

TJG

天津市公路工程建设标准

TJG F5002-2022

冲击弹性波法检测评定桥梁预应力 孔道灌浆密实度技术规程

Technical Specification for Detection and Evaluation of Grouting Density of Bridge
Prestressed Duct by Impact Elastic Wave Method

2022-08-01 发布

2022-09-01 实施

天津市交通运输委员会发布

天津市公路工程建设标准

冲击弹性波法检测评定桥梁预应力孔道 灌浆密实度技术规程

Technical Specification for Detection and Evaluation of Grouting Density
of Bridge Prestressed Duct by Impact Elastic Wave Method

TJG F5002-2022

主编单位：天津市交通科学研究院

天津交科检测科技有限公司

批准部门：天津市交通运输委员会

实施日期：2022年09月01日

前 言

根据天津市交通运输标准化技术委员会《关于下达 2020 年天津市公路工程建设标准制修订工作任务计划（第一批）的通知》（津交发〔2020〕162 号）的要求，由天津市交通科学研究院承担《冲击弹性波法检测评定桥梁预应力孔道灌浆密实度技术规程》（2020-G02）的制定工作。

编制组经广泛调研、开展专题研究，借鉴国内外先进科研成果，参考国内现行标准，并在广泛征求意见的基础上，完成了本规程的编制。

本规程包含 5 章及 1 个附录，分别是总则、术语和符号、基本规定、现场检测、数据分析与结果评定、附录 A 现场记录表。

本规程由李永强、刘力博、周海成、王星、王伟广、殷明文、王霄宁、徐宗程、董晓明、刘秀娟、郝合锁、李云芳、张建东负责起草第 1、2、3 章，李永强、马强、满伟、韩学光、宋少杰、张磊、张孟冬、王飞、黄明、王勇、秦见光、王峥负责起草第 4 章及附录 A，刘力博、雷晨光、王雪姣、李渊源、王金玲、张弘博、高静、米国宾、张远军、刘希瑞、吴波涛、刘洋负责起草第 5 章。

本规程由天津市交通科学研究院负责具体技术内容的解释。请各有关单位在执行过程中，将发现的问题和意见，函告本规范日常管理组，联系人：刘力博（地址：天津市东丽开发区一经路 25 号；邮编：300300； E-mail: llb_006@163.com），以便修订时参考。

主 编 单 位：天津市交通科学研究院
天津交科检测科技有限公司

参 编 单 位：天津市公路事业发展服务中心
天津市交通运输综合行政执法总队工程质量安全支队
雄安新区建设工程质量安全检测服务中心
天津市交通运输基础设施养护集团有限公司
天津海滨大道建设发展有限公司

京台高速公路廊坊事务中心

山东恒建工程监理咨询有限公司

四川升拓检测技术股份有限公司

主 编：李永强 刘力博

主要参编人员：周海成 王 星 王伟广 殷明文 张建东

王霄宁 徐宗程 董晓明 刘秀娟 郝合锁

马 强 李云芳 满 伟 王 峥 韩学光

宋少杰 张 磊 黄 明 张孟冬 刘 洋

王 勇 王 飞 雷晨光 王雪姣 李渊源

王金玲 张弘博 高 静 米国宾 张远军

刘希瑞 秦见光 吴波涛

主 审：梁 栋

参加审查人员：訾建峰 闫卫喜 谢 斌 冯国益

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.....	- 5 -
3.1 检测工作流程.....	- 5 -
3.2 检测准备工作.....	- 6 -
3.3 检测设备.....	- 6 -
3.4 检测方法适用条件.....	- 7 -
4 现场检测.....	- 10 -
4.1 抽样要求.....	- 10 -
4.2 检测频率.....	- 10 -
4.3 传感器布设.....	- 11 -
4.4 激振方式.....	- 12 -
4.5 数据采集.....	- 13 -
5 数据分析与结果评定.....	- 15 -
5.1 定性检测分析.....	- 15 -
5.2 定位检测分析.....	- 17 -
5.3 评定标准.....	- 18 -
5.4 检测报告.....	- 19 -
附录 A 现场记录表.....	- 20 -

1 总则

1.0.1 为加强天津市公路混凝土桥梁预应力孔道灌浆密实度施工质量管理，规范其检测和评定，保证工程质量，特制定本规程。

1.0.2 本规程适用于天津市公路混凝土桥梁预应力孔道灌浆密实度检测和评定，其它结构形式预应力孔道灌浆密实度检测评定可参照本规程执行。

条文说明：

本规程适用于基于冲击弹性波法的桥梁预应力孔道灌浆密实度检测。梁体类型包括预制或现浇预应力混凝土梁。孔道材质包含塑料和金属波纹管，孔道布置方向包括纵向、横向及竖向。其它结构形式预应力孔道灌浆密实度检测可参照本规程。

1.0.3 天津市公路混凝土桥梁预应力孔道灌浆密实度检测除应符合本规程要求外，尚应符合国家及行业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 elasticity waves

在冲击力的作用下质点离开平衡位置发生振动,并引起周围质点振动,这种振动在介质弹性范围内以波动形式传播。

2.1.2 灌浆密实度 grouting density

预应力孔道中,固化填充粘结物(如砂浆等)在有粘结性孔道中的填充密实程度。

2.1.3 定性检测 method for qualitative detection

通过对梁体两端外露预应力筋分别进行激振和拾取信号,分析信号传播过程中波速、能量及频率变化,对整个孔道的灌浆密实度进行定性判断的检测方法。

2.1.4 定位检测 method for location detection

沿预应力孔道在梁板中的走向,按一定间距逐点进行激振和拾取信号,通过分析信号反射波的变化规律,对所测位置灌浆质量及其缺陷范围进行定量判断的检测方法。

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

根据弹性波在预应力孔道中传播过程中能量的衰减比来定性判断孔道灌浆有无缺陷的分析方法。

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

根据弹性波在预应力孔道中传播速度的大小来定性判断孔道灌浆有无缺陷的分析方法。

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

根据弹性波在预应力孔道中传播频率的变化来定性判断孔道两端有无缺陷的分析方法。

2.1.8 综合灌浆指数 comprehensive grouting 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灌浆

密实度的定性综合指标。

2.1.9 灌浆密实度指数 grouting compactness index

孔道灌浆密实长度与孔道总长度的比值，分为检测区段灌浆密实度指数和全孔道修正灌浆密实度指数。

2.1.10 冲击回波法 (IE) impact echo method

通过冲击方式产生瞬态冲击弹性波，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。

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

根据冲击弹性波信号经孔道位置的绕射和反射特性来判断孔道灌浆缺陷位置的一种分析方法。

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

根据激振弹性波信号分析孔道检测面的自振周期与标定位置混凝土自振周期的差异性，来判断混凝土构件缺陷的定位检测分析方法。

2.2 符号

A_r 、 A_s -分别是接收端和激振端信号的振幅 (m/s^2)；

D -定位检测灌浆密实度指数，在整个预应力孔道长度中，灌浆密实段所占比例；

D_e -定位检测孔道的局部时，修正灌浆密实度指数；

D_k -孔道各定位检测区段中，灌浆质量较好的连续区段的灌浆密实度；

F_r 、 F_s -分别是接收端和激振端信号的卓越频率 (kHz)。

I_{EA} -根据 FLEA 法得到的分项灌浆指数；

I_f -定性检测综合灌浆指数；

I_{PV} -根据 FLPV 法得到的分项灌浆指数；

I_{TF} -根据 PFTF 法得到的分项灌浆指数；

L -预应力孔道全长 (m) ；

L_0 -孔道长度基准值 (一般取 10m) ；

L_d -定位检测区段长度 (m) ；

N -定位检测的总点数；

N_D -定位检测灌浆有大规模缺陷测点数；

N_J -定位检测灌浆饱满的测点数；

N_x -定位检测灌浆有小规模缺陷测点数；

β -定位检测测点的灌浆状态。

3 基本规定

3.1 检测工作流程

桥梁预应力孔道灌浆密实度现场检测工作流程如图 3.1 所示。

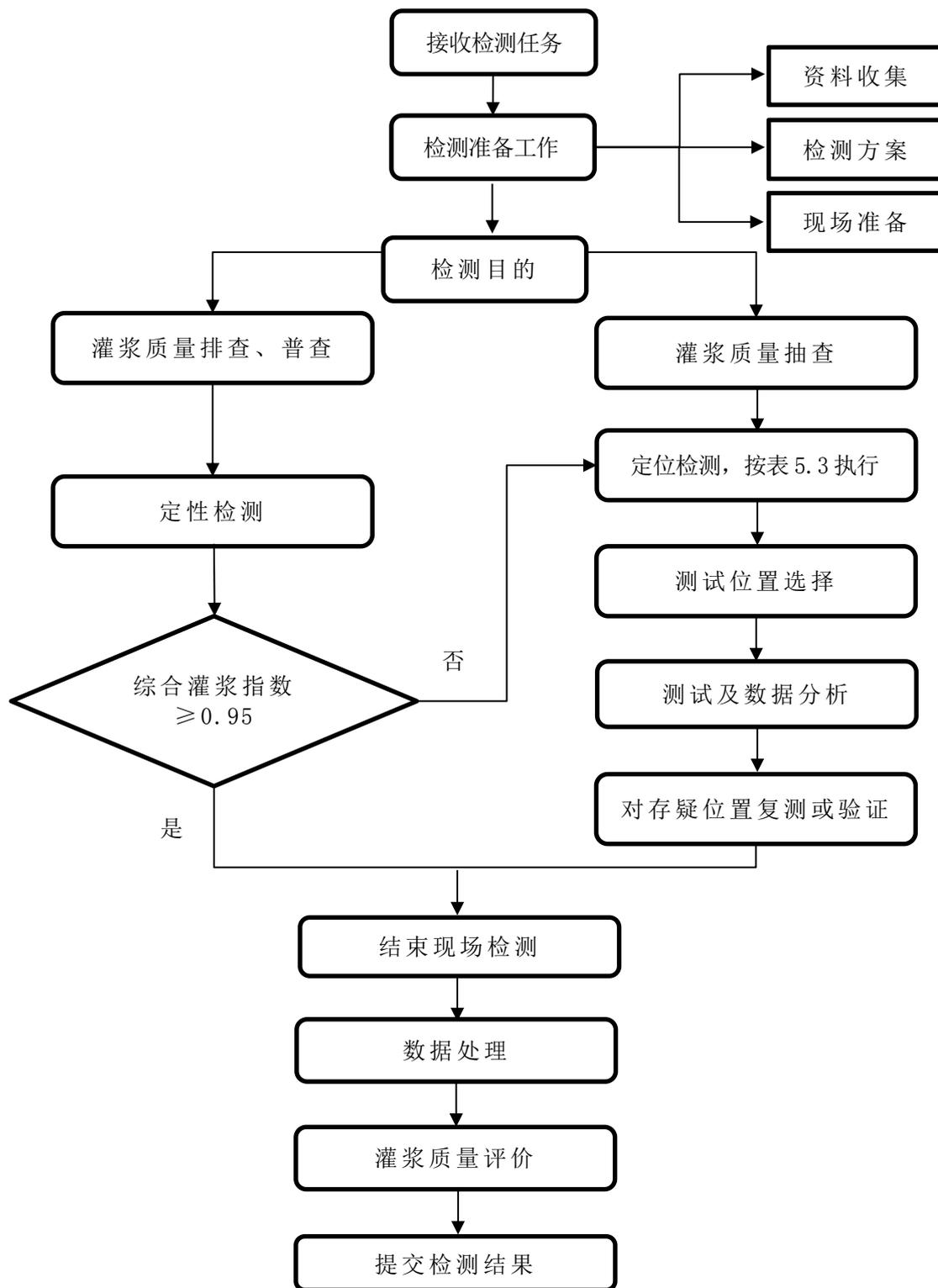


图 3.1 灌浆密实度检测流程

3.2 检测准备工作

3.2.1 资料收集应包括但不限于：工程设计图纸、施工记录、灌浆时间及灌浆工艺等。

3.2.2 检测方案宜包括但不限于：工程概况、检测目的、检测要求、检测依据、检测方法、检测人员、检测保障措施、仪器设备情况等。

3.2.3 现场准备工作应包括但不限于：

1 明确预应力孔道位置及走向；

2 定性检测应将预应力孔道两端封锚砂浆凿除，并将锚具与外露的预应力钢束清洗干净，预应力钢束外露长度宜为 3cm~5cm；

3 定位检测应依据设计图纸、施工记录等，描绘出被测预应力孔道走向及测点位置，测试区域的混凝土表面应平整、光滑、整洁。

条文说明：

定性检测时，信号激振和接收装置均布置于预应力钢束上，为保证耦合良好，应保证清洗干净，另外预应力钢束外露过长，对激振结果存在影响，所以规定了钢束外露长度为 3~5cm。

定位检测时，需沿孔道轴向逐点扫描式激振和采集。故需要依据设计图纸、施工记录等，描绘出被测预应力孔道走向及测点位置，测点位置的表面缺陷对检测结果存在影响，故需使测试区域混凝土表面平整、光洁。

3.3 检测设备

3.3.1 检测设备应适合于冲击弹性波信号采集与分析，宜包括信号激发器具、信号接收装置、信号调理装置、模数转换装置、信号分析及数据分析装置及专用附件等。

3.3.2 检测设备及其附件应经相应计量部门检定/校准合格。

3.3.3 检测设备硬件性能应符合以下要求：

1 模数转换 (A/D) 卡通道应不少于 2 个，采样分辨率不应低于 16bit，最大采样频率不应小于 500kHz。

2 传感器宜采用压电式加速度传感器，频响范围宜为 0.1kHz~20kHz，并符合 JB/T 6822 的规定。

3 放大器宜采用电荷放大器，最大增益倍率不宜小于 40dB，且增益倍率可调。

3.4 检测方法适用条件

3.4.1 孔道密实度检测应在孔道灌浆材料达到设计强度的 80%以上时进行。

条文说明：

当孔道灌浆材料固化程度不足时，其在检测时的特征就类似于灌浆缺陷。因此，理想状态下应当在灌浆材料的强度接近乃至超过构件混凝土的强度时进行检测，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，本规程在总结经验的基础上，规定灌浆材料强度至少达到设计强度的 80%以上，可以采用灌浆材料试块试验获取，也可以通过试验数据数理统计后，采用灌浆时间来控制。

3.4.2 定性检测适用于两端钢绞线外露的梁体，梁体总长度不宜大于 60m，大于 60m 时应进行方法适应性研究，否则宜采用定位检测法对孔道分段进行检测。

条文说明：

对于定性检测，为提高检测精度，需在钢绞线的两端分别激振和接收，在一次测试中，可同时完成三种方法（FLEA、FLPV、PFTF）的测试。三种分析方法各有特点及其适用条件范围，形成互补。FLPV 法仅对灌浆密实度很低的孔道有效，而 FLEA 对灌浆密实度较高的孔道较为适宜，两者形成互补，提高了定性检测的适用范围。PFTF 法适用于检测孔道两端的灌浆质量，但其受检测条件和人为影响较大。应根据不同的条件，选择适宜的方法，宜采用多种分析方法综合评定，具体见第 5 章。

3.4.3 定位检测应明确预应力孔道位置，适用于检测预应力孔道灌浆缺陷的位置，以及沿测线方向缺陷的范围大小。

3.4.4 定位检测时，当测试对象的厚度不大于 60cm，且底端反射明显，宜采用冲击回波等效波速法（IEEV）分析。

条文说明：

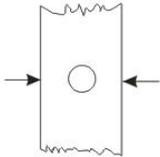
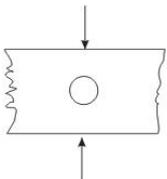
板厚对定性测试各方法的影响相对较小，而对定位测试的 IEEV 法则有较大的影响。一般来说，当管径相同时，板厚越薄，IEEV 法的测试精度越高。基于目前的定位检测的技术水平，IEEV 法一般要求梁、板的厚度不超过 60cm。

3.4.5 定位检测时，当测试对象厚度大于 60cm 且底端反射不明显，或测试方向存在多排孔道并列时，宜采用共振偏移法（IERS）分析。

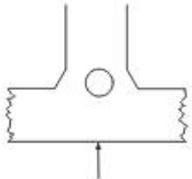
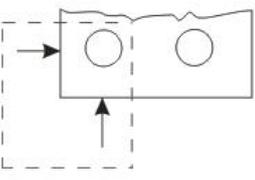
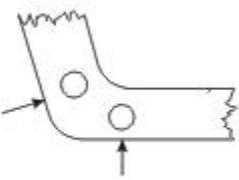
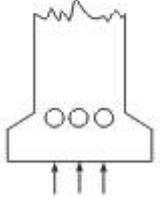
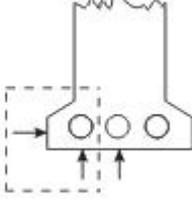
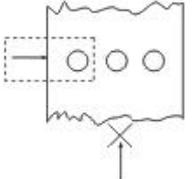
条文说明：

定位检测时，当被检对象内仅有 1 个孔道且信号能够到达被检孔道所在梁板对侧面时（相对于激振面），优先采用冲击回波等效波速法（IEEV），当采用被检对象较厚或有 2 根及以上孔道并排（检测信号传播时先后到达）时，则分别在距离孔道最近的测试面采用共振偏移法（IERS）进行检测，具体参考表 3.4.5-1。

表 3.4.5-1 不同结构适用的检测方法参照表

常见结构类型	适用分析方法	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波纹管结构
	IEEV/IERS	可检测出缺陷的大致类型、尺寸	单排结构的负弯矩，连续梁顶板等单排结构

续表3.4.5-1 不同结构适用的检测方法参照表

常见结构类型	适用分析方法	检测效果	适用结构
	IERS	可检测出该处是否存在缺陷，及缺陷范围	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，及缺陷范围	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，及缺陷范围	箱梁底部拐角或者其他类似结构
	IERS	可检测出该处是否存在缺陷，及缺陷范围	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，可以从下部激振
	IERS	可检测出该处是否存在缺陷，及缺陷范围	T梁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)，及缺陷范围	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

4 现场检测

4.1 抽样要求

4.1.1 宜按照随机方式进行抽样。

4.1.2 对压浆过程出现堵塞、灌浆材料发生初凝等施工异常的孔道宜全数检测。

4.1.3 对需要专项排查灌浆施工质量的梁体、孔道，宜全数逐一检测。

4.1.4 梁体预应力孔道进行定位检测时，应优先选择孔道位置相对较高的锚头两端、负弯矩区、起弯点等位置进行检测。

条文说明：

定位检测优先对宜发生灌浆缺陷的区域进行检测，主要包括锚头两端、负弯矩区、起弯点等位置。

4.2 检测频率

4.2.1 对于新建桥梁，宜满足以下规定：

1 对预制梁（板）桥：抽检数量不少于同类型预制梁（板）总数的 10% 且不少于 3 片。受检预制梁（板）的预应力孔道全数进行定性检测，其中定位不宜少于 2% 孔道数。

2 对现浇梁（板）桥：抽检数量不少于总孔道数的 10% 且不少于 10 个孔道，当孔道总数不足 10 个时，应全数进行定性检测。

3 对各种梁型，首次施工、改变施工工艺、更换灌浆材料、更换施工队伍或设备时，应对最初施工的 3 片预制梁全数检测或 1 跨现浇梁前 10 个孔道进行定性检测。

条文说明：

一般影响灌浆密实性的因素有灌浆工艺、灌浆材料和灌浆设备等，当上述条件出现变动时，宜对最初施工的 3 片预制梁或 1 跨现浇梁前 10 个孔道进行检测。另外，如果施工条件没有变化，操作人员变动较大时，也可

能造成灌浆差异。

4 对综合灌浆指数不合格或者不适用于定性检测的孔道应进行定位检测，定位检测长度不小于梁体长度的 10%且不少于 3m。

5 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，应双倍抽检。

4.2.2 对已建成桥梁，宜根据工程管理相关单位的具体要求或实际情况确定。

4.3 传感器布设

4.3.1 测试位置应干燥、平整、清洁无浮浆。

条文说明：

传感器安装对检测数据的质量存在明显影响，需严格按照要求进行传感器安装。

4.3.2 定性检测时传感器宜采用磁性卡座或机械装置与预应力孔道最上端的钢绞线端部紧密耦合，传感器轴线应与钢绞线轴线平行。如图 4.3.2 所示。

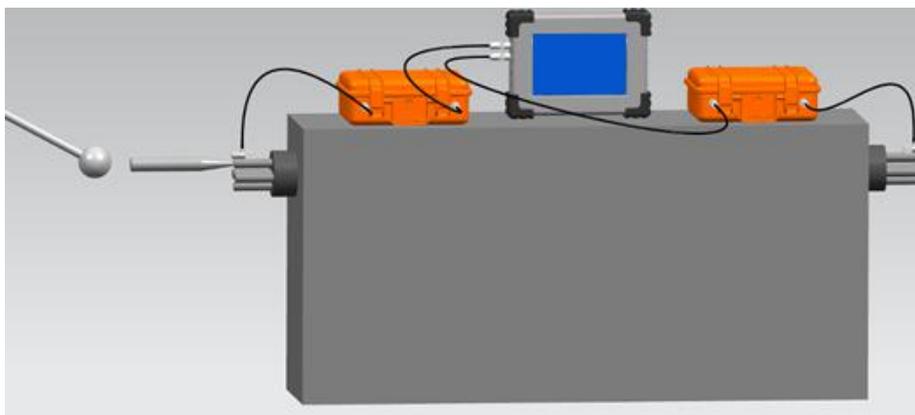


图4.3.2 定性检测示意图

4.3.3 定位检测时传感器宜采用专用安装支座与检测对象表面紧密耦合，应保证各测点按压力度均匀、传感器轴线方向与测试面垂直、传感器与测试面紧密接触。

4.3.4 定位检测时应在被测孔道轴线上布置测点，测点间距宜为

100mm~200mm，如图 4.3.4 所示。

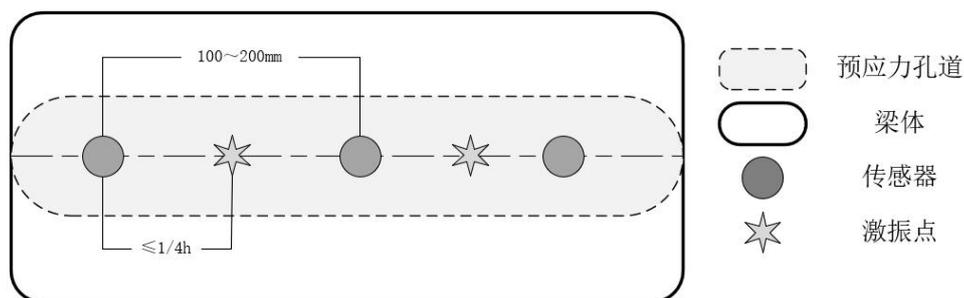


图 4.3.4(a) 定位检测示意图(竖向敲击)

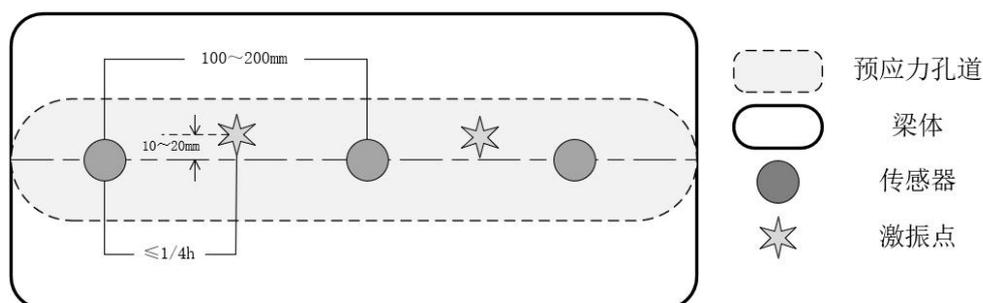


图 4.3.4(b) 定位检测示意图（水平敲击）

4.4 激振方式

4.4.1 定性检测应采用瞬态激振方式，宜采用激振锥配合激振锤等能够激发低频弹性波的装置激振。

4.4.2 定位检测（IEEV）应根据检测对象的壁厚，按表 4.4.2 选取合适的激振锤进行激振。

表 4.4.2 定位检测激振锤的选取参考（IEEV）

结构厚度（cm）	$10 \leq t < 20$	$20 \leq t < 40$	$40 \leq t < 60$	$t \geq 60$
首选激振锤直径（mm）	10	17	17	30
次选激振锤直径（mm）	6、17	10	30	50

4.4.3 定位检测（IERS）宜根据孔道埋设深度进行锤型选择试验。

条文说明：

不同激振锤的影响深度和引发共振深度不同，故需根据结构选择不同尺寸的激振锤。IERS 一般可以根据下图中激振频率与孔道埋深关系选择激

振锤。

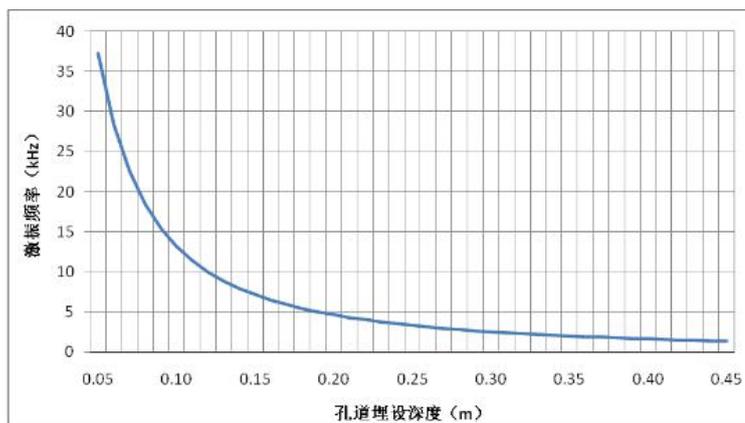


图4.4.3-1 激振频率与孔道埋深关系图示

4.5 数据采集

4.5.1 定性检测前应沿梁长方向在其无预应力孔道且混凝土良好区域对波速进行标定。

条文说明：

定性检测时，应在完好的混凝土处进行波速标定，考虑到骨料不均匀对波速的影响，一般在梁体正上方混凝土上标定，应注意定性检测与定位检测的标定波速不可互用。

4.5.2 定位检测前应在无预应力孔道或确认孔道灌浆密实的位置，至少做 1 条基准测线作为判定依据。

条文说明：

定位检测时，标定分为定点标定和基准测线标定。定点标定是指选取某点或某几个点的波速，取平均值作为标定波速，基准测线标定是指在测试孔道上方混凝土处或确认孔道灌浆密实的位置，布置同样的测点和测线（与被测孔道平行）进行波速标定，采用这样的标定方法，可进一步排除骨料不均匀影响。本规范推荐做基准线标定。

4.5.3 定位检测时，现场采用逐点式采集，预应力混凝土梁顶板和底板宜采用从上表面激振、拾振的方式进行检测，腹板宜采用从侧面激振和拾

振的方式进行检测。填写现场记录表，参见附录 A。

条文说明：

在管道中灌浆不密实的一个重要原因是灌浆材料的泌水。此时，产生的不密实区主要位于管道的上方。由于结构的关系，如图 4.5.3 中 A 方式的测试分辨力较高，而 B 方式的分辨力相对低一些。对于腹板中的孔道，大多数只能采用 B 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。

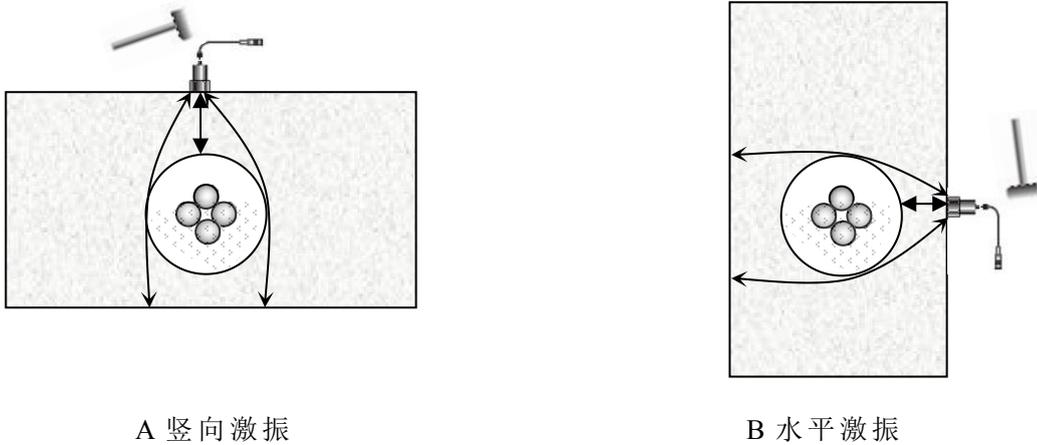


图4.5.3 激振方向的选择

5 数据分析与结果评定

5.1 定性检测分析

5.1.1 采用综合灌浆指数 I_f 作为定性检测的评定指标。

5.1.2 当定性检测孔道长度大于 60m 时，可只采用全长波速法进行计算，按公式（5.1.2）计算：

$$I_f = I_{PV} \quad (5.1.2)$$

式中： I_f —综合灌浆指数；

I_{PV} —根据 FLPV 法得到的分项灌浆指数。

条文说明：

对于定性检测，梁的长度对检测精度有一定影响。一般来说，梁长在 60m 之内时，定性检测的各个方法均可适用。而超过此长度后，能量衰减大，接收到的信号受噪音影响较大，信噪比过低，不易于区分能量和频率，此时一般只采用全长波速法进行分析判别。

5.1.3 当测试条件不利激振时，宜采用 FLEA、FLPV 两个分项计算综合灌浆指数，按公式（5.1.3）计算：

$$I_f = (I_{EA} \cdot I_{PV})^{1/2} \quad (5.1.3)$$

式中： I_{EA} —根据 FLEA 法得到的分项灌浆指数。

条文说明：

频率法受测试条件和人为影响较大，当钢绞线有斜面、松散、外露长度过长等不利激振条件时，接收信号频率会异常，此时可以采用波速和能量衰减方法进行判别。

5.1.4 当测试条件正常，测试频率正常，应采用 FLEA、FLPV、PFTF 三个分项计算综合灌浆指数，按公式（5.1.4）计算：

$$I_f = (I_{EA} \cdot I_{PV} \cdot I_{TF})^{1/3} \quad (5.1.4)$$

式中： I_{TF} —根据 PFTF 法得到的分项灌浆指数。

5.1.5 各分项灌浆指数根据基准值线性内插计算得到，基准值参见表 5.1.5。

表 5.1.5 灌浆指数的基准值

方法	项目	全灌浆时数值	无灌浆时数值
I_{PV} 全长波速法	波速 (km/s)	混凝土实测波速(注 ¹)	5.01(注 ⁴)
I_{EA} 全长衰减法	能量比 X (注 ²)	0.02	0.20
I_{TF} 传递函数法	频率比 (F_r / F_s) (注 ³)	1.0	3.0
	受信频率 Fr (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 X 可按公式 (5.1.5) 计算。 注 ³ : F_r 、 F_s 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。			

$$X = \frac{A_r \cdot L}{A_s \cdot L_0} \quad (5.1.5)$$

式中: X —能量比;

A_r —接收端信号的振幅 (m/s²);

A_s —激振端信号的振幅 (m/s²);

L —孔道全长 (m);

L_0 —孔道长度基准值 (一般可取 10m)。

条文说明:

灌浆指数是根据基准值自动计算的, 因此基准值的选定非常重要。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, 所以在条件许可时, 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。在没有标定条件时, 可参考本规程表 5.1.5, 其中混凝土 P 波波速受混凝土配比, 骨料影响较大, 以 C50 为例, 一般波速 4.2km/s ~4.5km/s, 而实际检测中一些地区经常出现波速 3.7km/s~4.9km/s 的情况, 甚至极端情况超出这个范围, 因而此处混凝土波速未给具体参考值, 需要做标定, 且现场混凝土波速标定条件一般都满足。钢绞线试验统

计的波速 5.01km/s，浮动较小，此处给定参考波速，一般不需要再标定。能量比受梁长影响较大，宜标定获取，此处给出了梁长为 10m 时的基准值，在没有标定的情况下能量比可采用本规程中比值。

频率比 (F_r/F_s) 受测试条件及人为影响较大，此处给出了参考基准，测试频率比或受信频率明显高于该区间时，对测试条件优化后继续，若仍然异常，传递函数法可以不采用。

5.2 定位检测分析

5.2.1 预应力灌浆缺陷严重状态分为轻度和重度，可根据冲击回波等效波速法的底部反射波速进行缺陷分级，参考表 5.2.1。

表 5.2.1 缺陷分级

检测方向	等效波速降低比例范围	缺陷长度 (m)	缺陷分级
水平激振	降低 < 5%	—	良好
	5% ≤ 降低 ≤ 10%	≤ 0.4	轻度
	5% ≤ 降低 ≤ 10%	> 0.4	重度
	降低 > 10%	—	重度
竖直激振	降低 < 10%	—	良好
	10% ≤ 降低 ≤ 15%	≤ 0.4	轻度
	10% ≤ 降低 ≤ 15%	> 0.4	重度
	降低 > 15%	—	重度

注：缺陷分级时，等效波速降低比例与缺陷长度需同时满足表中相应数值范围。

5.2.2 当仅对检测区段进行灌浆质量评价时，采用灌浆密实度指数 D 作为定位检测的评定指标，按公式 (5.2.2) 计算：

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \beta_i \times 100\% \quad (5.2.2)$$

式中： D —灌浆密实度指数；

N —定位测试的总点数；

β_i — i 取 1~ N 时分别对应的测点灌浆缺陷状态换算值，即良好： $\beta=1$ ，轻度： $\beta=0.5$ ，重度： $\beta=0$ 。

条文说明：

灌浆密实度指数计算将测点的灌浆缺陷状态分为三种：良好、轻度、重度。规程中式 5.2.2 展开如下：

$$D = \frac{N_J \times 1 + N_X \times 0.5 + N_D \times 0}{N} \times 100\%$$

$$N = N_J + N_X + N_D$$

式中： D —灌浆密实度指数；

N —定位测试的总点数；

N_J —良好测点数；

N_X —轻度缺陷测点数；

N_D —重度缺陷测点数。

5.2.3 当定位检测仅为孔道的局部时，用修正灌浆密实度指数 D_e 来判定整孔的灌浆质量，按公式 (5.2.3) 计算：

$$D_e = \frac{DL_d + D_k(L - L_d)}{L} \quad (5.2.3)$$

式中： D_e —修正灌浆密实度指数；

D —检测区段的灌浆密实度指数；

L_d —检测区段长度 (m)；

L —孔道全长 (m)；

D_k —该孔道各检测区段中，灌浆质量较好的连续区段的灌浆密实度指数。该连续区段的长度取检测区段的 1/2，按公式 5.2.2 计算。

5.3 评定标准

根据定性检测确定的综合灌浆指数 I_f 及定位检测确定的修正灌浆密实度 D_e ，依据表 5.3 进行灌浆质量评价。

表5.3 灌浆质量评定标准一览表

评价方法	评价参数	评价结果	说明
综合灌浆 指数 I_f	$I_f \geq 0.95$	I类（优）	/
	$0.8 \leq I_f < 0.95$	II类（良）	应按4.1.4条，对重点部位进行定位抽检。
	$I_f < 0.8$	III类（不合格）	应定位复检。
灌浆密实 度 D_e	$D_e \geq 0.95$	I类（优）	灌浆密实
	$0.90 \leq D_e < 0.95$	II类（良）	存在局部轻微缺陷
	$D_e < 0.90$	III类（不合格）	存在明显缺陷。应复检，复检仍不合格，应进行局部处理

注：当定性检测两端灌浆指数差异过大时，以指数较低端为标准判定。同时使用定性和定位检测时，以定位检测结果作为评定值。

条文说明：

综合灌浆指数 I_f 是一个相对指标，本身没有物理意义。为了提高综合灌浆指数对灌浆缺陷的灵敏度，对三个分项指标采用了几何平均的形式。如果一个指标较低，则整个指标也会较低，指标越高出现灌浆缺陷的可能性越小，反之越大。

5.4 检测报告

检测报告宜包括但不限于下列内容：

- 1 工程概况基本信息；
- 2 委托内容及检测目的；
- 3 检测依据、检测方法、检测设备及检测日期；
- 4 抽检数量、检测位置、检测数据分析与判定；
- 5 检测结论。

附录 A 现场记录表

表A.1 孔道灌浆密实度定性检测现场记录表

记录控制编号：

工程名称					
检验编号		检测日期			
委托单位		桥梁结构			
设备编号		检测依据			
梁(板)编号		浆体龄期(强度)			
梁(板)长度		梁体设计强度			
孔道编号	孔道长度 (m)	孔道直径 (mm)	波纹管类型	激振端	保存文件名
检测部位示意图					
备注					
校核			检测		

第 页 / 共 页

表 A.2 孔道灌浆密实度定位检测现场记录表

记录控制编号：

工程名称						
检验编号				检测日期		
委托单位				桥梁结构		
设备编号				检测依据		
梁（板）编号				浆体龄期（强度）		
梁（板）长度				梁体设计强度		
孔道 编号	孔道 直径	孔道 埋深	波纹管 类型	激振锤	检测部位及厚度描述	保存 文件名
检测部 位示意 图						
备注						
校核				检测		

第 页 / 共 页