

桥梁预应力孔道注浆密实度无损检测 技术规程

Technical Specification for Non-destructive Testing of Bridge Prestress
Grouting Channel

地方标准信息服务平台

2023 - 09 - 30 发布

2023 - 10 - 30 实施

目 次

前言	II
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 基本规定	4
5.1 检测设备	4
5.2 检测方法适用条件	5
6 现场检测	5
6.1 检测工作流程	5
6.2 检测前的准备工作	6
6.3 检测频率	6
6.4 抽样要求	6
6.5 传感器安装	6
6.6 激振方式	7
6.7 检测步骤	7
7 数据计算与分析	8
7.1 定性注浆指数计算	8
7.2 定位注浆指数计算	9
8 质量评价标准	10
附录 A (规范性) 线性标定	12
附录 B (资料性) 孔道注浆密实度定位检测判定参考色板	13
附录 C (资料性) 孔道注浆定性检测现场记录表	15
附录 D (资料性) 孔道注浆定位检测现场记录表	16

前 言

本文件按照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

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。

本文件由辽宁省交通运输厅提出并归口。

本文件起草单位：辽宁省交通运输事务服务中心、辽宁省交通高等专科学校、四川升拓检测技术股份有限公司。

本文件主要起草人：张佳运、赵永生、吴佳晔、项巍、张淼、刘洋、李刚、王先伟、杨春亮、付东华、刘琳琳、焦兴华、温佳宇、王亮、许涛、王连威、周志国、刘阳、孙宁、李秋雨、金春福、刘军、王天舟、谷云龙、马健。

本文件发布实施后，任何单位或个人如有问题和意见建议，均可以通过来电或来函等方式进行反馈，我们将及时答复并认真处理，根据实际情况依法进行评估及复审。

归口管理部门通讯地址：沈阳市和平区十三纬路19号，联系电话：024-23867960。

起草单位通讯地址：沈阳市和平区十三纬路18甲2号，联系电话：024-81670358。

地方标准信息服务平台

桥梁预应力孔道注浆密实度无损检测技术规程

1 范围

本文件规定了混凝土桥梁预应力孔道注浆密实度检测的设备及使用要求、规范性引用文件、术语、符号、基本规定、现场检测要求、数据分析与质量评价等。

本文件适用于桥梁预应力孔道注浆密实度冲击弹性波法检测与评定,其它预应力孔道注浆密实度检测评定可参照本规程执行。

桥梁预应力孔道注浆密实度无损检测除应执行本文件外,尚应符合国家现行有关标准的规定。

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。

GB/T 50083 工程结构设计基本术语标准

GJB 1805 数据采集设备通用规范

JGJ/T 411 冲击回波法检测混凝土缺陷技术规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

冲击弹性波 impact elasticity waves

在冲击力的作用下质点在弹性范围内振动并传播形成的波动。

3.2

注浆密实度 the duct grouting compactness

预应力孔道中,固化物粘结物(如砂浆等)在有粘结性孔道中的填充密实程度。

3.3

定性检测 qualitative detecting

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，对单个孔道的注浆密实度进行整体判断的检测方法。

3.4

定位检测 positioning detecting

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，对所测位置注浆质量及其缺陷范围进行定量判断的检测方法。

3.5

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注浆有无缺陷的分析方法。

3.6

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注浆有无缺陷的分析方法。

3.7

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。

3.8

综合注浆指数 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注浆密实度的定性综合指标。

3.9

注浆密实度指数 compactness index

孔道注浆密实长度与孔道总长度的比值，分为检测区段注浆密实度指数和全孔道修正注浆密实度指数。

3.10

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注浆缺陷位置的分析方法。

3.11

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。

3.12

快速傅里叶变换算法 (FFT) fast fourier transform

快速傅里叶变换算法是把波分解为sin波或cos波,分解出的各种sin(cos)波的频率、振幅和相位即为原始(合成)波的频谱。

3.13

最大熵算法 (MEM) maximum entropy method

最大熵算法分析的含义是在不增加熵的条件下推定信号的自相关系数,从而推算其频谱的方法。

3.14

P波 primary wave

波的传播方向与粒子振动方向平行的波。

4 符号

下列符号适用于本文件。

A_r -接收端信号的振幅 (m/s^2) ;

A_s -激振端信号的振幅 (m/s^2) ;

D -定位检测注浆密实度指数,在整个预应力孔道长度中,注浆密实段所占比例;

D_e -定位检测孔道的局部时,修正注浆密实度指数;

D_k -孔道各定位检测区段中,注浆质量较好的连续区段的注浆密实度;

F_r -接收端信号的卓越频率 (kHz) ;

F_s -激振端信号的卓越频率 (kHz) ;

I_{EA} -根据 FLEA 法得到的分项注浆指数;

I_f -定性检测综合注浆指数;

I_{PV} —根据 FLPV 法得到的分项注浆指数；

I_{TF} —根据 PFTF 法得到的分项注浆指数；

L —预应力孔道全长（m）；

L_d —定位检测区段长度（m）；

L_0 —孔道长度基准值；

N —定位检测的总点数；

N_0 —定位检测注浆有大规模缺陷测点数；

N_f —定位检测注浆饱满的测点数；

N_x —定位检测注浆有小规模缺陷测点数；

β —定位检测测点的注浆状态。

5 基本规定

5.1 检测设备

5.1.1 检测设备应适合于冲击弹性波信号采集与分析，主要包括信号激发装置、信号接收装置、信号传输装置、采集卡和数据分析装置。

5.1.2 检测设备计量性能应符合以下要求：

- 1) 标定幅值误差应在 $\pm 5\%$ 范围之内；
- 2) 电信号测量误差应在 $\pm 1\%$ 范围之内。

5.1.3 检测设备硬件性能应符合以下要求：

- 1) 采集卡通道应不少于 2 个，采样分辨率应不低于 16bit，最大采样频率应不小于 500kHz；
- 2) 传感器宜采用压电式加速度传感器，频响范围宜介于 0.1kHz~20kHz；
- 3) 应采用电荷放大器，且增益倍率可调。

5.1.4 检测设备应在检定/校准有效期内使用。

5.1.5 检测设备应能在 $-10^{\circ}\text{C} \sim +45^{\circ}\text{C}$ 的温度环境条件下正常工作，检测环境应无强机械振动和电磁干扰。

5.1.6 检测设备软件性能应符合以下要求：

- 1) 应适用于 2 个以上通道数据采集，具有调整采集长度和变换触发水平功能；
- 2) 应具有滤波降噪，变换增益，快速傅里叶变换算法（FFT）和最大熵算法（MEM）频谱分析等功能；

3) 数字信号应具有显示、存储、成像等功能;

4) 软件应包含数据采集和分析功能。

5.2 检测方法适用条件

5.2.1 注浆材料的强度应达到设计强度的 80%方可进行注浆密实度检测。

5.2.2 定性检测适用于两端钢绞线露出长度宜在 3cm~5cm, 梁体总长度不大于 60m 的预应力孔道注浆质量检查。不满足上述情况时, 宜采用定位检测法对孔道分段进行检测。

5.2.3 定位检测需明确预应力孔道位置, 适用于检测孔道注浆缺陷的有无及其位置, 以及沿测线方向缺陷的范围大小。

5.2.4 当测试对象为腹板厚度不大于 60cm 的单排孔道, 且腹板底端反射明显时, 定位检测适用冲击回波等效波速法 (IEEV) 分析。

5.2.5 当测试对象腹板厚度大于 60cm, 或腹板底端反射不明显, 或测试方向存在多排孔道并列时, 定位检测宜使用共振偏移法 (IERS) 分析。

6 现场检测

6.1 检测工作流程

桥梁预应力孔道注浆密实度现场检测工作流程如图1所示。

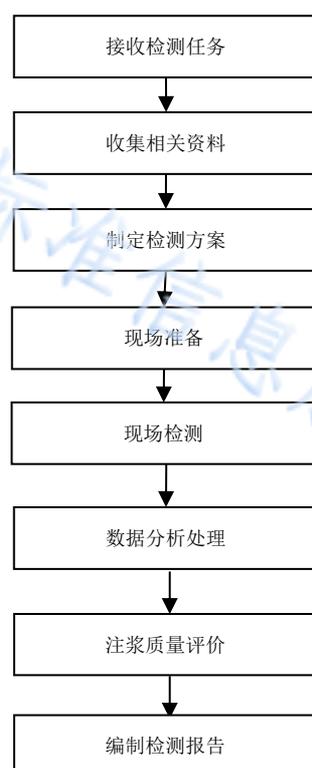


图 1 注浆密实度检测流程

6.2 检测前的准备工作

6.2.1 调查工程现场，收集工程设计图纸、注浆资料、施工记录等，了解预应力孔道位置走向、注浆工艺及注浆过程中出现的异常情况。

6.2.2 定性检测专项准备工作：应将预应力孔道两端封锚砂浆凿除，并将锚具与露出的预应力钢束清洗干净，预应力钢束外露长度宜介于 3cm~5cm 之间。

6.2.3 定位检测专项准备工作：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和间距，并使测试区域及反射面内的混凝土表面平整、光洁。

6.2.4 仪器准备工作：实施检测工作前，应对设备进行测试工作。

6.2.5 编制检测方案宜包含但不限于以下内容：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。

6.3 检测频率

6.3.1 对预制梁（板）桥：抽检数不少于预制梁（板）总数的 10%且不少于 3 片，如使用定位检测不宜少于 2%孔道数。定性检测时每片受检预制梁（板）的预应力孔道全数检测。

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

6.3.3 对新建工程、改变了施工工艺、改变注浆材料或设备更换时，应对最初施工的 3 片预制梁全数检测或第 1 跨现浇梁前 10 个孔道进行检测。

6.3.4 对综合注浆指数不合格的孔道及不适用于定性检测时应进行定位检测，定位检测长度不小于梁体长度的 10%且不少于 2m。

6.4 抽样要求

6.4.1 对梁体预应力孔道进行定位检测时，宜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。

6.4.2 对专项排查注浆施工质量的梁体和孔道宜全数检测。

6.5 传感器安装

6.5.1 传感器安装接触面应无浮浆、灰尘等异物，应保证传感器与被测体在检测时处于良好的耦合状态。

6.5.2 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耦合，并保证传感器轴线与钢绞线轴线基本平行。

6.5.3 定位检测时传感器应采用专用支座与检测对象表面耦合，专用支座应具有增加阻尼和抑制按压力度的功能。

6.6 激振方式

6.6.1 定性检测宜采用激振锥配合激振锤等能够激发低频弹性波的激振方式。

6.6.2 定位检测应根据检测对象的壁厚差异，按表 1 选取合适的激振锤进行激振。

表 1 定位检测激振锤选取表

结构厚度 (cm)	$h < 15$	$15 \leq h < 40$	$40 \leq h < 60$	$h \geq 60$
首选激振锤直径 (mm)	D10	D17	D17	D30
次选激振锤直径 (mm)	D17	D10	D30	D50

6.7 检测步骤

6.7.1 定性检测宜按以下步骤进行操作：

- 1) 连接检测系统，按要求安装传感器，设置检测参数，确认系统运行正常；
- 2) 在孔道的一端用激振锥激振，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，在孔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、无异常情况结束后测试；
- 5) 每片梁（板）检测前，均应在其无预应力孔道的区域对波速进行标定，应取不少于 6 次测量的平均值作为标定结果。

6.7.2 定位检测按以下步骤进行操作：

- 1) 连接检测系统，设置检测参数，确认系统运行正常；
- 2) 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 10 cm~20 cm 为测点间隔；
- 3) 按一定的方向对每个测点进行测试，测试时按要求将传感器和混凝土表面耦合在一起；
- 4) 激振方向与被测构件表面垂直，测试方向竖直时激振点在孔道中心线的投影线上，测试方向水平时激振点应在孔道中心线的投影线上方 1 cm~2 cm，激振点与传感器距离不应大于被测构件厚度 1/4；
- 5) 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、无异常情况结束后测试；

6) 在每一片梁(板)检测前,均应在注浆无缺陷孔道或2个孔道之间的混凝土位置进行线性标定,应符合附录A的规定。确定混凝土底部回波时间,宜取不少于6次测量的标定结果,波速计算请参照附录A。

7 数据计算与分析

7.1 定性注浆指数计算

采用综合注浆指数 I_f 作为定性检测的评定指标。

7.1.1 当定性检测孔道长度大于60米时,因能量衰减很大接收到的信号信噪比低、频率也会受到影响,宜只采用全长波速法进行计算,计算方式见公式(1)

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

式中:

I_f ——综合注浆指数;

I_{PV} ——根据 FLPV 得到的分项注浆指数。

7.1.2 当测试条件不利激振时,宜采用全长衰减法(FLEA)和全长波速法(FLPV)两个分项计算综合注浆指数,计算方式见公式(2)

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

式中:

I_f ——综合注浆指数;

I_{EA} ——根据全长衰减法(FLEA)得到的分项注浆指数;

I_{PV} ——根据全长波速法(FLPV)得到的分项注浆指数。

7.1.3 当测试条件正常,测试频率正常,应采用全长衰减法(FLEA)、全长波速法(FLPV)和传递函数法(PTFT)三个分项计算综合注浆指数,计算方式见公式(3)。

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

式中:

I_f ——综合注浆指数;

I_{EA} ——根据全长衰减法(FLEA)得到的分项注浆指数;

I_{PV} ——根据全长波速法(FLPV)得到的分项注浆指数;

I_{TF} ——根据传递函数法(PTFT)得到的分项注浆指数。

7.1.4 各分项注浆指数是根据基准值线性内插计算得到的。条件允许时应对同梁场、同类型梁孔道注浆前后弹性波传播波速、振幅和频率进行标定。如现场无法标定，基准值的相关信息见表 2。

表 2 注浆指数的基准值

方法	项目	全注浆时值	无注浆时值
I_{PV} 全长波速法	P 波速 (km/s)	混凝土实测波速(注 ¹)	5.01(注 ¹)
I_{EA} 全长衰减法	能量比 X (注 ²)	0.02	0.20
I_{TF} 传递函数法	受信频率 F_r (kHz) (注 ³)	2.0	6.0

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 可按下公式 (4) 计算;
注³: F_r 是接收端信号的卓越频率 (kHz);
注⁴: 根据钢绞线的模量 (196GPa) 推算, 并结合实际测试验证。

$$X = \frac{A_r \cdot L}{A_s \cdot L_0} \quad (4)$$

式中:

X ——能量比;

A_r ——接收端信号的振幅 (m/s^2);

L ——孔道全长 (m);

A_s ——激振端信号的振幅 (m/s^2);

L_0 ——孔道长度基准值 (一般可取 10 m)。

7.2 定位注浆指数计算

7.2.1 预应力孔道注浆缺陷分为大规模缺陷和小规模缺陷, 可以根据冲击回波等效波速法的底部反射波速以及波纹管壁反射信号进行缺陷分级, 分级的相关信息见表 3。

表 3 缺陷分级

检测方向	实测波速	缺陷长度 (m)	缺陷分级
水平	降低 5%以内	—	良好
	降低 5%~10%	≤ 0.4	小规模缺陷
	降低 5%~10%	> 0.4	大规模缺陷
	降低 10%以上	—	大规模缺陷
竖直	降低 10%以内	—	良好
	降低 10%~15%	≤ 0.4	小规模缺陷

	降低 10%~15%	>0.4	大规模缺陷
	降低 15%以上	—	大规模缺陷

7.2.2 当仅对检测区段进行注浆质量评价时，采用注浆密实度指数 D 作为定位检测的评定指标，计算方式见公式（5）或公式（6）：

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \beta_i \times 100\% \quad (5)$$

$$D = \frac{N_J \times 1 + N_X \times 0.5 + N_D \times 0}{N} \times 100\% \quad (6)$$

式中：

D ——注浆密实度指数；

N ——定位测试的总点数；

β_i —— i 取 1-N 时所对应的测点的注浆状态，即良好： $\beta_i=1$ ，小规模缺陷： $\beta_i=0.5$ ，大规模缺陷： $\beta_i=0$ ；

N_J ——健全测点数；

N_X ——小规模缺陷测点数；

N_D ——大规模缺陷测点数。

7.2.3 当定位检测仅为孔道的局部时，用修正注浆密实度指数 D_e 来判定整孔的注浆质量，计算方式见公式（7）

$$D_e = \frac{DL_d + D_k(L - L_d)}{L} \quad (7)$$

式中：

D_e ——修正注浆密实度指数；

D ——检测区段的注浆密实度指数；

L_d ——检测区段长度（m）；

D_k ——该孔道各检测区段中，注浆质量较好的连续区段的注浆密实度指数。该连续区段注浆指数计算长度选择检测区段的 1/2。按式（6）计算；

L ——孔道全长（m）。

8 质量评价标准

根据定性检测确定的综合注浆指数 I_f 及由定位检测确定的注浆密实度 D_e ，依据表 4 进行注浆质量评价。

表 4 注浆质量评价标准一览表

评价方法	评价参数	评价结果	说明
综合注浆指数 I_f	$I_f \geq 0.95$	I 类（优）	不需处理
	$0.80 \leq I_f < 0.95$	II 类（良）	重点部位宜定位检测
	$I_f < 0.8$	III 类（不合格）	应定位复检
注浆密实度 D_e	$D_e \geq 0.95$	I 类（优）	不需处理
	$0.90 \leq D_e < 0.95$	II 类（良）	不需处理
	$D_e < 0.90$	III 类（不合格）	应复检，复检仍不合格，应进行局部处理

注：当定性检测两端注浆指数差异过大时，应以指数较低端为标准判定。

地方标准信息服务平台

附录 A
(规范性)
线性标定

A.1 在使用冲击回波定位法前，应使用检测设备在无孔道或确认注浆密实孔道混凝土位置进行波速标定，且保证检测部位混凝土无外观缺陷，无浮浆，表面平整。

A.2 测点间距宜为 10 cm~20 cm，信号采集方式可采用逐点式，收集得到检测数据，宜采用沿线多点标定，单点标定测试可能因混凝土本身不均匀造成误差。

A.3 标定波速计算采用频谱或等值线图表示。下图为等厚结构标定频谱结果，计算时对于与设计厚度偏离的点（图 A.1 中 2、3 点）不参与计算，使用其它点反射时刻计算波速平均值。

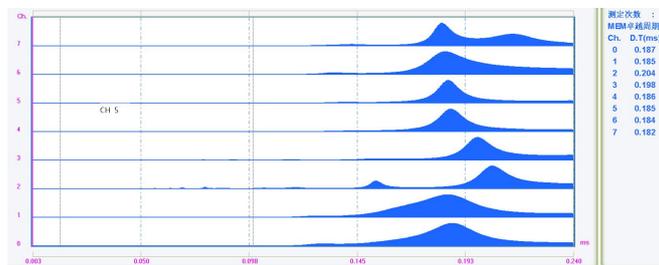


图 A.1 测试示意图

A.4 在进行线性标定之后，可采用同样的方式对桥梁预应力孔道密实度进行检测。

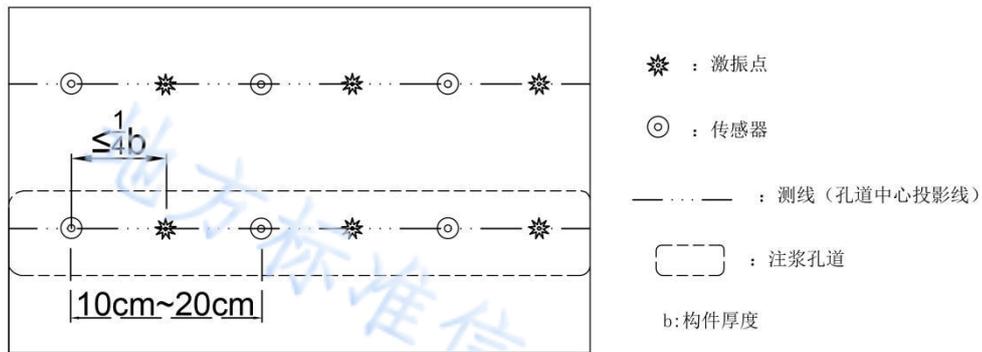


图 A.2 测试示意图

附录 B

(资料性)

孔道注浆密实度定位检测判定参考色板

B.1 密实部位

B.1.1 混凝土材质均匀，板的厚度一致。



图 B.1 密实部位的云图（色板-1）

B.1.2 板的厚度有变化。



图 B.2 密实部位的云图（色板-2）

B.2 不密实部位

B.2.1 松散型/小空洞型缺陷

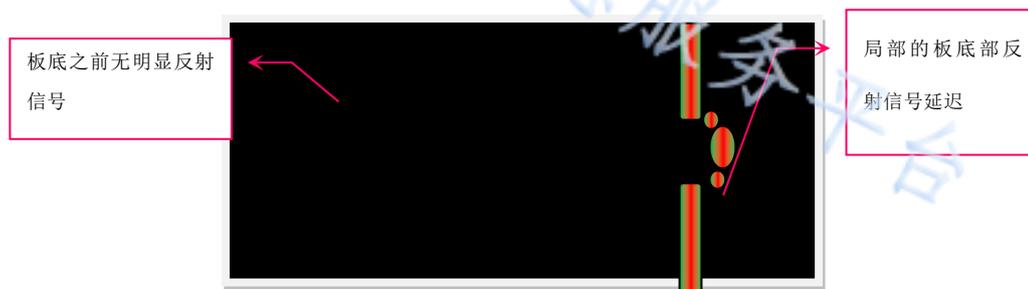


图 B.3 松散型/小空洞型缺陷部位的云图（色板-3）

B.2.2 空洞型缺陷（塑料波纹管）



图 B.4 空洞型缺陷（塑料波纹管）的云图（色板-4）

B.2.3 空洞型缺陷（铁皮波纹管）



图 B.5 空洞型缺陷（铁皮波纹管）的云图（色板-5）

B.3 缺陷判定

B.3.1 采用等效波速法分析时，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；腹板宜采用从侧面激振和拾振的方式。



图 B.6 上部检测

侧面检测

B.3.2 上部存在缺陷检测方向不同，测试结果也会有差异，侧面检测时可能无法覆盖缺陷位置，相比上部检测，侧面检测出缺陷的可能性偏小。

附录 C

(资料性)

孔道注浆定性检测现场记录表

记录编号:

第 页 / 共 页

工程名称			结构形式		
施工单位			委托单位		
设备编号			检测依据		
梁(板)编号			浆体强度		
梁(板)长度			注浆工艺		
孔道编号	孔道长度(m)	孔道直径(mm)	钢束数量	激振端	保存文件名
检测部位示意图					
备注					

检测:

复核:

年 月 日

附录 D

(资料性)

孔道注浆定位检测现场记录表

记录编号:

第 页 / 共 页

工程名称				结构形式				
施工单位				委托单位				
设备编号				检测依据				
梁(板)编号				浆体强度				
梁(板)长度				注浆工艺				
孔道 编号	孔道 直径	孔道 埋深	梁板 厚度	关键测点 厚度 1	关键测点 厚度 2	关键测点 厚度 3	关键测点 厚度 4	保存文件名
检测部位 示意图	地方标准信息服务平台							
备注								

检测:

复核:

年 月 日