

基于冲击回波法的预应力孔道压浆缺陷探究

杨雅勋,柴文浩,于海波,汪世龙

(长安大学公路学院,陕西 西安 710064)

摘要 目的 针对后张法预应力混凝土构件中孔道压浆缺陷问题,研究管道材质、缺陷大小、缺陷临界面位置及预应力钢筋位置等主要因素对冲击回波法检测混凝土孔道压浆缺陷结果的影响规律. 方法 以单层布置的预应力管为研究对象,采用 ABAQUS 有限元软件对影响因素进行数值模拟计算,并与现场试验进行对比验证. 结果 结果表明:管道材料对测试结果有影响,金属波纹管比 PVC 管测试结果误差更小;缺陷大小对频率信号有影响,随着缺陷尺寸的增大,频率信号向低漂移;缺陷临界面位置对测试结果有一定影响,腹板工况下测试难度较大;预应力钢筋对测试结果无影响. 结论 缺陷大小、缺陷临界面位置对测试结果有一定影响,预应力钢筋对结果无影响. 所得结果对压浆孔道检测缺陷提供了一定的技术指导,并为该方向的进一步研究提供相关的理论支持.

关键词 压浆缺陷;冲击回波法;有限元模拟;现场试验;频率信号

中图分类号 TU37;U44 文献标志码 A

Research on Grouting Defects of Prestressed Tunnel Based on Impact-echo Method

YANG Yaxun, CHAI Wenhao, YU Haibo, WANG Shilong

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an, China, 710064)

Abstract: Aiming at the problem of tunnel grouting defect in post tensioned prestressed concrete members, the influence of the main factors such as the pipe material, defect size, the position of the defect critical surface position and the position of the prestressed steel bar on the results of the impact-echo method for detecting the concrete tunnel grouting defects is studied. This paper takes the single layer prestressed pipe as the research object. ABAQUS finite element software is used for numerical simulation calculation of the influencing factors, which is verified by comparison with the field test. The results show that the material of the pipe has influence on test results. The test error of metal pipe is less than that of PVC pipe. The defect size has influence on the frequency signal, with the increase of defect size, the frequency signal drifts to low frequency. The

收稿日期:2019-10-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51878059);国家重点研发计划项目(2018YFB1600300)

作者简介:杨雅勋(1979—),男,副教授,博士,主要从事桥梁检测与安全评估方面研究.

location of the critical section of the defect has some influence on the test results, it is difficult to test under the working condition of the web plate. The prestressed steel has no influence on the test results. The defect size and the location of the defect interface have some influence on the test results, while the prestressed steel has no influence on the test results. The results in this paper provides some technical guidance for the detection of defects in grouting tunnels, and provides relevant theoretical support for further research in this field.

Key words: grouting defect; impact-echo method; finite element simulation; field test; frequency signal

随着后张法预应力混凝土桥梁的大量建设,孔道压浆密实度问题已然成为影响该类桥梁使用性能的一大难题。由于孔道压浆不密实导致预应力钢筋遭到腐蚀,进而造成的桥梁结构垮塌事件在过去的几十年内经常发生,如:20世纪90年代英国的 Ynys-y-Gwas 桥和比利时的 Malle 大桥倒塌事件以及2004年的辽宁某大桥倒塌等事故^[1-3]。针对这一问题,需要对后张法预应力孔道压浆密实度进行检测,目前常用的方法有冲击回波法(IE)、回弹法、超声波法(UP)、地质雷达法(GRP)、声波散射法、内窥镜法以及红外热像法等^[4-5]。

与其他检测方法相比,冲击回波法(IE)由于测试过程简单、便捷而被广泛应用实际工程中,并且被誉为最有前途的现场检测方法之一。该方法最早是在20世纪80年代由美国康奈尔大学率先提出,并用于检测预应力管道内缺陷^[6]。M. Hill 等^[7]利用冲击回波法检测开展了预应力管道灌浆质量的实验研究,发现该法可以有效识别出方形梁管道灌浆缺陷的信号。肖国强^[8]、谭献良^[9]、杨海林^[10]等利用冲击回波法检测混凝土构件的厚度以及预应力管道压浆质量,发现该方法可行。部分学者^[11-13]对冲击回波法检测的频率信号进行了相关处理,提高了检测结果的精确度。邹春江^[14]、A. R. Norinan^[15]、F. YAO^[16]、G. Z. QU 等^[17]探究了板厚度、影响范围、混凝土的声阻抗以及灌浆密度对冲击回波法测试结果的影响。

基于此,笔者采用 ABAQUS 有限元软件

对影响冲击回波法检测结果的管道材质、缺陷大小、缺陷临界面位置和预应力钢筋等因素进行数值模拟计算,并通过现场试验进行了对比验证,研究这些因素对测试结果频率信号的影响,得出了这些因素的影响规律。

1 冲击回波法

冲击回波法是采用低频冲击应力波来检测混凝土结构中缺陷的一种方法。在实际检测过程中,通常采用一个小钢球轻敲混凝土表面,此时会在混凝土表面产生应力波,该应力波(主要为P波)向结构内部传播,遇到不同的介质界面就会发生反射现象。在不同的介质界面之间的多次来回反射会产生瞬时共振现象,瞬时共振所形成的应力波会导致混凝土的表面位移产生微小变化,通过提前放在激发点周围的位移传感器收集该位移信号。由于位移传感器接收到的位移信号是时域信号,无法直接进行有关的频域分析。故一般采用快速傅里叶变换(FFT)将该时域信号变化为对应的频域信号,然后根据变化得到的频域信号来对混凝土结构内部的缺陷情况及密实度进行评价。其原理流程示意图如图1所示。

根据冲击回波法的相关原理^[18-19],在分析频率信号时,针对于不同的波阻抗材料,厚度频率计算公式有所不同。对于密实无缺陷混凝土板的厚度频率 F_T 可由式(1)确定;对于混凝土中有钢筋时,钢筋反射频率 F_s 可由式(2)确定;

$$F_T = \alpha_s V_p / 2T. \quad (1)$$

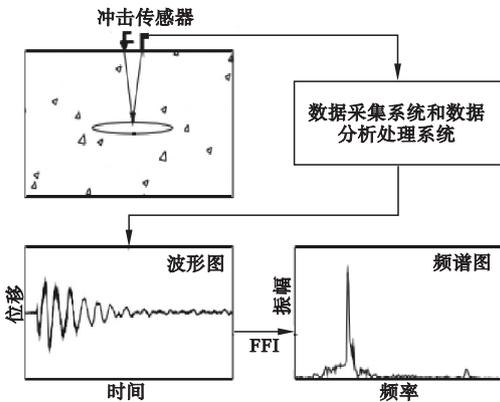


图1 冲击回波法原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the impact-echo method

$$F_s = \alpha_s V_p / 4d. \quad (2)$$

式中: α_s 为板的形状系数;对于混凝土板,一般取 0.96; V_p 为传播时应力波在混凝土中的波速; T 为板的厚度; d 为孔道埋深厚度。

2 有限元模拟

2.1 模拟介绍

采用有限元程序 ABAQUS 对各种典型因素作用下的冲击波响应信号进行数值模拟,探究各种典型因素对冲击回波法在检测预应力混凝土孔道压浆缺陷结果的具体影响。为计算方便,将小球产生的冲击力简化为一个正弦形的简谐力,并在激发点附近 5 cm 处收集该点的表面的位移,以此来获取混凝土内部传播的低频冲击应力波的有关响应信号,最后将收集到的时域位移信号通过快速傅立叶变化为对应的频域位移信号,并将其绘制成对应的频谱图。

2.2 模拟参数

材料参数见表 1。

表1 材料参数

Table 1 Material parameters

材 料	密度/ 10^3 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比 ν
钢材	7.80	2.1×10^{11}	0.3
混凝土	2.40	3.45×10^{10}	0.2
砂浆	1.75	8.70×10^9	0.2
PVC	1.10	4.0×10^9	0.2

试验选取 C40 混凝土,网格划分精度为 10 mm,采用直径 6 mm 小钢球作为激发源,所产生的冲击力将其简化为一个峰值为 30 N 的半周期时长的正弦力,冲击时长采用 30 μs ,某具体时刻的冲击力见式(3)。

$$F = F_{\max} \sin(\pi t / t_c). \quad (3)$$

式中: F 为某一时刻 t 的冲击作用力; F_{\max} 为荷载峰值,此处取 30 N; t 为作用时间 $1 \sim 30 \mu\text{s}$; t_c 为冲击持续时长。

2.3 模拟工况

为研究管道材质、缺陷大小、缺陷临界面位置及预应力钢筋这几种典型影响因素,设置 10 种不同工况,具体如表 2 所示。

表2 工况汇总

Table 2 Conditions summary

工况	孔道材料	压浆密实度	缺陷临界面与测试面对应位置	预应力筋位置
1	金属/PVC	0	平行	无
2	金属/PVC	1/3	平行	无
3	金属/PVC	2/3	平行	无
4	金属/PVC	1	平行	无
5	金属	1/3	垂直	无
6	金属	2/3	垂直	无
7	金属	1	平行	有(孔道顶部)
8	金属	1	平行	有(孔道底部)
9	金属	1/2	平行	有(孔道顶部)
10	金属	1/2	平行	有(孔道底部)

注:平行指顶板、底板工况;垂直指腹板工况。

有限元模型采用 $1.6 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ 的中间为空的长方体,管道位于中心位置,孔道半径为 4 cm,金属管厚度和 PVC 管厚度分别选取为 2 mm 和 3 mm,用半径为 2 cm 钢筋代替模拟预应力钢筋。图 2 是部分模型示意图。

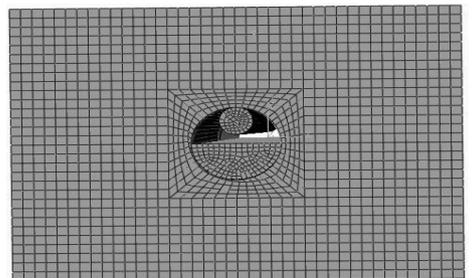


图2 部分有限元 ABAQUS 模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of partial finite element ABAQUS model

2.4 模拟结果

对布置的典型工况进行有限元数值模拟,得到各个工况对应的时域信号,采用快速傅里叶变化,对在 MATLAB 中得到的时域信号变化为对应的频域信号,得到各个工况的频谱图,部分工况的金属波纹管频谱图结

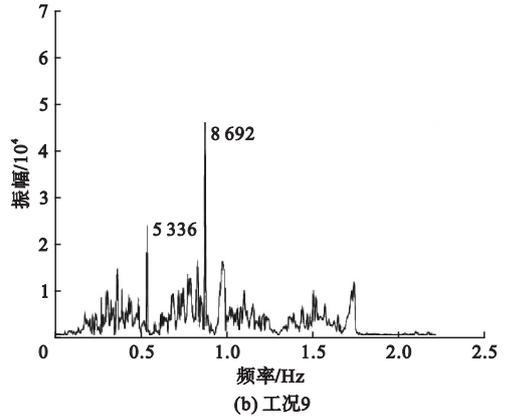
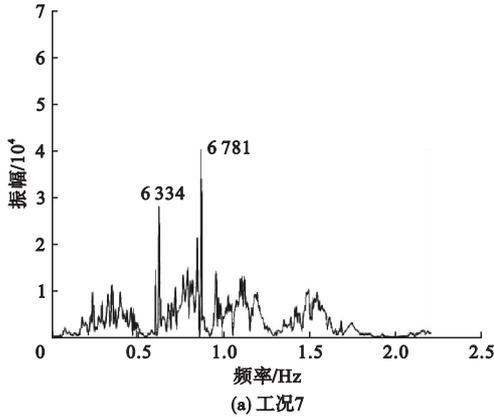


图3 频谱图

Fig. 3 Spectrogram

表3 峰值频率结果

Table 3 The results of peak frequencies

编号	板厚频率			缺陷频率		
	f_m/Hz	f_c/Hz	$\Delta f/\%$	F_m/Hz	F_c/Hz	$\Delta F/\%$
1-1	6 206.3	4 988	19.6	16 296.4	16 420	3.0
2-1	6 206.3	5 072	18.3	16 296.4	16 542	2.3
3-1	6 206.3	5 233	15.7	16 296.4	16 485	2.6
4-1	6 206.3	6 080	2.1	—	—	—
1-2	6 206.3	4 673	24.7	16 296.4	16 180	4.4
2-2	6 206.3	4 821	22.3	16 296.4	16 277	4.1
3-2	6 206.3	4 904	20.9	16 296.4	16 331	3.5
4-2	6 206.3	6 053	2.5	—	—	—
5	6 206.3	5 581	10.1	16 477	16 025	2.7
6	6 206.3	5 883	5.2	16 477	15 810	4.1
7	6 206.3	6 334	2.1	—	—	—
8	6 206.3	6 334	2.1	—	—	—
9	6 206.3	5 306	14.5	13 299.2	12 768.5	3.8
10	6 206.3	5 306	14.5	16 926.4	16 255.0	3.9

注:表中1-1为金属波纹管;1-2为PVC波纹管;其余类似。其余编号均对应与表2工况; f_m 为板厚频率测量值; f_c 为板厚频率测量值; F_m 为缺陷频率测量值; F_c 为缺陷频率测量值; $\Delta f = (f_m - f_c)/f_m$; $\Delta F = (F_m - F_c)/F_m$, Δf 与 ΔF 取绝对值,“—”表示无此情况。

从表3中的1-1~4-2结果可以看出,当管道压浆有缺陷时,其对应的板厚频率均向低频发生漂移,且随着缺陷尺寸的增大漂移率逐渐增大,可以作为判断预应力管道是否存在缺陷的一个依据。金属波纹管的漂移率从2.1%增

果如图3所示。

将所有工况频谱图中的峰值进行统计,并根据式(1)或式(2)计算其对应的厚度频率值、缺陷厚度频率值及漂移率(Δf 以及 ΔF),结果见表3所示。

大到19.6%;PVC管的漂移率从2.5%增大到24.7%;对应的缺陷反射频率,金属管的误差小于PVC管。这说明波纹管材料对测试结果影响较小,同等条件下,金属波纹管的阻碍小于PVC管,结果与理论值更为接近,故实际工

程中可采用金属管作为压浆孔道。

从表3中的1-1~4-1以及5、6结果可以看出,在同等条件、相同的缺陷情况下,计算所得到的板厚漂移率结果:顶、底板工况大于腹板工况,说明测试断面与缺陷临界断面相互位置对测试结果有影响;当两界面相互垂直时,缺陷的横向尺寸比两者相互平行时小,因此板厚漂移率有所减少。除此之外,板厚频率值的漂移率与缺陷横向尺寸成正相关,腹板工况检测时难度有所增加。

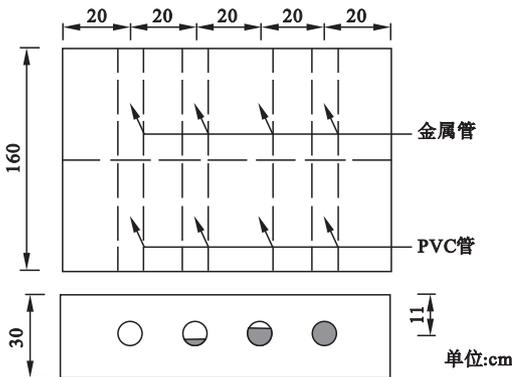
从表3中7~10结果可以看出,板厚频率向低发生偏移。在此情况下,当把预应力钢筋布置在孔道顶部(工况7和9)时,可以检测出钢筋的反射频率,分别为8 781 Hz和8 692 Hz,与理论值8 463 Hz接近,而当上部出现缺陷(工况10)的情况下,没有测到任何预应力钢筋的反射频率信号,但是检测到缺陷的频率信号,这说明预应力钢筋不影响缺陷频率信号的检测。除此之外,在工况8中没有检测到预应力钢筋的反射频率信号,是由于预应力钢筋的频率信号与板厚频率信号

接近,两者之间相互重叠二而导致无法显示频率的峰值。

3 现场试验

3.1 试件制备

现场制备3块C40的混凝土板试件来验证有限元模拟的分析结果。板尺寸为 $1.6\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ (1块)与 $0.8\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ (2块)两种,前者用来验证管道材质、缺陷大小的影响规律,后者用来验证缺陷临界界面位置及预应力钢筋的影响规律。每个试件设置4个孔道,管道直径设置为8 cm,管道中心距离混凝土试件表面为11 cm,在第3块板中布置直径为8 mm的纵向钢筋,相邻钢筋间隔为5 cm。采用3根16 mm的普通钢筋代替预应力钢筋。试件1的尺寸示意图4(a),现场试件见图4(b)。试件2和试件3纵向布置与试件1相同,横向尺寸压浆情况如表2所描述(其中试件2的尺寸布置图将试件1的每个孔道顺时针90度,形成腹板工况)。



(a) 试件尺寸图



(b) 现场试件图

图4 试件1示意图

Fig. 4 Schematic diagram of specimen 1

3.2 测试过程

采用直径6 mm的小钢球,选取每个管道纵向轴线对应的混凝土板表面作为管道压浆的测试线,纵向10 cm布置一个测点,不考虑边缘点与试件正中间点,试件1共14个测点,试件2和3各有7个测点,测试点与冲击

点的距离取3 cm。测试前采用预应力混凝土梁多功能检测仪(SPC-MATS)对每个试件进行波速标定,并选取多个测点进行平均。

3.3 测试结果

波速标定结果为:试件1波速为3 956.5 m/s,试件2波速为3 988.3 m/s,

试件3波速为4 000.2 m/s. 测试出每个测点的频率,并计算其对应的厚度频率漂移率和缺陷深度漂移率. 在1号板中选取测点3、4与测点9、10的结果绘制成图进行对比分析,其结果见图5. 由图5及有限元模拟计算结果可知,随着缺陷尺寸的增大,其对应的板厚频率逐渐减小;且漂移率逐渐增加,金属管中,测点3的漂移率从

4.4%增加到20.8%,测点4的漂移率从3.9%增加到21.2%;PVC管中,测点9漂移率从7.5%增加到27.6%,测点10从6.5%增加到27.3%. 针对缺陷程度误差,计算各点的名义缺陷深度,结果表明:金属波纹管的误差率在4%~5.5%,而PVC管的误差则在6%~8.1%,说明金属管的测试结果更加准确.

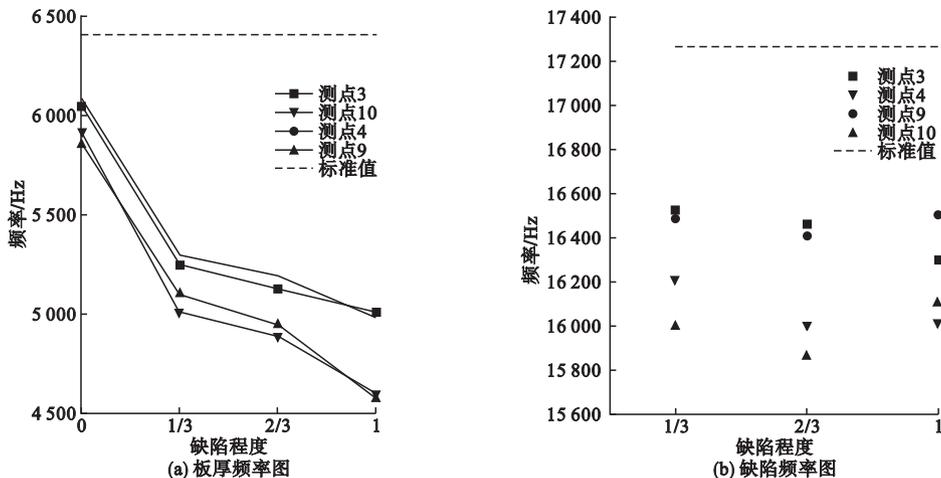


图5 1号板测点频率图

Fig. 5 The test point frequency diagram of No. 1 plate

2号板中的2、3号垂直工况的金属管道,取对应的3与4测点的相关数据,结果如

表4所示.

表4 2号板测点结果图

Table 4 Measurement point result of No. 2 plate

测点	压浆程度	f_m /Hz	f_c /Hz	Δf /%	F_m /Hz	F_c /Hz	ΔF /%
3	1/3	5 409	6 381	15.2	16 280	17 403	6.5
	2/3	5 882	6 381	7.8	18 943	17 403	8.8
4	1/3	5 304	6 381	16.8	15 986	17 403	8.1
	2/3	5 943	6 381	6.9	15 874	17 403	8.7

从表4与图5中的1/3,2/3两种压浆情况测试结果对比分析可以看出,在同等条件、同等的缺陷尺寸条件下,顶、底板工况检测所得到的板厚漂移率要大于腹板工况的测试结果,同时测试结果的误差有所增大. 这说明在同等条件下,测试截面与缺陷

临界面两者之间的位置关系对检测结果有影响,垂直时检测难度大,且测试结果的精度下降.

对3号板进行测试,将测试得到的测点结果的板厚频率与缺陷频率进行统计,见图6所示.

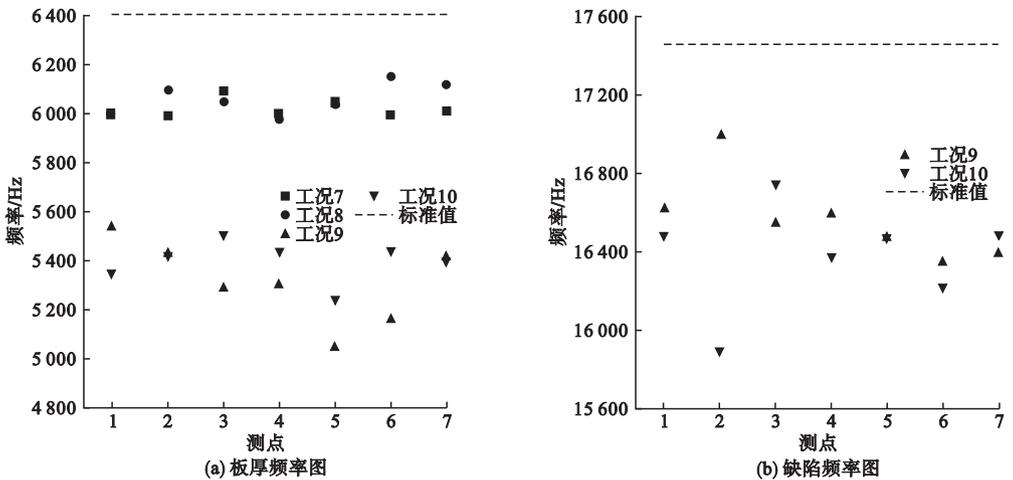


图6 3号板测点频率图

Fig. 6 Test point frequency diagram of No. 3 plate

由图6以及有限元模拟计算可发现板厚频率向低漂移,且工况7与8的板厚漂移率大致在4%~6.3%,工况9与10的板厚漂移率在15%~18%,且工况9与10可以检测出缺陷深度频率,误差大部分在4.2%~7.1%。除此之外,只在工况7时检测到钢筋的反射频率信号,钢筋的反射频率集中在8972~9372 Hz,与理论值8814 Hz相比,误差在1.8%~10.6%。工况9由于预应力钢筋在空洞中未检测到钢筋频率信号,工况8和10由于钢筋布置在底板,板厚频率信号与钢筋反射信号相互重叠而被淹没未测到。检测到的钢筋信号频率值与缺陷频率信号值相差较大,易于区分,对缺陷频率信号检测没有影响。这说明预应力钢筋不影响冲击回波法对孔道压浆缺陷的检测。

4 结论

(1)冲击回波法能够有效测试到缺陷的位置及埋深程度,且管道材料对测试结果有较明显影响:金属管的影响比PVC管要小,精度更高。此外,缺陷横向尺寸与板厚频率漂移率之间存在正相关的关系:孔道缺陷尺寸越大,测试得到的板厚频率信号的漂移率越大。因此在判断缺陷深度过程中,结合板厚频率漂移率与缺陷深度频率信号来定量地判断

缺陷深度是可行的。

(2)缺陷临界面与测试面的位置关系对检测结果有较大影响,当两者相互垂直(腹板工况)时,检测难度较高,且检测所得结果误差较大。

(3)纵筋较少情况下,未检测到明显的与纵向钢筋有关的频率信号,因此纵筋对缺陷及预应力钢筋等测试频率信号的检测几乎不影响。正常情况下,预应力钢筋信号可以检测到,且与缺陷信号相差较大;而当预应力钢筋存在缺陷中时,测试信号较难检测到。因此可以判断钢筋对缺陷深度信号的测试不影响。

参考文献

- [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 Jiaye, YANG Chao, JI Wenhong, et al. Comparison of test methods for bolt & anchor filling percentage [J]. Journal of Sichuan university of science & technology (natural science edition), 2010, 23(5):500-503.)
- [2] 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 Xianyan, LUAN Jian, WANG Zhifeng. Inspecting grouting quality of prestressed duct of bridge box girder by impact-echo method [J]. Journal of central south university of forestry & technology, 2010, 30(10):78-82.)
- [3] 辛公锋,王兆星,刘家海,等. 箱梁预应力孔道压浆密实性检测技术研究[J]. 公路交通科

- 技,2010,27(增刊1):114-117.
(XIN Gongfeng, WANG Zhaoxing, LIU Jiahai, et al. Research on grouting density inspection of box girder prestressed duct [J]. Journal of highway and transportation research and development,2010,27(S1):114-117.)
- [4] 张敬彬. 冲击回波法在预应力混凝土结构无损检测中的应用研究[D]. 北京:北京交通大学,2017.
(ZHANG Jingbin. The application study of impact-echo method in nondestructive testing of prestressed concrete structures[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2017.)
- [5] 谭少海,刘德坤. 预应力管道压浆质量无损检测方法对比研究[J]. 中外公路,2018,38(6):157-161.
(TAN Shaohai,LIU Dekun. Comparative study on nondestructive testing methods of grouting quality of prestressed pipe[J]. Journal of China & foreign highway,2018,38(6):157-161.)
- [6] NICHOLAS J. CARINO, MARY S. Detection of voids in grouted ducts using the impact-echo method [J]. ACI materials journal, 1992, 89(3):296-303.
- [7] HILL M, MCHUGH J, TURNER J D. Cross-sectional modes in impact-echo testing of concrete structures [J]. Journal of structural engineering,2000,126(2):228-234.
- [8] 肖国强,陈华,王法刚. 用冲击回波法检测混凝土质量的结构模型试验[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(增刊1):1790-1792.
(XIAO Guoqiang, CHEN Hua, WANG Fagang. Application of impact-echo method to checking concrete quality [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2001, 20(S1):1790-1792.)
- [9] 谭献良,王建平. 冲击回波法检测预应力管道压浆质量技术研究[J]. 铁道建筑,2010,8:49-52.
(TAN Xianliang, WANG Jianping. Research on the technology of detecting the grouting quality of prestressed pipe by impact-echo method [J]. Railway construction, 2010, 8:49-52.)
- [10] 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 Hailin. Research on the impact-echo method to detect prestressed bridge duct grouting [D]. Harbin: Northeast Forestry University,2014.)
- [11] ZOU C J, CHEN Z Z, DONG P, et al. Experimental and numerical studies on nondestructive evaluation of grout quality in tendon ducts using impact-echo method [J]. Journal of bridge engineering, 2016, 21(2):04015040.
- [12] EPP T, CHA Y J. Air-coupled impact-echo damage detection in reinforced concrete using wavelet transforms [J]. Smart materials and structures,2016,26(2):025018.
- [13] HAN Q B, CHENG J, FAN H H, et al. Ultrasonic nondestructive testing of cement grouting quality in corrugated pipes based on impact-echo [J]. Journal of advanced concrete technology,2014,12(11):503-509.
- [14] 邹春江,陈征宙,董平,等. 箱梁中冲击回波主频影响因素研究及应用[J]. 振动与冲击,2010,29(7):126-131.
(ZOU Chunjiang, CHEN Zhengzhou, DONG Ping, et al. Influencing factors on impact-echo characteristic frequency in a box beam [J]. Journal of vibration and shock,2010,29(7):126-131.)
- [15] NORINAH A R, ADNAN F N, HAMID R. 2D finite element simulation of air-coupled impact echo testing on concrete slab [C]//IOP conference series: materials science and engineering. IOP publishing, 2019, 513(1):012016.
- [16] YAO F, CHEN G, ABULA A. Research on signal processing of segment-grout defect in tunnel based on impact-echo method [J]. Construction and building materials, 2018(187):280-289.
- [17] QU G Z, SUN M, ZHOU G L. Detecting grouting quality of tendon ducts using the impact-echo method [C]//AIP conference proceedings. AIP publishing LLC, 2018, 1973(1):020011.
- [18] 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 Zhifeng, ZHOU Xianyan, YAN Banfu, et al. Grout quality testing in prestressed ducts with impact-echo method [J]. Journal of vibration and shock,2009,28(1):166-169.)
- [19] REHMAN S K U, IBRAHIM Z, MEMON S A, et al. Nondestructive test methods for concrete bridges; a review [J]. Construction and building material,2016,107:58-86.
(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)