

弹性波法在桥梁结构预应力孔道压浆密实度检测中的应用研究

张依龙¹ 刘毅¹ 王浩晨¹ 张应龙²

1. 中铁西南科学研究院有限公司 四川成都 611731

2. 国家电投黄河公司甘肃盐锅峡发电有限公司 甘肃兰州 731601

摘要: 弹性波以其受钢筋干扰较小和检测便捷高效等优势在工程实体检测中的应用越来越广泛, 在预应力桥梁构件及钢筋混凝土坝体等工程实体检测中解决了电磁波、声波等易受钢筋干扰的问题; 本文通过对弹性波法检测原理和在工程实体检测案例的探讨, 进一步了解了该方法在桥梁预应力孔道压浆密实度检测方面的应用情况。

关键字: 弹性波法; 预应力孔道; 定性分析; 定位分析

1. 前言

预应力孔道压浆主要有两个目的: 一是为了防止预应力钢绞线被腐蚀, 保证构件的耐久性, 排除孔道内的水和空气; 二是使得钢绞线与周围混凝土通过注浆形成一个整体, 使构件的受力分布得到改善, 承载力得到提高。压浆质量存在问题将加速钢绞线锈蚀, 结构劣化, 降低结构承载力。大面积的压浆质量问题有可能导致结构破坏, 严重时可能导致桥梁垮塌。现有针对压浆质量检测主要有: (1) 基于电磁波: 金属对电磁波有屏蔽作用且钢筋对电磁波有很大影响; (2) 基于超声波: 超声波可以采用两边对测方式, 但需要耦合且受钢筋影响大; (3) 基于放射线: 该方法精度高, 但存在测试复杂、成本高、具有放射性等一系列问题; (4) 基于弹性波: 其优点是测试效率高, 精度能够满足要求。弹性波法在对于钢筋较为密集以及需要较高精度的钢筋混凝土结构在检测成本及效率方面有着明显的优势, 也为其在工程检测技术中的广泛应用奠定了基础^[1]。

2. 检测原理

通过小锤敲击产生低频应力波, 传播到混凝土结构内部, 遇到内部缺陷表面及构件底面反射回来 (如图 1 所示)。低频应力波在构件表面、内部缺陷表面及构件底面之间来回反射产生瞬态共振, 共振频率能在振幅谱中辨别出来。通过对反射回来的波谱进行时域和频域分析, 对注浆质量进行定性分析。若定性分析确认孔道存在明显缺陷, 则需进行缺陷定位分析, 沿着预应力孔道以一定间距逐点进行激振和信号接收^[2]。通过分析激振信号从波纹管以及对侧反射信号的强弱、传播时间等特性, 确定波纹管缺陷的位置及形态。

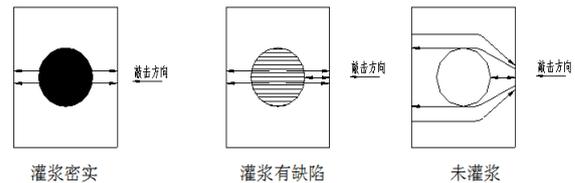


图 1 激振信号传递示意图

当工程预应力筋构件为圆柱体且其直径 d 远远小于长度 L 时, 可采用弹性波中的一维杆件理论对预应力筋进行分析。预应力筋与混凝土胶结在一起, 与周围混凝土存在较大的弹性波阻抗差异, 因此, 应用弹性波理论对预应力筋孔道压浆缺陷进行无损检测, 可将预应力筋视为一维弹性杆件。一维弹性杆件模型的波动方程如下式 (1):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{V_p^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式中: $V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, V_p 为孔道内部预应力筋的应力波的传播速度, E 为材料的弹性模量; ρ 为材料密度。

在水泥砂浆、预应力筋及混凝土组成的混合体系中, 从预应力筋端部发射的应力波, 经预应力筋向四周传播, 在预应力筋与砂浆、混凝土之间的界面发生复杂的反射、透射及能量衰减。当预应力筋孔道灌浆饱满时, 弹性波逸散面大, 能量衰减快, 因此其在预应力筋中的振动持续时间短。而当预应力筋孔道内部未灌浆时, 预应力筋中的弹性波逸散面小, 能量衰减慢, 因此其在预应力筋中传播的持续时间变长。应力波在预应力筋中传播时, 当遇到界面变化时会发生反射, 其原始振动能量应为各界面透射波能量和反射波能量

的和。因此，可通过各界面反射波的能量状况变化，来推算界面性质的变化。

2.1 定性分析

定性分析用于判断孔道内部是否存在缺陷。对采集的数据运用全长速度法 (FLPV)、全长衰减法 (FLEA)、传递函数法 (PFTF) 综合分析，获得孔道的综合注浆指数，该方法弱化了单一分析方法的局限性，获得业界较为广泛的认可。FLPV 法的理论基础是孔道 P 波波速与注浆密实度成负相关，当波在孔道中传播的速度与在混凝土中波速接近时，认为注浆密实度达到 100%。该方法较为直观，但是在注浆密实度大于 50% 时对波速变化很不敏感，因此该法仅在注浆密实度很低时有效，局限性较大^[3]。

FLEA 法是根据接收端和激振端信号的振幅比来判定。孔道注浆密实度越高，弹性波在孔道中传播时逸散越多，衰减越大，振幅比越小。即振幅比越小，反映注浆密实度越高。反之，振幅比大，注浆密实度低。

PFTF 法则是通过对比受信与激发信号初动部分的传递函数，推测锚头附近的注浆密实度陷情况。当注浆不密实时，钢绞线产生自振，受信信号初动部分频率较高^[4]。反之，注浆密实时频率较低。

2.2 定位分析

定位分析是确定缺陷的具体位置，包括等效波速法 (IEEV) 和共振偏移法 (IERS)。

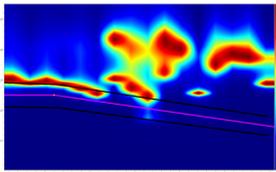
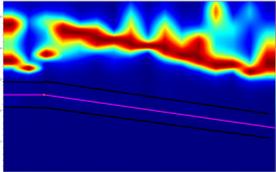
IEEV 法的基本原理是，当存在注浆缺陷时，弹性波传播距离增加，时间延长，等效波速增大。其测试精度和孔径比 / 壁厚 (D) 有关，D 越大，测试精度越高。在梁板两端壁厚较厚处，IEEA 法测试分辨率显著降低，须采用共振偏移法分析^[5]。共振偏移法 (IERS) 和定性分析的传递函数法类似，都是利用注浆不密实时钢绞线的自振。当自振波半波长与缺陷的埋深接近时，缺陷反射与自振可能产生共振，通过波谱分析，可以确认缺陷位置，以及推断缺陷大小^[6]。

3. 工程应用案例

3.1 预制梁孔道压浆密实度检测应用

某高速公路仙台 2 号大桥预制梁在孔道压浆密实度检测过程中发现预应力孔道预制梁两端头附近存在压浆不密实 (空洞) 缺陷，预制梁内部因其孔道为两端高，中间低的受力布局 (如图 2)，故其在压浆施工中容易在两端部分出现缺陷病害，在本次检测中重点对两端 2 米范围内进行了定位检测，其结果如表 1 所示。

表 1 孔道压浆检测结果

项目	检测波谱图	结果说明
初次检测		<p>1. 说明：红色线为预应力管道中心线，黑色线范围内为预应力管道。</p> <p>2. 初次检测：由波谱图可知：该管道在 0~1.14 米范围内能量密度较大，且存在多次强反射信号，经开孔后发现该处存在缺陷。</p>  <p>3. 压浆后复测：由波谱图可知：该缺陷在预应力管道范围内强反射信号已消失。</p>
重新注浆后复测		

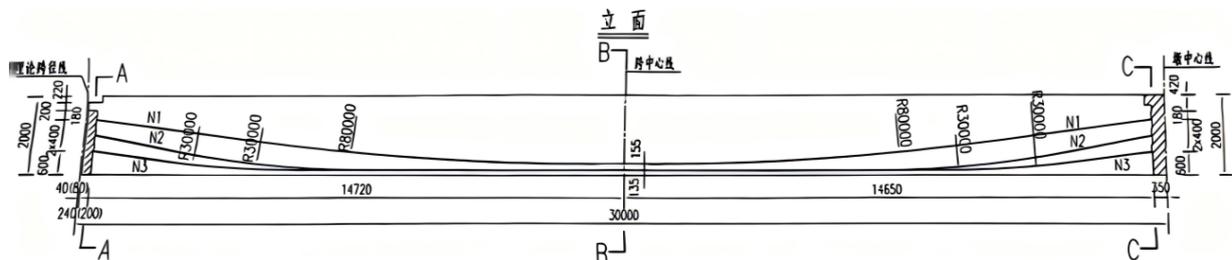


图 2 预制梁中预应力孔道布局形式示意图

3.2 孔道压浆密实度检测在连续钢构及简支转连续结构部位应用

连续钢构（连续梁）及简支转连续结构部位为常见的负弯矩位置，其预应力管道布局通常为中间高两端低（如图

3），所以在压浆过程中由于重力作用的影响，其缺陷经常出现在孔道中间最高点位置，所以在现场检测过程中重点检测中间高点位置孔道压浆的密实度情况，如表 2 所示。

表 2 孔道压浆检测结果

项目	检测波谱图	结果说明
检测情况		<p>红色线为预应力管道中心线，由图可知，在该管道范围内强反射较多，能量密度较高，凿开后发现孔道内存在较多积水，为后期结构耐久性埋下了安全隐患。</p>

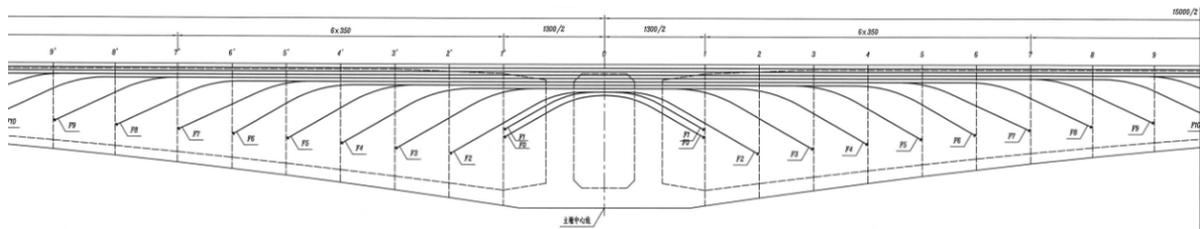


图 3 现浇梁顶板钢束孔道布局示意图

4. 预应力孔道压浆工艺流程改进建议

4.1 现有预应力孔道压浆流程

一般压浆过程为压浆料从 A 端注入，待 B 端有一定量的压浆料流出时封闭 B 端，A 端继续以一定速度注入压浆料，待压力达到规范要求后继续保压一段时间，然后封闭 A 端压浆孔，压浆完成。其流程图如 5 所示。

变为：压浆料从 A 端注入，待 B 端有一定量的压浆料流出时封闭 B 端，A 端继续以一定速度注入压浆料，待 C 端有部分压浆料流出后，A 端继续加压至规范要求后继续保压一段时间，在此过程中观察 C 端观察孔内浆料的液位高度，使之内部一直保持充盈状态，待保压一段时间后封闭 A 端压浆孔，压浆完成。其流程图如 6 所示。



图 4 简支转连续预应力孔道示意图

该流程在预应力管道顶部未预留排气孔和观察孔，经常会在预应力管道最高处出现管道压浆不密实的情况。

4.2 建议改进措施

与之前压浆流程不同之处是孔道最高处 C 端增加了压浆观察孔，即在压浆孔道最高处开一个小孔（或在湿接缝施工过程中在管道最高处预留压浆孔或软管），其压浆流程就

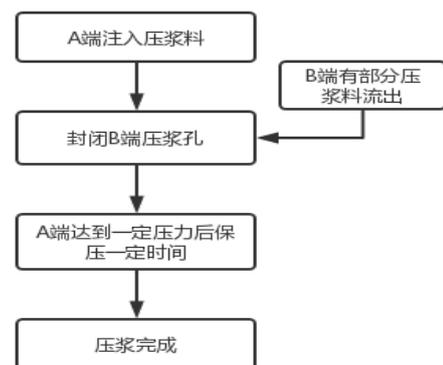


图 5 负弯矩位置预应力孔道压浆流程示意图

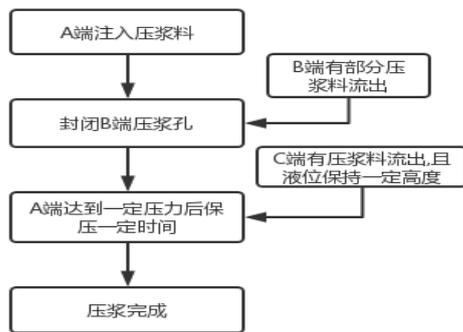


图 6 改进后的负弯矩位置预应力孔道压浆流程示意图

5. 结论

弹性波在构件表面、内部缺陷表面及构件底面之间来回反射产生瞬态共振，共振频率能在振幅谱中辨别出来。通过对反射回来的波谱进行时域和频域分析，对注浆质量进行定性分析。若定性分析确认孔道存在明显缺陷，则需进行缺陷定位分析，沿着预应力孔道以一定间距逐点进行激振和信号接收。通过分析激振信号从波纹管以及对侧反射信号的强弱、传播时间等特性，确定波纹管内缺陷的位置及形态。通过在现场实际检测验证对于弹性波在孔道压浆密实度检测中具有一定的可靠性，也证明该方法适用于桥梁结构预应力孔道压浆密实度检测。

参考文献：

- [1] 洪晓江, 吴波涛, 向程龙等. 孔道压浆密实度定性检测方法的适用性及优化 [J]. 公路交通科技, 2023, 40(10):73-78, 103.
- [2] 宋景景. 预应力孔道压浆密实度检测技术在连续刚构桥中的应用 [J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2015, 28(6):73-76. DOI:10.11863/j.suse.2015.06.15.
- [3] 邢厚俊, 葛宁, 贾其松等. 冲击回波声频法在桥梁孔道压浆密实度检测中的应用研究 [J]. 铁道建筑, 2021, 61(12):68-70, 80.
- [4] 王华, 许湘华. 预应力孔道压浆缺陷检测及注胶加固效果评价研究 [J]. 交通科技, 2022(1):62-64, 76.
- [5] 刘安桥, 熊超, 贾万权. 冲击回波法检测预应力孔道注浆密实度实践研究 [J]. 低碳世界, 2021, 11(2):165-166.
- [6] 邹春江. 含缺陷平板冲击回波响应的数值模拟和实验研究 [D]. 江苏: 南京大学, 2010.

作者简介：

张依龙(1993.2-), 男, 汉族, 籍贯: 甘肃定西人, 本科, 工程师, 研究方向: 桥梁与隧道工程。