

# 预应力管道灌浆质量检测方法的现状和进展

吴佳晔<sup>1</sup>, 杨超<sup>2</sup>, 季文洪<sup>3</sup>, 刘秀娟<sup>4</sup>, 魏永高<sup>5</sup>

(1. 四川理工学院建筑工程学院, 四川 自贡 643000 2. 杭州市交通工程质量安全监督局, 杭州 310000)

3. 上海市建筑科学研究院, 上海 200032 4. 四川升拓检测技术有限责任公司, 成都 610072

5. 北京星通联华科技发展有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 文章通过分类比较的方法, 介绍了目前国内外最常用的测试预应力管道灌浆质量的钻芯取样法、电磁波雷达法、X 光、 $\gamma$ 射线法、弹性波冲击回波法、超声波透射法以及透过等几种测试方法, 认为基于冲击弹性波的一系列技术是可行和有发展前途的方法。

**关键词:** 预应力管道; 灌浆质量; 检测方法; 冲击弹性波

**中图分类号:** TU 413

**文献标识码:** A

## 引言

目前大量的预应力混凝土桥梁在我国桥梁建设中占主导地位, 被广泛应用于包括青岛海湾大桥、杭州湾跨海大桥、苏通大桥等重要建设项目上。对于预应力混凝土桥梁, 由于预应力筋定位不准引起预应力损失, 同时在施工张拉过程中造成梁体崩裂; 预应力钢绞线要在桥梁使用过程中确保长期发挥作用, 达到设计要求, 预应力孔道的压浆质量效果是其重要的影响因素之一。如果预应力孔道压浆不密实, 金属材料在高应力状态下锈蚀速度很快, 孔道中的钢绞线材料易发生腐蚀, 从而影响桥梁的耐久性、安全性; 并且预应力筋下存在压浆质量缺陷时会出现混凝土应力集中致使破坏, 随时间推移引起的预应力损失现象, 会改变梁体的设计受力状态, 从而影响桥梁的使用寿命。

在桥梁建设中, 后张预应力压浆不密实的问题早在十几年前就已受到国内外的广泛关注。建于 1953 年的英国 Ynys-Gwas 桥梁, 于 1985 年突然倒塌, 经过英国的运输与道路研究实验室 (TRRL) 研究发现该桥梁倒塌是由于预应力钢筋锈蚀所致。此外, 建于 1957 年的美国康涅狄格州的 Bissell 大桥, 因为预应力筋锈蚀导致桥的安全度下降, 在使用了 35 年后也不得不于 1992 年炸毁

重建。通过分析上述两个事故, 导致钢绞线锈蚀的主要原因就是预应力孔道压浆不密实。因此采用先进的无损检测技术对预应力结构的管道整体灌浆质量进行检测, 对客观评价结构的质量状况意义重大。

为此, 国内外相继开展了一些研究, 提出了不少检测方法。例如冲击回波法、超声波成像法、表面波频谱成像法、探地雷达法、电磁波 (雷达)、X 光、 $\gamma$ 射线法、能量衰减法和超声相阵法等方法。从发信点与受信点的位置关系, 可以将上述方法分为透过法和反射法; 从采用的测试媒介, 又可以把这些方法分为两大类, 基于弹性波 (包括超声波) 的方法和弹性波以外的方法, 并在对这些方法进行总结比较的基础上, 对检测技术的发展方向进行了探索。

## 1 弹性波以外的检测方法

### 1.1 钻芯检测法

钻芯检测是最早使用的传统技术, 属于局部破损检测方法, 只能按规定的抽检比例进行检测。虽然该方法是最为直观有效的测试方法, 但由于工作量大、效率低、费用较高和易对预应力钢束造成损伤等因素, 钻芯检测不宜做大面积的检测。该方法一般在无损检测中发现异常时, 作进一步的确认判断时使用。

## 1.2 电磁波雷达法

反射法可在结构物表面进行, 灵活性较好, 是重要的无损检测方法。

其中, 雷达法是利用高频电磁波以宽频带短脉冲形式, 由结构物表面通过发射天线定向传入地下, 经过存在电性差异的混凝土反射后返回表面, 被接收天线接收。当发射与接收天线以固定的间距沿测线同步移动时, 就可以得到反映混凝土缺陷分布情况的雷达图像。混凝土均一性差时 (如存在蜂窝、架空等), 这部分区域与周围混凝土电性差异增大, 反射波增强; 当其完整致密时, 混凝土性质相对均一, 反射波变弱。该方法可根据波形记录直接分析混凝土内部缺陷的分布和形态, 具有一定的可视性; 可根据探测深度、分辨率的要求选用不同频率的天线。原理图和测试图如图 1、图 2 所示。

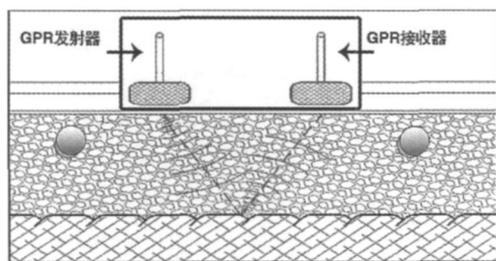


图 1 雷达探测原理示意图

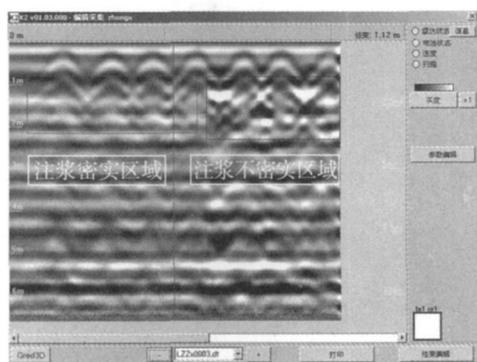


图 2 雷达探测结果

一般来说, 波长越短的电磁波, 传播的直线性越好, 分辨率越强。但同时衰减也越快, 测试范围就窄。此外, 需要指出的是, 灌浆管主要有两种类型, 金属管和 PVC 管。由于金属材料的诱电性很强, 因此雷达对铁管内的灌浆密实度是无法进行测试。

## 1.3 X光、γ射线法

γ射线和 X 光都有较强的穿透性和直线性。当 X 光或 γ射线穿过 (照射) 物质时, 该物质的密度越大, 射线强度减弱得越多, 即射线能穿透该物质的强度就越小。因此, 在梁、板的两端分别发信和受信 (拍片), 通过像片中感光的浓淡程度即可测试孔道的灌浆密实度。

这两种方法具有一定的可视性, 测试精度也相对较高。但问题在于这两种方法的测试设备较为庞大, 测试费用高, 且有一定的危险性 (放射性)。此外, 这一类的透过法由于需要在梁的两端作业, 不适合箱梁结构。

## 2 基于弹性波的方法

由于弹性波 (Elastic Wave, 包括超声波) 是一种机械波, 能够直接反映材料结构的力学特性, 因此在无损检测中得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。

### 2.1 冲击回波法

1992 年, 冲击回波法首次应用于检测预应力孔道内缺陷。目前研究表明冲击回波法是最有能力评估铁制孔道内压浆情况的方法。运用冲击回波谱图, 能大概评估全压浆的塑料孔道内的压浆情况, 国内外的研究重点和已有的研究工作也主要集中于该方面。

冲击回波法是通过检测激振信号在缺陷区域的重复反射来测试灌注密实度<sup>[2-3]</sup> (图 3)。当孔道灌注不密实时, 冲击回波的反映类似于缺陷, 一方面出现较为明显的反射 (频谱) 信号, 另一方面, 反射的弹性波波速也会有所降低。

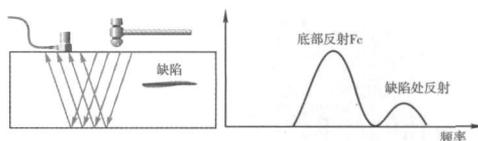


图 3 冲击回波法测试结构物厚度 (波速) 及缺陷

弹性波冲击回波法的检测仅需 1 个测试面, 测试过程简便、快捷, 结果客观。加拿大学者马尔霍察在 1984 年国际现场混凝土无损检测会议论文集的综述中, 曾把冲击回波法列为“最有发展前途的现场检测方法之一”。

冲击回波法测试的孔道灌浆的关键技术在于频谱分析技术。通常, 冲击回波采用 FFT (快速傅利叶变换) 的方法, 但该方法对微小缺陷的分辨率往往不能令人满意, 为此, 采用分辨率更高的频谱分析方法 (如 MEM (Maximum Entropy Method) 最大熵法) 是有意义的 (图 4)。

### 2.2 横向透过法: 超声波透射法

超声波透射法是将两个探头分别置于试件的两个相对面, 一个探头发射, 另一个探头接收。根据超声波穿透试件后的时间、能量变化情况来判断试件内部质量。如对象内无缺陷, 声波穿透后衰减减小, 则接收信号较强; 反之, 接收探头只能收到较弱信号。

超声波透射法的优点是工件中不存在盲区, 适宜探测薄壁工件; 但该方法对发射和接收探头的相对位置要求严格, 所以不适合箱梁等人员难以进入的结构, 且测

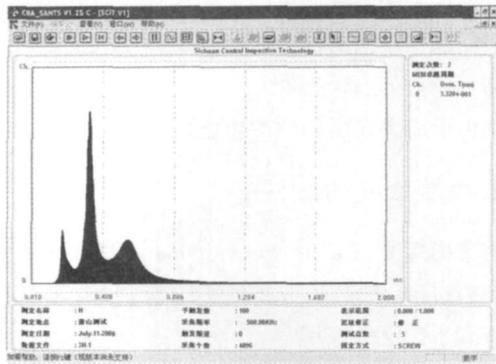


图 4 MEM的分析画面

试费时、对接触面要求高,因而很难得以广泛应用。

### 2.3 纵向透过法

上述的各种方法都是单点、横向式的测试方法,普遍存在测试效率低、难以全面测试孔道的缺点。为了检测整个锚索(杆)的灌浆密实度,则有必要对锚索全长进行检测。此时,采用上述的反射法或透过法的测试工作量就很大。因此,采用纵向式的测试方法,即从孔道(锚索)的一端测到另一端是非常必要的。为此,学者们开发了基于弹性波的纵向测试锚索(杆)灌浆密实度的方法。

一般认为,压浆密实波形相对欠密实波形首波到达时间较晚;且欠密实波形接收到的波形幅值相对于压浆饱满波形的幅值较小,如图 5所示。

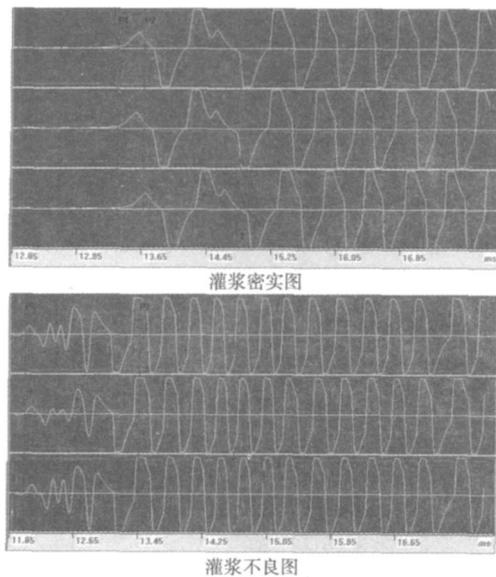


图 5 纵向式测试

从图 5可以看出,对波形放大后,对于压浆欠密实的波形当首波到达的前几个波段会发生切波现象,而压浆饱满的波形因幅值较小不会发生切波现象。

所以,常用的方法有两类,即基于波速的方法和基

于振幅(能量)的方法。

#### (1)基于波速的测试方法

本测试方法是通过测试预应力结构物管道的 P 波速度来对内部注浆的饱和度进行控制。其基本原理如图 6所示:根据池上、鎌田等<sup>[4]</sup>的研究成果,对未灌注锚索,测试得到的 P 波速度接近于锚索自身的 P 波速度(5.1km/s左右)。而随着灌注度的提高,测试得到的 P 波速度逐渐趋近于混凝土的 P 波速(一般在 4km/s左右)。

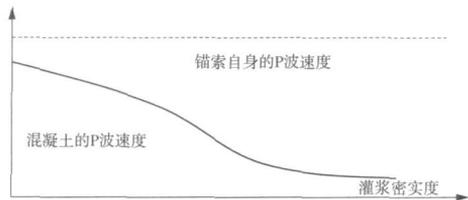


图 6 基于波速的灌浆密实度纵向透过测试技术的原理

但是,需要特别指出的是,该方法的理论并不严密。严格地说,在锚索中传播的弹性波 P 波的波速,并不会因为灌浆密实度的变化而有明显的降低,反而可能因为灌浆密实度的提高使得周围约束增加,而使得波速有略微的增加。因此,该方法本身存在理论上的缺陷乃至错误。然而,在工程实践中,确实也存在随着密实度的增加,实测的波速出现降低的现象。这又是为什么呢?

其原因实质在于传感器测试的灵敏度不够。在锚头激发的能量,一部分沿着锚索向前传递,而一部分则扩散到周围混凝土中,并沿着混凝土向前传递(图 7)。当灌浆密实度较高的时候,由于在锚索中传递的弹性波的波速较快,因此沿锚索传播的 P 波的能量大部分都进入到周围的混凝土中。这样一来,沿锚索传递到端部的能量就非常微弱,乃至难以检出,接收的信号主要来自管道周围的混凝土。因此,测试的波速实质上是混凝土的波速。另一方面,当传感器灵敏度高、测试距离短,能够检出从锚索中传递来的弹性波信号的时候,测试的波速就很难反映灌浆密实度(图 8)。

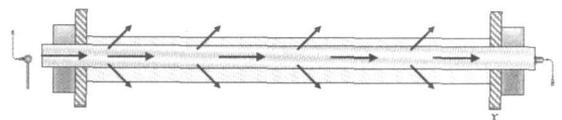


图 7 在管道中传播的弹性波的能量消散

#### (2)基于振幅的测试方法

如前所述,灌浆密实度对锚索中的弹性波最直接的影响体现在能量的衰减方面。因此,如果能够直接测试出能量的衰减,无疑是非常理想的。但是,相比波速的测试而言,能量衰减的测试误差要大得多。所以,如何

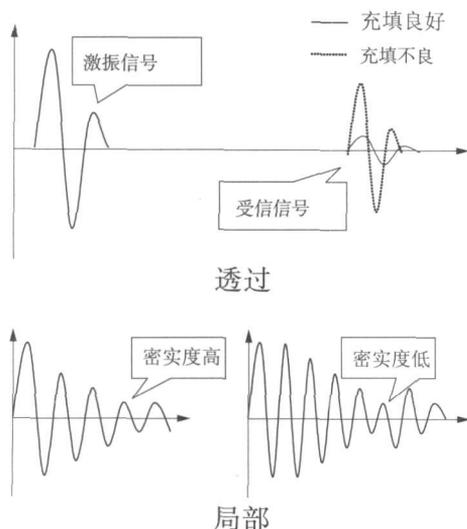


图 8 锚杆充填度与能量逸散间的关系

能够精确地测试出沿锚索传递的弹性波的能量衰减是该方法的关键所在。对此, 吴佳晔等开发的“采用双方向发振减小弹性波动信号测试误差的技术”是一个很好地解决方案。

此外, 对于竖向预应力锚杆的检测, 采用振动衰减也是一种有效的方法<sup>[5]</sup>。

### 3 预应力孔道灌浆检测技术的发展方向

预应力孔道灌浆密实度的检测是一项非常重要的工作, 其有效与否可能直接影响到桥梁的安全。从检测技术的发展方向来看, 方向有:

(1) 对预应力管道而言, 全数、全断面检测是最理想

的, 因此提高测试效率是非常必要的。例如, 可移动式、非接触式测试设备是发展方向之一。

(2) 发展可视化技术。

(3) 采用多种方法综合测试, 并逐步积累数据库。

### 4 结束语

综上所述, 在预应力管道灌浆质量的各种检测方法中, 基于冲击弹性波的各类方法是较有发展前途的。同时, 各种方法都有各自的优缺点, 建议综合使用。

### 参考文献:

- [1] 吴佳晔, 安雪晖, 田北平. 混凝土无损检测技术的现状和进展 [J]. 四川理工学院学报: 自然科学版, 2009, 22(4): 4-7.
- [2] Sansalone M, Street W. 冲击回波法及其现场型仪器在砼结构无损检测中的应用 [A]. 土木工程无损检测国际会议论文集 [C]. 1997. 12
- [3] Mary Sansalone Impact-Echo The Complete Story ACI Structural Journal 1997, 777-786
- [4] 池上和司, 鎌田敏郎. PC グラウト充填評価システム構築のための弾性波パラメータの検討, シンポジウムコンクリート構造物の非破壊検査への期待論文集 [M]. 东京: 日本土木学会, 2003
- [5] 植木博. 打撃振動波形の減衰特性に着目した PC グラウトの充填度診断 [C]. 構造物の診断に関するシンポジウム論文集, 1998, 151-157.

## Comparison of Test Methods for Bolt & Anchor Filling Percentage

WU Jia-ye<sup>1</sup>, YANG Chao<sup>2</sup>, JI Wen-hong<sup>3</sup>, LIU Xiu-juan<sup>4</sup>, WEI Yong-gao<sup>5</sup>

(1. School of Science, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China

2. Hangzhou Bureau of Communications Engineering Quality and Safety, Hangzhou 310000, China

3. Shanghai Research Institute of Building Sciences Co. Ltd., Shanghai 200032, China

4. Sichuan Central Inspection Technology Co. Ltd., Chengdu 610072, China

5. Beijing SATCOM IFS, Beijing 100085, China)

**Abstract** The filling quality is very important for the pre-stressed structures. Compared the methods by category, introduced the most commonly used methods for grouting quality test, such as drill core sampling, electromagnetic wave radar, X-ray, γ-ray method, elastic wave, impact echo method, ultrasonic transmission method, etc., are introduced in this paper. It is proved that the series of technology methods based on impact elastic waves are feasible and promising.

**Key words** pre-stressed; filling quality; test method; NDT