

桥梁预应力孔道注浆质量检测

栗海涛, 杨静, 张森

云南省公路科学技术研究院, 昆明 650051

摘要 桥梁预应力孔道结构内部若存在不密实区或空洞等缺陷, 会影响结构的承载能力和耐久性, 因而孔道注浆质量的无损检测成为确保大型结构安全运营的关键措施。首先从理论上探讨了应力波检测预应力桥梁孔道注浆质量的原理和方法, 提出了评价孔道注浆质量的参数, 接着对应力波在预应力桥梁孔道注浆检测中的应用开展模型试验研究, 进而进行现场检测分析, 并与桥梁孔道注浆实际缺陷进行对比。结果表明, 应力波法检测预应力桥梁孔道注浆质量信息全面, 效果好, 检测中所发现的缺陷位置与实际桥梁孔道注浆的缺陷位置有较好的一致性, 且检测受环境干扰小, 方便快捷, 证实了应力波检测预应力桥梁孔道注浆质量的可行性、有效性和无损性。

关键词 应力波; 注浆质量; 无损检测

中图分类号 TU528.07

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.04.007

Detection of Grouting Defects in Prestressed Bridge Duct

SU Haitao, YANG Jing, ZHANG Sen

Institute of Science and Technology of Yunnan Province Highway, Kunming 650051, China

Abstract This paper studies the vibration characteristics of the phononic crystal beam on elastic foundations, based on the Euler beam theory and the Winkler foundation model. The finite element method is used to obtain the band structures of phononic crystal Euler beams. The results reveal the influence of the foundation constraint on the bending vibration band gaps in the phononic crystal Euler beam. The computational results of the band structures of the phononic crystal Euler beam without foundation are compared with those on the elastic foundation. The significantly different band gaps of the model are shown. The influences of different component ratios of the phononic crystal Euler beam model are also studied, as well as the frequency ranges of the vibration band gaps.

Keywords stress wave; grouting quality; non-destructive testing

0 引言

在后张法预应力混凝土结构施工中, 孔道压浆是非常重要的环节, 它关系到预应力钢绞线的使用寿命和效率, 一旦预应力失效, 将导致桥梁垮塌。注浆不饱满时, 会造成混凝土泌水, 且孔道内存在空气, 致使施加预应力后的钢绞线暴露于空气和水的酸性环境中, 相比普通状态, 其腐蚀速度将呈数量级增长。

预应力桥梁孔道注浆看似简单, 实际涉及多方面的问题。为了保证注浆的密实度, 消除空气和泌水对预应力筋的影响, 人们从多方面入手研究解决办法。如采用不同的管道安放方式, 优化注浆原料的配制, 甚至采用真空灌浆技术等。但在实际操作中, 由于真空度难以保证, 致使真空注浆的效

果并不理想; 同时, 真空压浆工艺复杂, 技术上受到较多的制约。鉴于真空注浆技术的现状, 国内预应力桥梁施工中常规压浆方法还会被普遍应用。为了保证压浆效果, 必须从多方面严格控制孔道注浆的质量。

基于声频应力波反射理论^[1]的桥梁孔道注浆无损检测新方法, 具有较强的针对性, 克服了传统测试方法的不足, 为桥梁孔道注浆质量控制开拓了一条新的途径^[2]。

1 注浆质量应力波检测

在注浆完成后的预应力桥梁孔道中, 存在钢绞线、水泥石、空气和水等介质, 要判断孔道注浆密实度, 可通过测试水泥石在预应力孔道中所占的体积分数来实现。

收稿日期: 2012-08-09; 修回日期: 2012-11-30

基金项目: 云南省科技厅科技项目(云交科 2007(A)2-03)

作者简介: 栗海涛, 高级工程师, 研究方向为公路交通工程检测、试验、施工监控等, 电子信箱: 358297262@qq.com

当弹性应力波从一种介质传播到另一种介质中时,在两种介质的分界面上,弹性应力波会造成扰动,同时分界面导致波向两种介质中传播,形成透射波与反射波^[1-3]。如图 1 所示,图中 A, C, ρ 分别代表介质的截面积、固有波速、原始密度;下标 1 和 2 分别代表两种介质;re, tr, in 分别代表反射波、透射波、入射波。

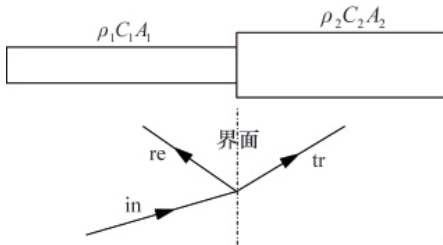


图 1 应力波的反射与透射

Fig. 1 Reflection and transmission of stress wave

由于两种介质在界面处互相接触,由牛顿第三定律和连续条件可知,界面两侧总的应力相等,两侧质点的速度相等^[4],因此有

$$\nu_1 + \nu_R = \nu_T \quad (1)$$

$$A_1(\sigma_1 + \sigma_R) = A_2\sigma_T \quad (2)$$

而在 τ 时刻,加于钢绞线顶端的扰动(初始速度为 ν_0 、应变为 ε_0)在中体中传播速度为 C_0 ,在 t 时刻扰动到达 x 截面传播轨迹的特征线可表示为

$$\nu = -C_0\varepsilon = \nu_0\left(t - \frac{x}{C_0}\right) \quad (3)$$

将式(3)变形,可得

$$\nu - \nu_0 = \mp C_0(\varepsilon - \varepsilon_0) = \mp \frac{\sigma - \sigma_0}{\rho_0 C_0} \quad (4)$$

式(4)表明了应变、应力与速度在弹性波传播中的关系。将式(4)代入式(2),可得

$$\frac{\sigma_1}{\rho_1 C_1} - \frac{\sigma_R}{\rho_1 C_1} = \frac{\sigma_T}{\rho_2 C_2} \quad (5)$$

将式(3)和式(5)联立,可得反射与透射应力波和入射应力波的关系。

$$\sigma_R = \frac{\rho_2 C_2 A_2 - \rho_1 C_1 A_1}{\rho_1 C_1 A_1 + \rho_2 C_2 A_2} \sigma_1 \quad (6)$$

$$\sigma_T = \frac{2\rho_2 C_2 A_2}{\rho_1 C_1 A_1 + \rho_2 C_2 A_2} \sigma_1 \quad (7)$$

由前述可得反射系数 R 及透射系数 T

$$R = \frac{\rho_2 C_2 A_2 - \rho_1 C_1 A_1}{\rho_1 C_1 A_1 + \rho_2 C_2 A_2} \quad (8)$$

$$T = \frac{2\rho_2 C_2 A_2}{\rho_1 C_1 A_1 + \rho_2 C_2 A_2} \quad (9)$$

ρCA 称为广义波阻抗。从式(9)可知,当界面两侧的广义波阻抗相同时,透射系数为 1,而反射系数为 0,即此时没有反射现象,相当于应力波在均匀介质中传播;当应力波由广义波阻抗高的物体传入广义波阻抗低的物体,即 $\rho_2 C_2 A_2 <$

$\rho_1 C_1 A_1$ 时,反射系数小于 0,此时反射波与入射波反相;当应力波由广义波阻抗低的物体传入广义波阻抗高的物体,即 $\rho_2 C_2 A_2 > \rho_1 C_1 A_1$ 时,反射系数大于 0,此时反射波与入射波同相。

在预应力桥梁孔道注浆质量应力波检测中,正是由于应力波在水泥石、空气和水中传播时的广义波阻抗不同,在不同介质界面发生反射、折射,使得入射波和反射波的能量、振幅不同,从而可以对接收信号进行处理,判别桥梁孔道中水泥石所占孔道体积比,得出注浆的密实度^[5,6]。

2 评价注浆质量的参数

(1) 固结波速。

应力波通过钢绞线-水泥石体系时的 P 波波速称为固结波速。通常,固结波速大于注浆体的 P 波波速,而小于钢绞线束体的 P 波波速,即 $\nu_2 < \nu_0 < \nu_1$ 。固结波速和钢绞线束体与锚固剂的黏结强度有关,锚固质量与黏结强度成正相关关系。注浆饱满的孔道,其实测波速接近注浆体波速,而注浆密实度差的孔道接近于钢绞线在空气中的波速(约为 5100m/s)。固结波速在一定程度上反映了钢绞线束体的锚固质量的高低^[7]。

(2) 应力波振幅。

由应力波检测原理可知,当应力波遇到两种介质交界面时,会在交界面上发生应力波的反射和透射。当应力波从声阻抗大的介质传入声阻抗小的介质时,主要发生透射;而当应力波从声阻抗小的介质传入声阻抗大的介质时,主要发生反射。钢绞线-水泥石体系中,若缺陷存在,如有空洞和泌水时,应力波将发生反射。因此,在固端接收到的反射波能量大于在锚固质量较好的钢绞线-水泥石体系,即注浆密实度对钢绞线束体中的应力波最直接的影响在能量的衰减上。由于应力波的能量衰减直接体现为应力波振幅的大小,因此,在发射波能量一定的条件下,通过对信号中应力波振幅的比较可以判断注浆密实的程度。

(3) 基频及频率比。

当钢绞线受激振动时,其振动信号的总能量是按各次谐振频率进行分配的。因此,在信号处理中,当运用频域分析对采样信号进行分析时,基频值是一个非常重要的参数。所谓基频,即信号经傅里叶变换后的初次低谐振频率。在锚固参数相同的情况下,有效锚固长度在全长锚固状态下占的比例越大,基频越高^[8],因此注浆密实度越高。

在对频率进行无量纲化处理后,注浆密实度还可以通过振动信号的各谐振频率之差与基频的比值来评价。注浆密实度越高,其信号的频率比越趋近于 2;而注浆密实度较低的孔道,其频率趋于 1。

3 应力波在桥梁孔道注浆检测中的模型试验

为了验证声频应力波法在桥梁孔道注浆检测中的实际效果,进行了声频应力波法的模型试验。

在试验现场,预制了 3 片 50cm×50cm×400cm 的预应力混

混凝土梁,见图2。混凝土的质量配比为 47:27:17:9(砾石:砂:水泥:水),水泥浆的质量配比为 1:0.5(水泥:水)。预应力孔道沿纵向布置,待试件达到规定龄期后,进行预应力张拉。在进行灌浆工序中,安放不同尺寸的软泡沫对孔道内部的灌浆缺陷进行模拟,如图3所示,孔道中白色区域为模拟缺陷。

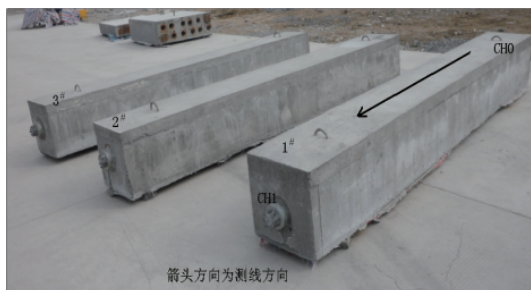


图2 预制试验梁

Fig. 2 Prefabricated test beams

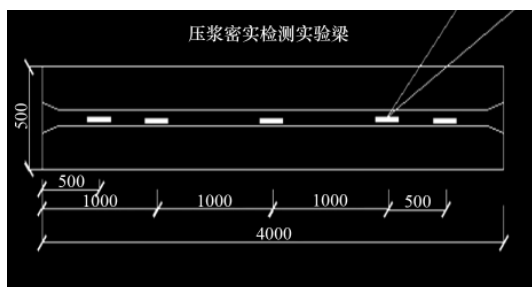


图3 1号梁 25%预埋缺陷示意图(单位:mm)

Fig. 3 Schematic diagram of the defects in No. 1 beam with 25% pre-buried defects (unit: mm)

现场测试时,采用重庆交通科研设计院开发的注浆质量检测仪。经过多次对比研究发现,预应力孔道注浆检测的合适滤波频率低、高通分别为 10Hz 和 2kHz。选用端发端收的激振方式,见图4。

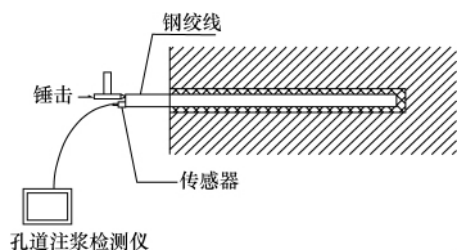


图4 孔道注浆检测示意图

Fig. 4 Schematic diagram of channel grouting detection

震源激发的入射信号从预应力孔道钢绞线的端部发出。在预应力孔道中,弹性波在不同物质中发生反射和透射,见图5。接收到的输出信号经过时频域处理,可以据此分析判断预应力孔道中的注浆质量。图6为不同缺陷中应力波的传播路径。

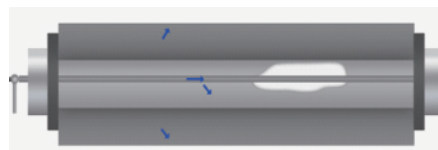


图5 应力波在预应力孔道介质中的传播示意图

Fig. 5 Schematic diagram of propagation of stress wave in prestressed ducts

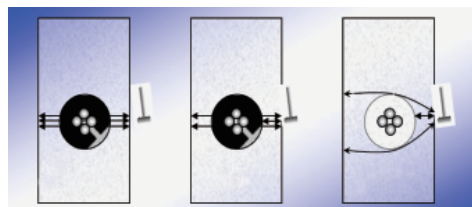


图6 应力波在不同缺陷的孔道中传播路径示意图

Fig. 6 Schematic diagram of propagation path of stress wave in channels of different defects

预应力钢绞线端部激振产生的能量沿着钢绞线向前传递时,会向周围介质(如混凝土)中逸散。一般情况下,注浆密实度越高,其与周边介质的接触面积就越大,从而能量的逸散(即衰减)也就越大,见图7。因此,与锚固工程注浆检测一样,可以利用激发信号与反射信号的振幅比,结合波速法和对信号的时频域分析理论来判断桥梁孔道注浆的密实度。

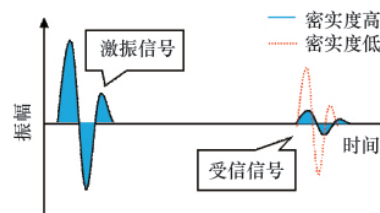


图7 注浆密实度高低的振幅对照示意图

Fig. 7 Schematic diagram of amplitude comparison diagram of grouting compactness

通过对不同注浆密实度试验梁的应力波信号进行分析,得表1和表2。可见,预设密实度为 25% 的 1# 梁的 FFT 卓越周期为 0.087ms,振幅比为 0.034425;预设密实度为 50% 的 2# 梁的 FFT 卓越周期为 0.1ms,振幅比为 0.037016;预设密实度

表1 不同注浆密实度的应力波信号的衰减指数

Table 1 Attenuation index of stress wave signal in different grouting compactness

试验梁编号	预设密实度/%	FFT 卓越周期/ms	持续时间/ms	衰减指数
1#	25	0.087	1.586	10.679
2#	50	0.1	1.837	5.277
3#	75	0.082	1.86	8.801

表 2 不同注浆密实度的应力波振幅比

Table 2 Amplitude ratio of stress wave with different grouting compactness

试验梁编号	1#	2#	3#
预设密实度	0.25	0.5	0.75
振幅比	0.034425	0.037016	0.025339
密实指数	0.106236	0.114157	0.077791

为 75% 的 3# 梁的 FFT 卓越周期为 0.082ms, 振幅比为 0.025339。由上述可知, 随着注浆密实度的提高, 采样信号的 FFT 周期减小, 振幅比也减小。同时, 应力波经小波变换后, 从频谱等值线图(图 8)可看出, 注浆密实时, 信号经过孔道在底端的反射时间较短, 而注浆不密实时, 信号经孔道壁绕射在底端的反射时间较长, 与理论推测相符。

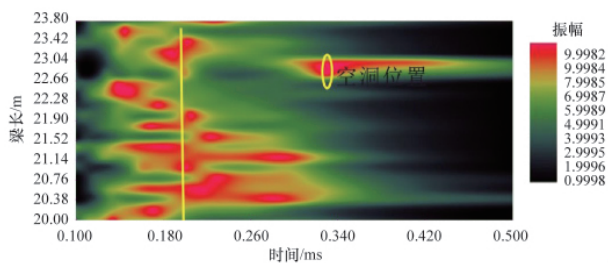


图 8 典型应力波频谱等值线图

Fig. 8 Contour map of the spectrum of typical stress wave

对应力波信号处理后, 从测试结果的示意图(图 9)可看出, 声频应力波检测的缺陷位置与试验梁设置的缺陷位置有较好的一致性。试验表明, 采用声频应力波法对预应力桥梁孔道注浆质量的检测效果好, 同时, 检测受环境干扰的影响较小, 而且能提供较为全面的注浆质量状况信息。采用该方法可以方便快捷地判断桥梁孔道注浆的密实度, 确保桥梁工程的施工质量, 相比传统的检测方法具有明显的优势。

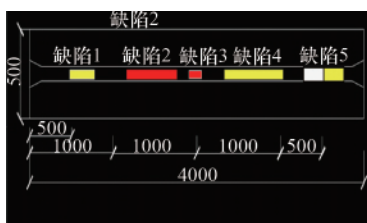


图 9 试验梁注浆检测结果示意图(单位:mm)

Fig. 9 Results of the grouting detection of test beam (unit: mm)

4 后张法预应力桥梁孔道注浆检测应用

在云南的多条高速公路建设中, 开展了预应力 T(箱)梁孔道注浆质量检测工作。一方面, 通过施工过程中的质量控制, 确保工程的施工质量; 另一方面, 对桥梁施工的安全稳定性和结构耐久性进行评价。下面通过应力波法对一片预应力

T 梁的检测, 了解预制梁的孔道注浆效果。

(1) 孔道注浆无损检测仪的现场检测。

现场检测梁为一跨径 35m、两端连续的预应力 T 梁, 梁高 2.4m, 顶板宽度 1.98m, 混凝土设计强度为 C50。T 梁预留孔道采用塑料波纹管, 张拉施工完毕后注入 M30 水泥浆, 注浆体龄期为 10d。

弹性波沿着孔道的方向传播, 并在孔道内的不同介质界面上发生反射和透射。弹性波到达孔道底端时, 在混凝土和空气界面发生反射, 传感器将接收到的反射回波储存于仪器中。结合波形特征、频率特征、能量特征, 对注浆饱和度进行分析。通过对波速、频率、振幅、波形及其相位等一系列指标分析处理, 综合判定预应力混凝土孔道灌浆的质量、灌浆的显著缺陷位置和缺陷程度。

(2) 检测数据分析。

图 10 为注浆饱满度较好的孔道的原始波形曲线图和时频分析。通过对原始波形进行时频分析可知, 在该孔道钢绞线中, 能量衰加快, 频带集中, 无底端反射波, 未见明显缺陷。综合分析可知, 波形规则的预应力孔道注浆饱满度为 95%, 判定该孔道注浆质量为优。

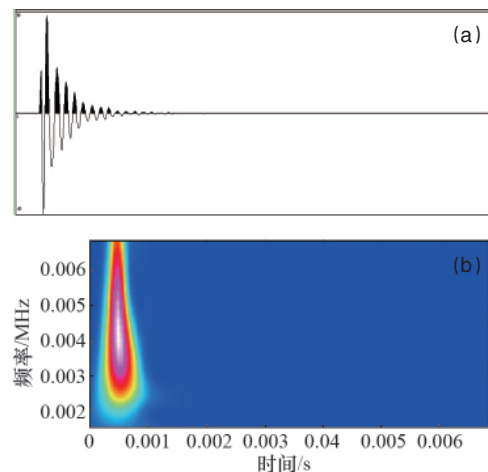


图 10 注浆饱满度较好的孔道原始波形曲线图(a)和时频分析图(b)

Fig. 10 Original waveform graph (a) and time-frequency analysis chart (b) of grouting channel with better plumpness

图 11 为注浆饱满度合格的孔道的原始波形曲线图和时频分析图。通过对原始波形进行时频分析可知, 在该孔道钢绞线中, 能量衰减较慢, 频带较宽, 子波迭加强, 可见底端反射, 局部存在轻微不密实现象。综合分析可知, 波形规则的预应力孔道注浆饱满度为 76%, 判定该孔道注浆质量为合格。

图 12 为注浆饱满度较差的孔道的原始波形曲线图和时频分析图。通过对原始波形进行时频分析可知, 在该孔道钢绞线中, 能量衰减缓慢, 频带分布范围大, 子波迭加强, 有多处能量较强的反射, 多处存在不密实或空浆现象。综合分析可知, 波形规则的预应力孔道注浆饱满度为 69%, 判定该孔道注浆质量为不合格。

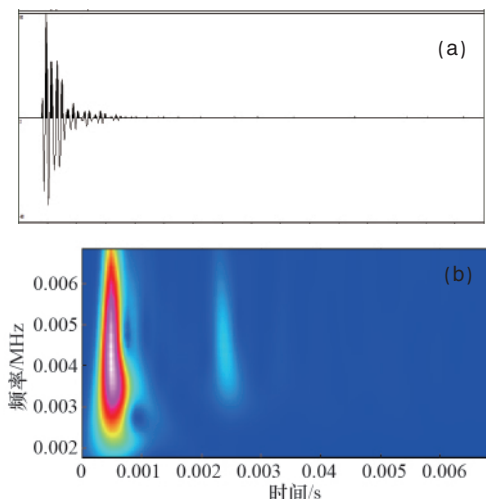


图 11 注浆饱满度合格的孔道原始波形曲线图(a)和时频分析图(b)

Fig. 11 Original waveform graph (a) and time-frequency analysis chart (b) of grouting channel with qualified plumpness

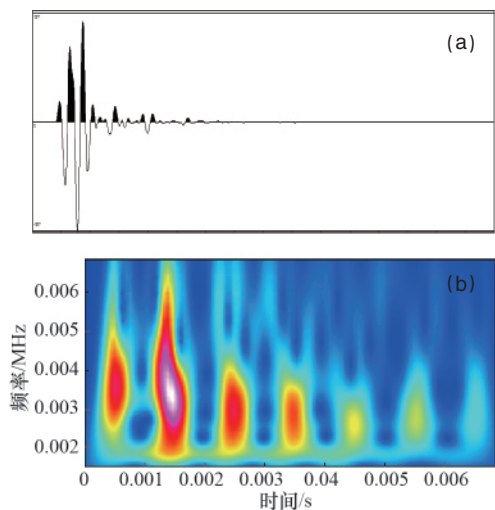


图 12 注浆饱满度较差的孔道原始波形曲线图(a)和时频分析图(b)

Fig. 12 Original waveform graph (a) and time-frequency analysis chart (b) of grouting channel with poor plumpness

为了验证实际情况,按照检测结果定位的缺陷位置,现场将此 T 梁表面混凝土破损,见图 13。从图中可以看出,该孔



图 13 现场破损开的注浆不密实孔道图
Fig. 13 On-site broken and non-dense grouting channel

道注浆严重不密实,将严重影响成桥后结构的安全稳定性。检测结果与实际情况相符。

5 结论

本文探讨了应力波法用于预应力桥梁孔道压浆质量无损检测,并对测试结果进行了验证。

(1) 该方法克服了传统缺陷检测中识别缺陷工序繁琐,结构安全受影响,受人为因素影响等弊端,能实现对孔道压浆质量进行无损检测。与基于电磁波和超声波的方法相比,应力波法在检测便捷性、可靠性等方面都表现出优势。

(2) 预应力孔道内部缺陷有空洞、夹杂、离析、疏松等多种类型,目前,无损检测可以运用于注浆质量的检测,但是,针对注浆缺陷类型的判断还需要进一步的实践与研究。

参考文献 (References)

- [1] 郭伟国, 李玉龙, 索涛. 应力波简明基础教程[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007.
Guo Weigu, Li Yulong, Suo Tao. A concise course of stress wave[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007.
- [2] 李维树, 甘国权, 朱容国, 等. 工程锚杆注浆质量无损检测技术研究与应用[J]. 岩土力学, 2003, 24(S1): 189-194.
Li Weishu, Gan Guoquan, Zhu Rongguo, et al. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(S1): 189-194.
- [3] 罗斌, 唐树名, 唐忠林, 等. 边坡锚索无损检测技术及应用 [J]. 公路交通技术, 2009(6): 45-47.
Luo Bin, Tang Shuming, Tang Zhonglin, et al. Technology of Highway and Transport, 2009(6): 45-47.
- [4] 陈建功, 张永兴. 完整锚杆纵向振动问题的求解与分析 [J]. 地下空间, 2003, 23(9): 268-271.
Chen Jianguo, Zhang Yongxing. Underground Space, 2003, 23(9): 268-271.
- [5] 冯大斌, 董建伟, 孟履祥. 后张预应力孔道灌浆现状 [J]. 施工技术, 2006, 35(2): 49-51.
Feng Dabin, Dong Jianwei, Meng Luxiang. Construction Technology, 2006, 35(2): 49-51.
- [6] 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 Jiaye, Yang Chao, Ji Wenhong, et al. Journal of Sichuan University of Science & Engineering: Natural Science Edition, 2010, 23(5): 500-503.
- [7] 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 Tianchun, Yi Weijian, Lu Guangyin, et al. Journal of Vibration Engineering, 2006, 19(3): 411-415.
- [8] 李传平, 刘耀武, 张保和. 公路桥梁 140 米长预应力孔道压浆质量控制[J]. 施工技术, 2005, 34(7): 59-60.
Li Chuanping, Liu Yaowu, Zhang Baohe. Construction Technology, 2005, 34(7): 59-60.

(责任编辑 安莹, 吴晓丽)