

# 时频分析技术在桥梁预应力管道注浆质量检测中的应用

杨春东

(河北省承德市公路工程质量监督站,河北承德 067000)

**摘要:**管道注浆质量直接影响到预应力混凝土桥梁的承载能力和耐久性,亟待发展注浆质量无损检测技术。时频分析技术是波纹管声波检测资料分析的重要手段,它通过分析时间-频率域内振动能量的分布规律,实现对梁板与波纹管振动模式的分析,识别出纵波、横波和各模态的Lame波及其相应的传播速度,与偏移成像技术相结合,有效地确定注浆质量缺陷的位置。

**关键词:**管道;注浆质量;声波检测;时频分析

中图分类号:U445 文献标识码:A 文章编号:1008-1933(2012)04-329-05

## Application of time-frequency analysis technique on NDT of ducts grouting in pre-stressed bridge

YANG Chundong

(Chengde Highway Engineering QA Center, Hebei Province Chengde Highway Engineering Lab, Chengde 067000, China)

**Abstract:** Grouting defects affect the bearing capacity and durability of pre-stressed concrete bridge. So the technology of NDT of ducts grouting is required. Duct acoustic time-frequency analysis technology is such an important method that it can analyze the vibration mode of the beam and duct by the distribution of vibration energy in the time-frequency field. It also can identify the P-wave S-wave, Lamé wave in different mode include the velocity. Combined with migration imaging technology, it can effectively locate the grouting defect in the duct.

**Key words:** prestressed duct; grouting fullness; acoustic inverse scattering; time-frequency analysis

## 0 前言

随着铁路与高速公路建设的发展,我国的桥梁数量迅猛增加,我国的桥梁绝大多数是预应力混凝土桥梁,特别是近年新建的桥梁95%以上都是预应力混凝土桥梁。预应力混凝土桥梁有多种桥型,如T型钢构桥、T型简支梁桥、箱型简支梁桥、连续梁桥等,数量较大的是T型简支梁和箱型简支梁桥。对这些桥梁的混凝土浇筑质量和预应力体系进行严格的检测,可以确保桥梁的工程质量。

预应力体系的长期有效性是决定预应力桥梁承载能力的关键因素。其中预加应力的尺寸、锚头质量、钢绞线性能、孔道注浆质量等是影响预应力体系有效性的主要因素。目前,对前三项影响因素在材料性能和施工技术等方面都进行了可靠的控制,唯独管道注浆质量控制难度较大,又是隐蔽工程,缺少检测和评价技术。

瑞士大学的R·H·EVANS教授最早观察到预应力管道内水泥浆泌水而形成自由水的问题,英国在桥梁检测中也发现注浆管道内封存空气和充水的问题<sup>[1]</sup>。在桥梁检测中发现孔道的注浆质量存在的问题比较普遍,主要是脱空和充水。近年的检测和开孔验证表明,多数情况下,孔道注浆的脱空长度约占检测长度的10%~20%,有些病害桥梁脱空区的长度甚至占到30%,而且常见管道充水现象。

白杨的硕士论文就预应力孔道注浆质量对桥梁承载力和耐久性的影响进行了专门的研究<sup>[1]</sup>,通过理论分析、物理实验和数值分析等研究,结果表明灌浆质量直接影响到预应力结构的安全性和可靠性。其研究主要结论如下:

- 1) 注浆能保护预应力钢绞线不发生锈蚀,保证预应力钢绞线与混凝土的粘结与协同工作;
- 2) 注浆能消除预应力混凝土结构中应力变化对锚具的影响,延长锚具的使用寿命,提高结构的可靠性;
- 3) 注浆能有效地改善梁体截面的应力状态,减小截面上最大拉应力和最大压应力的数值。

由此可知,注浆不饱满会造成预应力钢绞线的腐蚀锈断、预应力损失和应力集中,严重影响结构耐

收稿日期:2012-03-16

作者简介:杨春东(1970-),男,道路桥梁工程硕士,高级工程师,站长,主要从事公路质量监控和检测工作。

E-mail: 958475403@qq.com

久性,甚至引起结构失效或垮塌。管道中充水会加速钢绞线的锈蚀,在北方寒冷地区还会诱发冻胀病害,损害保护层,加速钢筋和钢绞线锈蚀。注浆质量问题国内外都普遍存在,欧洲的 Ynys-y-Gwas 大桥、Bickton Meadoms 大桥、Bissell 大桥及国内沪宁高速拓宽整修中都发现注浆不饱满和钢绞线锈断等问题,严重地影响到预应力体系的效能。

对于预应力体系的检测技术国内外开展了多方面的研究,涉及到有效预应力大小、钢绞线锈蚀状况、注浆质量等方面。为了测量钢绞线中有效预应力的数值是否符合于设计要求,国内开展了大量的研究,已经开发出基于反张法测量锚下预应力的技术和设备,申请了两项专利<sup>[2-3]</sup>,在重庆高速公路的预制混凝土梁板的检测中获得了成功的应用。崔玉萍等用应力解除法对混凝土桥梁在预应力与静载联合作用下梁体的实际应力状态分布进行了测量,并以此对桥梁的承载力进行评价,这是对混凝土桥梁预应力体系有效性进行检验的有效方法。兰子奇在硕士论文中研究使用漏磁法检测钢绞线锈断的技术<sup>[4]</sup>,以便能对钢绞线的工作状况作出判断。我国对于波纹管注浆质量检测技术的研究最早是在 2007 年,在全国的地质雷达技术培训班上,赵永贵讲解了用地质雷达检测波纹管注浆质量的技术,建立了注浆脱空区判别的准则,在重庆和云南高速、青岛跨海大桥建设中都有成功的应用<sup>[5]</sup>,取得了很好的效果。当然,雷达技术仅限于塑料波纹管,对于金属波纹管注浆质量的检测要困难得多,这方面的研究正在继续中。电磁波无法穿透金属波纹管,用超声层析成像法检测的条件不具备,同时分辨率也不够;红外线热成像技术仅能反应梁体表面的温度差异,对波纹管内部注浆质量的差异无能为力。美国康奈尔大学最早提出冲击回波法(IE: Impact-Echo Method),用以检测混凝土的质量<sup>[6]</sup>,并相信该技术能解决所有混凝土质量问题,包括波纹管的注浆质量问题。冲击回波法(IE)的原理是利用混凝土构件上下界面间冲击回波的多次反射形成共振,通过测量共振频率和介质波速推测界面间距离。按照冲击回波法理论,波纹管内部如果有空洞,空洞与上界面间会产生一个频率较高的共振回波,要比梁板上下界面对应的共振频率高。中国先后开展了用 IE 法检测波纹管注浆质量的试验研究,鄒春江等<sup>[7]</sup>以及王志峰等<sup>[8]</sup>分别对 IE 法进行了模型试验和现场检测,检测的结果与 IE 法的预测恰好相反。管道空洞对应的冲击回波的共振频率不但不高,反而降低,而且出现了多个频率峰值的现象,这与 IE 法依靠共振频率高低推定界面深度的原理发生了矛盾。研究者对这一现象给出了如下解释,认为孔道内的空洞尺度较小,不足以形成多次反射共振,而空洞的存在降

低了传播速度,使得上下界面间的共振频率反而降低。由于多峰值现象的出现,实际应用中很难用来判断缺陷的位置,因而用 IE 方法检测波纹管注浆质量的努力遇到了困惑。近年来国内开展了基于声波散射技术的波纹管注浆质量检测技术研究,云南高速公路建设过程中为此设立了研究课题,并且建立了波纹管注浆质量检测的地方规程,相继在云南、重庆、陕西与河北等省市开展了大量的试验研究<sup>[9]</sup>。这些研究虽然还处于起步阶段,在理论深度和技术有效性上还有待于深入和提高,但是它开启了一条新的途径。

波纹管是梁体的一部分,波纹管的缺陷也是梁体的缺陷。梁体有多个自由面,它的振动不同于无界弹性介质的振动,具有明显的结构特点,除了纵波和横波之外,还有各种模态的 Lamé 波,具有频散现象。这就使得波纹管的检测处于复杂的波场背景之下,使质量缺陷的识别变得更加困难。波纹管声波检测的关键是数值信号处理技术,如何从复杂的梁体振动数据中提取质量缺陷的信息,这是信号处理技术的核心。本文介绍的时频分析技术就是这类核心技术之一。

时频分析是一种非稳态信号分析技术,它以时间和频率二维空间展现振动能量的分布特征,揭示振动过程的瞬态频谱。它的主要功能是对梁板与波纹管的复杂振动进行模式分解,识别出纵波、横波、对称和非对称模态 Lamé 波,并且展示各种模式波的频谱和传播速度,它与偏移成像技术相结合,可靠地确定注浆缺陷的位置。该方法结合承秦高速公路桥梁工程进行了波纹管注浆质量检测试验,取得了良好的效果。这一研究推动了波纹管注浆质量检测技术的深入发展。

## 1 波纹管的振动理论与注浆质量初步评价

混凝土梁中波纹管、注浆混凝土与钢绞线固结为一体,并与梁体紧密结合共同受力,钢绞线拉张后两端有锚头固定。当钢绞线一端敲击激发声波时,钢绞线及周围的包裹体一起振动。其振动形式包括纵向、横向和扭转三种振动形式。在检测中最关心的是纵向振动,纵向振动遵从的振动方程为:

$$(\rho_s + s\rho_c) \frac{\partial^2 U_x}{\partial t^2} + KU_x - (E_s + sE_c) \frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

其中左端第一项为钢绞线与包裹体振动的惯性力,第二项为梁体混凝土的弹性恢复力,第三项为钢绞线与包裹体弹性形变内力。 $\rho_s$  和  $E_s$  为钢绞线的密度与弹性模量, $\rho_c$  和  $E_c$  为包裹混凝土的密度与弹性模量。 $s$  为包裹体等效截面。通常第二项较第

三项小很多,可以忽略。此时波纹管的纵波速度为:

$$V_p(x) = \sqrt{\frac{E_s + sE_c}{\rho_s + s\rho_c}} \quad (2)$$

当波纹管注浆密实时,包裹体等效截面  $s$  较大,钢绞线的密度和模量可以忽略,此时波纹管波速接近混凝土波速:

$$V_p(x) = \sqrt{\frac{E_c}{\rho_c}} \quad (3)$$

当波纹管注浆脱空严重时,包裹体等效截面积  $s$  很小,波纹管波速接近钢绞线波速:

$$V_p(x) = \sqrt{\frac{E_s}{\rho_s}} \quad (4)$$

一般情况下,波纹管的平均波速介于混凝土与钢绞线的波速之间。波速偏低时表示注浆密实,波速偏高时注浆脱空严重,这与传统想法可能不一致。波纹管的平均波速可以通过直达波进行测量,在波纹管一端激发,另一端接收,记录声波沿波纹管传播的走时,根据波纹管的长度计算波纹管的纵波速度。纵波速度可以作为注浆质量评价的一个指标,波速太高表示脱空严重,速度太低表示浆体强度偏低。注浆质量密实的波纹管正常的纵波速度约在  $5.0 \sim 5.3 \text{ km/s}$  左右,一般情况下介于混凝土波速和钢绞线波速之间  $4.3 \text{ km/s} < V_p < 5.7 \text{ km/s}$ 。

## 2 注浆质量缺陷检测的 Rayleigh 散射理论

纵波速度方法可用于不同波纹管注浆质量的初步评价和比较,但不能提供波纹管注浆内部质量缺陷的位置和大小等详细信息。为了检测波纹管内部的注浆质量缺陷,需要引进声波散射理论。折射、反射与散射都是非均匀介质中波动传播的规律。反射遵从 Snell 定律,适合界面尺度  $D$  远大于波长  $\lambda$  时的传播规律  $D \gg \lambda$ 。Snell 定律的主要内容是入射角等于反射角,反射强度与波阻抗差成正比;当异常体尺度小于波长时,反射定律不再成立,波的传播遵从 Rayleigh 散射原理。散射波没有特定的方向,它的散射强度是广角的方向分布函数,散射强度与波阻抗差、异常体尺度成正比。在传统的工程勘察和工程检测中习惯于使用反射的概念,然而,实际的混凝土工程检测条件下散射理论接近客观情况。例如,检测使用的声波频率为数  $10 \text{ kHz}$ ,混凝土波速在  $4 \sim 5 \text{ km/s}$  范围内,此时波长为  $0.4 \sim 0.5 \text{ m}$ ,而工程要求的检测目标的尺度为  $0.1 \text{ m}$  左右。可见多数情况下,使用的波长远大于检测目标,不满足反射条件,而更接近于 Rayleigh 散射条件。在波纹管注浆质量缺陷检测中,应用 Rayleigh 散射理论会得到更精确的结果。

为清楚解释散射理论的基本概念,不失一般性,这里讨论一维纵波振动方程。弹性介质的纵波振动方程可表示为:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial^2 x} - \frac{\partial^2 U}{V_p^2 \partial^2 t} = 0 \quad (5)$$

式中  $V_p$ ——纵波速度。

弹性介质中力学性状的不均性表现为密度与弹性模量的变化,综合体现在波速  $V_p$  的变化上。介质的纵波速度  $V_p(x)$  可表示成一个平均速度  $V_0$  与差异分布  $\alpha(x)$  之和的形式,差异分布  $\alpha(x)$  表示为:

$$\alpha(x) = \frac{V_p(x) - V_0}{V_p(x)} \quad (6)$$

$$\frac{1}{V_p(x)} = \frac{1 - \alpha(x)}{V_0}$$

在波速分布不均的介质中波会产生散射,此时振动的总波场  $U$  为入射波场  $U_1$  与散射波场  $U_s$  之和:

$$U = U_1 + U_s \quad (7)$$

一般情况下,入射波比散射波强得多,这种情况称之为 Born 近似,即:

$$U_1 \gg U_s \quad U \approx U_1 \quad (8)$$

将波速表达式(6)带入到纵波振动方程(5),在 Born 近似下,并考虑到平均波速满足波动方程,即可得到反应注浆缺陷的散射波方程:

$$\frac{\partial^2 U_s}{\partial^2 x} - \frac{\partial^2 U_s}{V_0^2 \partial^2 t} = -\frac{\alpha(x)}{V_0^2} \frac{\partial^2 U_1}{\partial^2 t} \quad (9)$$

该方程表明,波速异常区  $\alpha(x)$  的作用相当于一个二次震源,在入射波的激励下产生散射波。震源的强度与波速异常幅值、入射波强度成正比。检测记录是入射波与散射波的总合,散射波是所有缺陷散射的总和,有下列积分表示:

$$U_s(x_s, x_0, \omega) = \omega^2 \int_{\Omega} \frac{\alpha(x)}{V_0^2} U_1(x, x_0, \omega) g(x, x_s, \omega) dx \quad (10)$$

该式说明散射信号强度与波速异常幅值、入射波强度、异常体大小和散射信号频率的平方成正比。散射波是由被动震源产生的,它的走时是入射波与散射波的走时之和。通过对散射波的接收与计算,以确定异常体  $\alpha(x)$  的位置与强度分布,就是检测的目的。

限于篇幅,本文不能对梁板振动的 Lamé 波及其频散特性等内容进行详细讨论,但有一点应该说明,注浆缺陷的散射包含纵波、横波和各种模式的 Lamé 波,这是检测数据分析的基础。

## 3 波纹管注浆质量检测的方式

通过激发声波和接收注浆缺陷的散射可以检测波纹管的注浆质量。根据声波散射原理,注浆质量

检测可以有两种方式:一种是逆散射检测方法;另一种是散射追踪检测方式。本文仅限于逆散射检测方式。

逆散射检测方法使用两个检波器,分置波纹管的两端,其中一端敲击,如图 1 所示。敲击端检波器接收注浆缺陷的散射回波,对面一端接收透射的直达波。根据透射波的分析可确定波纹管中波的主要模式和传播速度,为用散射回波走时确定缺陷的空间位置提供依据。为提高测量的可靠性,每端进行多次激发,比较其一致性。

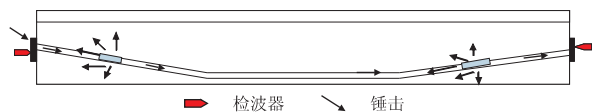


图 1 逆散射检测方式的观测布置

Fig. 1 Observation of inverse scattering

#### 4 时频分析技术与主要功能

根据声波散射理论,散射信号的时间、能量、频率与缺陷的位置、脱空程度、体积大小有关,这是散射波用于工程解释的 3 个要素。据此,声波逆散射资料的处理与解释遵循下列三条原则:

- 1) 由透射波走时测量波纹管的平均波速,并以此对波纹管注浆质量进行初略评价;
- 2) 逆散射声波的走时为入射波和散射走时之和,根据逆散射走时和波速可确定缺陷位置;
- 3) 散射波的能量强弱与脱空程度相关,主频高低与散射体大小相关;能量强脱空严重,主频率低散射体大,反之亦然。

波纹管声波逆散射记录是典型的非稳态过程,通常的时程表示方法只能展现能量随时间的变化,傅立叶频谱分析只能揭示能量随频率的变化。这些传统技术都无法实现散射理论解释对时间、能量、频率等三要素的要求,因而需要新的分析技术。本文使用 TD-BWG 波纹管注浆密实性分析软件,它是基于短时 Fourier 分析技术(STFT)开发的一种快捷有效的瞬态谱分析方法,能有效地展示散射信号的物理内涵,揭示振动过程中不同时间、不同频率的能量分布。该技术可用于波纹管、锚杆、锚索的声波检测资料分析。

短时 Fourier 分析是一种固定时窗的瞬态谱分析方法,它的数学表达为:

$$STFT(f, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} U(\tau) g(t - \tau) e^{-2\pi f\tau} d\tau \quad (11)$$

其中  $g(t)$  为时窗函数,当窗函数取标准差  $\sigma = 1$  的高斯函数形式时具有最高的时频分辨率:

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} \quad (12)$$

图 2 是用 TD-BWG 时频分析技术处理波纹管检测中透射记录数据的界面。

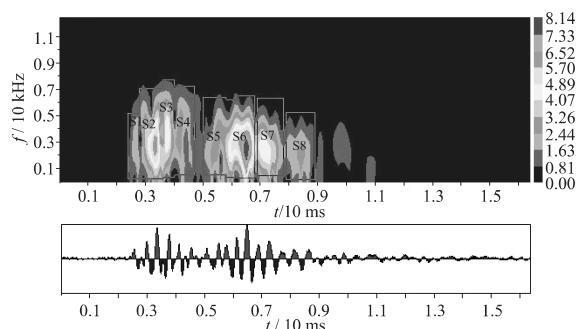


图 2 透射记录及 STFT 时频分析

Fig. 2 Transmitted wave and STFT time-frequency analysis

图 2 中的时频分析界面由上、下两部分组成。下部是透射声波的时程记录,上部是该记录对应的二维时频分析。横坐标为时间,纵坐标为频率,不同颜色表示能量的不同等级,红色能量最强。这里使用的时频分析的主要功能是根据能量的优势分布,对振动过程进行模式分解。时频分析图像表明,该透射记录中包含 8 个主要振动模式,分别标记为 S1 ~ S8,其中 S1 为纵波、S8 为横波,此外还包括 3 个对称模态和 3 个非对称模态的 Lamé 波。可以认为该透射记录就是由这 8 种主要振动模式波组成的。图中模式波的能量主要分布在 1 ~ 7 kHz 频率范围内,走时在 2.4 ~ 8.8 ms 之间。图像中清楚地显示了每种模式波的频谱特征和走时,由此可计算每种模式波的传播速度。能量最强的模式波是 S6,其次是 S2。S3 的主频偏高,S8 的主频偏低。

#### 5 应用与验证实例

应用逆散射检测法及时频分析技术对承秦高速某标段的波纹管灌浆质量进行了检测试验。按逆散射检测方式,波纹管两端锚头分别安装检波器,一端锚头激发,两端同时获得记录,一端为透射记录,一端为逆散射记录,其中包含着激发波。检测使用 TD-BWG 波纹管检测仪器,16 位 A/D 模数转换,双通道,检波器频带 100 ~ 20 kHz,配备 TD-BWG 时频分析系统。该分析系统开发是建立在声波散射理论、梁板振动的 lamé 波频散理论、STFT 时频分析技术和偏移成像技术基础之上的。波纹管检测数据分析流程和主要步骤如下。

1) 首先利用时频分析技术对波纹管透射波进行模式分解,识别出 7 ~ 8 个能量占优的模式波,拾取各模式波的走时,计算相应波速。它们的组合代表了波纹管与梁板振动的主要特征。

2) 利用纵波速度(S1 模式波速)初步评价波纹管注浆质量的优劣:

①清除激发端记录中的激发信号的影响(1 ms 以内记录) 得到逆散射记录数据;

②根据模式分解获得的主要模式波对应的波速 对逆散射数据进行偏移成像;

③根据检测精度的要求 选择不同的能量阈值 , 筛选注浆缺陷的位置、规模。

图3 是试验波纹管的检测数据及分析结果。图3 中间部分是逆散射时程记录 ,上部是其二维时频分析的瞬态谱 ,下部是波纹管注浆缺陷的偏移成像结果。从图3 中可以清楚地看到逆散射波不同时刻、不同频率的能量分布。能量强弱表示缺陷脱空的严重程度 能量强脱空严重 ,饱和度低。散射波频率高低表示缺陷大小 ,低频能量是由体积较大空区引起的。散射波时间与缺陷位置有关。分析结果给出 2 个明显缺陷的位置 ,分别在距敲击端 2.8 ~3.2 m 和 3.9 ~4.4 m 处。为验证检测结果 对检测试件进行了解剖 将波纹管从梁体中取出并剥开外皮观

察混凝土状态 ,发现在 3.0 m 处和 4.2 m 处分别存在两处较大缺陷 ,如图 4 所示 ,与计算结果基本一致。

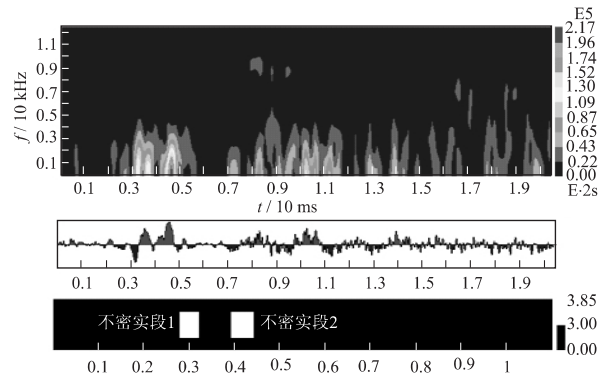
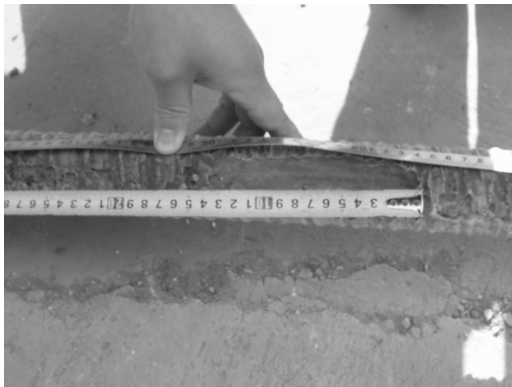


图3 逆散射检测波纹管注浆缺陷的偏移成像

Fig.3 Inverse scattering migration image of NDT of grouting defect in duct



(a) 3.0 m处的顶部存在较大的空区



(b) 4.2 m处存在空洞

图4 实际缺陷

Fig.4 Actual defect

### 6 结论

通过实际的波纹管检测与验证 ,表明时频分析技术与偏移成像技术相结合 ,能为波纹管注浆质量的声波检测技术提供有力的技术支持 ,可靠地确定波纹管注浆质量缺陷的位置。现场操作简单快速 ,图像直观 效果良好 具有推广价值。

目前 ,该方法对于缺陷位置的检测可满足工程需要 ,但对于缺陷的截面饱和度的定量化还需要大量的试验对比研究。

### 参考文献:

[1] 白 杨. 灌浆与张拉力对预应力混凝土梁的性能影响分析 [D]. 大连: 大连海事大学 2009.

[2] 罗 斌,唐树名,等. 锚下预应力反拉检测技术[J]. 公路交通技术 2012(01): 17-19.

[3] 崔玉萍,王晓江. 混凝土桥梁检测与评价[J]. 市政技术 2005, 23(z1): 36-41.

[4] 兰子奇. 混凝土桥梁预应力钢绞线锈蚀漏磁检测方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学 2008.

[5] 徐敬森,艾建强. 青岛海湾大桥 60m 预应力混凝土箱梁整体预制施工质量控制要点[J]. 公路 2009(9): 136-141.

[6] Mary J. Sansalone, William B. Streett. The Impact-Echo Method [J]. NDTnet, 1998 3(2) February.

[7] 邹春江,陈征宙,董 平,等. 冲击回波低频对箱梁预应力孔道注浆饱满度的响应及应用[J]. 公路交通科技 2010, 27(1): 73-77.

[8] 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.

[9] 刘俊起,刘 浩,赵永贵,等. 声波散射法在桥梁波纹管注浆质量检测中的应用[J]. 公路科技 2009(11): 139-140.