

ICS 93.140

P33

备案号:

DB35

福建省地方标准

DB35/T 1638—2017

公路混凝土桥梁预应力施工质量检测评定 技术规程

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

2017 - 02 - 08 发布

2017 - 05 - 08 实施

福建省质量技术监督局

发布

目 次

前言	V
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语与定义	1
4 符号	3
5 总则	4
6 基本要求	4
6.1 一般规定	4
6.2 压浆密实度	4
6.2.1 设备要求	4
6.2.1.1 计量性能要求	5
6.2.1.1.1 系统误差	5
6.2.1.1.2 声时误差	5
6.2.1.2 系统硬件性能	5
6.2.1.2.1 采样分辨率	5
6.2.1.2.2 频谱特性	5
6.2.1.2.3 增益性能	5
6.2.1.2.4 元器件	5
6.2.1.3 系统软件性能要求	5
6.2.1.4 传感器耦合方式	6
6.2.1.4.1 基本要求	6
6.2.1.4.2 定性检测	6
6.2.1.4.3 定位检测	6
6.2.2 激振方式	6
6.2.2.1 定性检测	6
6.2.2.2 定位检测	6
6.2.3 检测时间要求	6
6.2.4 适用条件	7
6.2.4.1 定性检测	7
6.2.4.2 定位检测	7
6.2.5 测试数量和比例	7
6.2.5.1 定性检测	7
6.2.5.2 定位检测	7
6.2.6 抽样要求	8
6.3 锚下预应力	8
6.3.1 设备要求	8

6.3.1.1	等效质量法	8
6.3.1.1.1	计量性能要求	8
6.3.1.1.2	系统硬件性能	8
6.3.1.1.3	系统软件性能要求	8
6.3.1.1.4	传感器耦合方式	8
6.3.1.1.5	激振方式	8
6.3.1.2	反拉法	9
6.3.1.2.1	测力量程	9
6.3.1.2.2	采样间隔	9
6.3.1.2.3	加载速率	9
6.3.1.2.4	夹片位移控制	9
6.3.2	检测时间要求	9
6.3.2.1	等效质量法	9
6.3.2.2	反拉法	9
6.3.3	适用条件	9
6.3.3.1	等效质量法	9
6.3.3.2	反拉法	9
6.3.4	测试数量和比例	10
6.3.4.1	等效质量法	10
6.3.4.2	反拉法检测	10
6.3.5	抽样方式	10
7	检测工作流程	10
7.1	压浆密实度检测	10
7.2	锚下预应力检测	11
7.2.2	等效质量法测试流程	11
7.2.3	反拉法测试流程	11
8	质量评定	12
8.1	压浆质量评价	12
8.1.1	定性检测评价指标	12
8.1.2	定位检测评价	13
8.1.2.1	压浆缺陷类型	13
8.1.2.2	测试区间的压浆质量	13
8.1.2.3	全孔道的压浆质量评价标准	14
8.2	锚下预应力评价	14
9	验证处理与数据管理	15
9.1	压浆缺陷	15
9.1.1	一般规定	15
9.1.2	检测结果验证	15
9.2	锚下预应力	15
9.2.1	一般规定	15
9.2.2	等效质量法检测	15

9.2.2.1 孔道压浆前	15
9.2.2.2 孔道压浆后	15
9.2.3 反拉法检测	15
9.3 检测数据管理	16
9.3.1 一般规定	16
9.3.2 现场数据要求	16
9.3.3 压浆缺陷数据库管理	16

前 言

本标准按GB/T 1.1-2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》的规定编写。

本标准由福建省交通运输厅提出并归口。

本标准起草单位：福建省交通建设质量安全监督局、福建省交通建设工程试验检测有限公司、中交一公局土木工程建筑研究院有限公司。

参与起草单位：宁德沈海复线高速公路有限责任公司、宁德沈海复线宁连高速公路有限公司、龙岩厦蓉公路扩建工程管理有限公司、福州捷程信息技术有限公司。

本标准起草人：林国仁、池毓伟、林柏章、陈思晓、张建忠、蔡华忠、祝可为、林丹、魏聿前、林志平、于少春、叶仙寿、吴佳晔、杨增权、徐惠民、苏兴矩、邱仁科、邱礼球、杨小波、朱纪刚、巴特尔、孙禾。

公路混凝土桥梁预应力施工质量检测评定技术规程

1 范围

本标准规定了公路混凝土桥梁预应力施工质量检测的总则、基本要求、检测工作流程、质量评定、验证处理与数据管理。

本规程适用于公路混凝土桥梁预应力施工质量检测评定,其他结构形式的预应力施工质量检测评定可参照本规程执行。

2 规范性引用文件

下列标准对于本标准的应用是必不可少的。凡是注日期的引用标准,仅注日期的版本适用于本标准。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。

JGJ/T 182-2009 锚杆锚固质量无损检测技术规程

3 术语与定义

下列术语与定义适用于本标准。

3.1

冲击弹性波 Impact elasticity waves

通过机械冲击在对象材料中产生的弹性波。

3.2

加速度传感器 Accelerometer

将测试对象的物理量加速度转换为电信号的装置。

3.3

电荷灵敏度 charge sensitivity

传感器在1个单位加速度(m/s^2)作用下产生的电荷量(PC)。

3.4

电荷放大器 charge amplifier

将传感器测得的微弱电荷信号放大,转换为电压信号输出的装置。

3.5

激振锤 excitation hammer

发生冲击弹性波的激励装置，是产生测试信号的工具。

3.6

冲击锤 Impact hammer

发生冲击弹性波的激励装置，是产生测试信号的工具，能记录信号的初始时刻。

3.7

卡座 fixture

利用磁性或机械装置，将传感器与被测对象耦合。

3.8

压浆密实度 The duct grouting compactness

孔道体积中，固化压浆料所占比例，用 S_p 表示。

3.9

压浆密实度指数 Compactness index

在检测孔道长度中，压浆密实部分所占的比例，与压浆密实度 S_p 的意义类似，用 D 表示，可定量反映压浆质量。

3.10

综合压浆指数 Integrated Filling index

压浆密实度定性检测过程中，根据波速、衰减、传递函数三个参数的线性分布指数进行几何平均的综合结果，用 I_f 表示，可定性反映压浆质量。

3.11

冲击回波等效波速法 (IEEV) Impact Echo Equivalent Velocity method

孔道压浆缺陷定位的检测方法，根据信号反射和绕射判断孔道压浆缺陷的一种方法，用于确定缺陷具体位置和判断缺陷大致类型。

3.12

冲击回波法 (IE) impact echo method

孔道压浆密实度定位的检测方法，根据激振弹性波信号反射特性可判断孔道是否存在缺陷。

3.13

共振偏移法 (IERS) Impact Echo Resonance Shift method

孔道压浆密实度定位的检测方法,根据激振弹性波信号反射偏移时刻可判断孔道是否存在缺陷,及缺陷大致类型。

3.14

全长衰减法 (FLEA) Full Length Energy Attenuation method

孔道压浆密实度定性的检测方法,根据激振弹性波的受信信号能量和激振信号能量比值对孔道压浆密实度进行定性判断。

3.15

全长波速法 (FLPV) Full Length P-wave Velocity method

孔道压浆密实度定性的检测方法,根据激振弹性波信号在压浆孔道中的传播速度定性判断孔道有无缺陷。

3.16

传递函数法 (PFTF) P-wave Frequency Transform Functions method

孔道压浆密实度定性的检测方法,根据激振弹性波信号在传播过程中的频率变化定性判断孔道端部有无缺陷。

3.17

反拉法 Reverse Stretch Method

压浆前锚下有效预应力的检测方法,通过对锚索(或锚头)施加反向预应力并测量锚索(锚头)位移的方法测定锚下预应力。也称为“反张法”。

3.18

等效质量法 (TTEM) Tension Test method based Equivalent Mass method

压浆后锚下有效预应力的检测方法,通过对锚头敲击诱发其自由振动,并测定其动力响应的方法来推算锚下预应力。

4 符号

下列符号适用于本文件。

- D : 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 : 检测孔道的局部时,修正压浆密实度指数。
- Dk : 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。
- S_r : 孔道体积中固化压浆料所占比例。
- N : 定位测试的点数。
- N_j : 健全测点数。
- N_s : 小规模缺陷测点数。
- N_b : 大规模缺陷测点数。
- β : 测点的压浆状态。

L_d : 检测区段长度。

L_0 : 孔道全长。

L : 孔道长度基准值 (一般取 10m)。

I_f : 定性检测综合压浆指数。

I_{EA} : 为根据全长衰减法 (FLEA) 得到的分项压浆指数。

IPV: 为根据全长波速法 (FLPV) 得到的分项压浆指数。

ITF: 为根据传递函数法 (PFTF) 得到的分项压浆指数。

A_r 、 A_s : 分别是接收端和激振端信号的振幅 (m/s^2)。

F_r 、 F_s : 分别是接收端和激振端信号的卓越频率 (KHz)。

F_D : 为设计锚下有效预应力减去摩阻影响与材料回缩损失后的预应力值。

F_c : 为测试有效锚下预应力。

E : F_D 与 F_c 的相对偏差。

5 总则

为了加强公路桥梁预应力混凝土结构质量控制,规范桥梁预应力施工质量检测评定,保证工程质量,制定本规程。

在预应力混凝土梁施工、质量控制和工程质量检测评定时,除应符合本规程外,尚应符合国家现行有关规程的规定。

本标准附有条文说明,对检测方法具体步骤、原理、特殊参数计算等进行了解读。

6 基本要求

6.1 一般规定

6.1.1 公路混凝土桥梁预应力工程施工应做好质量控制工作。施工单位应按本规程的有关规定进行抽样自检、监理单位应按本规程的规定进行平行抽检、建设单位应按本规程的规定进行抽检。

6.1.2 检测设备必须送国家认可计量检定机构进行检定或校准,且检定或校准结果合格方可进行测试工作。

6.1.3 测试过程中需记录测试对象编号、孔道编号、锚头编号、钢束编号、桩号等能说明测试区域准确位置的信息。

6.2 压浆密实度

6.2.1 设备要求

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。

6.2.1.1 计量性能要求

6.2.1.1.1 系统误差

检测系统标定幅值相对误差±5%。

6.2.1.1.2 声时误差

声信号测量相对误差±1.0%。

6.2.1.2 系统硬件性能

6.2.1.2.1 采样分辨率

检测系统分辨率应在 16Bit，即测试量程的 $1/2^{16}$ 以上。采样频率应达到 500KHz 以上。

6.2.1.2.2 频谱特性

接收系统频响范围应适用频率在 1~50kHz 信号的采样。

6.2.1.2.3 增益性能

检测系统应适用 100m 长度以内梁压浆密实度的定性检测，接收端信号的 S/N 比应在 5 以上。

6.2.1.2.4 元器件

测试系统的主要元器件应满足表1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	40KHz 以上
电荷放大器	频率特性	0.2Hz~30 KHz +0.5/3dB
低噪电缆		其产生的脉冲信号应小于 5mV。
A/D 卡	采样通道数	2 以上
	变换速度	2 μ sec/ch
	分辨率	16bit

6.2.1.3 系统软件性能要求

测试及分析系统的软件的性能应符合表 2 要求。

表 2 测试软件的性能要求

项 目		要 求
数据采集	自检	应具有设备基本状态自检功能
	触发	应具有触发机能
	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	应具有频响补偿的机能
	频谱分析	应具有 FFT、MEM 频谱分析机能

6.2.1.4 传感器耦合方式

6.2.1.4.1 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。

6.2.1.4.2 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。

6.2.1.4.3 定位检测

采用特制的传感器支座，传感器以均匀的力度按压在梁体表面。同时，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。

6.2.2 激振方式

6.2.2.1 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，且在同批次梁体检测中避免更换。

6.2.2.2 定位检测

根据测试对象的壁厚差异，应采用不同尺寸的激振锤（见表 3）；对测试结果有不明确时，应换次选激振锤再次测试分析。

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

6.2.3 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，一般宜按《锚杆锚固质量无损检测技术规程》(JGT/T182) 的规定，在压浆 7 d 后进行检测工作。

6.2.4 适用条件

6.2.4.1 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 50 m，大于 50 m 的梁需要专门研究或变更为定位检测的方式。

6.2.4.2 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，以及缺陷的大致尺寸、缺陷类型。在测试对象的厚度不大，底端反射明显时，应优先采用冲击回波法（IE 法）。而当对象厚度较大，底端反射不明显

时,则需要采用共振偏移法(IERS法);定位检测要求波纹管能够确定,同时孔道尺寸(d)和深度(T)应符合以下条件:

- a) 当 $0.3 < d/T < 1.5$ 时,且属于单排预应力孔道可检测出缺陷的大致尺寸及类型。
- b) 当 $1.5 \leq d/T$ 时,或者 $0.3 < d/T < 1.5$ 属于多排(2个及以上)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。

6.2.5 测试数量和比例

在定位检测适用的条件下,尽可能采用定位检测方法,当需要排查压浆事故(如漏灌、管道堵塞)或者无法进行定位检测时,可采用定性检测。

6.2.5.1 定性检测

- 6.2.5.1.1 对需要排查压浆施工事故的梁体孔道,应进行全部检测。
- 6.2.5.1.2 对于每个梁场中的各个梁型,以及改变了施工工艺、压浆材料时,最初施工的3片预制的预应力梁(板)或1跨(联)预应力的现浇梁进行全孔道检测,其余孔道按照定性检测比例执行。
- 6.2.5.1.3 针对预制的预应力梁(板)、预应力现浇梁桥,每座桥按照总孔道数不少于10%的比例进行定性检测,且每座桥抽检总数不少于5个孔道,不足5个孔道的须全部进行检测。
- 6.2.5.1.4 根据本批次检测对象的孔道数量计算,若检测对象中超过10%不合格率时,应增加一倍的检测频率。
- 6.2.5.1.5 对综合压浆指数不合格的孔道须进行定位检测。
- 6.2.5.1.6 当孔道无法进行定性检测时,应采用定位检测。

6.2.5.2 定位检测

- 6.2.5.2.1 对每个梁场的各种梁型,以及改变了施工工艺、压浆材料时,最初施工的3片预制的预应力梁(板)或1跨(联)预应力的现浇梁进行全孔道检测,其余孔道按照定位检测比例执行。
- 6.2.5.2.2 针对预制的预应力梁(板),对于正弯矩区段的孔道,每座桥按照不少于同类型孔道总数3%的比例进行抽检;对于负弯矩区段的孔道,每座桥宜按孔道总数10%的比例进行抽检。且每座桥正、负弯矩孔道抽检总数均不少于3个孔道。
- 6.2.5.2.3 针对预应力的现浇桥,每座桥按照不少于同类型孔道总数5%的比例进行抽检。且每座桥同类型孔道抽检总数均不少于3个孔道。
- 6.2.5.2.4 根据本批次检测对象的孔道数量计算,若检测对象中超过15%不合格率时,应增加一倍的检测频率。

6.2.6 抽样要求

- 6.2.6.1 原则上按照随机的方式抽样。
- 6.2.6.2 压浆过程中出现施工异常的孔道、堵管的孔道。
- 6.2.6.3 腹板中的孔道,一般应选择弯曲较大的孔道的锚头两端、负弯矩、起弯点等容易出现不密实的位置。

6.3 锚下预应力

6.3.1 设备要求

6.3.1.1 等效质量法

检测设备应适合于冲击振动信号采集与分析,系统主要包括激振装置、传感器、耦合装置、采集系

统、显示系统、数据分析系统等。

6.3.1.1.1 计量性能要求

6.3.1.1.1.1 系统误差

检测系统标定幅值相对误差±5%。

6.3.1.1.1.2 声时误差

声信号测量相对误差±1.0%。

6.3.1.1.2 系统硬件性能

6.3.1.1.2.1 采样分辨率

检测系统分辨率应在 16Bit，即测试量程的 $1/2^{16}$ 以上。采样频率应达到 500kHz 以上。

6.3.1.1.2.2 频谱特性

接收系统频响范围应适用频率在 1kHz~50kHz 信号的采样。

6.3.1.1.2.3 增益性能

接收端信号的 S/N 比应在 5 以上。

6.3.1.1.2.4 元器件

测试系统的主要元器件应满足表 1 要求。

6.3.1.1.3 系统软件性能要求

测试及分析系统的软件应满足表 2 要求。

6.3.1.1.4 传感器耦合方式

传感器宜采用磁性卡座或胶水粘固等粘接方式与锚头耦合，粘接面应无浮浆等杂质，且传感器粘接稳固。

6.3.1.1.5 激振方式

6.3.1.1.5.1 应采用激振锤进行激振。

6.3.1.1.5.2 激振力度应符合设备相关作业指导书或说明书要求。

6.3.1.1.5.3 根据锚头规格类型，选取相应的激振锤（见表 4）。

表 4 压浆后锚下预应力检测激振锤表

锚头类型	<5 孔	5~10 孔	11~20 孔	>20 孔
激振锤	D17 加橡胶套	D30 加橡胶套	D50 加橡胶套	D60 加橡胶套

6.3.1.2 反拉法

检测系统应适合于对单根钢绞线有效预应力和同断面锚下有效应力的不均度检测。各钢绞线有效

应力之和，即为锚索锚下有效预应力。

6.3.1.2.1 测力量程

精度：1% F_s 。

6.3.1.2.2 采样间隔

不小于 5 次/s。

6.3.1.2.3 加载速率

油泵加载速率应在 0.1 L/min ~0.4 L/min，具备加载速率调整功能。

6.3.1.2.4 夹片位移控制

检测时夹片位移量不超过 1 mm。

6.3.2 检测时间要求

6.3.2.1 等效质量法

锚头应露出，压浆前后均可测试，宜在钢束裁剪后进行检测工作，外露长度不宜大于 10 cm。

6.3.2.2 反拉法

应于张拉完成后且在压浆前进行测试。

6.3.3 适用条件

6.3.3.1 等效质量法

等效质量法检测宜用于张拉事故（如漏张、张拉设备出现问题或施工工艺出现问题等）的普查，以及压浆后无法进行反拉法检测的情况。检测时应满足，钢绞线已裁剪、锚头尚未封端、具备激振锤摆动空间及传感器安装空间。

6.3.3.2 反拉法

反拉法适用于锚头、锚索外露，且锚索外露长度满足张拉要求的无粘结预应力工程。对有粘结预应力检测应在张拉后至压浆前进行，检测时间不宜超过张拉后 24 h。

检测时应具备检测所需空间及外露钢绞线长度，应满足二次张拉设备尺寸要求，当张拉端长度不能满足反拉作业时，需进行特殊处理后再进行二次张拉检测。

6.3.4 测试数量和比例

当检测条件满足反拉法检测适用条件时，应采用反拉法进行检测；当需要排查张拉事故，或者无法进行反拉法检测时，可采用等效质量法检测。

6.3.4.1 等效质量法

6.3.4.1.1 需要排查张拉施工事故的梁体锚索，应进行全部检测。

6.3.4.1.2 针对预制的预应力梁（板），每座桥正、负弯距分别不少于锚索总数的 10%的比例进行抽检，且每座桥正、负弯距锚索抽检总数均不少于 2 束。

6.3.4.1.3 针对预应力箱梁桥和悬浇桥的边跨、中跨合拢段等施工较困难位置，每座桥按照不少于同类型锚索总数 10%的比例进行抽检，且每座桥同类型锚索抽检总数均不少于 2 束。

6.3.4.1.4 根据本批次检测对象的锚索数量计算，当检测结果中超过 10%不合格率时，应增加一倍的检测频率。

6.3.4.2 反拉法检测

6.3.4.2.1 针对预制预应力梁，每座桥按照不少于同类型锚索总数 3%的比例进行抽检，且每座桥正、负弯距锚索抽检总数均不少于 2 束。

6.3.4.2.2 针对预应力箱梁桥和悬浇桥的边跨、中跨合拢段等施工较困难位置，按照不少于同类型锚索总数 5%的比例进行抽检，且每座桥同类型锚索抽检总数不少于 2 束。

6.3.4.2.3 根据本批次检测对象的锚索数量计算，当检测结果中超过 5%的不合格率时，应增加一倍的检测频率。

6.3.5 抽样方式

原则上随机抽取，对于特殊结构部位（锚下预应力仪器不易操作的部位）夹片存在不齐平的部位应重点检测。

7 检测工作流程

7.1 压浆密实度检测

压浆密实度检测工作流程见图 1：

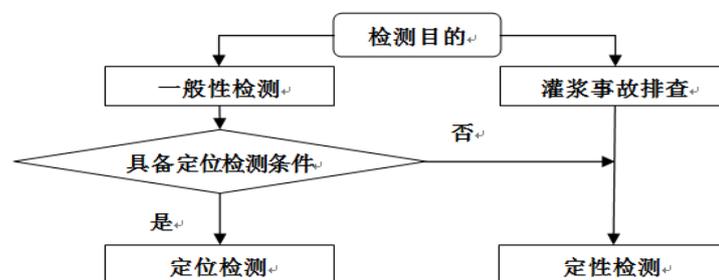


图 1 压浆密实度测试流程

定性检测发现有疑问或问题时，应进行定位检测和验证。

7.2 锚下预应力检测

7.2.1 锚下预应力检测工作流程

根据锚头所处的状态、现场条件、测试目的、测试数量等，应选用最适的测试手段或组合。锚下预应力检测工作流程见图 2：

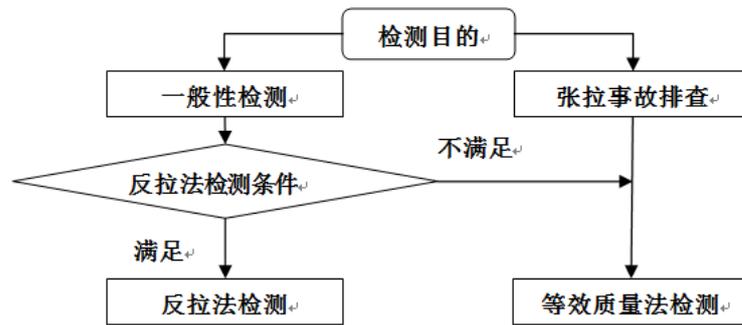


图 2 有效锚下预应力无损检测推荐流程

等效质量法检测发现有小时，应进行反拉法检测或其它方法验证。

7.2.2 等效质量法测试流程

等效质量法进行锚下预应力无损测试时，对于不同型式的锚索，需要进行标定以确定相应的参数。其检测工作流程见图 3:

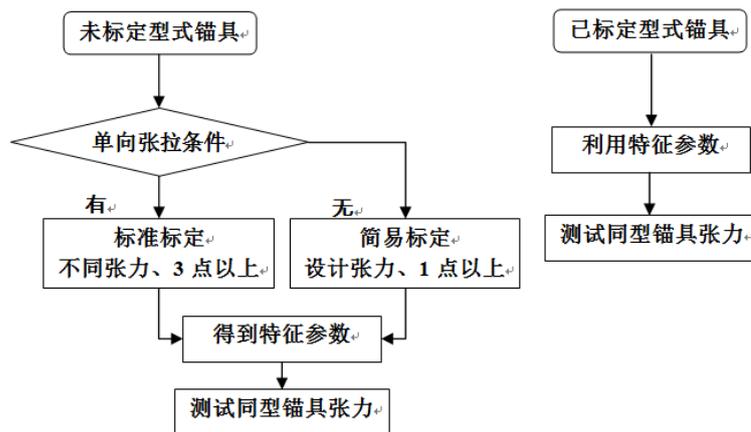


图 3 有效锚下预应力无损检测流程

7.2.3 反拉法测试流程

反拉法检测工作流程见图 4:

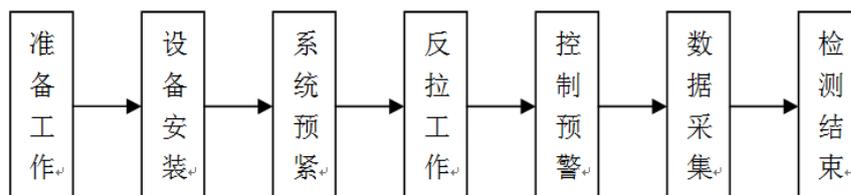


图 4 反拉法检测流程

8 质量评定

8.1 压浆质量评价

8.1.1 定性检测评价指数

采用综合压浆指数 I_f 作为定性检测的评定指标，当压浆饱满时， $I_f = 1$ ，而完全未灌时， $I_f = 0$ 。综合压浆指数见公式（1）：

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

式中：

I_{EA} 为根据 FLEA 法得到的分项压浆指数；

I_{PV} 为根据 FLPV 法得到的分项压浆指数；

I_{TF} 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 进行线性插值计算得到。

表 5 压浆指数的基准值

方法	项目	全压浆时值	无压浆时值	说明
全长波速法	^a 波速 (km/s)	^a 混凝土实测波速	^b 5.01	
全长衰减法	^c 能量比 (x)	0.02	0.20	
传递函数法	^d 频率比 (F_r / F_s)	1.00	3.00	所测得的激振频率在区间值时，再根据频率比进行线性插值计算
	激振频率 F_s (KHz)	2.0	4.0	

^a 梁不同部位的混凝土 P 波波速有一定的不同；
^b 根据钢绞线的模量 (196GPa) 推算，并结合实际测试验证 (KHz)；
^c 能量比 x 可按公式 (2) 计算：

$$x = \frac{A_r \cdot L}{A_s \cdot L_0} \dots\dots\dots (2)$$

其中：
 A_r 、 A_s ——接收端和激振端信号的振幅 (m/s^2)；
 L_0 ——孔道全长、 L ——孔道长度基准值 (一般可取 10m)。

8.1.2 定位检测评价

8.1.2.1 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

8.1.2.2 测试区间的压浆质量

测试区间采用压浆密实度指数 D 作为定位检测的评定指标，见公式 (3)：

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \beta_i \times 100\% \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：

N ——定位测试的点数；

β ——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)：

$$D = \frac{N_J \times 1 + N_X \times 0.5 + N_D \times 0}{N} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

N_J 代表健全测点数。

N_X 代表小规模缺陷测点数。

N_D 代表大规模缺陷测点数。

N 为总测点数，有 $N = N_J + N_X + N_D$

8.1.2.3 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 D_e 来判定孔道的压浆质量，见公式 (5)：

$$D_e = \frac{DL_d + D_k(L_0 - L_d)}{L_0} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

D ——测试区间的压浆密实度指数。

L_d ——测试区间长度。

L_0 ——孔道全长。

D_k ——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。

表 7 压浆密实度评价方法比较

评价方法	评价参数	评价结果	说明
综合压浆指数 I_f	≥ 0.95	I 类 (良好)	
	$\geq 0.8, < 0.95$	II 类	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 D_e	≥ 0.95	I 类 (良好)	
	$\geq 0.90, < 0.95$	II 类 (合格)	
	< 0.90	III 类 (不合格)	应复检

8.2 锚下预应力评价

根据公路桥涵施工技术规范要求, 得到相对偏差 E , 见公式 (6):

$$E = \frac{F_c - F_D}{F_D} \times 100\% \dots\dots\dots (6)$$

式中:

E — 锚下预应力相对偏差。

F_D — 设计锚下有效预应力减去摩阻影响与材料回缩损失后的预应力值。

F_C — 测试有效锚下预应力。

8.2.1 等效质量法的测试精度相对于反拉法偏低, 当无法实施反拉法检测或者需要大范围检测时所采用的方法。

8.2.2 当等效质量法复测测得的张力也不足, 若孔道已压浆, 无法用反拉法进行检测时, 应对梁体进行单梁荷载试验, 并以此作为最终判定依据。

表 8 锚下预应力评价方法一览表

方法	钢绞线状态	相对偏差 (E)	评判结果
等效质量法	已截断	$0 \leq E \leq 10\%$	合格
		$ E > 10\%$	须复检或其它方法验证
	未截断	$0 \leq E \leq 15\%$	合格
		$ E > 15\%$	采用反拉法或其它方法重检
反拉法	未截断	$ E \leq 5\%$	合格
		$ E > 5\%$	不合格

9 验证处理与数据管理

9.1 压浆缺陷

9.1.1 一般规定

9.1.1.1 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。

9.1.2 检测结果验证

9.1.2.1 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。

9.1.2.2 钻孔口径不宜太小。

9.1.2.3 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。

9.1.2.4 条件允许时，应从上向下钻孔，避免从下向上钻孔。

9.1.2.5 钻孔后宜用内窥镜观察，可辅以挂钩法、穿丝法。

9.1.2.6 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。

9.2 锚下预应力

9.2.1 一般规定

9.2.1.1 在张拉千斤顶、压力传感器获得计量校准和合格后，反拉法测得的锚下预应力即为最终结果。

9.2.1.2 对等效质量法测得结果如有疑问，应重检。在条件允许时，还应采用反拉法等其它方法验证。

9.2.1.3 在条件允许时，对测得张拉不足或者有疑问的锚索均应进行补张拉处理，条件不允许应进行相应加固措施保障结构安全。

9.2.2 等效质量法检测

9.2.2.1 孔道压浆前

复检后仍不合格的锚索，应进行补张拉处理。

9.2.2.2 孔道压浆后

梁体锚索复检后仍不合格的应进行荷载试验，最终评定结果以荷载试验为准。

9.2.3 反拉法检测

反拉法检测时应严格控制夹片位移量，确保检测过程对原有结构承载力不产生影响。

9.3 检测数据管理

9.3.1 一般规定

检测数据应保证真实、可靠，并妥善保存，在需要时能够回溯。

9.3.2 现场数据要求

现场检测时应详细、准确记录测试对象的相关信息。在条件允许时，还宜记录测试现场的GPS信息。

9.3.3 压浆缺陷数据库管理

检测数据宜用数据库进行管理。数据库应具备远程数据传输、储存、检索、回溯以及对比等功能。

公路混凝土桥梁预应力施工质量 检测评定技术规程（条文说明）

1 范围

由于压浆密实和锚下有效预应力检测过程中受测试对象结构类型、仪器设备、操作方式、人员水平等因素影响较大,故概述性的对检测过程中的基本要求进行了明确。

2 规范性引用文件

对检测过程的抽检比例,抽检方式、仪器标准等参照了国家行业等现行相关规程。

3 术语与定义

本章节将规程中列出的术语进行了详细描述与定义。

4 符号

对参数计算过程中出现的符号做了规定。

5 总则

本章节对制定本规程的目的进行了详细说明,以及该规程与国家现行规程、行业规程的优先关系,对检测单位在执行该规程明确了优先级。

6 基本要求

6.1 一般规定

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,或各参建单位共同见证委托检测单位检测,以及对设备检定要求做了明确规定,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。

6.2 压浆密实度

6.2.1 设备要求

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,结合《规范引用文件》对仪器及压浆密实度检测做了技术要求,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。

6.2.1.1 计量性能要求

根据GB/T 2951《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。

6.2.1.2 系统硬件性能要求

根据GB/T 15406-94《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。

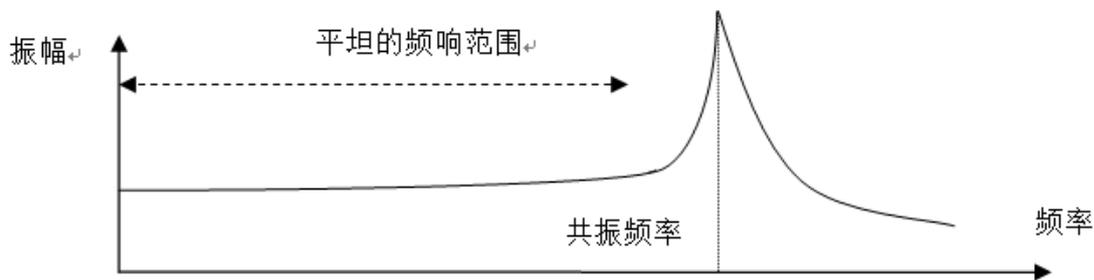
6.2.1.2.4 元器件

(1) 传感器要求

由于测试对象的梁、板较薄,且需要在频域进行分析,因此,传感器的频谱特性就显得尤其重要。以壁厚20cm、直径6cm波纹管的梁板为例,激发的弹性波在梁底、波纹管的纵波反射频率大致如附表1所示:

附表1 纵波共振频率

	梁底	波纹管
共振频率	10KHz	25~30KHz



附图 1 传感器的频响特性

因此，根据测试需要，测试系统的频响范围应控制在 0~30kHz。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。

(2) 放大器要求

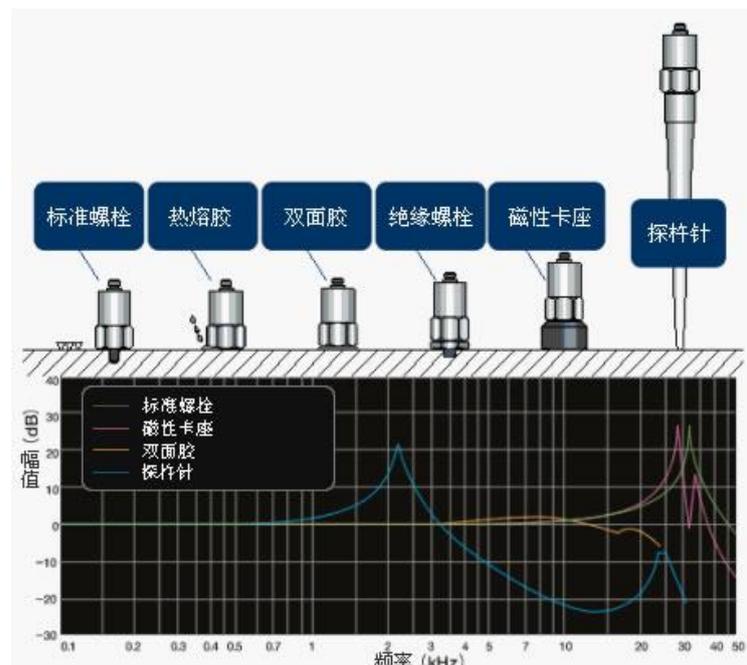
放大器应与所选择的传感器参数匹配，且满足测试需求。

6.2.1.3 系统软件性能要求

根据测试基本要求及各检测方法特点对软件做了基本规定。

6.2.1.4 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。附图 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：



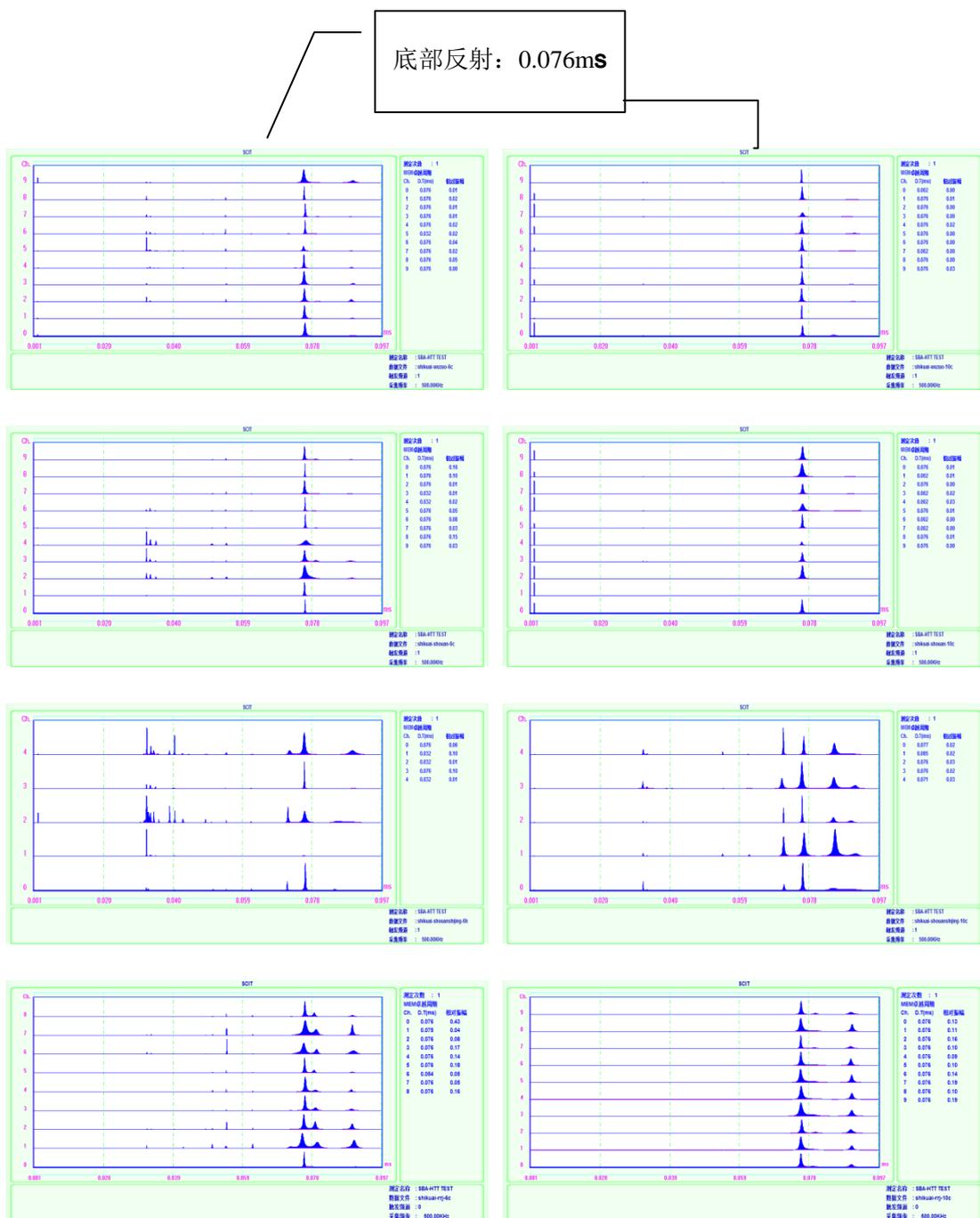
附图 2 不同固定方法对频响曲线的影响

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。

为达到即快速又可靠的测试，需要传感器既要牢固与梁体表面接触，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)~(4)：

- (1) 专用支座套。
- (2) 手按力度小。
- (3) 手按力度大。
- (4) 热熔胶。



附图 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) 手按压力度过大时, 频段杂乱, 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的耦合力度和阻尼, 使得测试信号更为稳定。

6.2.2 激振方式

6.2.2.2 定位检测

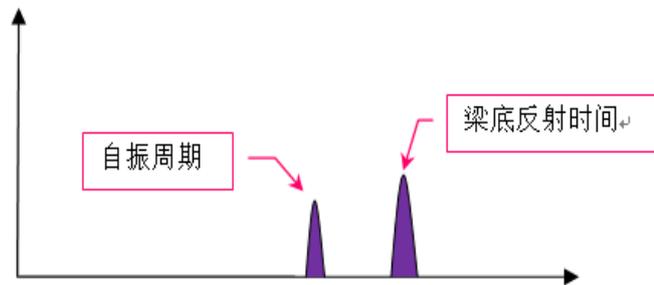
选取的激振锤对压浆密实度检测精度和分辨力有很大的影响。激振锤激振得到的弹性波具有自振周期。该自振周期与弹性波速的乘积一半, 即为对应于自振周期的壁厚 (对应壁厚)。对于 C50 预应力混凝土梁, 各激振锤得到的弹性波自振周期及对应壁厚约为附表 2 所示:

附表 2 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对应壁厚时, 理论上在频谱图上就会出现两条线:



附图 4 自振周期的影响

(2) 当实际梁厚接近表中对应壁厚时, 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。

(3) 当实际梁厚小于表中对应壁厚时, 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。根据研究结果和经验表明, 根据测试对象的壁厚, 激振锤选取相应规格。当对测试结果有疑虑时, 换次选激振锤再次测试是必要的。

对于定性检测, 由于传播的距离长, 信号衰减大, 因此, 需要激发长波长的弹性波信号。为此, 要求激振装置本身质量大、碰撞面的曲率半径小。

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。对于单纯的 IE 法, 采用较小的激振锤激发短波长的弹性波一般有利于提高对压浆缺陷的分辨力。而对于等效波速法, 由于需要识别梁底部的反射波, 则往往需要波长较长的弹性波以测试较厚的梁。

6.2.3 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（附表 3 所示）对龄期的要求：

附表 3 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 70% 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。

6.2.4 适用条件

6.2.4.1 定性检测

定性检测涉及三种基于不同原理的分析方法，三种分析方法各有特点及其适用条件范围，形成互补。

FLPV 法仅对压浆密实度很低的工况有效，而 FLEA 对压浆密实度较高的孔道较为适宜，两者形成互补，同时提高了定性检测的适用范围。

如前所述 PFTF 对孔道的两端压浆密实的检测具有较大的实际意义，但钢绞线的张力、自由段长度等的影响在实际检测中应考虑。

6.2.4.2 定位检测

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。

主要影响因素：

(a) 梁的长度

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 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。

(b) 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。

(c) 管道的排列

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。

(d) 管道的位置

管道位置对定性测试、定位测试的各方法均有一定影响。

定性测试：尽量用同位置的管道进行比较。

定位测试：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。

(e) 管道材质的影响

特别对金属波纹管，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。

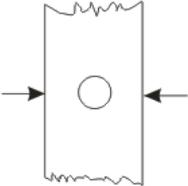
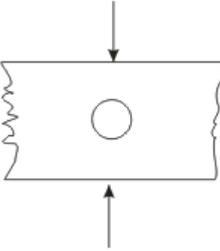
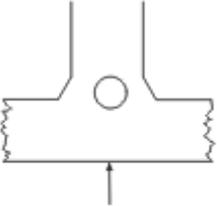
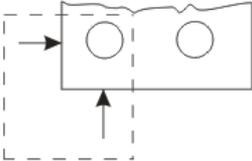
(f) 钢筋的影响

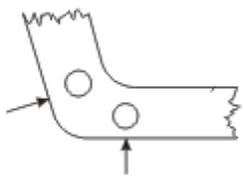
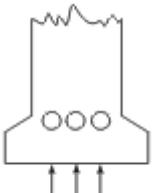
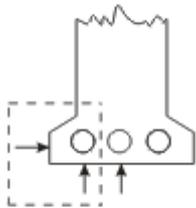
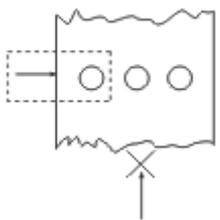
一般来说，钢筋的影响不大。但在管道和测试面之间有钢板等异性构件时，也会产生影响。

(g) 混凝土浇筑质量

一般来说，混凝土浇筑质量影响不大。但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。

附表 4 不同结构适用的分析方法参照表

常见结构类型	适用分析方法	检测效果	适用结构
	IEEV/IE/IE/S	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/IE/IE/S	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
	IE/IE/S	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
	IE/IE/S	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/ERS	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/ERS	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/ERS	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/ERS	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

6.2.5 测试数量和比例

参照行业相关检测规程以及《浙江省公路工程竣(交)工验收实施细则》,当不具备定性检测的条件时,可仅进行定位检测,若条件所限,仅采用定性检测时,宜适当提高检测数量和比例,同时结合JGJ/T 182-2009)《锚杆锚固质量无损检测技术规程》、DL/T 5424-2009《水利水电工程锚杆无损检测规程》综合福建省实际情况综合考虑对检测比例进行了规定。

注:本批次检测对象的孔道数量:是指本批次且检测对象按所检测桥梁正、负弯矩的孔道分别统计孔道数量。

6.2.6 抽样方式

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容易出现压浆缺陷。一般定位检测的测点间距按 10cm—20cm 布置。

6.3 锚下预应力

6.3.1 设备要求

6.3.1.1 等效质量法

6.3.1.1.1 计量性能要求

参照“条文说明”6.2.1.1 内容。

6.3.1.1.2 系统硬件性能

参照“条文说明”6.2.1.2 内容。

6.3.1.1.4 传感器耦合方式

良好的接触面有利于信号的传递，减少接触面信号能量的损失，同时，可避免因接触不良产生的干扰频率对测试结果的影响。

6.3.1.1.5 激振方式

不同结构、锚头尺寸、锚具形式的振动频率不尽相同，所以激振锤的激振频谱范围也应有所不同。同时，因该方法需要激振，在狭小的空间内很难进行测试，故应当明确检测具备空间位置。

6.3.1.2 反拉法

设备要求：

根据 JT D60—2015《公路桥涵设计通用规范》及 CQJTG/T F81—2009《桥梁预应力及索力张拉施工质量检测验收规程》相关精度控制要求对仪器设备参数做了规定。

6.3.2 检测时间要求

6.3.2.1 等效质量法

由于等效质量法受压浆状态影响较小，故只要在满足测试条件的任何时候方可测试。

6.3.2.2 反拉法

由于张拉完成在没有压浆的情况下时间过久会导致预应力损失，另一方面 24 小时为张拉与压浆的空闲期，在此期间检测既不会因预应力放置过久产生损失的影响，也不会影响压浆工作。

6.3.3 适用条件

6.3.3.1 等效质量法

为了便于检测工作开展对检测时间做了要求，等效质量法与孔道是否压浆并无关系，因此，在任何时期使用锚头露出均可进行检测。

作为一种崭新的锚下预应力无损检测方法，在一些特定的情况下，其测试精度会受到较大的影响。主要体现在以下几个方面：

(1) 参数的获取和标定

在锚下预应力测试中需对已知预应力数值的结构振动特性进行标定，需要 3 个以上已知锚下预应力进行标定。标定应采用同型锚具、位置也最好一致。同时，在常规标定时，一般可通过模型试验或单端张拉的方法。但应注意，在单端张拉时，会因摩擦而产生预应力损失。

另一方面，在很多时候仅在接近设计锚下预应力值易于标定，为此，可采用简易标定法。在简易标定时，作为标定值的锚下预应力尽可能通过其他方法（如施工记录、预置传感器）等确认。当无法确认时，可采用全部测试值中锚下预应力较大 30% 的数值作为设计值。此外，该方法对于低锚下预应力区的测试结果误差较大，需要引起注意。

(2) 钢绞线的影响

根据测试理论，钢绞线露出过长时，其影响不能忽视。当钢绞线未截断时，其露出长度常常达到50cm以上。由于其质量大，并在锚头激振过程中也会产生相应的振动，从而给测试结果带来较大的负面影响，导致结果的稳定性降低。

(3) 激振部位和力度的影响

在测试过程激振点和激振力度对结果产生一定影响，建议在测试时，尽量固定激振点和激振力度。

6.3.3.2 反拉法

因为需要二次张拉需要钢束未裁剪，如果已经裁剪且尚未可通过延长钢束长度选择适合的检测方式。

反拉法的原理及分析方法相对较为简单，但在测试过程中也有许多注意事项：

(1) 加载速率

油泵加载速率会对测试结果产生较大的影响，应注意加载速率。

(2) 设备回零差影响

其主要原因是压力表内弹簧疲劳或者压力传感器回零差较大。

(3) 漏油

其主要原因一般是千斤顶内密封圈老化破损或千斤顶缸壁划伤，表现特征是正常施压时，压力表工作不正常或活塞不移动。另外，管道漏油与油泵漏油都会对测试结果产生影响。

(4) 张拉过程的影响

该方法需要钢绞线有一定的自由区间，因此，不适合全面压浆的工况（如桥梁）。此外，反拉法会产生一定的残余变形，会对钢绞线产生一定的影响。因此，反拉法只能在压浆前小范围抽检，由于曲线切线斜率突然变小，可以通过监视这个突变值来发出报警从而终止反拉，防止继续反拉造成对锚索的破坏。

反拉法检测锚下预应力必须在检测前进行标准试验，获得必要的基础数据，以提高锚下预应力分析计算的准确度。标准试验应在与拟检测工程条件基本相同或可类比的条件下进行。

6.3.4 测试数量和比例

参照 JTG/T F50-2011《公路桥涵施工技术规范》、JT D60—2015《公路桥涵设计通用规范》及 CQJTG/T F81-2009《桥梁预应力及索力张拉施工质量检测验收规程》结合等效质量法与反拉法实际设备精度情况以及福建省实际情况对检测比例进行了规定。

注：本批次检测对象的锚索数量：是指本批次且检测对象按所检测桥梁正、负弯矩的锚索分别统计锚索数量。

6.3.5 抽样方式

抽样方式结合工程实际特点以及概率论相关知识对抽样方式进行了明确。

7 检测工作流程

7.1 压浆密实度检测

在现场检测中，只要条件允许，应尽量采用定位检测的方法。

(1) 定性检测

方法概述

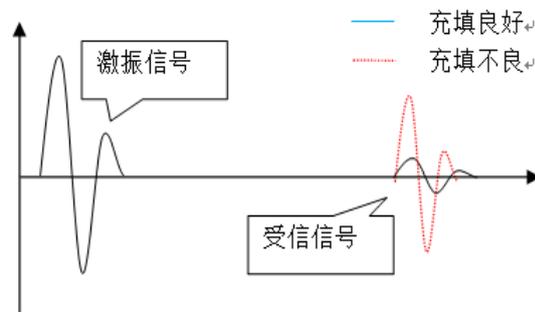
定性检测测试效率高，但测试精度和对缺陷的分辨相对较差，一般适用于对漏灌、管道堵塞等压浆事故的检测。

由于空洞等缺陷通常发生在孔道的上方，因此，通常只需测试最上方的钢绞线即可。在一次测试过程中，可同时完成上述三种方法（FLEA、FLPV、PFTF）的测试。

(a) 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。

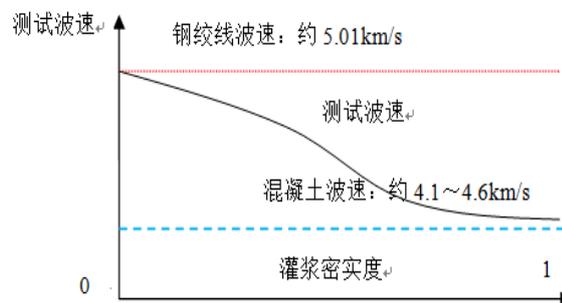


附图 5 全长衰减 (FLEA) 测试示意图

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、边界条件等的影响较大，误差也较大，必须通过双向激振的方法来抑制误差。

(b) 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，随着压浆密实度的增加，波速是逐渐减小，当压浆密实度达到 100% 时，测试锚索的 P 波波速接近混凝土中的 P 波波速。



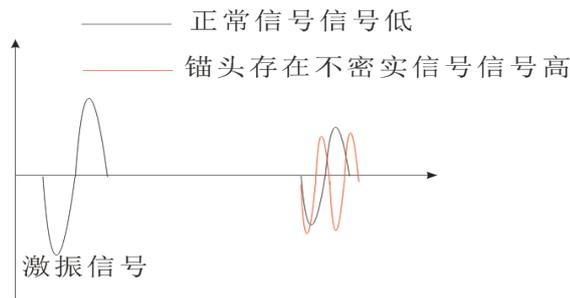
附图 6 全长波速 (FLPV) 测试示意图

根据理论研究结果，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。

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。

(c) 传递函数法 (PFTF)

与压浆饱满的钢绞线相比，空悬且受到张拉的钢绞线自振频率更高，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。



附图 7 传递函数法（PFTF）的测试概念

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，尽管原理不同，但测试方式完全一样。因此，根据一次的测试采集数据可以同时进行 3 种方法分析，并得到各自分析结果。

附表 5 压浆密实度定性测试方法比较

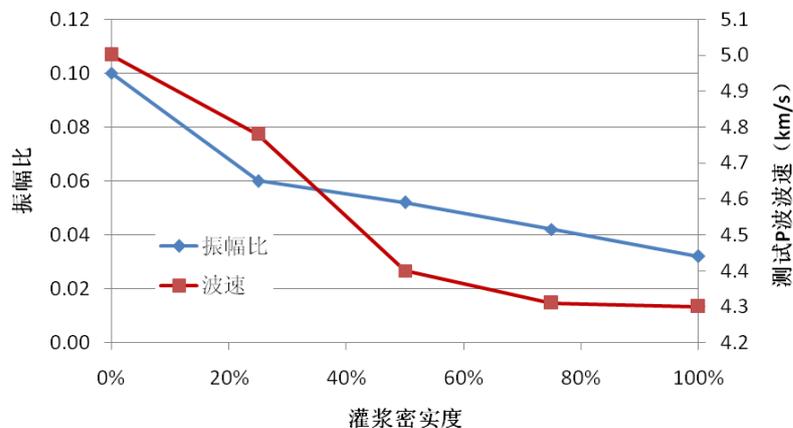
方法	优点	缺点
全长衰减法（FLEA）	测试原理明确、对压浆缺陷较为敏感	测试结果离散性较大，影响因素多
全长波速法（FLPV）	测试结果较为稳定，适合测试大范围缺陷	测试原理不严密，对缺陷较为钝感
传递函数法（PFTF）	能够测试锚头附近的压浆缺陷，解析方便	测试范围较小

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。



附图 8 定性测试结果

钢绞线端头清理及传感器安装

钢绞线端头清理包括长度及其清洁度，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。清洁度有利于传感器的安装，钢绞线上应无浮浆。

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。

激振及数据采集

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。

混凝土波速的测定

如果梁体较高，则不同高度混凝土的基准波速往往有一定差异。通常是上面小下面大，基准波速的测试最好在波纹管的中间高程处进行。

(2) 定位检测

方法概述：

本规程的定位检测是基于冲击回波法（Impact Echo，简称 IE）。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 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缺陷的检出。

为此，本规程引入了在传统 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，IEEV、IERS 法可以较好地识别压浆缺陷。

上述定性检测效率高，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。

(a) 孔道定位

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。

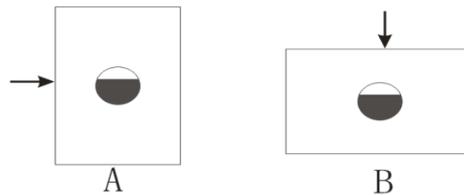
经了解，山西省交通科学研究院^[4]对激振点与管道的相对位置的影响进行了研究。激振点的位置分别位于孔道中心投影、中心+D/4 和中心-D/4。结果表明，无论是全空还是全满，各个激振点测试得到

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 $\pm D/4$ 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 $D/2$ 。

(b) 确定检测方向

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往下方向检测，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，如附图 9 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。



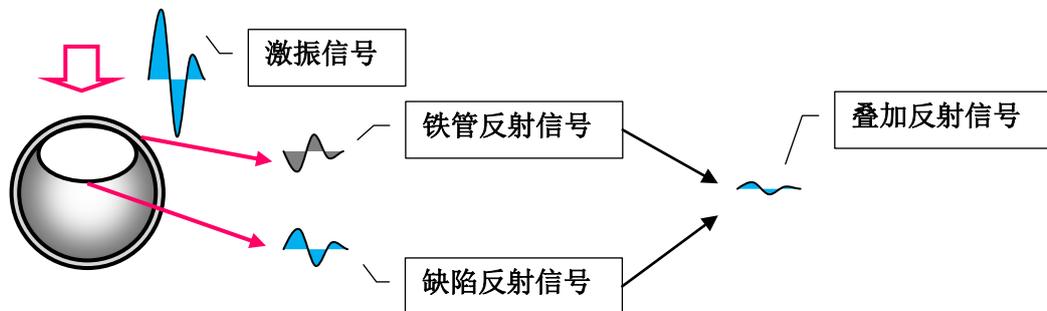
附图 9 激振方向的影响

(c) 孔道材质

在公路工程中，孔道主要采用 2 类波纹管，即金属和 PVC 波纹管。尽管 PVC 波纹管在与混凝土间粘结性能等方面要低于金属波纹管，但由于其施工方便因而也得到了广泛的应用。

由于阻抗的关系，两类波纹管对弹性波的反射不同，从而对压浆密实度缺陷的检测也有一定的影响。

根据弹性波的反射理论，机械阻抗 $R = \rho VA$ （即密度、波速与面积的乘积）的变化决定了反射信号大小和相位。金属管壁、PVC 管壁、混凝土、缺陷的阻抗大小顺序为：金属 > 混凝土 > PVC > 缺陷空洞。因此，金属波纹管处对弹性波是逆向反射，PVC 和缺陷则是正向反射。由于管壁很薄，会出现金属波纹管的反射和缺陷处的反射互相抵消，而 PVC 与缺陷的反射则是相互增强的现象。



附图 10 金属波纹管反射概念

所以，不能仅凭缺陷处的反射信号的强弱来判断，而是要结合等效波速法，即梁底部（壁面）反射信号的传播时间进行综合考虑。

附表 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

(d) 激振及数据采集

(1) 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。

(2) 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。

(e) 混凝土波速的标定

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。

7.2 锚下预应力测试

可参照“条文说明”第 6.3.3 条。

8 质量评定**8.1 压浆质量评定****8.1.1 定性检测评价指数**

综合压浆指数 I_f 是一个相对指标，本身没有物理意义。

为了提高综合压浆指数 I_f 对压浆缺陷的灵敏度，对三个分项指标采用了乘积的形式。也就是，如果一个指标较低，则整个指标也会较低。

此外，相关基准值是在特定的设备（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。

定性检测尽管无法确定缺陷的位置，但具有检测效率高的优点，因此，仍然有较高的实用价值。在此，我们对定性检测几个方法的精度和敏感性进行了研究。

全长波速法（FLPV）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检测方法，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。

基于等效质量的方法，压浆密实度 S_r 与测试波速 V 的关系可以表达为：

$$S_r = \frac{A_s \rho_s (V_s^2 - V^2)}{\zeta (A - A_s) \rho_g (V^2 - V_g^2)} \dots\dots\dots (7-1)$$

其中， A_s 、 A 分别为孔道中钢绞线的面积和孔道的面积。

V_s 、 V_g 分别为钢绞线和压浆料中弹性波的波速。其中， V_s 取 5.01km/s， V_g 则应通过试块加以测试。

ρ_s 、 ρ_g 分别为钢绞线和压浆料的密度，分别可取 7800 kg/m³ 和 2400kg/m³

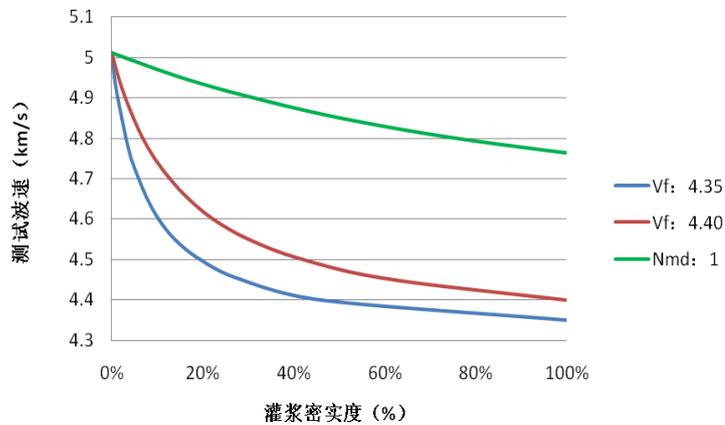
ζ 为修正系数，反映孔道壁（PVC 或金属）以及周围混凝土的影响，可通过压浆饱满孔道（ $S_r=1$ ）的实测波速 V_f 来标定：

$$\zeta = \frac{A_s \rho_s (V_s^2 - V_f^2)}{(A - A_s) \rho_g (V_f^2 - V_g^2)} \dots\dots\dots (7-2)$$

代入上式，又可以得到：

$$S_r = \frac{(V_s^2 - V^2)(V_f^2 - V_g^2)}{(V_s^2 - V_f^2)(V^2 - V_g^2)} \dots\dots\dots (7-3)$$

因此，只要能够实现测出 V_f 和 V_g ，即可容易地得到压浆密实度。此外，当 $V_s > V_f$ 时 ζ 取 1。在此，我们利用一套典型参数进行了计算。 V_g 取 4.30km/s 和 4.45（ $\zeta=1$ ）， V_f 分别取 4.35、4.40：

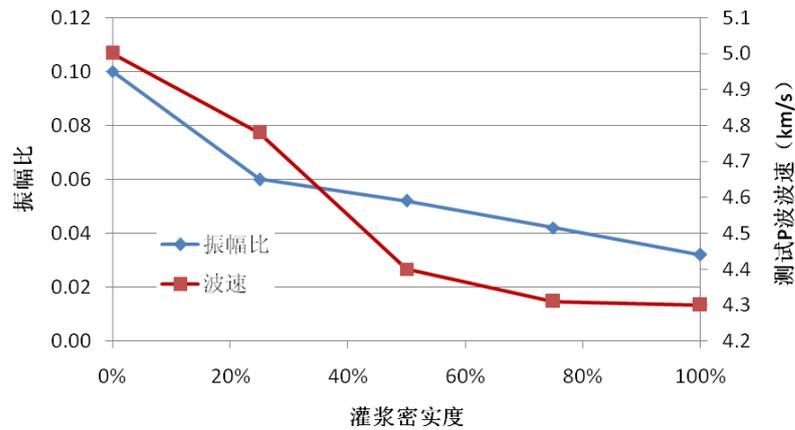


附图 11 全长波速法计算例

从附图 11 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。



附图 12 定性测试结果

根据检测经验，综合压浆指数 I_f 较低 (<0.8) 或者很高 (>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，宜待评定，即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。

8.1.2 定位检测评价

根据测试区间的定位检测结果来推定孔道的压浆质量。

(1) 测试区间的压浆质量

测试区间采用压浆密实度指数 D 作为定位检测的评定指标，有：

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \beta_i \times 100\% \quad \dots\dots\dots (7-10)$$

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

$$D = \frac{N_J \times 1 + N_X \times 0.5 + N_D \times 0}{N} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (7-11)$$

其中， N_J 代表健全测点数。

N_X 代表小规模缺陷测点数。

N_D 代表大规模缺陷测点数。

N 为总测点数，有 $N = N_J + N_X + N_D$

注：当一个孔道分成若干段测试区间时，则合并若干段测区计算 D 值。

(2) 孔道压浆质量评价标准

当定位检测仅为孔道的局部时，用修正压浆密实度指数 D_e 来判定孔道的压浆质量：

$$D_e = \frac{DL_d + D_k(L_0 - L_d)}{L_0} \dots\dots\dots (7-12)$$

其中， D 为测试区间的压浆密实度指数。

L_d 为测试区间长度。

L_0 为孔道全长。

D_k 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。

注：当一个孔道分成若干段测试区间时，则把若干段合并为一段连接区段，从而计算 D_k 值。

8.2 锚下预应力评价

8.2.1 压浆前检测

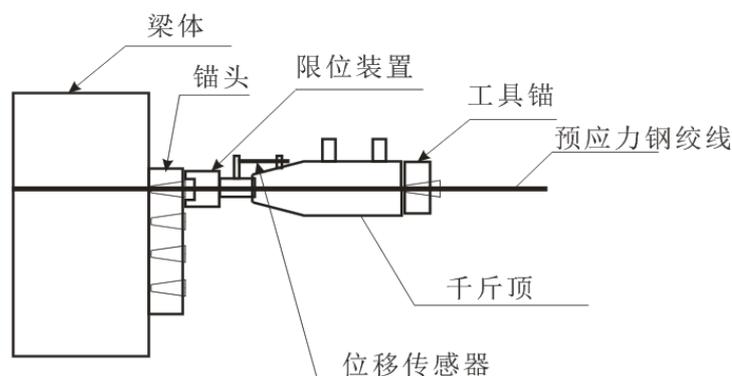
压浆前主要采用反拉法进行检测，次选等效质量法进行检测。

(1) 反拉法

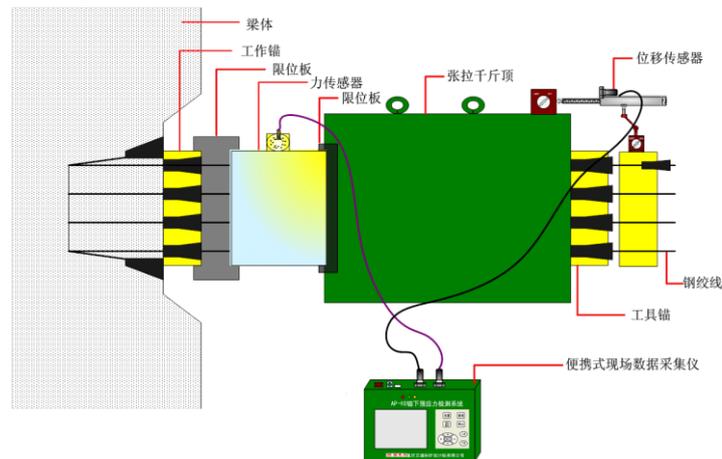
(a) 基本原理

反拉法的基本概念如附图 13、附图 14 所示两种情况，在外露钢绞线上安装工具锚，并在工具锚和原锚头（工作锚）之间设置千斤顶及位移、力传感器。其中，位移传感器量测夹片的位移。

张拉钢绞线，当反拉力小于原有预应力时，夹片对钢绞线有紧固力，不发生位移。而反拉力大于原有预应力时，夹片与钢绞线一道也参加伸长。此时，夹片的位移急剧增加，因此，测量夹片的位移趋势即可判定有效预应力。



附图 13 单根反拉法基本概念



附图 14 整束反拉法基本概念图

从理论上讲，只要夹片产生相对于锚头的位移，即可判定张拉力已大于原有有效预应力。因此，降低测量噪声，提高信噪比是有意义的。此外，夹片产生相对于锚头的位移与孔道内钢绞线的自由段长度有密切的关系。典型的单根张拉的位移~力关系曲线如附图 15 所示：

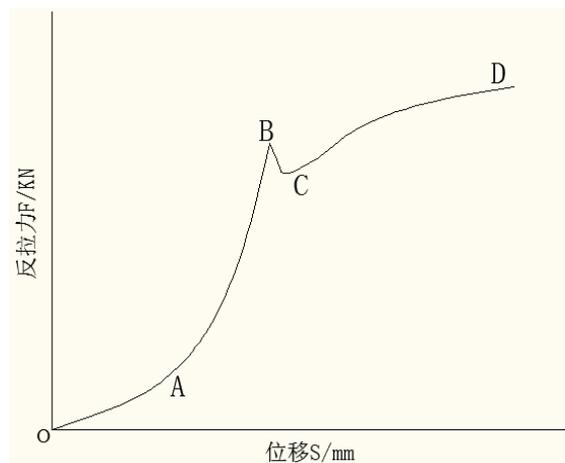


图 15 反拉法检测过程中的钢绞线位移~力关系曲线 (F~S)

反拉法检测开始时，反拉力慢慢增大，各个部件设备间空隙进一步被排除，此阶段反拉力增加较小，而位移迅速增加，在 F~S 预应力曲线上斜率较小，如附图 15 中的 OA 段；OA 段结束，各个部件间空隙全部被压紧，此阶段随着反拉力增加，位移增量为工作段钢绞线的弹性变形，曲线的斜率趋于稳定，如附图 15 中的 AB 段；AB 段末端，反拉力达到平衡锚下有效预应力与静摩擦力之和，反拉力持续作用，完成克服摩擦力，此时，预应力体系将进行一个调整，如附图 15 中的 BC 段，此阶段夹片与锚具之间的摩擦消失，夹片将随着钢绞线向外移动，直至被限位板(筒)限制住；当夹片松动后，反拉力继续增大，此时位移增量为工作段钢绞线和锚下锚索弹性变形之和，显然此时单位反拉力带来的位移量大得多，在 F~S 曲线上斜率减小，如附图 15 中的 CD 段。

因此，C 点以后的张拉可以认为已经克服了夹片摩阻，因此，也可将 C 点作为预应力的判据。

(b) 注意事项

单根张拉法与整束张拉法的预应力判据是有明显不同的。对于整束张拉，其预应力判据是根据 F~S 曲线的下曲拐点（附图 15 中 B 点），而对于单根张拉，则目前有两种判据：

- (1) F~S 曲线的第二次上曲拐点，附图 15 中 C 点。
- (2) 夹片的位移绝对值一般取 0.5~1mm。

在此特别需要说明的是，反拉法的不当操作对夹片的损伤以及对于梁极限承载力的影响。在进行反拉法测试时，如果控制不严会造成锚具极限承载力的损失。其原因在于在 2 次张拉时，夹片会随着钢绞线的位移而产生与锥口间的相对位移。此时，由于夹片、锥口产生的塑性变形，以及夹片在位移过程中不可避免地产生转动，从而在放张时夹片无法完全回缩到原来的位置。该位置的差异越大，对该钢绞线（及锚固）的极限张力一般也就越低，对结构极限承载力的不利影响也就越大。

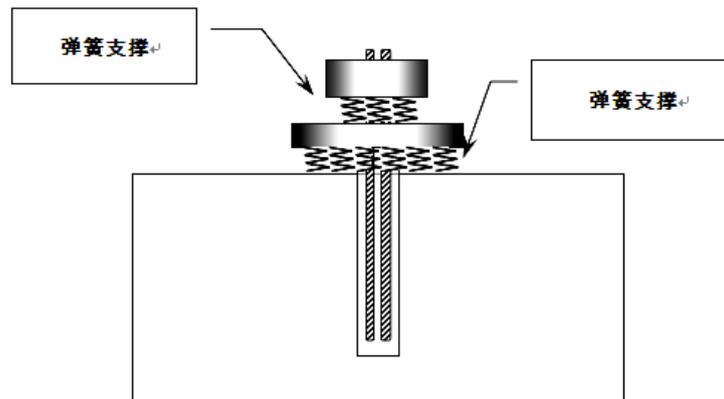
例如，在“二次张拉低回缩钢绞线竖向预应力锚固系统设计、施工、验收技术规范（征求意见稿）”中，明确规定“2 次张拉应在张拉控制应力处于稳定状态下进行，锚固阶段张拉端的内缩量应符合下列规定。a、第一次张拉锚固回缩量 $\leq 6\text{mm}$ ；b、第二次张拉锚固回缩量 $\leq 1\text{mm}$ ”。

相对而言，单根张拉法对夹片的位移量相对比较容易控制，而整束张拉法的控制则较为困难。特别是各钢绞线的张拉预应力相差较大时，原预应力较小的钢绞线率先进入力平衡状态（即夹片开始松动被并带出），但由于其它钢绞线尚未进入力平衡状态，因此，千斤顶继续工作，使得该夹片继续被带出，有可能使其被超张拉进而超过允许的回缩极限（1mm）。

所以，从对预应力结构的不利影响来看，单根张拉有一定的优势，同时，对夹片的位移量进行了限位是及其必要的。

8.2.2 压浆后检测

将锚头与垫板、垫板与后面的混凝土或岩体的接触面模型化成如下的弹簧支撑体系：



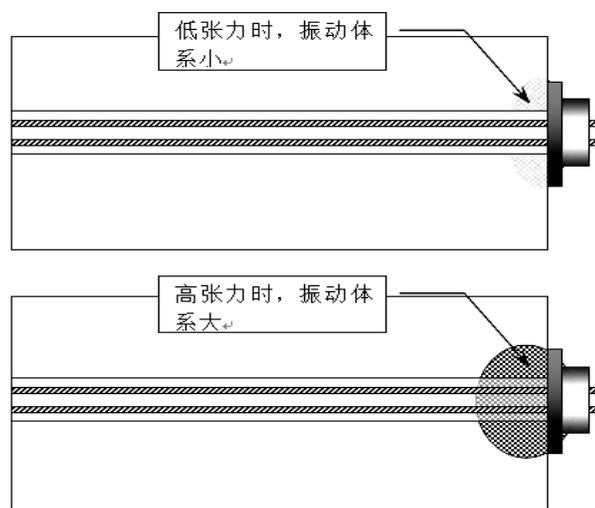
附图 16 振动体系模型

该弹簧体系的刚性 K 与锚下预应力（有效预应力）有关，当然锚下预应力越大， K 也越大。另一方面，在锚头激振诱发的系统基础自振频率 f 可以简化表示为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$$

..... (7-13)

其中， M 为振动体系的质量。通过实验发现，埋入式锚索在锚头激振时，其诱发的振动体系并非固定不变，而是会随着锚下预应力的变化而变化。锚下预应力越大，参与自由振动的质量也就越大。



附图 17 有效预应力与振动质量的关系

基于“等效质量”原理的有效锚下预应力测试理论和测试方法，利用激振锤（力锤）敲击锚头，并通过粘贴在锚头上的传感器拾取锚头的振动响应，从而能够快速、简单地测试锚索（杆）的有效锚下预应力。

9 验证处理与数据管理

9.1.2 检测结果验证

经验证存在压浆质量缺陷的孔道，应采取相应措施进行处理。

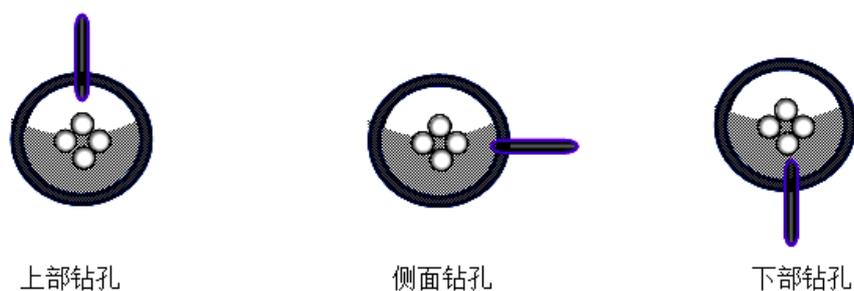
9.1.2.1 对检测及评价结果出现争议时的处理

验证检测考虑到成本与对梁的破坏性，首选钻孔和内窥镜结合的方法，该方法破坏性小成本低，而且结果直观。

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（有缺陷判为无缺陷）。造成这样的状况主要有以下原因：

9.1.2.2 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、下部钻孔是非常常见的。从附图 18 可以看出，在侧面、下部钻孔时，出现漏判的可能性是非常大的。



附图 18 钻孔方向、位置与缺陷判断

9.1.2.5 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。



附图 19 内窥镜及空管照片

9.1.2.6 对于纵、横向波纹管，其缺陷往往在管的上部；而对于竖向波纹管，其缺陷可能在管内的四周；对于竖向波纹管，单钻一个孔往往难以发现缺陷；对于纵、横向波纹管，管壁下外侧与混凝土间也有可能出现脱空现象。

9.2 锚下预应力

整束张拉检测后相当于已经对预应力进行了补张拉无需再进行处理，但出现此问题极有可能是施工单位所使用张拉设备出现问题，应当对张拉设备进行校准，另一种，是由于工人操作不当，建议加强施工班组管理；采用单根张拉需对检测不合格的预应力结构进行补张拉处理使其达到设计值，补张拉完成后需再次进行检测，直至符合设计要求为止。

9.3 检测数据管理

检测现场原始数据、相关信息对于保证检测结果的真实和可靠具有决定性的作用。随着检测数据的不断增多，以及时间的推移，这些数据的保存、检索、追溯的问题日益突出。另一方面，在数字化快速发展的环境下，数据库技术也日益成熟和完善。为此，将数据库技术与工程检测相结合，无论是对技术的进步、还是对检测质量的保障，都有十分积极的意义。同时，通过各种工况检测数据的收集、图像的分析，一方面，有利于后续修改完善规程提供依据，另一方面，有利于适当时机建立自动分析模型工具，在现场具备快速输出初步检测结论，促进工程检测的标准化、智能化应用。