

doi: 10.11720/wtyht.2019.1098  
渠广镇,周广利,张科超,等.基于冲击回波法的预应力管道压浆密实性检测[J].物探与化探,2019,43(4):919-924.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1098  
Qu G Z,Zhou G L,Zhang K C,et al.The detection of grouting compactness of pre-stressed ducts based on the impact-echo method[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2019,43(4):919-924.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1098

# 基于冲击回波法的预应力管道压浆密实性检测

渠广镇<sup>1,2</sup>,周广利<sup>2</sup>,张科超<sup>3</sup>,王彦伟<sup>2</sup>

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064;2. 山东省交通科学研究院,山东 济南 250014;3. 交通运输部 公路科学研究院,北京 100088)

**摘 要:** 首先阐述冲击回波检测方法的原理,然后通过制作试验模型构件模拟了预应力管道由空到密实的四种工况,采用冲击回波法对管道预应力注浆质量进行检测,得出如下结论:随着灌浆密实的增加,板底反射时刻和板名义厚度逐渐减小;从腹板半空方向测试,反射时刻和板名义厚度最大,管道密实的底部反射时刻和无管道处的反射时刻基本相当。最后提出预应力管道压浆中易于出现不密实的部位。通过工程实例验证了该方法的可靠性,在预应力管道损伤检测中具有一定的实用价值。

**关键词:** 预应力管道;冲击回波法;灌浆密实度

**中图分类号:** P631.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2019)04-0919-06

## 0 引言

预应力混凝土结构是在结构构件受外力荷载作用前,先人为地通过在内部穿入钢绞线再张拉对其施加压力的结构,其在桥梁结构中广泛应用。但预应力管道压浆质量得不到有效的保证,有时会出现管道内无水泥浆或仅有部分水泥浆等问题,据此可以把缺陷类型分为空洞型缺陷和疏松型缺陷。当管道内灌浆严重不足时,不仅会影响钢绞线的耐久性,而且对结构的整体性等多个方面都会产生不利影响。国内外曾出现因钢绞线腐蚀而引起桥梁结构失效或垮塌<sup>[1]</sup>,如欧洲的 Ynys-y-Gwas 大桥,国内沪宁高速在加宽整修中发现多座连续梁桥中预应力管道注浆部饱满,钢绞线锈蚀较重。因此,准确的判断管道注浆密实度成了研究重点问题。

目前,可用的无损检测方法有超声波法、射线检测法、探地雷达法、冲击回波法等等。超声波方法测试时其频率高,衰减快,受钢筋的影响大,同时塑料波纹管对超声波的反射较大,不利于内部缺陷的检测<sup>[2-3]</sup>;射线检测法检测费用高,对人体辐射作用

大<sup>[4]</sup>;探地雷达方法金属管道对其有屏蔽作用<sup>[5]</sup>;冲击回波法仅需要单一测试面,反射信号明显,是混凝土波纹管灌浆质量检测中较为有效的一种方法<sup>[6-8]</sup>。

文中通过在模型试件中模拟测试时不同激振方向,研究冲击回波方法对不同灌浆状况下响应特征,为科学评价管道灌浆质量提供基础数据。

### 1 冲击回波原理及测试仪器

#### 1.1 测试原理

冲击回波方法是一种基于机械应力波在固体介质中传播原理的一种无损检测方法。它利用瞬时机机械冲击(用一个小钢球或小锤轻敲混凝土表面)产生的低频应力波来对结构内部进行探测。应力波在构件表面、内部缺陷表面或构件表面底部边界之间来回反射产生瞬态共振,其共振频率能在振幅谱中辨别出,用于确定内部缺陷<sup>[9-10]</sup>。

波在固体内的传播方式有两种:P 波(纵波)和 S 波(横波)。这些波遇到声阻抗有差异的介质界面就会发生透射、反射或折射,不同界面之间的来回反

射就会产生瞬态共振,再由放置在冲击点附近的传感器接收共振引起的信号。冲击回波信号经过采集设备的 A/D(模/数)转换后并被采集、存储下来,A/D 的采样频率根据测试的厚度、精度来确定,采样频率范围多采用 100~500 kHz。计算机对所采集的信号进行滤波平滑、快速傅里叶变换(FFT)等处理,将采集到的时域信号转化为频域信号,用于确定内部缺陷的深度和构件的厚度。冲击回波法示意图见图 1 所示。

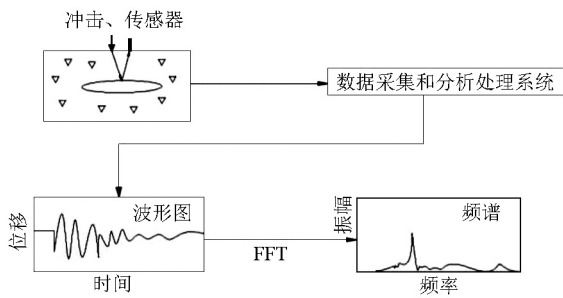


图 1 冲击回波法示意

Fig.1 Schematic of impact echo method

在混凝土板中,从无预应力管道、灌满浆管道及未灌满浆管道采集冲击回波信号,得出 3 种不同的响应特征,分别见图 2a、图 2b、图 2c 所示。

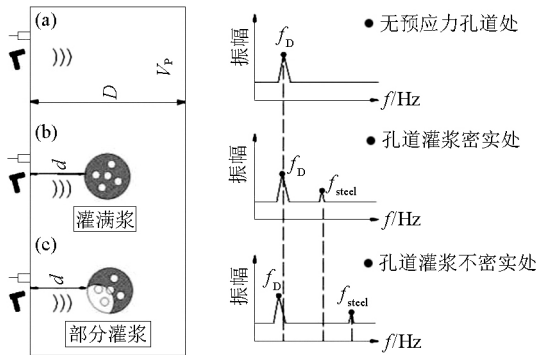


图 2 3 种预应力管道冲击回波响应

Fig.2 Impact echo response of three kinds of prestressed pipelines

通过对比分析以上冲击回波信号,可得如下结论<sup>[11-15]</sup>:

1) 无预应力管道部分。在无预应力管道的混凝土板中,应力波直接传播至板底后反射回测试面,由接收器接收响应信号,应力波所经过的路程为 2 倍板厚,经频域分析可获得有一明显峰值  $f_D$  的频谱,对应的冲击回波响应如图 2a 所示,共振频率  $f_D$  是与 P 波波速  $V_p$  和板厚  $D$  相关的量:

$$f_D = a_s V_p / (2D), \tag{1}$$

式中: $a_s$  是截面形状系数,板的截面形状系数取

0.96。

2) 管道灌浆填充密实。不同界面存在不同的纵波反射形式,当第 2 种材料的波阻抗高于纵波入射材料,则应力在界面处不改变方向。因此,当反射波返回冲击点时,接收器接收不到相应信号,直到波在冲击点附近(混凝土/空气界面)发生改变,变成拉力波,即到第二次反射信号被接收,如图 2b 所示。此时,密实管道的埋深计算公式为:

$$f_{steel} = a_s V_p / (4d). \tag{2}$$

3) 管道灌浆填充不密实。在管道灌浆不密实的情况下,应力波需绕过气孔传播,其比实心板的厚度频率略有偏移,此时灌浆管道相当于多相(多孔)介质,冲击波在此介质中传播会产生高频吸收衰减或损失,波传播路径加长,故反射频率降低。

根据混凝土—钢材界面反射作用的位移频率与混凝土—空气界面反射作用的位移频率之间的差别,可以鉴别预应力管道内的灌浆缺陷。对于具有给定保护层厚度的管道,在灌浆后存在气孔的不密实管道内预应力筋的反射频率为灌浆完满密实的相同管道的 2 倍,如图 2c 所示。

$$f_{P,G} = a_s V_p / (2d). \tag{3}$$

1.2 测试仪器

本次冲击回波法采用四川升拓 SPC-MATS 型预应力混凝土梁多功能检测仪,见图 3 所示。检测系统包括采集及处理仪、放大器、传感器、激振设备和专用附件等。配有直径分别为 10、17、30 mm 的钢球激振锤,可产生不同宽度的应力脉冲。冲击持续时间  $t_c$ (激振锤与混凝土表面的接触时间)决定了所产生的应力脉冲的频率成分,进而影响振幅谱中振幅峰值的大小,从而影响主频率的确定,要想获得高质量数据就应选择合适的冲击持续时间。对于直径为  $D$ (单位:m) 的钢珠冲击混凝土表面产生的冲击持续时间为<sup>[16-17]</sup>:

$$T_s = 0.0043D. \tag{4}$$

产生的最大频率为:

$$f_s = 1.25 / T_s = 291 / D. \tag{5}$$



图 3 预应力混凝土梁多功能检测仪

Fig.3 Multifunctional detector for prestressed concrete beams

表 1 给出了不同厚度的结构应优先选择的激振锤直径。

表 1 激振锤直径选择

Table 1 Shock hammer diameter selection			
构件厚度 $b$	$b \leq 20\text{ cm}$	$20\text{ cm} < b \leq 40\text{ cm}$	$40\text{ cm} < b \leq 60\text{ cm}$
首选激振锤直径 $D_{xx}$	D10	D17	D17
备选激振锤直径 $D_{xx}$	D17	D10	D30

注:  $D_{xx}$  中 D 为激振锤名称代号, xx 为激振锤直径, 单位 mm。

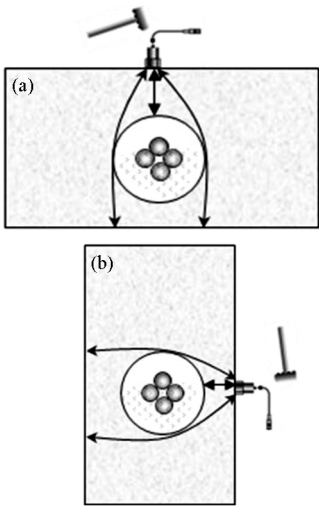
2 试验研究

2.1 试验模型简介

试验模型尺寸为:长×宽×高 = 100 cm×90 cm×20 cm 的混凝土立方体,在立方体中轴线截面内置直径 5.5 cm 铁皮管(图 4),图中阴影部分为浇筑混凝土。试件采用 C25 的混凝土浇筑,浇筑时及时振捣混凝土,在成型后 28 d 用冲击回波扫描仪对试件进行检测。对于管道内缺陷测试方向,理论上存在如图 5 所示的顶板方向激振和腹板方向激振,因此在试验模型中模拟 4 种工况:①密实;②顶板半空;③全空;④腹板半空。

2.2 试验结果

利用冲击回波法检测预应力管道的压浆状况一般根据信号的峰值频谱分布来确定。频谱分析中传统的 FFT 转换方法可能产生畸变,本文使用 MEM 分析法<sup>[18]</sup>,即最大熵法(maximum entropy method),MEM 分析的含义就是,在不增加熵的条件下推定信



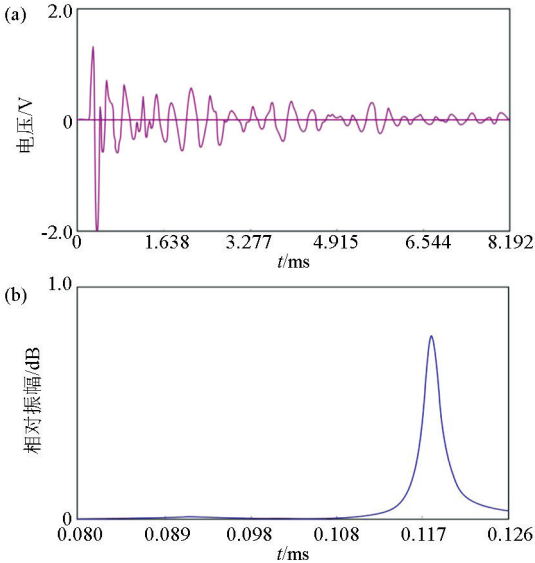
a—顶板方向激振;b—腹板方向激振  
a—roof direction excitation;b—web direction excitation

图 5 激振方向

Fig.5 Excitation direction

号的自相关系数,从而推算其频谱的方法。MEM 在 1967 年由 John Parker Burg 提出,最早用于地震波的解析。此方法与 FFT 相比,具有频谱分辨率高、适用于短数列等特点。

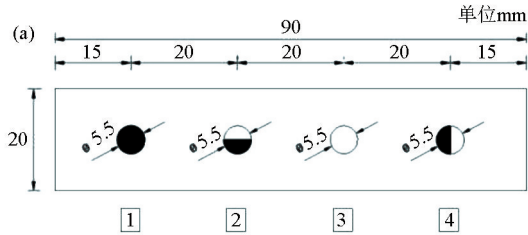
图 6a 为无管道处测点的时域曲线,图 6b 为该点的 MEM 卓越周期。根据图 6 中的频谱图,由于构件的设计厚度为 20 cm,本次测试自振反射时刻 0.118 ms,自振频率 8 475 Hz,根据式(1)可得应力波的传播速度  $V_p = 3\,531\text{ m/s}$ 。



a—测点时域曲线;b—测点 MEM 卓越周期  
a—time domain curve of measuring point;b—measuring point MEM predominance period

图 6 试件无管道处时域及卓越周期

Fig.6 Time domain and predominance period of pipeless specimens



a—模型尺寸;b—模型实体  
a—the model size;b—model entity

图 4 试验模型

Fig.4 The test model



同时对试验模型中的 4 种管道注浆状况测试,现列出工况 2 即图 5a 顶板方向激振时域及卓越周期如图 7 所示。图中对应两个自振反射时刻, $t_1=0.096\text{ ms}$ , $t_2=0.121\text{ ms}$ ,波纹管为钢制材料,其波阻抗大于混凝土波阻抗,因此对应  $t_1$  时刻厚度计算用式(2),可以得到管道埋深  $d=8.5\text{ cm}$ ,应用式(3)得到板名义厚度  $D=21.4\text{ cm}$ 。其他缺陷类型的计算结果汇总见表 2。

从测试结果来看,管道密实的底部反射时刻和无管道处的反射时刻基本一致;密实程度由空到密实的工况随灌浆密实反射时刻和板名义厚度逐渐减小,全空管道和密实管道名义板厚差率为 6.4%。

从腹板半空方向测试,反射时刻和板名义厚度最大,和密实管道名义板厚差率为 15.2%。在一般的预制小箱梁腹板管道测试中,一般为图 4 所示的侧方向激振,即表 2 中的工况 4 腹板半空情况,测试效果较为理想。

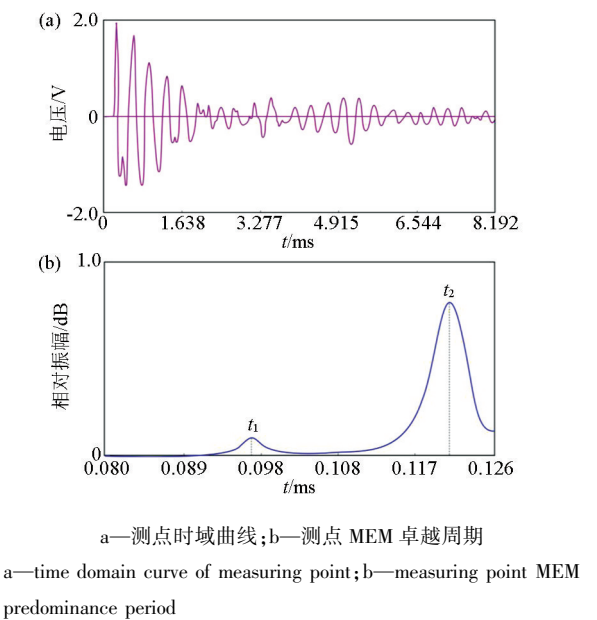


图 7 试件顶板方向激振时域及卓越周期  
Fig.7 Time domain and predominant period of specimen roof directional excitation

表 2 各缺陷类型结果汇总  
Table 2 Summary results for each defect type

工况类型		顶部反射时刻 $t_1/\text{ms}$	底部反射时刻 $t_2/\text{ms}$	$d/\text{cm}$	$D/\text{cm}$	$D$ 中和密实 管道差率
1	密实	0.094	0.116	8.3	20.4	/
2	顶板半空	0.096	0.121	8.5	21.4	4.9%
3	全空	0.100	0.123	8.8	21.7	6.4%
4	腹板半空	0.104	0.125	9.7	23.5	15.2%

3 工程实例

在工程实践中,用冲击回波法结合钻孔验证对预应力管道饱满度进行检测。选择某梁场的 30 m 预制小箱梁腹板束进行测试,所测腹板处设计厚度 20 cm,采用 C50 混凝土,预应力管道采用直径 5.5 cm 的铁皮波纹管。

首先根据设计图纸,对腹板预应力管道进行定位,管道编号从上向下依次为 N1、N2、N3、N4。沿梁走向从距梁端 1 m 位置处(避开锚固端)开始竖向布置测线,自上而下敲击测试,各测点间隔 5 cm,在管道位置处适当加密,测线纵向间隔 50 cm,如图 8 所示。测试完毕后,对数据处理,发现距梁端 5 m 处的一条竖向测线中 N2 管道底部反射时刻和无管道处差率 12.6%,初步判定此处不密实。而后对该处进行钻孔检验,见图 9,发现该位置注浆不密实,这与判定结论相符。

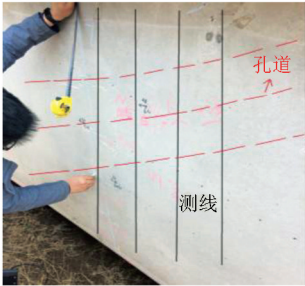


图 8 测线布置示意  
Fig.8 Schematic of survey line layout



图 9 管道灌浆不密实钻孔验证  
Fig.9 Verification of uncompacted pipeline grouting

4 结论

本研究基于冲击回波方法原理,根据应力波在管道不同灌浆状况下反射特性,可以判断管道内部是否有缺陷存在。同时根据检测经验和模型试验发现,对于后张法预应力梁的腹板管道,在管道的起弯点和出浆口及反弯点顶部易出现灌浆不密实现象,对上述检测部位重点关注。另外应该看到,冲击回波方法测试数据的提取与分析受管道定位、检测人员经验的影响较大,因此建议在今后研究中,建立基于大数据的信号智能化分析系统,避免了人工读取的主观偏差,提高检测的准确性。

参考文献 (References):

[1] 邹春江,陈征宇,董平,等.冲击回波主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):72-77.  
Zou C J, Chen Z Y, Dong P, et al. Impact-echo characteristic frequencies response to grouting fullness in ducts of prestressed box beam and application[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(1): 72-77.

[2] 朱自强,密士文,鲁光银,等.金属预应力管道注浆质量超声检测数值模拟研究[J].中南大学学报:自然科学版,2012,43(12):4888-4894.  
Zhu Z Q, Mi S W, Lu G Y, et al. Numerical simulation of detecting grouting quality of pre-stressed metallic tendon ducts through ultrasonic[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(12): 4888-4894.

[3] 朱自强,喻波,密士文,等.预应力管道压浆质量的超声波相控阵检测方法[J].中南大学学报:自然科学版,2014,45(10):3521-3530.  
Zhu Z Q, Yu B, Mi S W, et al. Detection of grouting quality in post-tensioned tendon duct by phased array ultrasonic[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(10): 3521-3530.

[4] 曹慧珏,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 H J, Sun W, Gong Y L, 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.

[5] 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 J Y, Yang C, Ji W H, 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.

[6] Sansalone M, Carino N J. Impact-echo method[M]. USA: Concrete

International, 1988: 38-46.

[7] 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.  
Wang Z F, Zhou X Y, Yan B F, et al. Grout quality testing in prestressed ducts with impact-echo method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(1): 166-169.

[8] 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 H W, Tang W Y, Liu D C, 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.

[9] 姚华.扫描式冲击回波法检测后张预应力孔道内缺陷的模型试验研究[D].重庆:重庆交通大学,2008.  
Yao H. Model test study on defect detection in post-tensioned prestressed channel by scanning impact-echo method[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2008.

[10] 尹洪正.预应力混凝土梁灌浆密实度无损检测的研究[D].南京:东南大学,2015.  
Yin H Z. Non-destructive testing of grouting density of prestressed concrete beams[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.

[11] 周先雁,栾健,王智丰.桥梁箱梁孔道灌浆质量检测中冲击回波法的应用[J].中南林业科技大学学报,2010,30(10):78-82.  
Zhou X Y, Luan J, Wang Z F. Inspecting grouting quality of prestressed duct of bridge box girder by impact-echo method[J]. Journal of Central South University of Forestry Science and Technology, 2010, 30(10): 78-82.

[12] Abraham O, Cote P. Impact-echo thickness frequency profiles for detection of voids in tendon ducts[J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(3).

[13] 陈卫华.基于冲击回波法的箱梁预应力管道压浆典型缺陷检测[J].清远职业技术学院学报,2017,10(4):46-51.  
Chen W H. Detecting grouting quality of tendon ducts of prestressed box girder using impact-echo method[J]. Journal of Qingyuan Polytechnic, 2017, 10(4): 46-51.

[14] 王伟,水中和,王桂明,等.冲击回波法检测波纹管灌浆质量的研究及工程实践[J].混凝土,2010,247(5):134-137.  
Wang W, Shui Z H, Wang G M, et al. Quality detects of bellows grouting by means of impact echo method and application[J]. Concrete, 2010, 247(5): 134-137.

[15] 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,2004,33(6):703-707.  
Ning J G, Huang X, Qu H, et al. Nondestructive testing of concrete structures using impact-echo method[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(6): 703-707.

[16] 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 X Y, Wang Z F, Yan B F. Nondestructive testing method of grouting quality for prestressed pipe[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(6): 64-71.

[17] 吴新旋.混凝土无损检测技术手册[M].北京:人民交通出版社,2003.

Wu X X.Technical manual for nondestructive testing of concrete [ M].Beijing:People's Communications Press,2003.

[ 18] 马国峰.基于冲击回波等效波速法的管道压浆密实度无损检测技术研究[J].铁道建筑,2017,(2):26-29.

Ma G F.Research on non-destruction technology method based on impact echo equivalent velocity used for inspecting pipe grouting compactness [ J].Railway Engineering,2017,(2):26-29.

The detection of grouting compactness of pre-stressed ducts based on the impact-echo method

QU Guang-Zhen<sup>1,2</sup>,ZHOU Guang-Li<sup>2</sup>,ZHANG Ke-Chao<sup>3</sup>,WANG Yan-Wei<sup>2</sup>

(1.School of Highway,Chang'an University,Xi'an 710064,China;2.Shandong Transportation Institute,Jinan 250014,China;3.Research Institute of Highway Ministry of Transport,Beijing 100088,China)

**Abstract:** A detailed description of impact-echo method was given firstly,then four different situations of grouting quality were modified from empty to dense through making test model.After that,the impact-echo method was adopted to detect the grouting quality of tendon ducts.The study was summarized as follows;If the reflection time of slab bottom and nominal thickness of slab increased,the degree of density would increase;the reflection time and nominal thickness of slab was the biggest when testing was from half-hole of web.At the same time,the reflection time of compacted and uncompact tendon ducts was basically the same.In the end,the uncompact parts of the prestressed pipe grouting were put forward.The method was verified by the engineering project and was proved to be of reference value.

**Key words:** pre-stressed duct;impact-echo method;grouting compactness

( 本文编辑:叶佩)