准局，National Bureau of Standards ，NBS) 就针对结构的无损检测技术（NDT）进行了研究，并在传统的工业无损检测技术（如X 射线、超声波、磁粉等）的基础上提出了相应的标准。

自 1983 年起，NBS 将研究重点放在了混凝土结构中的缺陷检测，但是，在NBS 在研究中发现， 既存的检测手段不适合混凝土内部缺陷的检测。通过对各类技术手段的对比，基于应力波（后来被称作弹性波）的检测技术由于波长较长，且能够反映力学特性而被作为了技术基础（Carino and Sansalone 1984），其研究成果则由于“冲击回波法”impact-echo method（Sansalone and Carino,1986）而广为人知。

1997 年，Sansalone 和Streett 发表的著作中全面阐述了IE 法的理论、室内和现场试验结果。在此基础上，90 年代末期，NIST 和康奈尔大学共同发布了IE 法的标准草案，并于 1998 年成为ASTM标准[ASTM C 1383]。

然而，IE 法在检测压浆缺陷时也遇到了诸多困难，往往无法检出压浆缺陷。其原因在于两个方面：

一方面，由于波纹管的存在，严重干扰了反射波。特别是金属波纹管，由于金属与缺陷的阻抗相反，使得两者的反射有互相抵消的趋势，使得反射信号变得更加微弱。

另一方面，传统的IE 法通常采用FFT 作为频谱分析的手段。但FFT 对微弱信号的低分辨力进一步阻碍了其对缺陷的检出。

为此，本规程引入了在传统的IE 法的基础上，进行了改进和扩展的多项新技术。大量的试验验证和现场应用表明，等效波速法(IEEV 法)、共振偏移法（IERS）法可以较好地识别压浆缺陷。

IE、IEEV 及IERS 法的基本原理是，当管道压浆存在缺陷时，有：



**压浆密实 压浆有缺陷 未压浆**

**图7-6 改良冲击回波法IEEV测试原理**

* + 1. 激振的弹性波在缺陷处会产生反射（IE 法的理论基础）；
    2. 激振的弹性波经过缺陷时，从梁对面反射回来所用的时间比压浆密实的地方长，其等效波速（2 倍梁厚/来回的时间）变慢（IEEV 法的理论基础）；
    3. 当激振信号产生的结构自由振动的半波长与缺陷的埋深接近时，缺陷反射与自由振动可能产生共振的现象，使得自由振动的半波长趋近于缺陷埋深（即共振偏移，IERS 法的理论基础）。

IEEV及IERS方法的具体情况如下。

1. 等效波速法（IEEV） 该方法包括两个部分，即：
2. 当存在压浆缺陷时，弹性波波线（或部分）传播距离增加，时间延长；
3. 采用基于相关分析为基础的频谱分析方法可以敏感地反映该时间的变化。基于这两点，即使压浆缺陷仅为局部，或者测线不在缺陷的正上方也可适用。



**局部缺陷 测点偏移 最短路线 最长路线**

**图 7-7 冲击回波等效波速法的概念**

对于位于梁中央的全空管，在其中心投影点激振，其从对向反射回来的最长和最短路径分别为：

最长路径：

最短路径：

其中， *H* ：梁厚；

*D* ：波纹管直径。

若不考虑波纹管材质的影响，则在典型工况下，全空管造成的等效波速的滞后如下表：

**表 7-4 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% | 22.20% | 25.51% |
| 最小滞后 | 0.25% | 0.98% | 2.15% | 3.71% | 5.57% | 7.67% |
| 平均滞后 | 2.82% | 5.61% | 8.39% | 11.15% | 13.89% | 16.59% |

对于局部缺陷（如半空），测试方向的影响很大。若从上、下方向测试，半空管的反应与全空相同。而从水平方向测试，则半空缺陷造成的等效波速的滞后要小于全空。

经实践证明，等效波速法是非常有效的方法。

1. 共振偏移法（IERS）

对于通常的预应力混凝土梁（C50），各激振锤得到的弹性波自振周期大约如下表：

**表 7-5 典型条件下弹性波的自振周期（ms）**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 激振锤 | D6 | D10 | D17 | D30 | D50 |
| 自振周期（ms） | 0.021 | 0.034 | 0.058 | 0.103 | 0.172 |
| 对应反射深度（m） | 0.041 | 0.069 | 0.117 | 0.206 | 0.344 |

因此，在孔道上面测得的自振周期与压浆密实部位或混凝土中测得的自振周期有所变化，且其对应反射深度与孔道埋深接近时，表明孔道压浆有缺陷。



**偏移量**

**压浆密实 压浆缺陷（自振频谱移位）**

**图 7-8 冲击回波共振偏移法（IERS）测试原理**

当测试结构厚度较厚，难以采用等效波速法时，可采用本方法。其中，激振锤的选取十分重要， 应尽量选取与孔道埋深相对应的激振锤，使得激发的弹性波频率与孔道的反射频率相近却又不完全相同，此时的测定效果最为理想。

上述三种方法均采用同一数据和同一频谱分析，仅在云图判读上有所不同。一般而言，IE 法是基础，各种状况均适用。IEEV 法适合于壁厚较小，底部反射明显的情形，且壁厚/孔径比（D/Φ） 越小，测试精度越高。而 IERS 法则相反，适合于壁厚较大，底部反射不明显的情形。

* + 1. 压浆缺陷类型

研究表明，不同类型和不同规模的缺陷对结构耐久性和整体性的影响是不同的：

* + - 1. 疏松型缺陷对结构的耐久性和整体性的影响相对较小。但是，当缺陷处材质强度降低较大，对钢绞线的保护性能严重低下时，其对结构的不利影响接近于空洞型缺陷；
      2. 当空洞型压浆缺陷与钢绞线相接触时，其对钢绞线的锈蚀的影响将急剧增加；
      3. 当空洞型压浆缺陷接近于全空时，不仅会严重影响钢绞线的耐久性，而且对结构的整体性等多个方面都会产生不利影响。

因此，将空洞型缺陷是否与钢绞线相接触，以及其是否接近全空作为缺陷的分级是恰当的。对于通常的孔道施工，钢绞线的横截面积约为孔道横截面积的 30%左右。考虑到形状因素，在钢绞线居中的情况下，经计算，钢绞线与管壁的距离约为管道内径的 0.2 倍左右，亦即 1.4～1.8cm。该规模的缺陷，对于侧方向定位检测，恰好能被检出；而对于上下方向的检测，由于缺陷通常位于管道的上方，其投影宽度约为管道内径的 0.8 倍，容易被检出。

再根据检测技术的水平状况，将预应力压浆缺陷分为大规模缺陷和小规模缺陷两级，可以根据

IEEV 法的底部反射波速以及波纹管壁反射（IE）信号的强弱参考表 7-7 确定。其中，大规模缺陷对应于 1.1.2 中的D 级，而小规模缺陷主要对应 1.1.2 中的B、C 级，和部分压浆料强度严重低下的疏松型缺陷。

**表 7-7 缺陷分级**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **管道**  **类型** | | **测试**  **方向** | | **等效波速** | | **管壁反射** | | **缺陷长度** | | **缺陷等级** | |
| 铁皮 | | 侧向 | | 降低 5～ 10 % | | - | | ≤ 0. 4m | | 小规模 | |
| 降低 10% 以上 | | - | | 大规模 | |
| 上下 | | 降低 10 ～ 15 % | | ≤ 0. 4m | | 小规模 | |
| 降低 15% 以上 | | ＞ 0. 4m | | 大规模 | |
| 塑料PVC | | 侧向 | | 降低 5～ 10 % | | 无明显反射 | | ≤ 0. 4m | | 小规模 | |
| 有一定反射 | | - | | 大规模 | |
|  |  | | 降低 10% 以上 | | - | | - | | 大规模 | |
| 上下 | | 降低 10 ～ 15% | | 无明显反射 | | ≤ 0. 4m | | 小规模 | |
| 降低 15% 以上 | | ＞ 0. 4m | | 大规模 | |
| 降低 15% 以上 | | 有一定反射 | | - | | 大规模 | |

在进行频谱分析时，应考虑波纹管材质对检测结果的影响。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，因此不能仅凭缺陷处的反射信号的强弱来判断，一定要结合等效波速法（IEEV）即梁底部（壁面）反射信号的传播时间加以综合判断。

表 7- 6 波纹管材质对缺陷判别的影响

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **波纹管材质** | **波纹管位置反射信号** | | | **缺陷时梁底反射时间** |
| **管壁** | **空洞缺陷** | **整体反射** |
| PVC | 微弱正向 | 正向 | 正向较强 | 延后 |
| 金属 | 微弱反向 | 正向 | 较弱 | 延后 |
| 无波纹管 | 无 | 正向 | 正向 | 延后 |

* + 1. 测试区间的压浆质量

压浆密实度指数 *D* 反映了在整个检测区间中，压浆密实部分所占的比率。每个测点的压浆状态**则根据 7.2.1 的方法确定。

* + 1. 全孔道的压浆质量评价标准

若仅对容易发生压浆缺陷的部分进行定位检测，则该部分出现压浆缺陷的概率远大于其他部位，若仍采用压浆密实度指数 *D* 作为全孔道压浆质量的评定方法显然不妥。为此，假设在检测区间中，较好的区间的 *Dk* 值可以代表其它未检测部分，以修正压浆密实度指数 *De* 来判定孔道的压浆质量。当然，该区间应满足以下条件：

1. 连续；
2. 长度不少于总检测长度的 1/2。
   1. 压浆质量评价标准

对于两种评价方法，其评价标准均建立在试验数据的基础上。附录 I 中归纳了我们在一些公路上的检测结果，规律性的结果如下：

* + 1. 预制梁一般质量较好，优良（Ⅰ、Ⅱ类梁）率在 90%左右，但也有少部分梁（8%左右） 压浆质量较差；
    2. 现浇梁普遍压浆质量较差，特别是负弯矩处；
    3. 采用综合压浆指数 *I f* 时，对于压浆质量特别差（如漏灌、管中堵塞）的孔道是适合的。而对于普通质量的压浆孔道，则具有较大的局限性。
    4. 采用压浆密实度指数 *D* 时，要注意测点选取位置以及测点数的影响。在实际测试中，可以对孔道全长进行检测，也可以对易于出现缺陷的区域进行局部抽检。显然，对孔道全长的检测得到的 *D* 会高于局部抽检得到的 *D* 值，这也可以部分解释现浇梁 *D* 偏低的现象。

1. 压浆缺陷验证

当检测方和被检方对测试结果出现争议时，应对测试存在疑问区域进行开孔验证，以确保测试结果的可靠性。但是，钻孔验证也并非一定准确，其错判、漏判的情形也十分常见。而且，在绝大多数情况下，会产生漏判（即将有缺陷判为无缺陷）。造成这样的状况主要有以下原因：

1） 钻孔方向的影响

由于缺陷通常出现在孔道的上部，因此从上部钻孔是最为理想的。然而，由于作业条件的限制， 从侧面、下面钻孔是非常常见的。从下图可以看出，在侧面、下面钻孔时，出现漏判的可能性是非常大的。

**上部钻孔 侧面钻孔 下部钻孔**

**图8-1 钻孔方向、位置与缺陷判断**

2） 穿丝、挂钩的问题

对于穿丝方法，要求孔道与边界较近且缺陷贯通，对于大多数梁无法适用。而挂钩法则要求钢绞线完全悬空。当钢绞线被部分包裹时，则挂钩法易于发生误判。

因此，建议用内窥镜观察的方法。相对而言，该方法适用面最广，可以利用小口径孔。但要注意聚焦等问题。

统计结果表明，采用钻孔目视的方式，有对压浆缺陷漏检的倾向（附录-2）

**图 8- 2 内窥镜及空管照片**

**附录-1 压浆密实度指数 *D*的检测结果统计（部分）**

我们汇总了一些实际检测工程的压浆密实度 *D*值。

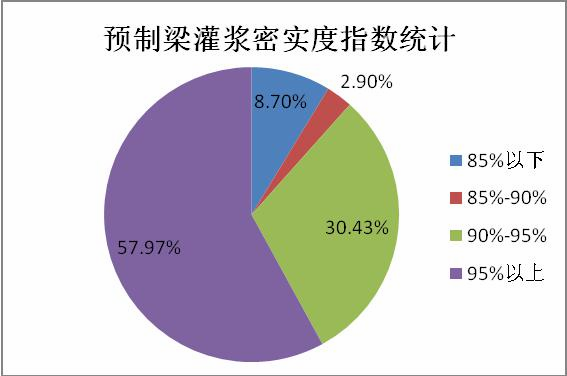
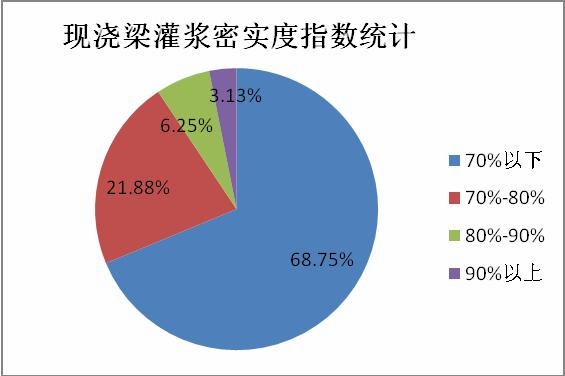
**附表 1- 1 预制梁**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **项目名称** | **检测梁型及长度** | **定位测试长度** | **缺陷长度** | **定位压浆指数** |
| C-GZCGQGY 作业区 | 30 米 T 梁 | N1:24m | 0.6m; | 97.5% |
| N2:16m | 0.2m; | 98.7% |
| N3:30m | 1.0m; | 96.7% |
| N4:30m | 0.4m; | 98.7% |
| C-JH 二期D7 合同段 | 30 米 T 梁 | N3:30m | 1.6m; | 94.6% |
| C-NF 高速LTW 大桥 | 30 米 T 梁 | N1:17m | 1.3m | 92.3% |
| C-NW 高速 CW 大桥 | 30 米 T 梁 | N1:17m | 0.7m | 95.8% |
| N2:7m | 0.85m | 87.8% |
| N3:6m | 1.35m | 77.5% |
| C-YJ 高速CH 大桥 | 40 米 T 梁 | N1:33m | 1.8m | 94.5% |
| C-YJ 高速 MW-1 大桥 | 20 米 T 梁 | N3:19m | 1.3m | 93.1% |
| C-FX 高速BSW 大桥 | 40 米 T 梁 | N1:34m | 0.95m | 97.2% |
| N2:10m | 0.7m | 93.0% |
| N3:10m | 0.8m | 92.0% |
| N4:10m | 0.7m | 93.0% |
| N5:10m | 0.6m | 94.0% |
| C-FX 高速ZJW 一号桥 | 40 米 T 梁 | N1:33m | 0.45m | 98.6% |
| N2:6m | 0.4m | 93.3% |
| N3:6m | 0.25m | 95.8% |
| N4:6m | 0.15m | 97.5% |
| N5:6m | 0.4m | 93.3% |
| C-FF 高速 WJ 特大桥 | 36 米 T 梁 | N4:30m | 0.7m | 97.7% |
| C-TH 高速GZZ 桥 | 20 米箱梁 | 右 N1:9m | 0.7m | 92.2% |
| 右 N2:9m | 0.9m | 90.0% |
| C-YJ 高速 1 标 | 16 米空心板 | 右 N1:16m | 0.5m | 96.8% |
| C-YJ 高速YJB 大桥 | 30 米 T 梁 | N1:13m | 0.85m | 93.4% |
| N2:6m | 0.1m | 98.3% |
| C-YJ 高速YCCJ 大桥 | 30 米 T 梁 | N1:13m | 0.9m | 93.0% |
| N2:6m | 1.1m | 81.6% |
| C-YJ 高速MDZ 大桥 | 20 米 T 梁 | N1:4m | 0.09m | 97.7% |
| N2:3m | 0.3m | 90.0% |
| C-QE 高速YLS 特大桥 | 40 米 T 梁 | N1:9m | 0.4 | 95.6% |
| N2:9m | 0.35 | 96.1% |
| N3:12m | 0.45 | 96.2% |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| C-QE 高速SX 大桥 | 40 米 T 梁 | N4:14m | 0.2m | 98.5% |
| C-QE 高速B2#桥 1#梁场 | 40 米 T 梁 | N2:9m | 0.3 | 96.7% |
| N3:9m | 0.1 | 98.9% |
| N4:11m | 0.3 | 97.2% |
| C-QE 高速B2#桥 2#梁场 | 40 米 T 梁 | N2:9m | 0.1m | 98.9% |
| N3:12m | 0.7m | 94.1% |
| N4:7m | 0.2m | 97.1% |
| Z-JHDY 高速 | 2 标空心板 | N1:12m | 0.65m | 94.5% |
| N2:14m | 0.5m | 96.4% |
| 3 标 T 梁 | N1:10m | 0.6m | 94.0% |
| N2:6m | 0.4m | 93.3% |
| N3:4m | 0.15m | 96.2% |
| 4 标空心板 | 3-7-N1:12m | 0.4m | 96.7% |
| 3-7-N2:12m | 0.3m | 97.5% |
| 3-8-N1:12m | 0.25m | 97.9% |
| 3-8-N2:12m | 0.65m | 94.5% |
| 3-3-N1:12m | 0.6m | 95.0% |
| 3-3-N2:12m | 0.35m | 97.0% |
| 5 标箱梁 | 6-2-N1:5m | 0.6m | 88.0% |
| 6-2-N3:5m | 0.2m | 96.0% |
| 6-3-N1:5m | 0.2m | 96.0% |
| 6-3-N3:5m | 0.3m | 94.0% |
| C-某高速 | 30 米箱梁 | 左 N3:4m | 1.8m | 55.0% |
| 左 N4:4m | 1.5m | 62.5% |
| 右 N3:4m | 2.1m | 47.5% |
| 右 N4:5m | 1.8m | 64.0% |
| Z-QJ 通道 |  | N1-左 | 无 | 100.0% |
| N4-左 | 无 | 100.0% |
| N1-右 | 无 | 100.0% |
| N2-右 | 无 | 100.0% |
| N2-右 | 0.2m | 99.3% |
| N3-右 | 0.2m | 99.3% |
| Z-DY 高速YK 段 5 合同  段 | N1-右 | 无 | 100% |
| Z-DY 高速YK 段 2 合同  段 | N2-右 | 0.4m | 98.4% |
| Z-DY 高速YK 段 1 合同段 | N1-左 | 无 | 100.0% |

**附表 5- 2 现浇梁**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **项目名称** | **检测梁型及长度** | **定位测试长度** | **缺陷长度** | **定位压浆指数** |
| 某高速 孔道编号 1 | 现浇箱梁 | 9m | 3.9m | 56.6% |
| 编号 2 | 9m | 3.6m | 60.0% |
| 编号 3 | 6m | 1.8m | 70.0% |
| 编号 4 | 6m | 1.5m | 75.0% |
| 编号 5 | 9m | 3m | 66.7% |
| 编号 6 | 8m | 4.8m | 40.0% |
| 编号 7 | 7m | 3.7m | 47.1% |
| 编号 8 | 6m | 3.6m | 40.0% |
| 编号 9 | 6m | 2.7m | 55.0% |
| 编号 10 | 6m | 2.1m | 65.0% |
| 编号 11 | 6m | 1.5m | 75.0% |
| 编号 12 | 5m | 2.1m | 58.0% |
| 编号 13 | 5m | 1.8m | 64.0% |
| 编号 14 | 5m | 3.3m | 34.0% |
| 编号 15 | 4m | 2.1m | 47.5% |
| 编号 16 | 4m | 2.7m | 32.5% |
| 编号 17 | 11m | 2.7m | 75.4% |
| 编号 18 | 11m | 3.6m | 67.2% |
| 编号 19 | 6m | 1.5m | 75.0% |
| 编号 20 | 4m | 1.5m | 62.5% |
| 编号 21 | 4m | 2.4m | 40.0% |
| 编号 22 | 3m | 1.6m | 46.7% |
| 编号 23 | 4m | 2.4m | 40.0% |
| 编号 24 | 4.5m | 2.1m | 53.3% |
| 编号 25 | 3m | 0.9m | 70.0% |
| 编号 26 | 4m | 1.8m | 55.0% |
| 编号 27 | 3m | 1.2m | 60.0% |
| 编号 28 | 4m | 2.4m | 40.0% |
| WZ-OJ 大桥 | 现浇箱梁 | 孔道 1：20m | 3m | 85.0% |
| 孔道 4：18m | 4m | 77.8% |
| 孔道 5：19m | 3m | 84.2% |
| Z-JHDY 高速 | 现浇箱梁 | 10m | 0.3m | 97.0% |

**附图 1- 1 压浆密实度指数分布图**

**附录-2 某项目钻孔验证统计**

某项目共检测预应力预制箱梁 6 片，检测出缺陷位置 8 处。根据缺陷判定模板此 8 处缺陷均为小缺陷（松散型或者小型缺陷），用钻孔勾丝的方法进行了验证。

**附图 5- 1 钻孔验证统计**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 检测结果 | 验证结果 | 对比结果 | 备注 |
| 压浆密实部位 | 无缺陷 | 一致 | 验证 15 处 |
| 1# 缺陷 | 存在缺陷 | 一致 |  |
| 2# 缺陷 | 存在缺陷 | 一致 |  |
| 3# 缺陷 | - | - | 未能钻到波纹管 |
| 4# 缺陷 | 存在缺陷 | 一致 |  |
| 5# 缺陷 | 用铁丝钩验证无缺陷 | 不一致 |  |
| 6# 缺陷 | 用铁丝钩验证无缺陷 | 不一致 |  |
| 7# 缺陷 | - | - | 钻孔失败 |
| 8# 缺陷 | 用铁丝钩验证无缺陷 | 不一致 |  |

从统计结果来看，共钻孔23处，钻孔失败2处，用铁丝勾检出缺陷3处（占比13%），未检出缺陷18处（占比78%）。