

# 基于冲击回波法的波纹管孔道密实性评估

黎碧波<sup>1</sup>, 齐广志<sup>2</sup>, 高华睿<sup>3</sup>

(1.陕西省交通建设集团公司, 陕西 西安 710000; 2.山东高速集团有限公司 建设管理公司, 山东 济南 250000;

3.山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

**摘要:** 基于冲击回波法对预应力波纹管道密实性开展研究,在阐述冲击回波法检测原理的基础上,基于 ABAQUS 有限元软件对检测过程中冲击荷载在砼内部的传播路径进行数值模拟分析,建立了不同压浆密实度下  $f_{\text{测}}/f_{\text{密}}$ 、压浆密实度  $c$  及测试构件厚度  $H$  之间的计算模型;开展波纹管孔道密实度测试模型试验,得到  $f_{\text{测}}/f_{\text{密}}$  与压浆密实度  $c$  的线性拟合关系式;基于工程推广应用,建立了同时考虑数值模拟及模型试验结果的修正模型,结果表明有限元模型计算结果与实际模型试验结果吻合较好,使用冲击回波法可有效检测波纹孔道的压浆密实度。

**关键词:** 桥梁;波纹管;压浆密实度;冲击回波法

中图分类号:U446.3

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2018)06-0125-06

开展预应力砼梁内部孔道压浆质量检测对保障预应力砼桥梁的耐久性和安全性十分重要。目前测试波纹管孔道压浆密实度的方法主要有有损检测和无损检测两种,其中无损检测方法又包括回弹法、冲击回波法、探地雷达法和超声波法。随着交通建设事业的发展,预应力管道压浆质量无损检测越来越受重视,冲击回波检测法成为预应力管道压浆质量检测方法的一个重要方向。国内对冲击回波法的研究主要集中在检测砼板厚度、裂缝等方面,对预应力管道压浆质量检测的研究较少,还没有成熟的技术方法及相关规范。冲击回波法检测目前局限在密实性定性评估阶段,难以得到准确的定量评估检测结果。该文在已有研究的基础上,开展基于冲击回波法的波纹管孔道密实性评估研究。

## 1 检测原理

冲击回波法是一种使用机械瞬态敲击被测物表面测点产生瞬时应力波,分析应力波在结构内部不同分界面反射绕射规律的方法。包含纵波 P 波、横波 S 波、表面波 R 波的应力波在结构内部传播(其中 R 波在物体表面传播,P 波和 S 波在物体内部传播),遇到砼内部缺陷或分界面时发生反射,反射波返回到物体表面时产生位移,这个位移被传感器接收得到回波的时域信号,再经过快速傅里叶变换成频域信号(见图 1)。

经试验验证,当传感器距冲击点很近时,传感器的信号响应主要由 P 波控制。传感器得到的时域

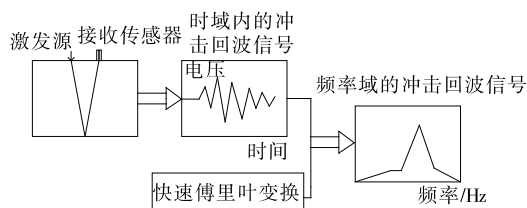


图 1 冲击回波法的基本原理

位移信号为  $x(t)$ ,通过傅里叶变换转换成频域信号。对于周期为  $T$  的任意信号,有:

$$x(t) = x(t+T) \quad (1)$$

式中: $t$  为总传播时间(s); $T$  为周期。

其傅里叶级数的复数形式为:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\omega_0 t} \quad (2)$$

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-jn\omega_0 t} dt \quad (3)$$

定义:

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (4)$$

则有:

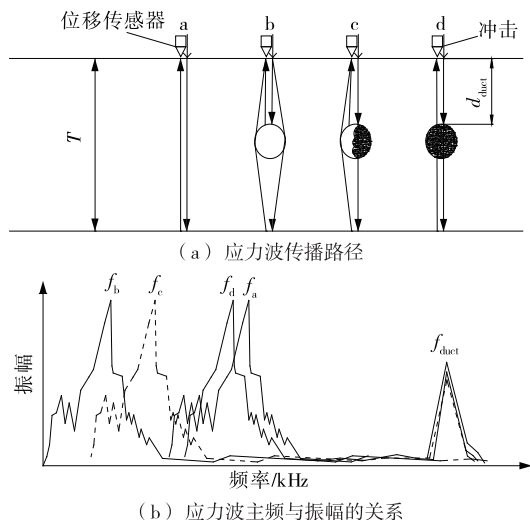
$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (5)$$

式(5)为傅里叶变换的逆变换,其中  $X(j\omega)$  为傅里叶频谱,其绝对值称为振幅频谱。这样就完成了冲击回波时域信号到频域信号的傅里叶转换。

依据冲击回波法的基本原理,砼板回波信号的主频受 P 波波速和砼板厚度的影响,传播路径见图 2(a),且满足下式:

$$f_p = \frac{\beta v_p}{2H} \quad (6)$$

式中:  $f_p$  为回波信号主频(Hz);  $\beta$  为形状系数;  $v_p$  为砧 P 波速度(m/s);  $H$  为砧板厚度(cm)。



a、b、c、d 代表应力波在箱梁中传播的 4 种情况;  $f_a$ 、 $f_b$ 、 $f_c$ 、 $f_d$  分别为 4 种传播路径下的主频;  $f_{duct}$  为 b、c、d 3 种路径下的管道反射峰值频率。

图 2 不同压浆密实度下应力波的传播路径和主频

当砧板中含空管即管道区域全空时,其传播路径为图 2(a)中 b,受应力波在空管中绕射的影响,主频向低频漂移,主频  $f_b$  最低,计算公式如下:

$$f_p = \mu \frac{\beta v_p}{2H} \quad (7)$$

当管道压浆密实时,传播路径为图 2(a)中 d,理论主频应和无管道砧板的主频相等。但实际上所使用的压浆材料一般为纯水泥浆,采用压力压浆或真空辅助压浆工艺,施工中常出现管道中水泥浆未充满(有空隙)、水泥浆体硬化后收缩、浆体固结后和管壁之间有细微空隙的现象,导致实测主频  $f_d$  比等厚度砧板的  $f_a$  主频略低[见图 2(b)]。

当管道注浆不密实时,传播路径为图 2(a)中 c,其主频  $f_c$  介于全空和全满之间,随压浆饱满度的下降,越来越接近于全空的主频  $f_b$ 。

根据频域信号的主频可判断管道的位置及压浆密实性。

## 2 冲击回波法检测的有限元模拟

采用 ABAQUS 有限元软件建立砧内部的计算模型,考虑各材料间本构关系后定义钢筋、砧等材料参数(见表 1)。

表 1 模型中的材料参数

参数名称	数值
砧抗拉强度 $f_t/(N \cdot m^{-2})$	$2.4 \times 10^6$
砧抗压强度 $f_c/(N \cdot m^{-2})$	$2.4 \times 10^7$
钢筋弹性模量 $E/(N \cdot m^{-2})$	$1.9 \times 10^{11}$
钢筋屈服强度 $f_y/(N \cdot m^{-2})$	$2.1 \times 10^8$
垫块弹性模量 $E/(N \cdot m^{-2})$	$2.1 \times 10^{12}$
泊松比 $\mu$	$3 \times 10^{-1}$

信号发射处的冲击荷载  $F$  为时间  $t$  的函数,表达式为:

$$F(t) = F_{\max} \sin\left(\frac{\pi t}{t_c}\right) \quad (8)$$

式中:  $t_c$  为冲击荷载的持续时间,取  $50 \mu s$ ;  $F_{\max} = 1$  N,将冲击荷载划分为 100 步。

砧表面纵向弹性波的传播速度  $v_d = \sqrt{E/\rho} = 3797$  m/s,砧内部纵向弹性波的传播速度  $v_p = \sqrt{E(1-\mu)/[\rho(1+\mu)(1-2\mu)]} = 3997$  m/s,冲击荷载持续时间与振幅的关系见图 3。

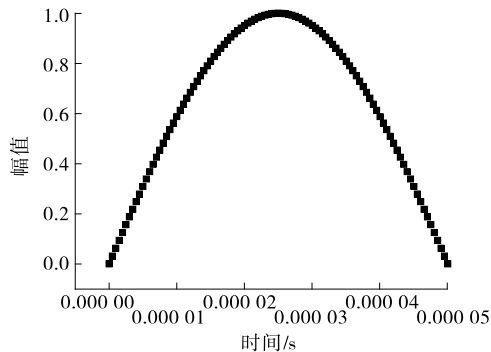


图 3 冲击荷载持续时间与振幅的关系

模型单元尺寸为 0.005 m,厚度为 18 cm,在砧结构内部预留波纹管孔道位置,施加的震源位于模型上表面、中间波纹管正上方(见图 4),共炮点与发射点的距离分别为 2、4、6、8 和 10 cm。

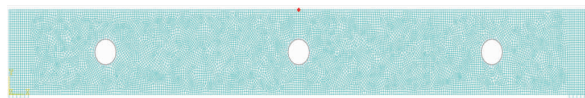
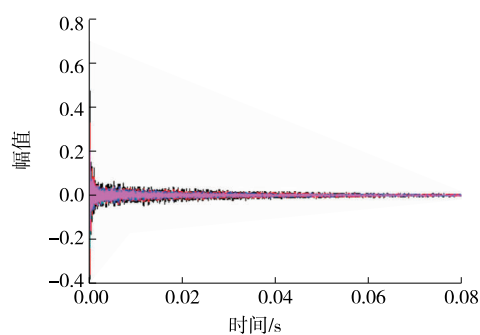
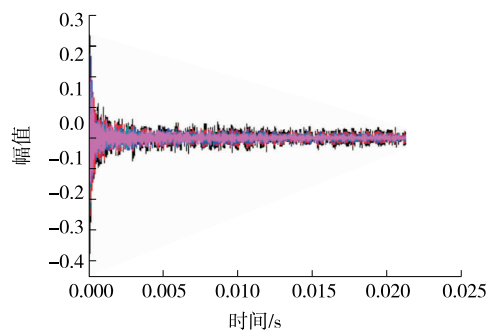
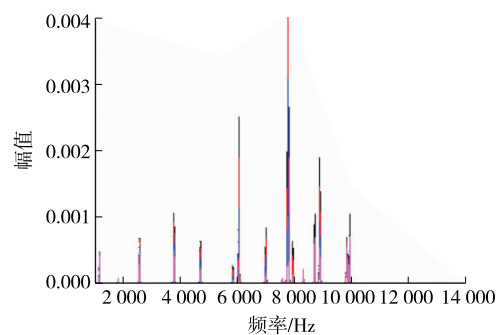


图 4 有限元计算模型

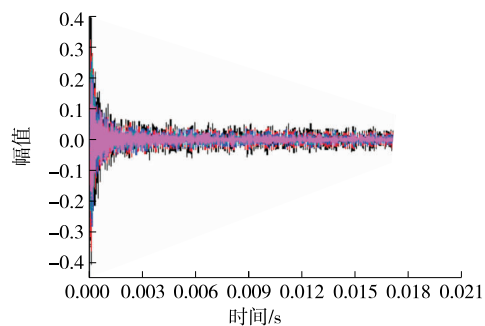
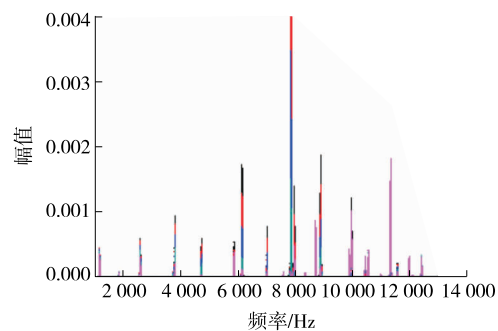
该模型分全空、1/4 密实、1/2 密实、3/4 密实、完全密实 5 种压浆密实度等级,采样时间为  $1 \times 10^{-7}$  s,采样时长为 0.08 s,分别计算每种压浆密实度的应力波时程,结果见图 5。



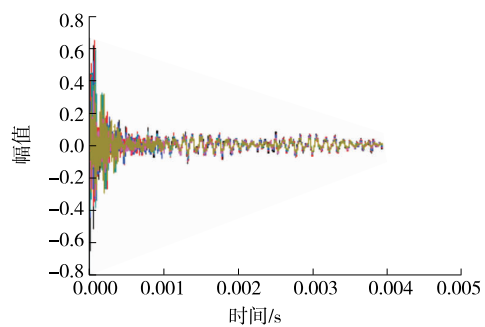
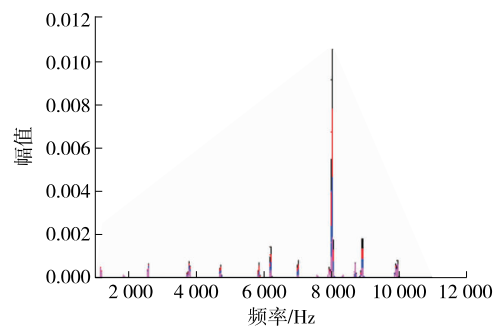
(a) 全空波纹管



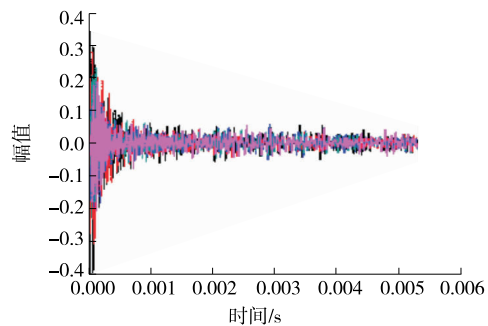
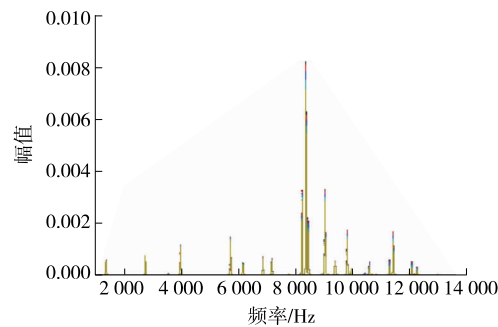
(b) 1/4密实波纹管



(c) 1/2密实波纹管



(d) 3/4密实波纹管



(e) 压浆密实波纹管

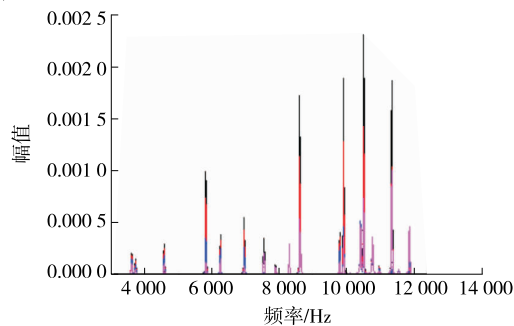


图 5 各压浆密实度下 18 cm 波纹管共炮点时域记录及频谱

同时计算 5 种压浆密实度即全空、1/4 密实、1/2 密实、3/4 密实及全密实,18、25、30、35、40、45、50、55 cm 8 种板厚情况下的主频,结果见表 2。将表 2 中主频  $f_{\text{测}}$  除以对应厚度完全密实情况下的主频  $f_{\text{密}}$ ,结果见表 3。为便于工程应用,分别对 8

种厚度下的主频变化率进行线性拟合,得到  $f_{\text{测}}/f_{\text{密}}$ 、构件厚度  $H$ 、压浆密实度  $c$  的理论表达式:

$$\frac{f_{\text{测}}}{f_{\text{密}}} = (-0.004\ 1H + 0.300\ 1)c + (0.005\ 3H + 0.603\ 2) \quad (9)$$

表 2 各压浆密实度不同板厚情况下的主频

压浆密实度	不同板厚(cm)情况下的主频/Hz							
	18	25	30	35	40	45	50	55
0.00	7 762.0	6 537	5 262.0	4 837.5	4 475.0	3 912.5	3 637.5	3 050.0
0.25	7 825.0	6 550	5 312.5	4 937.5	4 487.5	3 925.0	3 650.0	3 075.0
0.50	8 000.0	6 600	5 362.5	4 962.5	4 525.0	3 962.5	3 662.5	3 087.5
0.75	8 337.5	6 787	5 425.0	5 037.5	4 587.5	4 037.5	3 675.0	3 100.0
1.00	10 512.0	7 299	6 600.0	5 150.0	4 737.5	4 475.0	3 700.0	3 387.5

表 3 主频测试值与压浆密实下主频值的比值  $f_{\text{测}}/f_{\text{密}}$

压浆密实度	不同板厚(cm)情况下的 $f_{\text{测}}/f_{\text{密}}$							
	18	25	30	35	40	45	50	55
0.00	0.738 4	0.775 7	0.797 3	0.939 3	0.944 6	0.874 3	0.864 9	0.900 4
0.25	0.744 4	0.784 2	0.804 9	0.958 7	0.947 2	0.877 1	0.868 2	0.907 7
0.50	0.761 0	0.794 6	0.812 5	0.963 6	0.955 1	0.885 5	0.871 6	0.911 4
0.75	0.793 1	0.852 7	0.822 0	0.978 2	0.968 3	0.902 2	0.875 0	0.915 1
1.00	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0

### 3 模型试验测试

为验证实际冲击回波法检测密实度与数值模拟结果的准确性,建立不同波纹管密实程度试验模型(见图 6),在砧板表面对应预应力波纹管埋设位置沿纵向波纹管长度方向每隔 5 cm 均匀标注测点,用砂纸、打磨机将表面打磨平整,每个测点采集 3 次并对异常测点进行多次采样。



图 6 板厚 18 cm 试验检测模型

使用与砧板同期制作、强度相同的 C50 砧标准试块进行砧应力波速度标定,测得波速  $v_p$  约为 4 400 m/s,采样频率为 60 kHz,能覆盖现场测试所需时域与频谱响应信号。

分别对 18A1、18A2、25B1、25B2、40C1、40C3 6 类波纹管的 5 种压浆密实度即全空、1/4 密实、1/2 密实、3/4 密实及全密实进行数据测试,得到压浆密实度与频率拟合曲线(见图 7)和拟合关系式及各测线密实度与主频的关系式(见表 4)。将压浆密实度分为 10 级,得到各测线同一密实度下的理论主频(见图 8)。

由图 8 可知:18A、25B、40C 波纹管的主频均随压浆密实度线性变化,且变化趋势相同。

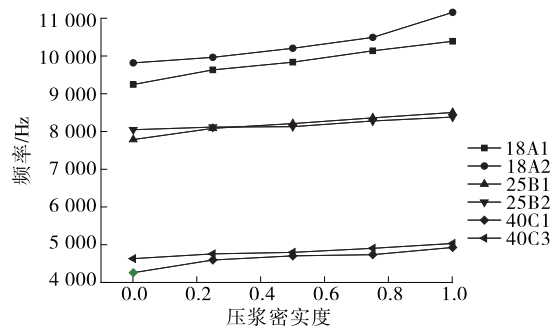


图 7 各测线同一密实度下实测主频

表 4 密实度与主频的关系式

波纹管类型	密实度与主频的关系式	相关系数 $R^2$
18A1	$y=1\,119.4x+9\,285.9$	0.991
18A2	$y=1\,284.8x+9\,682.4$	0.917
25B1	$y=685.37x+7\,842.6$	0.970
25B2	$y=332.42x+8\,020.7$	0.929
40C1	$y=592.6x+4\,342$	0.898
40C3	$y=380.3x+4\,629$	0.977

注:  $y$  为测试主频率(Hz);  $x$  为压浆密实度。

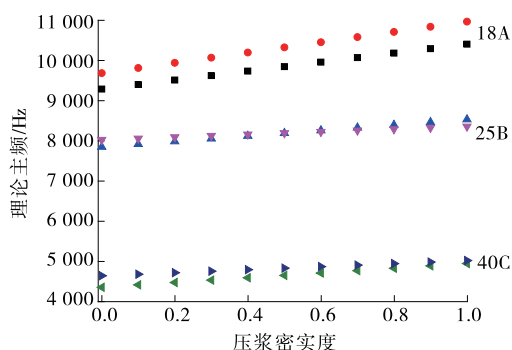


图 8 各测线同一密实度下理论主频

砼板厚度不同时,冲击回波主频存在较大差异。厚度相同的情况下,这个差异可通过某一密实度下主频与压浆完全密实情况下主频的比值  $f_{\text{测}}/f_{\text{密}}$  来消除。由此可得出 18A、25B、40C 波纹管在不同压浆密实度下理论主频与压浆完全密实主频的比值(见图 9)。

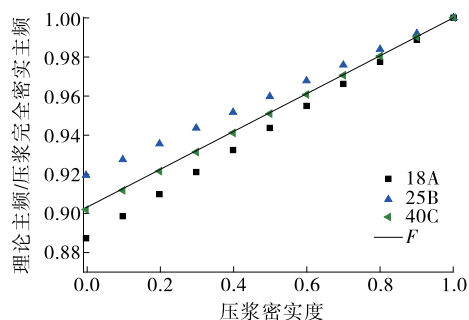


图 9 理论主频与压浆完全密实主频的比值

由图 9 可知:在不同板厚、相同压浆密实度情况下,理论主频与压浆完全密实主频的比值在一个较小的区间内变化,与厚度关系不明显。拟合得到如下线性公式:

$$\frac{f_{\text{测}}}{f_{\text{密}}} = 0.133\,6c + 0.828\,6 \quad (10)$$

模型试验采用的是 C50 砼,实际工程使用的砼

配合比甚至标号经常变动,而配合比及砼材质会对砼的波速  $v_p$  产生较大影响。通过式(11)、式(12)推导砼材质变化对式(10)是否有影响。

$$f_{\text{测}} = \frac{v_p}{2h}, f_{\text{密}} = \frac{v_p}{2H} \quad (11)$$

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\gamma)}{\rho(1+\gamma)(1-2\gamma)}} \quad (12)$$

式中:  $H$  为压浆完全密实时冲击回波传播路径的一半(cm,见图 10);  $h$  为测点冲击回波实际传播路径的一半(cm);  $E$  为砼弹性模量;  $\gamma$  为砼泊松比;  $\rho$  为砼密度。

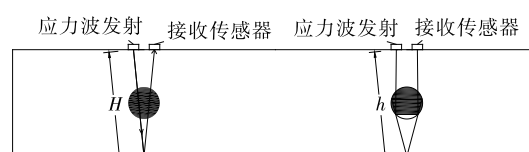


图 10 冲击回波传播路径示意图

将式(11)、式(12)带入式(10),得:

$$c = 10.32 \frac{f_{\text{测}}}{f_{\text{密}}} - 9.32 = 10.32 \frac{v_p/(2h)}{v_p/(2H)} - 9.32$$

$$9.32 = 10.32 \frac{H}{h} - 9.32 \quad (13)$$

式(13)说明砼材质对式(10)没有影响,式(10)可适用于任意配合比或任意标号的砼梁。

#### 4 数值模拟与模型试验结果综合分析

将根据现场模型试验结果拟合得到的  $f_{\text{测}}/f_{\text{密}}$  与压浆密实度的关系式即式(10)与根据不同厚度、不同压浆密实度下数值模型模拟结果拟合得到的  $f_{\text{测}}/f_{\text{密}}$ 、构件厚度  $H$ 、压浆密实度  $c$  的理论表达式即式(9)进行对比,两者相关参数不同,数值模拟得到的主频受压浆密实度  $c$  和预应力结构板厚  $H$  的影响,而模型试验得到的主频与压浆密实度  $c$  有关,与模型结构的厚度不存在直接关系。不同密实度下模型试验  $f_{\text{测}}/f_{\text{密}}$  [式(9)计算结果]和数值模拟  $f_{\text{测}}/f_{\text{密}}$  [式(10)计算结果]见表 5。

由表 5 可知:模型试验结果大于数值模拟计算理论值,偏差为 11.1%~22.2%。从工程推广应用角度分析,为得到能应用于实际工程检测的合理公式,结合数值模拟结果的精确性、现场模型试验与实际工况相近的特点,对模型试验拟合曲线、数值模拟计算曲线进行比较,得到修正后的综合模拟曲线(见图 11)及可直接现场应用的主频测试值与压浆密实度的修正模型:

表 5 不同密实度下模型试验  $f_{\text{测}}/f_{\text{密}}$  和数值模拟  $f_{\text{测}}/f_{\text{密}}$  对比

密实度 $c$	模型试验 $f_{\text{测}}/f_{\text{密}}$	不同板厚(cm)情况下数值模拟 $f_{\text{测}}/f_{\text{密}}$							
		18	25	30	35	40	45	50	55
0.00	0.90	0.70	0.74	0.76	0.79	0.82	0.84	0.87	0.89
0.25	0.93	0.76	0.79	0.81	0.83	0.85	0.87	0.89	0.91
0.50	0.95	0.81	0.83	0.85	0.87	0.88	0.90	0.92	0.93
0.75	0.98	0.87	0.88	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95
1.00	1.00	0.92	0.93	0.94	0.95	0.95	0.96	0.96	0.97

$$\frac{f_{\text{测}}}{f_{\text{密}}} = k [(-0.004\ 1H + 0.300\ 1)c + (0.005\ 3H + 0.603\ 2)] \quad (14)$$

式中: $k$  为修正值, $k=0.95$ 。

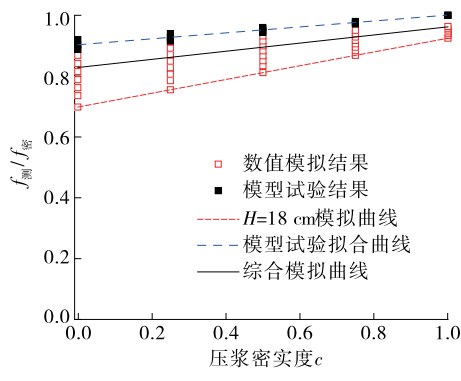


图 11 线性拟合应用曲线对比

## 5 结语

该文基于冲击回波法开展波纹管孔道压浆密实程度数值模拟和模型试验研究,通过有限元数值分析拟合得到  $f_{\text{测}}/f_{\text{密}}$ 、构件厚度  $H$  与压浆密实度  $c$  的理论表达式;通过模型试验,基于实测数据拟合得到  $f_{\text{测}}/f_{\text{密}}$  与压浆密实度  $c$  的理论表达式;基于工程应用推广,考虑有限元模拟和实测数据,提出基于冲击回波频率测试结果的孔道压浆密实程度评估模型,为实际波纹管压浆密实度检测提供借鉴。

## 参考文献:

[1] 张鹏飞.实桥孔道压浆调查和力筋性能分析及其对桥

梁结构的影响[D].南京:东南大学,2007.  
[2] 徐向锋.孔道压浆性能试验及施工质量的研究[D].南京:东南大学,2005  
[3] 冯小伟.孔道压浆材料试验及技术研究[D].长沙:长沙理工大学,2012.  
[4] 姜灏,刘海卿.回弹法对在役钢筋混凝土结构的健康检测[J].辽宁工程技术大学学报,2005,24(增刊).  
[5] 王磊,张建仁,张克波.回弹法和钻芯法检测劣化桥梁混凝土强度相关性研究[J].中外公路,2010,30(2).  
[6] Odile Abraham, Phillippe Cote. Impact-echo thickness frequency profiles for detection of voids in tendon ducts [J].ACI Structural Journal,2002,99(3).  
[7] C Colla.Improving the accuracy of impact-echo in testing post-tensioning ducts [J].Review of Quantitative Nondestructive Evaluation,2003,22.  
[8] R Muldoon, A Chalker, M C Forde, et al. Identifying voids in plastic ducts in post-tensioning prestressed concrete members by resonant frequency of impact-echo SIBIE and tomography [J].Construction & Building Materials,2007,21(3).  
[9] 季文洪,杨超.国外预应力孔道压浆质量检测实践:多阵列探地雷达法[J].世界桥梁,2008(2).  
[10] 檀永杰,徐波,吴智敏,等.基于超声对测法的钢管混凝土脱空检测试验[J].建筑科学与工程学报,2012,29(2).  
[11] 黄政宇,纪学灵,黄靓.超声波检测混凝土缺陷成像的定性分析法[J].湖南大学学报:自然科学版,2008,35(8).

收稿日期:2018-03-26

\*\*\*\*\*

(上接第 69 页)

南京:河海大学,2006.  
[9] 张军辉,尹志勇,郑健龙.南方湿热地区路基红黏土 Shakedown 临界应力水平试验研究[J].中南大学学报:自然科学版,2014,45(4).  
[10] Werkmeister S,Dawson A R,Wellner F.Pavement design moder for unbound granular materials[J].Journal

of Transportation Engineering,2004,130(5).  
[11] Hardin B O,Drnevich V P.Shear modulus and damping in soils [J]. Journal of the Soil Mechanics & Foundations Division,2014,98.  
[12] 莫文瑜,农承尚.干湿循环效应下石灰处治膨胀土动力特性试验研究[J].西部交通科技,2018(4).

收稿日期:2018-09-30