

代志力, 向中富, 刘世建, 等. 基于弹性波的预应力管道灌浆密实度定性检测与分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2021, 41(5): 77-85.  
DAI Zhi-li, XIANG Zhong-fu, ZHOU Hui, et al. Qualitative detection and analysis for compactness of prestressed concrete duct grouting based on elastic wave[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2021, 41(5): 77-85.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2021.05.008

# 基于弹性波的预应力管道灌浆 密实度定性检测与分析

代志力<sup>1</sup>, 向中富<sup>1</sup>, 刘世建<sup>2</sup>, 周 蕙<sup>3</sup>, 罗 超<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400060; 2. 广西交通科学研究院有限公司, 广西 南宁 530000;  
3. 重庆交通大学 城市建筑与规划学院, 重庆 400060)

**摘 要:**为了提高预应力管道灌浆密实度定性检测的精度, 针对 1 片 20 m 长的模型梁进行预应力管道灌浆密实度定性检测。首先, 通过简化建立了弹性波首波在管道中的一维传播模型, 提出首波慢度与灌浆密实度之间的线性表达式。然后, 根据传播模型浇筑 1 片 20 m 长的模型梁, 模型梁内含有 5 根具有不同灌浆密实度的预应力管道; 利用弹性波激发与采集装置对模型梁中的预应力管道进行灌浆密实度定性检测, 通过循环采样的方式进行数据采样; 对采样数据进行数据处理, 通过首波位置自动判断算法和最优滤波参数选择方法等手段, 得到被检管道的首波慢度。最后, 利用首波慢度与灌浆密实度线性公式, 计算出被检管道的灌浆密实度, 并将结果与设计值进行对比分析。结果表明: 弹性波首波慢度与管道灌浆密实度之间呈线性关系; 检测结果与设计值之间的相对误差约为 5%。所提出的循环采样、首波位置自动判断和最优滤波参数选择等方法, 可用于实际的预应力管道灌浆密实度定性检测, 提高检测精度。

**关键词:**桥梁工程; 预应力混凝土; 管道灌浆密实度; 定性检测; 弹性波首波

**中图分类号:** U446.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-8879(2021)05-0077-09

## Qualitative detection and analysis for compactness of prestressed concrete duct grouting based on elastic wave

DAI Zhi-li<sup>1</sup>, XIANG Zhong-fu<sup>1</sup>, LIU Shi-jian<sup>2</sup>, ZHOU Hui<sup>3</sup>, LUO Chao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400060, China; 2. Guangxi Traffic Science Research Institute Co. Ltd, Nanning 530000, Guangxi, China; 3. School of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400060, China)

**Abstract:** In order to improve the detection accuracy, the prestressed concrete duct grouting qualitative detection around a 20 meters long model beam was researched. Firstly, an one-dimensional propagation model for the first elastic wave in the grouting duct by reasonable simplification was established, then a linear formula for the first elastic wave slowness and duct

收稿日期: 2021-05-13

基金项目: 交通运输部特大型桥梁灾变安全监测预警与应急管理平台研究项目(2011318223190);

重庆市研究生教育创新项目(CYB18168); 广西重点研发计划项目(桂科 AB18221034)

作者简介: 代志力(1985-), 男, 重庆綦江人, 工学博士研究生, E-mail: daizhilixx@163.com。

通讯作者: 向中富(1960-), 男, 四川苍溪人, 教授, 博士研究生导师, E-mail: 1285214989@qq.com。

grouting compactness was proposed. Secondly, according to the propagation model, a 20 meters long model beam which include 5 ducts with different grouting compactness were built. The elastic excitation and acquisition devices were used to detect the duct grouting qualitatively by cycle sampling method. The sampled data, calculated the first wave slowness by first wave position automatic judgment algorithm and optimal filtering parameter selection method were processed. Finally, the linear formula to calculate the duct grouting compactness was used, compare with the result of the design value. The results show that the first elastic wave and the duct grouting compactness are nearly linear relationship, the relative error is 5% more or less. The cycle sampling, first wave position automatic judgment algorithm and optimal filtering parameter selection method can be used to detect the compaction of prestressed concrete duct grouting, and improve detection accuracy. 1 tab, 11 figs, 31 refs.

**Key words:** bridge engineering; prestressed concrete; duct grouting compactness; qualitative detection; elastic first wave

## 0 引言

预应力结构在桥梁工程中有着广泛的应用。预应力管道灌浆是预应力施工中的重要工序。高质量的管道灌浆可以避免水分浸入,减少预应力钢绞线的锈蚀,对预应力钢绞线起到很好的保护作用,从而提高预应力结构的安全性,保证其长期有效。

对预应力管道密实度灌浆质量的检测一直是研究的重点<sup>[1-2]</sup>。甘爱民等利用超磁致弹性震源,在预应力管道两端发射和接收弹性波,根据弹性波在预应力钢绞线中的传导函数来计算分析桥梁预应力管道的灌浆质量<sup>[3]</sup>。Jaeger 等基于弹性波理论对后张法混凝土结构中的管道灌浆缺陷进行研究,对完全密实、部分密实和完全不密实几种情况进行了三维有限元分析,通过建立试验模型验证了数值模拟的正确性,然后在一座实际桥梁上对混凝土梁进行了检测,通过侵入性验证证实了检测结果的正确性<sup>[4]</sup>。刘洋希等利用冲击回波法对预应力管道灌浆密实度进行检测分析,并给出了各自的有限元仿真结果,仿真和试验结果较为吻合<sup>[5-8]</sup>。Muldoon 等利用冲击回波法和超声层析成像法在爱丁堡大学对一系标准预应力混凝土梁塑料管道的灌浆密实度进行了检测,检测结果表明,塑料管道对冲击回波法影响较小,超声层析成像法的检测结果更加准确<sup>[9]</sup>。Martin 等采用超声层析成像技术,对 2 片后张法预应力混凝土梁管道灌浆密实度进行了检测<sup>[10]</sup>。该方法的缺陷在于检测时间较长。当管道间距越小,则测点之间的距离也越小,会增加测试的时间。周先雁等将冲击回波法与小波神经网络算法进行结合,利

用管道内置的软泡沫模拟实际压浆缺陷开展相关试验,提取出了测试信号对缺陷敏感的特征向量,创建了一个单隐层的 BP 神经网络对预应力管道的压浆质量进行判断,为灌浆密实度检测数据精细化分析奠定了基础<sup>[11]</sup>。Schoefs 等利用冲击回波法对混凝土管道缺陷进行检测,使用概率模型对检测信号的共振频率进行分析,取得了较好的检测结果<sup>[12]</sup>。Ohtsu 等利用弹性回波信号对混凝土内部缺陷进行检测,提出一种基于冲击回波的频谱叠加成像法对混凝土内部缺陷检测的方法,并在此基础上对某桥梁桥墩的混凝土灌浆情况进行了检测<sup>[13]</sup>。曹慧珺等利用管道灌浆模型模拟满灌浆、部分灌浆、无灌浆和灌浆空洞等情况,研究不同激振锤和不同检测间距下各灌浆情况的波形响应,以此对管道灌浆情况进行判定<sup>[14]</sup>。石明等利用基于弹性波的方法引入综合灌浆指数,对预应力管道灌浆进行了定性检测,该方法是目前预应力管道灌浆密实度定性检测的主要方法<sup>[15]</sup>。钟辉武等基于冲击弹性波建立了预应力管道压浆质量定性检测评价标准,提出了弹性波检测预应力孔道压浆质量及评价结果出现争议时的解决方法<sup>[16]</sup>。梁波等基于冲击弹性波对预应力梁提出了一套管道灌浆质量评判标准,并依托实际工程对预应力管道进行了灌浆密实度质量检测<sup>[17]</sup>。朱建伟等利用超声波检测技术对地铁桥梁预应力管道灌浆情况开展研究,设计了具有不同预埋缺陷的试件,检测结果表明该检测方法最小可以检测出尺寸为 5 cm 的不密实缺陷,实现了检测结果的量化分析<sup>[18]</sup>。徐宏武等利用冲击弹性波等效厚度法对 1 组预制 T 梁的管道灌浆质量进行了检测和对比试验<sup>[19]</sup>。Algernon 等基于冲击回波法,利用希尔伯

特-黄变换对预应力管道灌浆密实度检测信号进行分析<sup>[20]</sup>。胡林翼通过采集不同灌浆密实度情况下的冲击回波信号,利用小波分析方法研究了不同密实度下信号主频的响应规律及判断依据,实现了检测信号的精细化分析<sup>[21]</sup>。Lin 等利用希尔伯特-黄变换经验模态分解对冲击回波法的测试信号进行处理,数值模拟和模型试验表明该方法可以很好地定位回波峰值,减少噪声干扰<sup>[22]</sup>。寇森研究了具有不同脱空率的预应力灌浆管道模型的制作方法,并在该模型上进行了管道灌浆密实度检测的相关试验<sup>[23]</sup>。魏连雨等对预应力管道灌浆密实度检测结果进行了误差分析,提出了减少检测误差的方法,该方法有利于提高检测结果的精度<sup>[24]</sup>。综上,目前关于预应力管道灌浆密实度检测的研究主要包括:

①主要利用基于弹性波的方法进行密实度检测;②检测分为预应力管道整体灌浆密实度的定性检测和缺陷大小及所在位置的定位检测;③密实度定性检测主要依靠传递函数,包括弹性波波速、能量衰减、特征频率等参数的变化进行密实度质量判定。但在管道灌浆密实度定性检测方面仍存在一些不足,主要包括:①传递函数中弹性波的特征频率和能量衰减受检测环境的影响较大,容易引起检测误差甚至错误;②管道灌浆密实度与弹性波波速之间呈非线性关系,当密实度较大时非线性效应更加明显,容易引起较大的误差;③管道灌浆密实度与检测参数之间缺少定量关系,检测结果不明确;④弹性波的传播时间主要由人工判定,主观误差较大。

为此,本文围绕试验模型梁,采用基于弹性波的方法对管道灌浆密实度定性检测进行研究,从理论上推导出灌浆密实度与弹性波首波慢度线性模型,确定了二者之间的线性定量关系,同时通过试验对上述模型进行了验证。提出了循环采样、弹性波首波位置自动判断、最优滤波参数选择等方法,保证了检测结果的精度。

## 1 管道灌浆密实度定性检测线性模型

预应力管道灌浆密实度定性检测是一种灌浆密实度快速检测方法,在实际工程中有着广泛的应用<sup>[25-26]</sup>。定性检测示意如图 1 所示。将采集到的信号与管道密实度建立关系,从而对管道密实度情况进行判断。研究表明,管道灌浆密实度与首波波速具有如图 2 所示的相关性<sup>[27-29]</sup>。

首波波速与管道灌浆密实度之间的关系是非线性的,这在实际检测时会带来较大的误差。为了减

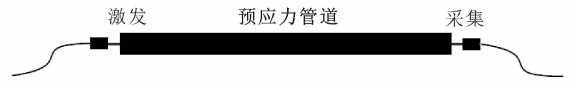


图 1 预应力管道定性检测示意

Fig. 1 Prestressed duct qualitative detection schematic

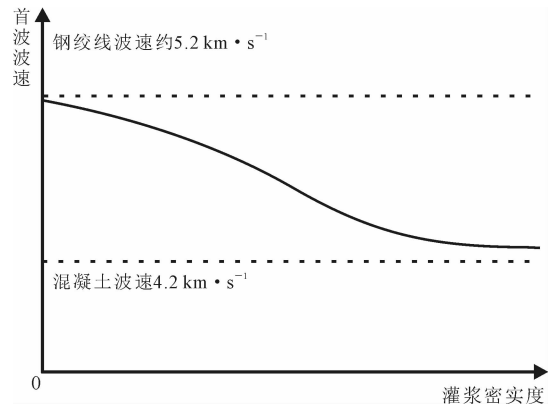


图 2 密实度与首波波速关系示意

Fig. 2 Compactness and first wave velocity relationship schematic

少非线性效应的影响,本文将管道灌浆密实度与首波慢度相关联,建立两者之间的线性关系,从而对灌浆密实度进行研究分析。

将实际管道内的灌浆情况进行简化,得到如图 3 所示的一维模型。该模型将管道内灌浆情况简化为密实区间和全空区间,密实区间长度为  $L_{aI}$ ,全空区间长度为  $L_{bI}$ ,令  $\sum L_{aI} = L_a$ ,  $\sum L_{bI} = L_b$ ,  $I$  为密实区间数。假设弹性波在密实区间的传播速度为  $V_a$ ,在全空区间内的传播速度(即钢绞线中)为  $V_b$ 。在仅考虑首波的情况下,首波的传播时间为

$$T = \sum \frac{L_{aI}}{V_a} + \sum \frac{L_{bI}}{V_b} = \frac{L_a}{V_a} + \frac{L_b}{V_b} \quad (1)$$

式中: $T$ 为首波传播时间。

因此,图 3 所示的一维模型可以等效为图 4 所示的模型。

令波纹管长度为  $L$ ,灌浆密实度为  $\rho$ ,则有  $L_a = \rho L$ ,  $L_b = (1-\rho)L$ 。将其代入式(1)后可以得到

$$\frac{T}{L} = \frac{V_b - V_a}{V_b V_a} \rho + \frac{1}{V_b} \quad (2)$$

令  $S = T/L$ ,  $S_b = 1/V_b$ 。 $S$ 是速度的倒数,即首波慢度。将式(2)代入式(1)后可得

$$\begin{cases} S = k\rho + S_b \\ k = (V_b - V_a)/(V_b V_a), S_b = 1/V_b \end{cases} \quad (3)$$

式中: $k$ 为慢度系数。

从式(3)可以看出,首波慢度与灌浆密实度之间是线性关系。

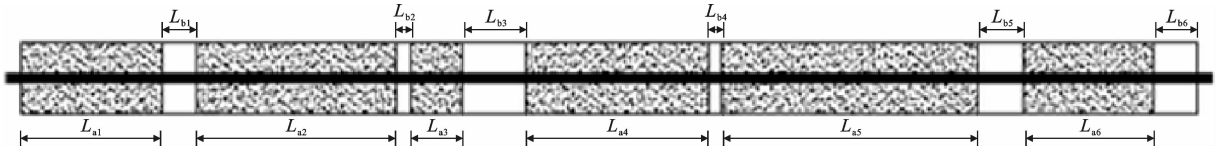


图3 管道灌浆一维模型

Fig. 3 Duct grouting one-dimension model



图4 管道灌浆一维等效模型

Fig. 4 Equivalent duct grouting one-dimension model

## 2 模型梁设计与制作

根据图4所示的一维等效模型,设计并制作了1片20 m长、1.5 m高的模型梁。模型设计如图5所示。

该模型梁中埋设5根预应力管道N1~N5,每个管道具有不同的灌浆密实度,依次为20%、40%、60%、80%、100%。每个管道为内径6 cm的塑料波纹管,每根波纹管内存入4束7Φ4的钢绞线,钢绞线公称直径约为12.7 mm,实际模型如图6所示。

## 3 试验数据采集

利用湖南天功测控公司生产的TH-CC型管道注浆密实度检测仪进行信号发射和采集。对于每个预应力管道,采用循环发射采集的方式进行数据采集。即在A端(发射端)的每根钢绞线上发射信号,然后在B端(接收端)的4根钢绞线上依次采集信号。因此,4根钢绞线共采集16组信号,记为 $A_p B_q$ ,其中 $p, q=1, 2, 3, 4$ 。每组信号采集4次,然后取其平均值。现场采样如图7所示。

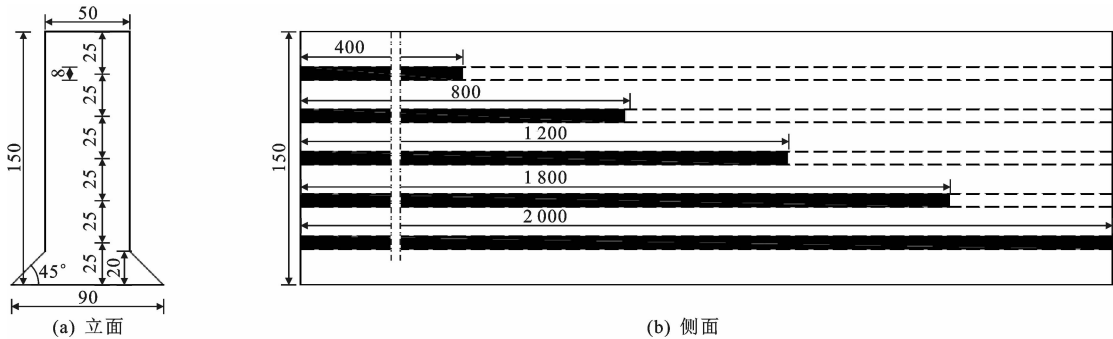
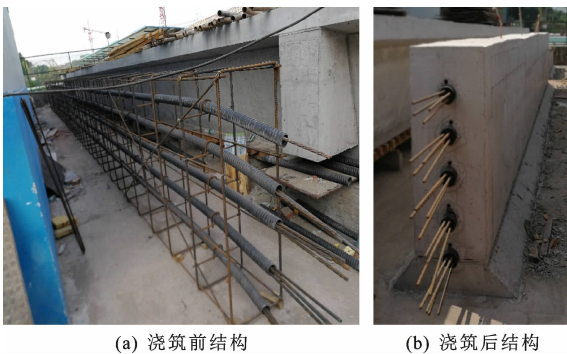


图5 模型梁设计

Fig. 5 Model beam design

单位: cm



(a) 浇筑前结构

(b) 浇筑后结构

图6 实际模型梁

Fig. 6 Actual model beam

## 4 试验分析

根据管道灌浆密实度定性检测线性模型制作了试验梁,采用循环采样的方式对梁中的每根预应力管道进行采样,每根管道各获得16组数据。根据每根管道的采样数据对应应力波首波位置进行判断,并得出首波传播时间和慢度。较小的首波传播时间测量误差会引起较大的密实度测量误差(详见本文第6节),为了减小传播时间测量误差,本文设计了首波位置自动判断算法和最优滤波参数选择算法对采样数据进行处理。



(a) 采集设备



(b) A端发射信号



(c) B端采集信号

图 7 信号发射与采集

Fig. 7 Signal transmission and acquisition

### 4.1 首波位置自动判断

令采集数据为  $f(n)$ , 其一阶差分为  $f_1(n)$ , 则

$$f_1(n) = f(n+1) - f(n) \quad (4)$$

式中:  $n$  为采样数据序号, 采样频率为 860 kHz.

令辅助信号  $R(n)$  如下

$$R(n) = \begin{cases} 1 & f_1(n) > 0 \\ -1 & f_1(n) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

将第  $I$  个  $R(n) = 1$  信号区间的起点和终点记为  $N_{bI}$  和  $N_{eI}$ . 从式(4)和式(5)容易得出,  $N_{eI}$  是数据波峰位置. 同时, 判断首波时需要设定一个阈值, 排除噪声的影响. 令滤波后首波前方噪声信号的最大值为  $P$ , 引入阈值系数  $\alpha$ ,  $\alpha$  的取值范围为 1.5~5.

当满足

$$f(N_{eI}) > \alpha P \quad (6)$$

则  $N_{eI}$  为首波波峰位置,  $N_{bI}$  为首波起始位置, 如图 8 所示.

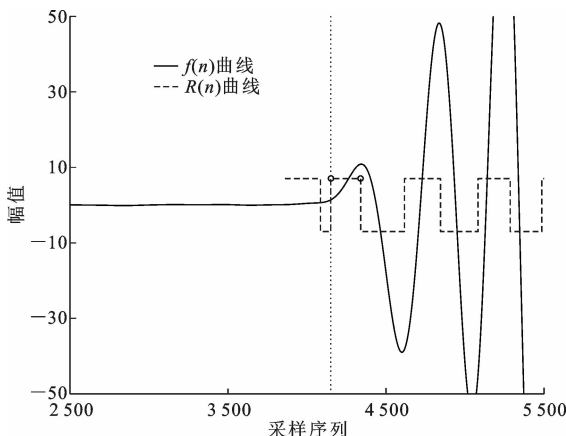


图 8 首波位置判断算法示意

Fig. 8 First wave position judgment algorithm schematic

### 4.2 最优滤波参数选择

通过滤波和首波判断算法, 可以快速判断出首

波位置. 但是, 经过进一步研究表明, 不同的滤波参数会影响滤波后首波的位置. 为了选择最佳的滤波参数, 减小误差, 本文将每个预应力管道循环采样的 16 个数据分为 1 组, 利用统计的方法选择最优的滤波参数.

对于某根预应力管道, 选用一系列不同的滤波器对采用数据进行滤波, 每个滤波器滤波后的数据为一个样本, 计算出每个样本的首波传播时间相对均方差, 即

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{16} (T_{ji} - \bar{T}_j)^2}{4\bar{T}_j}} \quad (7)$$

式中:  $S_j$  为第  $j$  个滤波器的滤波条件下本组信号的相对均方差;  $T_{ji}$  为第  $i$  个数据首波传播时间;  $\bar{T}_j$  为所有传播时间的平均值.

当  $S_j$  最小时, 所对应的  $\bar{T}_j$  为最优滤波结果, 即该管道的首波传播时间.

以 N1 管道为例, 选用 5 个低通滤波器, 滤波器性能如图 9 所示.

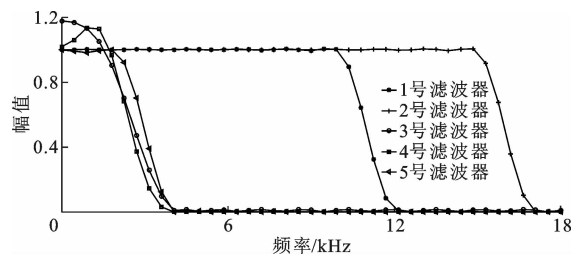


图 9 滤波器特性

Fig. 9 Characteristics of filters

结果表明, 选用 5 号滤波器时  $S_j$  最小, 其最优滤波结果如图 10 所示.

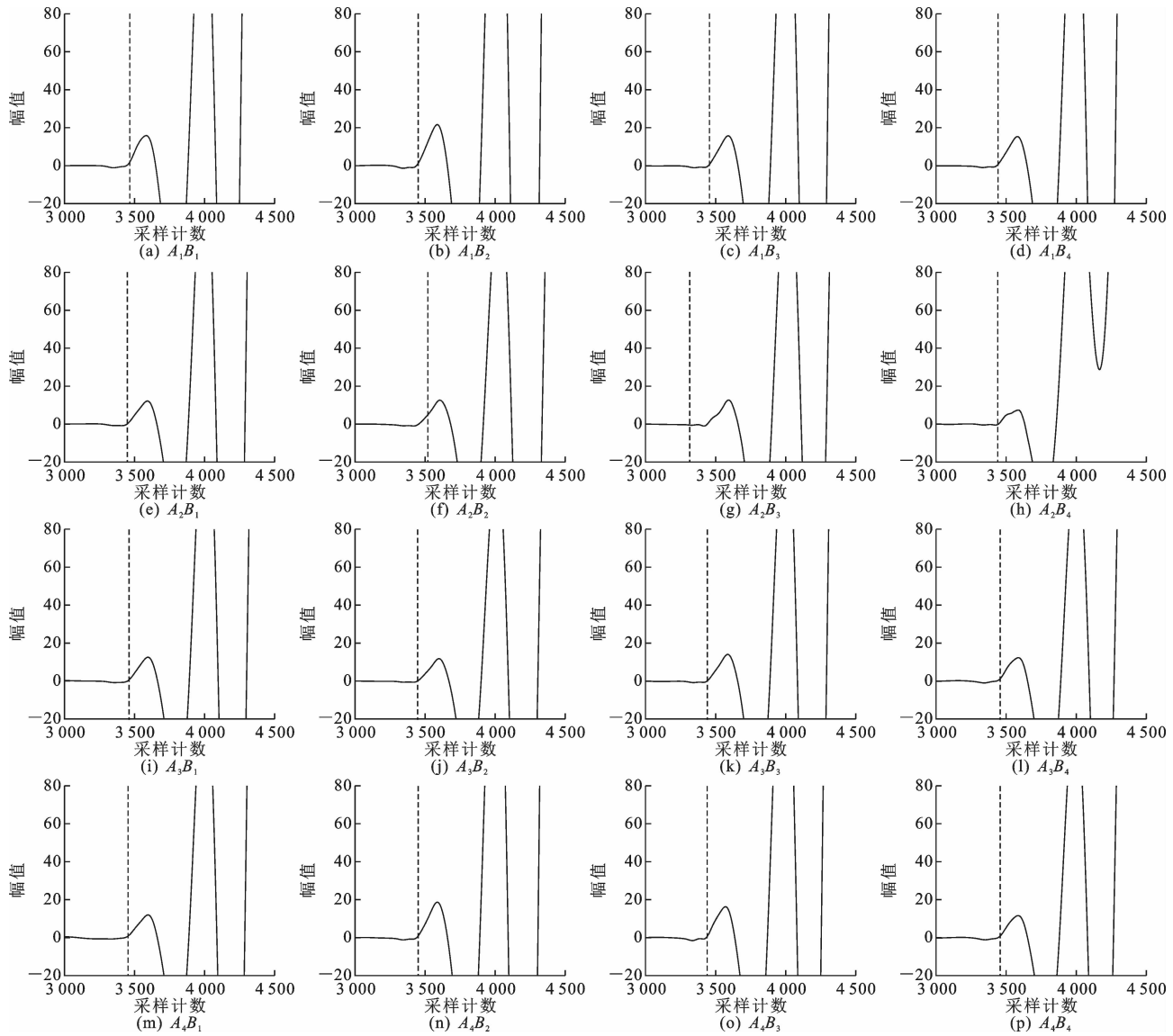


图10 N1(20%)管道首波位置最优滤波结果

Fig.10 N1(20%) duct fist wave optimal filter results

## 5 试验结果

利用前文所述的方法,计算出各管道的首波传播时间和相对均方差,根据首波时间计算出首波慢度,结果如表1所示。

表1 模型梁预应力管道密实度与首波传播时间

Tab.1 Model beam prestressed duct compactness and first wave propagation time

预应力管道	密实度设计值/%	首波传播时间/ms	相对均方差	首波慢度/( $\text{ms} \cdot \text{m}^{-1}$ )	测量值/%
N1	20	3.996	0.001 5	0.200	17.84
N2	40	4.194	0.002 1	0.210	41.41
N3	60	4.313	0.001 8	0.216	55.58
N4	80	4.565	0.008 2	0.228	85.59
N5	100	4.686	0.004 5	0.234	100.00

钢绞线波速  $V_b$  设为 5 200 m/s,对应的慢度为  $S_b=0.192 \text{ ms/m}$ 。将 N5 管道的测量值作为全密实管道( $\rho=1$ )的标准值。根据首波传播时间计算出密实度等于 100%时的首波波速  $V_a=4\ 268 \text{ m/s}$ ,慢度  $S_a=0.234 \text{ ms/m}$ 。将上述值代入式(3),可以得到密实度与首波慢度的理论线性曲线,见图 11。

将表1中的首波慢度测量值代入式(3),计算出每根管道灌浆密实度的测量值。

由图 11 可知,管道灌浆密实度与首波慢度大致呈线性关系,在一定精度范围内验证了本文线性模型的正确性。通过施工质量控制可以保障各管道灌浆密实度的设计值与真实值比较接近,而实际测量值与设计值之间误差较小。因此,验证了本文公式的正确性。

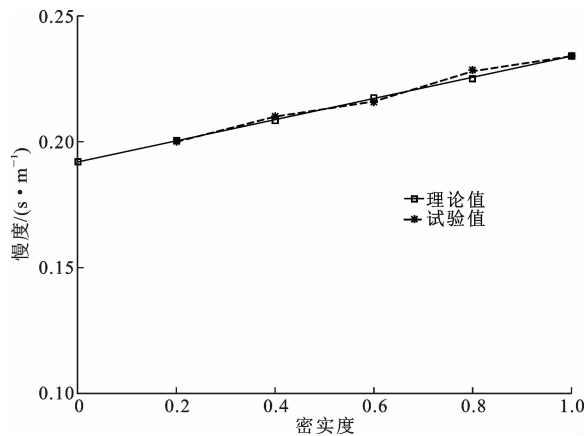


图 11 灌浆密实度的首波慢度理论结果和试验结果

Fig. 11 Results of grouting compactness first wave slowness theory and experiment

## 6 误差分析

由式(2)可以得到

$$\Delta T = \frac{V_b - V_a}{V_b V_a} L \Delta \rho \quad (8)$$

式中: $\Delta T$ 为首波传播时间绝对误差; $\Delta \rho$ 为密实度误差。

令首波传播时间测量误差  $\eta = \Delta T/T$ ,将式(8)代入式(2)后得到

$$\Delta \rho = \eta \left( \rho + \frac{V_a}{V_b - V_a} \right) \quad (9)$$

完全密实管道中的首波波速  $V_a$  主要与灌浆料的性质有关,通常为钢绞线中波速的 81%~83%。由式(9)可知,当密实度较大时,灌浆密实度测量误差  $\Delta \rho$  为首波传播时间测量误差  $\eta$  的 5~5.5 倍。

在目前的预应力管道灌浆密实度定性检测中,通常采用人工识别的方法判断首波传播时间<sup>[30-31]</sup>。一般情况下,人工识别的测量误差约为 2%,由式(9)可知,由此引起的密实度测量误差将大于 10%。本文通过循环采样、首波位置自动判断和最优滤波参数选择的方法,使得首波传播时间的测量误差小于 1%,将灌浆密实度的测量误差控制在 5% 以内,从而提高了灌浆密实度定性检测的精度。

## 7 结 语

(1)通过适当的简化,提出首波在预应力管道中传播的一维模型,进一步推导出如式(3)所示的灌浆密实度-首波慢度线性模型。

(2)制作模型梁,通过循环采样、首波位置自动判定和最优滤波参数选择的方法,对模型各管道的灌浆密实度进行了定性检测。检测结果与本文提出

的线性模型基本相符。

(3)本文改进了预应力管道灌浆密实度定性检测方法,提高了检测精度,实现了检测结果自动判读,避免了实际检测工作中人工判读引起的误差。

(4)本文提出的一维传播模型和模型试验梁中只考虑了完全密实和完全不密实 2 种情况,对部分密实情况缺少相应的分析。在后续工作中应该针对部分密实的情况展开相关分析,使得研究结果与实际情况更加接近。

## 参考文献:

### References:

- [1] 吴佳晔,杨超,季文洪,等. 预应力管道灌浆质量检测方法的现状和进展[J]. 四川理工学院学报(自然科学版),2010,23(5):500-503.  
WU Jia-ye, YANG Chao, JI Wen-hong, et al. Comparison of test methods for bolt & anchor filling percentage[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition), 2010, 23(5): 500-503.
- [2] 高云. 预应力混凝土结构管道灌浆的应用与研究现状[J]. 世界桥梁,2011,39(3):65-68.  
GAO Yun. Current status of application and research of duct grouting for prestressed concrete structure[J]. World Bridges, 2011, 39(3): 65-68.
- [3] 甘爱民,胡琼琼,陈勳达,等. 新型超声波检测技术检测管道灌浆质量的实践研究[J]. 城市道桥与防洪,2011(6):209-210,323.  
GAN Ai-min, HU Qiong-qiong, CHEN Meng-da, et al. Study on testing and inspecting quality of duct grouting by new ultrasonic testing technique[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2011(6): 209-210, 323.
- [4] JAEGER B J, SANSALONE M J, POSTON R W. Detecting voids in grouted tendon ducts of post-tensioned concrete structures using the impact-echo method[J]. ACI Structural Journal, 1996, 93(4): 462-473.
- [5] 刘洋希. 基于冲击回波法的预应力管道压浆质量检测[D]. 长沙:湖南大学,2013.  
LIU Yang-xi. Detecting grouting quality of tendon ducts using the impact-echo method[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [6] 杨海林. 冲击回波法检测预应力孔道灌浆的应用研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2014.  
YANG Hai-lin. Research on the impact-echo method to detect prestressed bridge duct grouting[D]. Har-

- bin; Northeast Forestry University, 2014.
- [7] 陈芳平. 预应力孔道灌浆质量无损检测与快速评价技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.  
CHEN Fang-ping. Study on nondestructive testing and rapid evaluate technical of prestressed duct grouting quality[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.
- [8] 徐予睢. PC梁孔道灌浆及无损检测技术的应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.  
XU Yu-sui. Application of grouting and nondestructive testing technology for PC beam[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [9] MULDOON R, CHALKER A, FORDE M C, et al. Identifying voids in plastic ducts in post-tensioning prestressed concrete members by resonant frequency of impact-echo, SIBIE and tomography[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(3): 527-537.
- [10] MARTIN J, BROUGHTON K J, GIANNOPOLOUS A, et al. Ultrasonic tomography of grouted duct post-tensioned reinforced concrete bridge beams[J]. NDT & E International, 2001, 34(2): 107-113.
- [11] 周先雁, 王智丰, 晏班夫. 预应力管道压浆质量无损检测方法[J]. 中国公路学报, 2011, 24(6): 64-71.  
ZHOU Xian-yan, WANG Zhi-feng, YAN Ban-fu. Nondestructive testing method of grouting quality for prestressed pipe[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(6): 64-71.
- [12] SCHOEFS F, ABRAHAM O, POPOVICS J S. Quantitative evaluation of contactless impact echo for non-destructive assessment of void detection within tendon ducts[J]. Construction and Building Materials, 2012, 37: 885-892.
- [13] OHTSU M, YAMADA M, SONODA T. Quantitative evaluation of SIBIE procedure and case studies[J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 1248-1254.
- [14] 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, 14(5): 578-585.  
CAO Hui-jun, SUN Wei, GONG Yu-ling, et al. Application of impact echo method to quality inspection of prestressed ducts grouting in bridges[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2017, 14(5): 578-585.
- [15] 石明, 韩永胜. 基于冲击弹性波的预应力孔道压浆饱满度检测方法及其适用范围研究[J]. 工程建设与设计, 2019(1): 206-208.  
SHI Ming, HAN Yong-sheng. Research on test method and applicable range of grouting fullness of prestressed hole based on impact elastic wave[J]. Construction & Design for Engineering, 2019(1): 206-208.
- [16] 钟辉武, 江茂盛, 钟建国, 等. 基于冲击弹性波检测预应力孔道压浆质量的评价体系研究[J]. 广东交通职业技术学院学报, 2016, 15(4): 24-28.  
ZHONG Hui-wu, JIANG Mao-sheng, ZHONG Jian-guo, et al. Study on evaluation system of pre-stressed pore pressure grouting quality based on impact elastic wave[J]. Journal of Guangdong Communication Polytechnic, 2016, 15(4): 24-28.
- [17] 梁波, 何文政. 预应力混凝土梁孔道灌浆密实度无损检测技术的研究及应用[J]. 现代交通技术, 2016, 13(2): 53-57.  
LIANG Bo, HE Wen-zheng. Research and application of nondestructive testing technology on duct grouting density for prestressed concrete beam[J]. Modern Transportation Technology, 2016, 13(2): 53-57.
- [18] 朱建伟, 卢贵武, 孔祥利, 等. 地铁预应力桥梁孔道灌浆密实度超声波检测技术[J]. 无损检测, 2019, 41(4): 39-44.  
ZHU Jian-wei, LU Gui-wu, KONG Xiang-li, et al. Ultrasonic wave detection technology for the grouting density of the subway pre-stressed beam[J]. Nondestructive Testing Technologizing, 2019, 41(4): 39-44.
- [19] 徐宏武, 唐文洋, 刘大昌, 等. 基于冲击回波等效厚度法的预应力管道压浆密实度无损检测技术研究[J]. 公路交通技术, 2017, 33(4): 43-47.  
XU Hong-wu, TANG Wen-yang, LIU Da-chang, et al. Nondestructive detection technology of prestressed pipe grouting density based on impact echo equivalent thickness method[J]. Technology of Highway and Transport, 2017, 33(4): 43-47.
- [20] ALGERNON D, WIGGENHAUSER H. Impact echo data analysis based on Hilbert-Huang transform[J]. Transportation Research Record, 2007(2028): 146-153.
- [21] 胡林翼. 基于小波分析的冲击回波法预应力管道压浆质量检测[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2013, 22(1): 16-19.  
HU Lin-yi. Grout quality testing in prestress ducts using impact-echo method based on wavelet analysis[J]. Journal of Hunan City University (Natural Science), 2013, 22(1): 16-19.
- [22] LIN C C, LIU P L, YEH P L. Application of empirical mode decomposition in the impact-echo test[J]. NDT & E International, 2009, 42(7): 589-598.

- [23] 寇森. 桥梁预应力管道注浆质量无损检测技术:模型设计研究[J]. 交通科学与工程, 2013, 29(4): 61-65.  
KOU Sen. Non-destructive testing technology for the prestressed pipe of bridges—Research on the model design[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2013, 29(4): 61-65.
- [24] 魏连雨, 钱浩, 丛颖利, 等. 预应力孔道压浆质量检测误差分析[J]. 河北工业大学学报, 2013, 42(2): 92-96.  
WEI Lian-yu, QIAN Hao, CONG Ying-li, et al. Error analysis of grouting detection with bridge prestressed channel[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2013, 42(2): 92-96.
- [25] 郭旋, 杨令. 冲击弹性波无损检测预应力管道注浆质量的研究[J]. 青海交通科技, 2019(4): 123-126.  
GUO Xuan, YANG Ling. An experimental study on grouting quality of pre-stressed pipe based on non-destructive testing technology of impact elastic wave [J]. Qinghai Transportation Science and Technology, 2019(4): 123-126.
- [26] AZARI H, NAZARIAN S, YUAN D R. Assessing sensitivity of impact echo and ultrasonic surface waves methods for nondestructive evaluation of concrete structures[J]. Construction and Building Materials, 2014, 71: 384-391.
- [27] KANG J M, SONG S, PARK D, et al. Detection of cavities around concrete sewage pipelines using impact-echo method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 65: 1-11.
- [28] IGUAL J, SALAZAR A, SAFONT G, et al. Semi-supervised Bayesian classification of materials with impact-echo signals [J]. Sensors, 2015, 15(5): 11528-11550.
- [29] 王智丰, 周先雁, 晏班夫, 等. 冲击回波法检测预应力束孔管道压浆质量[J]. 振动与冲击, 2009, 28(1): 166-169, 190.  
WANG Zhi-feng, ZHOU Xian-yan, YAN Ban-fu, et al. Grout quality testing in prestressed ducts with impact-echo method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(1): 166-169, 190.
- [30] 杨天春, 易伟建, 鲁光银, 等. 预应力 T 梁束孔管道压浆质量的无损检测试验研究[J]. 振动工程学报, 2006, 19(3): 411-415.  
YANG Tian-chun, YI Wei-jian, LU Guang-yin, et al. Experimental study of nondestructive testing for grouting quality in prestressed concrete T-beam [J]. Journal of Vibration Engineering, 2006, 19(3): 411-415.
- [31] LI T, LONG S G. Grout assessment of plastic ducts in prestressed structures with an HHT-based method [J]. Construction and Building Materials, 2018, 180: 35-43.