

## 冲击回波法检测梁板孔道注浆密实度力学响应分析

何庆华<sup>1</sup>, 颜波<sup>2,3\*</sup>, 卢辉<sup>1</sup>(1. 广州市高速公路有限公司, 广东 广州 510288; 2. 广东省建筑科学研究院集团股份有限公司;  
3. 广东建科交通工程质量检测中心有限公司)

**摘要:**前人已论证冲击回波法检测孔道注浆密实度的有效性,对该检测方法进行力学响应分析,采用 Ansys 有限元程序中的动力模块 LS-DYNA 实现模型计算。为更符合实际情况,重点研究较为普遍的不密实(半脱空)状态的冲击回波响应分析。基于冲击回波法的检测原理,弹性波在结构内部来回反射得到具有周期性特点的时间位移曲线,经过频谱分析以确定混凝土内部缺陷位置。研究探讨冲击点垂直波纹管及平行波纹管两种情况下响应信号接收点的位置影响因素,得到接收点的合适布点位置,优化现场检测方法。

**关键词:**冲击回波;孔道密实度;力学响应;分析

## 1 概述

孔道压浆是预制梁板施工的重要工序,压浆的饱满度直接关系到梁板的质量和耐久性,冲击回波法是近年来兴起的一种孔道注浆密实度检测方法,徐义标、翁文文等通过室内模型试验验证了该方法的有效性;褚锋通过人为设置波纹管孔道 1/4 密实、1/2 密实、3/4 密实、完全密实的状态进行了试验,评价了冲击回波法的有效性;邹春江等通过预制试块试验研究了箱梁中板厚、孔道深度、 $d/T$ (孔径与板厚比)、孔道影响的范围、浆强度和饱满度的因素对冲击回波主频的响

应规律;卢江波等采用 Ansys/LS-DYNA 软件完成模型的建立与计算,对无浆孔道处厚度频率的多种因素,如孔厚比(波纹管内径与板厚之比)、波纹管类型、壁厚比(波纹管壁厚与板厚之比)等进行了数值分析。

上述文献重点研究了无浆孔道的工况,根据冲击回波的检测机理,其发射波响应程度与其反射路径距离有关,因此在实际工作中,发射端与接收端应有合适的位置。该文将在前人的研究基础之上,通过有限元软件,为更符合实际情况重点研究不密实(半脱空)状态的冲击回波响应模型,模拟实际圆形孔道,评价最优的回波接收距离,为该技术的进一步深入研究、工程实践提供思路。

## 4 结语

该文仅讨论了设滑动支座的墩柱,对普通板式橡胶支座和固定支座的研究详见文献[4]。当墩柱较高时,应判断支座在水平力作用下是否滑动,若未产生滑动,尚应按固定支座计算。

推演过程中采用了较多保守性假设条件,且未考虑滑动支座对桥墩的转动约束,因此,得出的计算长度

系数比实际略大。

## 参考文献:

- [1] 孙训方,方孝淑,关来泰.材料力学II[M].北京:高等教育出版社,2002.
- [2] 铁摩辛柯.材料力学——高等理论及问题[M].汪一麟,译.上海:上海交通大学出版社,1960.
- [3] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S].
- [4] 陈国红,徐召.梁桥桥墩纵桥向计算长度系数研究[J].中外公路,2021(3).

收稿日期:2020-12-24(修改稿)

基金项目:广东省交通运输厅科技项目(编号:科技-2015-02-026)

作者简介:何庆华,男,硕士,高级工程师.E-mail:709693516@qq.com

\*通信作者:颜波,男,博士(后),高级工程师.E-mail:57024777@qq.com

## 2 冲击回波法原理及建模计算

弹性波在结构内部来回反射得到具有周期性特点的时间位移曲线,再经过快速傅里叶变换(FFT)将时域信号转变为频域信号,然后进行频谱分析得到占主要部分的频率以确定混凝土内部缺陷位置。

当弹性波从混凝土传播到空气、水等界面,波阻抗变小,反射波相位发生改变,弹性波传播路径为 $2T$ 。当激振点与传感器之间距离较近时,纵波成为反射波的主要成分,则内部缺陷位置 $T$ 为:

$$T = \frac{\alpha_s C_p}{2f} \quad (1)$$

### 2.1 基本假定

通过 Ansys 程序中的动力模块 LS-DYNA 来分析不同预应力管道压浆质量下的冲击回波响应,在使用 Ansys 建立模型的过程中,假定代表每个单元的近似函数是连续的,单元之间的边界是连续的;在冲击荷载作用下,模型始终处于线弹性状态,服从胡克定律。

### 2.2 单元设置及网格划分

模拟分析中均采用 Solid164 单元三维实体,在模型中有以下基本特点:

(1) 为三维实体单元,类似矩形含有 8 个节点,在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴上每个节点具有位移、速度及加速度共 9 个自由变量。

(2) 对应混凝土的单元属性改为使用全积分算法(Full Int),这样可以有效避免沙漏问题的出现。

### 2.3 载荷施加及无反射边界条件

冲击回波法检测中冲击荷载和冲击接触时间的基本关系可简化为半周期正弦函数曲线,加载的半正弦曲线冲击荷载,峰值为 100 N,持续时长为 30  $\mu$ s,施加的载荷均位于其左侧面上,载荷施加在冲击面的中心节点。

### 2.4 有限元模型设计

孔道注浆波纹管管道内情况可分为以下 3 类:全脱空、半脱空和全密实。鉴于前人研究多为全脱空状态,但实际工程中,半脱空的工况更加普遍,因此该文重点研究半密实半脱空的孔道状态。

建模所使用的材料参数见表 1,计算模型示意图如图 1 所示,其中虚线为拟定的波纹管管面,灰色部分为钢绞线。有限元模型的波纹管管道内部结构由 3 部分组成:钢绞线、对应孔道压浆的混凝土以及对应缺陷部分的空洞区域。动力学基本计算方程中不考虑重力

因素的影响。

表 1 模型材料参数

材料	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性 模量/ MPa	泊松 比	P 波波 速/( $\text{m} \cdot$ $\text{s}^{-1}$ )	声阻抗/ [ $\text{kg} \cdot (\text{m}^2$ $\cdot \text{s})^{-1}$ ]
等效混 凝土	2 500	$34.5 \times 10^3$	0.2	3 916	$9.2 \times 10^6$
钢绞线	7 850	$20.7 \times 10^3$	0.28	5 800	$45.5 \times 10^6$

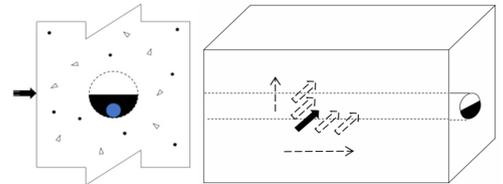


图 1 计算模型半脱空状态孔道及冲击点位置示意图

对于冲击回波板厚的影响,文献[4、5]已经进行过专题研究,限于篇幅此次模型采用固定板厚,暂不考虑板厚的影响因素。

同种介质中弹性波传递速度一样,因此混凝土强度一定时,混凝土空洞缺陷只改变弹性波的传递路径,不影响波在其他部位的传递速度,因此模型用同种混凝土参数,不影响冲击回波传递规律的研究。

## 3 信号接收点与冲击点的距离响应分析

回波信号的分析是冲击回波法无损检测的主要难点,也是最为重要的一步,不同的缺陷形式以及测试条件都可能导致响应信号发生变化,限于篇幅,该文主要计算半脱空的距离响应。

建立一块长 50 cm、宽 25 cm、高 25 cm 的方形板,内有半径 2.5 cm 的半圆柱体贯穿空洞,其直线边与板的长边平行,圆心位于板的高度方向正中,预设到冲击面的距离 9 cm,即波纹管埋深(保护层厚度)6.5 cm。

侧面敲击的敲击点位于半圆形空洞底边上方 1 cm 处,如图 2 所示。由式(1)可知,若应力波的往返总路程按 13 cm 计算,则该模型中缺陷所对应的理论峰值频率为 28 918 Hz。

由于半圆柱体缺陷的存在,即使是距离冲击点相同距离的信号接收点,其所接收到的应力波的反射情况也不尽相同,因此对采样点的选取分为沿波纹管方向和垂直波纹管方向进行探讨。

### 3.1 沿波纹管方向

沿波纹管方向上只需提取一侧的信号进行分析,设定距离冲击点分别为1、2、3和4 cm处节点的时程曲线,如图3所示,并进行FFT变换,如图4所示。

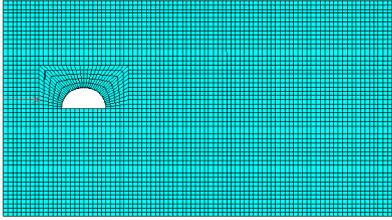


图2 半空缺陷模型(保护层厚度6.5 cm)

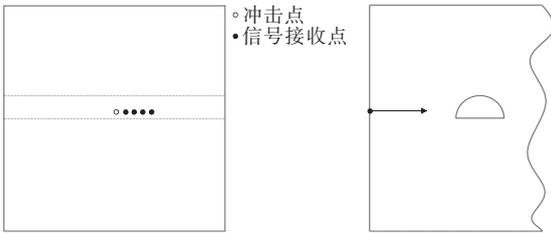


图3 采样示意图

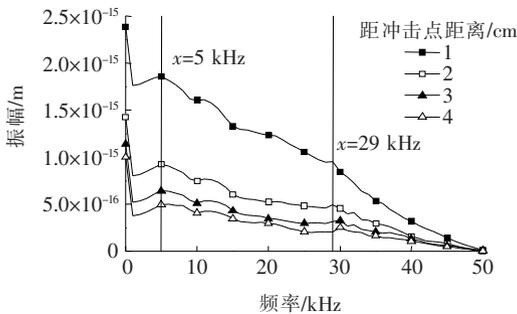


图4 沿波纹管不同测距的解析频谱图

由图4可知:在沿波纹管方向上,当测点距离冲击点为1 cm时,其解析频谱图虽然能反映板厚峰值频率,但缺陷峰值频率的峰型不够明显;当距离冲击点远于2 cm时,板厚峰值频率和缺陷峰值频率的峰型都不够明显,且缺陷峰值频率还会向高频处偏移。而距离冲击点为2 cm处节点的频谱图既能反映板厚峰值频率5 kHz,又能在29 kHz处显示较为明显的峰型,综合响应最好。

### 3.2 垂直波纹管方向

垂直波纹管方向,由于缺陷为半圆柱体空洞,因此冲击点两侧的信号接收点不具有对称性,需要分别提取两侧的信号进行分析,首先提取在冲击点上方距离冲击点分别为1、2、3和4 cm处节点的时程曲线,如图5所示,并进行FFT变换,如图6所示。

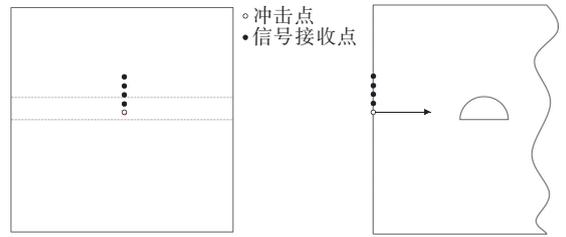


图5 采样示意图

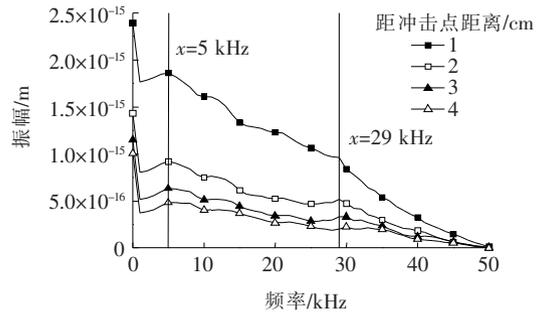


图6 垂直波纹管(上方)不同测距的解析频谱图

由图6可知:在垂直波纹管方向的上方,当测点距离冲击点为1 cm时,其频谱图虽然能反映板厚峰值频率,但缺陷峰值频率的峰型不够明显;当距离冲击点远于2 cm时,板厚峰值频率和缺陷峰值频率的峰型都不够明显,且缺陷峰值频率还会向高频处偏移。而距离冲击点为2 cm处节点,其频谱图既能反映板厚峰值频率5 kHz,又能在29 kHz处显示较为明显的峰型,综合响应最。

然后提取在冲击点下方距离冲击点分别为1、2、3和4 cm处节点时程曲线,如图7所示,并进行FFT变换,如图8所示。

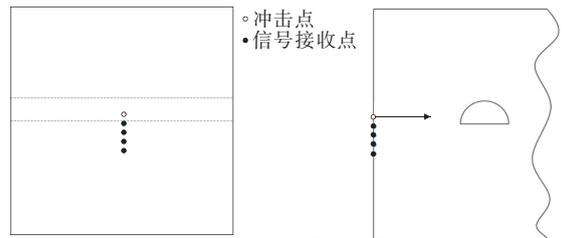


图7 采样示意图

由图8可知:在垂直波纹管方向的下方,距离冲击点为1 cm处的节点的综合响应相对较好,其频谱图能反映板厚峰值频率,但仍存在缺陷峰值频率的峰型不够明显的问题;当距离冲击点远于1 cm时,缺陷峰值频率的峰型都不能得到显示。对比可知,下方信号接收点的整体表现不如上方的因为它们距离缺陷区域更远,所接收的反射自缺陷区域的应力波更不如上方

集中。

最后,对比沿波纹管方向距离冲击点 2 cm 的节点和垂直波纹管方向上方中距离冲击点 2 cm 的节点,如图 9 所示。

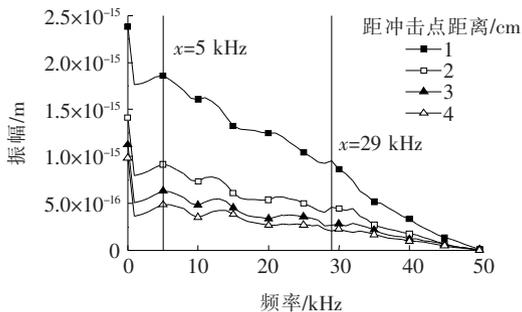


图 8 垂直波纹管(下方)不同测点的解析频谱图

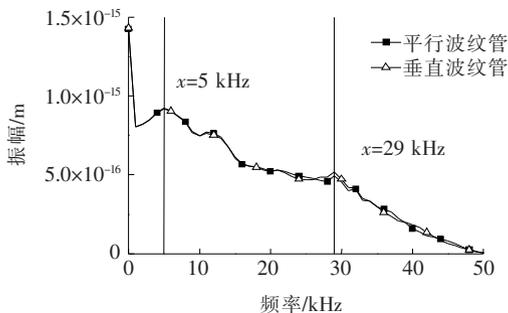


图 9 垂直波纹管和沿波纹管水平方向采样点的频谱图(距冲击点 2 cm)

由图 9 可知:两处节点在板厚峰值频率和缺陷峰值频率的响应上并无明显的优劣之分,因此二者都可以作为该类半圆柱体缺陷模型的信号接收点。

## 4 结论

采用 Ansys-LS/DYNA 建模对注浆不密实(半脱空)状态梁板孔道的冲击回波响应进行计算分析。根据回波法检测原理,研究探讨了信号接收点的位置影响因素,当侧面敲击的冲击点固定为波纹管半脱空缺陷(半圆形)底边上方 1 cm 处,响应计算表明:

(1) 接收点沿波纹管方向,测点与冲击点距离过近(该文参数为 1 cm)时,混凝土缺陷峰值频率的峰型不够明显,但测点与冲击点距离较远(该文参数为 2 cm)时,板厚峰值频率和缺陷峰值频率的峰型都不

够明显,测点与冲击点对板厚及缺陷频率分辨峰型具有最优位置(该文参数为 2 cm)。

(2) 接收点垂直波纹管方向,在缺陷上方时,模型结果类似于沿波纹管方向的结果。测点与冲击点距离过小或过大时,峰值频率的峰型都不够明显,测点与冲击点对板厚及缺陷频率分辨峰型具有最优位置(该文参数为 2 cm)。

(3) 接收点垂直波纹管方向,在缺陷下方时,当测点与距离冲击点较远(该文参数为 1 cm)时,缺陷峰值频率的峰型都不能得到显示。下方信号接收点的整体表现不如上方的原因是它们距离缺陷区域更远。

(4) 在合适的接收信号位置,沿波纹管方向或垂直波纹管方向(缺陷区域侧),两个方向均可达到较好的响应效果,受接收点与隐蔽波纹管相对位置关系影响不大。

(5) 对半脱空的注浆孔道缺陷进行了响应计算研究,将进一步深入解析冲击回波法的检测机理、优化检测方法、仪器设备改进及工程应用提供理论支撑。

## 参考文献:

- [1] 徐义标,张峰,曹原,等.波纹管孔道压浆密实度定量检测的试验研究[J].中外公路,2015(3).
- [2] 翁方文,项梁,荀东亮.冲击回波法预应力管道压浆质量检测技术研究[J].中外公路,2016(2).
- [3] 褚锋,张峰,高磊,等.冲击回波法检测预应力波纹管孔道压浆质量的回波响应研究[J].公路与汽运,2015(1).
- [4] 邹春江,陈征宙,董平.箱梁中冲击回波主频影响因素研究及应用[J].振动与冲击,2010(7).
- [5] 卢江波,方志.基于冲击回波厚度频率的预应力孔道注浆状态分析[J].地震工程与工程振动,2013(3).
- [6] 张全升,吴佳晔,魏永高.预应力梁孔道灌浆质量的无损检测技术对比研究[J].公路交通科技,2010(12).
- [7] 谭少海,刘德坤.预应力管道压浆质量无损检测方法对比研究[J].中外公路,2018(6).
- [8] 曹慧珺,孙巍,龚育龄,等.冲击回波法在桥梁预应力管道灌浆质量检测中的应用分析[J].工程地球物理学报,2017(5).
- [9] 宁建国,黄新,曲华,等.冲击回波法检测混凝土结构[J].中国矿业大学学报,2004(6).