

# 基于改进冲击回波法的装配式混凝土桥墩套筒灌浆检测理论研究

包龙生,陶天阳,刘杰,于玲

(沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 研究不同纵向缺陷长度的冲击回波法,改进后的冲击回波法提高了装配式混凝土桥墩模型的检测精度,解决装配式混凝土墩套中注浆缺陷的问题。方法 分析10个不同纵向全空隙缺陷长度参数的装配式混凝土桥墩模型,设计各套筒灌浆缺陷长度,分析不同试验位置 ABAQUS Explicit 显示动态,频域信号可以从时域信号数据得到。结果 注浆全模型谱图 A 中1处优频峰值  $f=0.9183\text{ kHz}$ ,未注浆模型 J 的频谱图中存在2个优良频率峰值,分别是  $6.5854\text{ kHz}$  和  $19.7561\text{ kHz}$ 。纵向缺陷长度比套筒长度大20%和套筒长度为10%的全空隙缺陷可以被厚度频率准确识别,厚度频率在  $0\sim100\text{ mm}$  内能准确识别缺陷。结论 提高套筒灌浆饱满度检测精度的方法准确可靠,能够满足理论分析、计算精度和工程实际误差的要求。

**关键词** 改进冲击回波法;装配式;混凝土桥墩;套筒灌浆;缺陷检测

中图分类号 TU375.6

文献标志码 A

## Grouting Detection Theory of Assembled Concrete Pier Sleeve Based on Shock-echo Method

BAO Longsheng, TAO Tianyang, LIU Jie, YU Ling

(School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** An impact echo method with different longitudinal defect lengths is studied to improve the detection accuracy in an assembled concrete pier model so as to solve a problem in the defect detection of the assembled concrete pier sleeve grouting. Ten prefabricated concrete bridge pier models with different longitudinal full void defect length parameters were designed, the defect length of each sleeve grouting was set, and the dynamic display of ABAQUS Explicit at different test positions was analyzed. The frequency domain signal could be obtained from the time domain signal data. In the spectral figure A of the whole grouting model, there is one optimal frequency peak ( $F=0.9183\text{ kHz}$ ). In the spectral figure of the non-grouting model J, there are two excellent

收稿日期:2020-08-15

基金项目:“十三五”国家重点研发计划重点专项基金项目(2018YFC0809600,2018YFC0809606);辽宁省重点研发计划指导计划基金项目(2018416028);沈阳市建委城乡系统科研项目(201904)

作者简介:包龙生(1971—),男,教授,博士,主要从事桥梁工程结构方面研究。

frequency peaks, which are  $F = 6.585\ 4\ \text{kHz}$  and  $F = 19.756\ 1\ \text{kHz}$  respectively. When the longitudinal defect length is 20% larger than the sleeve length and the sleeve length is 10%, the all-empty defect can be accurately identified by the thickness frequency, and the thickness frequency can be accurately identified within 0 ~ 100 mm. So the method to improve the detection accuracy of sleeve grouting plumpness is accurate and reliable, and can meet the requirements of theoretical analysis, calculation accuracy and engineering actual error.

**Key words:** Improved impact echo method; fabricated; concrete pier; sleeve grouting; defect detection

预制混凝土结构钢筋连接中的钢套灌浆缝是我国预制混凝土结构常用的接头方法。注浆的质量好坏直接决定装配结构的质量安全。检测和评价装配式混凝土结构的注浆质量主要有 X 射线法、探地雷达法、超声波法和冲击回波法<sup>[1-5]</sup>。冲击回波法在混凝土结构无损检测中应用广泛,而预制钢筋混凝土结构套缝灌浆的压实研究仅限于较薄的剪力墙等结构<sup>[6-7]</sup>。大体积结构套筒节点的检测特别是装配式混凝土桥墩,由于桥墩的体积大,厚度大,而进行冲击回波法检测时往往只能选取一个端面,套筒内灌浆缺陷界面只存在于混凝土结构内部,因此回波信号较弱<sup>[8-13]</sup>。笔者利用基础理论和实践方法,控制饱和冲击回波中注入孔预应力,研究传播节点回波特征的预制混凝土桩,提出提高套筒灌浆饱满度检测精度的方法。

1 冲击回波法原理

冲击回波法应用过程:①在混凝土表面产生弹性力波,笔者采用钢球撞击混凝土表面,使弹性力波传播到内部缺陷或结构达到极限时,混凝土内部的弹性波反射回来,在混凝土表面撞击点附近引起质点的振动<sup>[14-18]</sup>。②用位移传感器记录质点振动时间曲线。③在对记录的信号进行分析时采用时域或频域分析法,确定混凝土结构的完整性和缺陷的位置<sup>[19-22]</sup>。

根据冲击回波理论,弹性波的理论传播速度  $V_p$  为

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad (1)$$

式中: $E$  为材料的弹性模量, GPa;  $\mu$  为泊松比;  $\rho$  为密度,  $\text{kg/m}^3$ 。

弹性波在板内一个来回的传播时间  $\Delta t$  为

$$\Delta t = \frac{2T}{V_{p, \text{plate}}} \quad (2)$$

冲击回波的厚度频率  $f$  为周期  $\Delta t$  的倒数,代入式(2),即得到冲击回波的板厚频率:

$$f = \frac{V_{p, \text{plate}}}{2T} \quad (3)$$

式中: $f$  为板底反射的优良振动所对应的频率(也称板厚频率), Hz;  $V_{p, \text{plate}}$  为 P 纵波在混凝土中的传播速度  $\text{m/s}$ , 也称 P 纵波速度,  $\text{m/s}$ ;  $T$  为板的厚度,  $\text{m}$ 。

当位置低于一个缺陷结构的影响时,如不完全灌浆,进入混凝土的弹性波,反映缺陷的一部分和衍射混凝土的一部分,可以通过分析缺陷频率和厚度来评估<sup>[13-24]</sup>。

2 有限元模拟

2.1 设计模型参数

笔者采用有限元 ABAQUS 建立模型,分析发现冲击回波使得混凝土表面产生一个弹性力波,其弹性波的能量很小,结构产生的冲击响应也很小。由于弹性波的实际频率较低,且波会增长,材料的性能如表 1 所示。

图 1 为混凝土桥墩的 1/2 三维实体单元模拟计算模型,混凝土桥墩模型长宽高( $a \times b \times c$ )为 2 000 mm  $\times$  2 000 mm  $\times$  1 000 mm,套筒内径  $D$  为 90 mm,长为 800 mm,图中的

I 代表模型的侧边,Ⅱ则代表对边。

表 1 材料性能

材料名称	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/MPa	泊松比
混凝土(C40)	2 440	32 500	0.2
套筒(铸铁)	7 000	120 000	0.3
钢筋	7 800	210 000	0.25

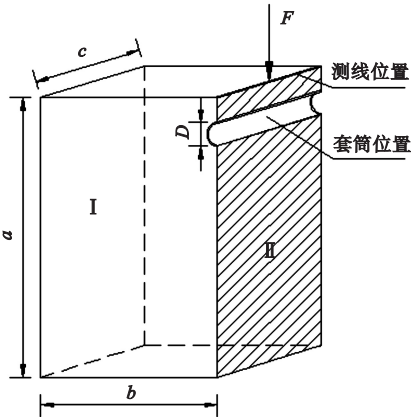


图 1 1/2 计算模拟图像

Fig. 1 1/2 Schematic diagram of calculation model  
冲击荷载的冲击作用持续时间可表示为

$$t_c \approx \frac{0.00429D}{h^{0.1}}. \tag{4}$$

式中: $t_c$  为接触时间, $\mu\text{s}$ ; $D$  为钢球直径, $\text{m}$ ; $h$  为钢球落距, $\text{m}$ 。

模拟测试采用的是 17 mm 直径的钢球。式(4)冲击作用持续时间  $t_c$  为 75  $\mu\text{s}$ ,集中力最大值为 100 N。对顶面中心 8 个单元施加半正弦冲击载荷,载荷施加点与响应接收点之间的距离选为 5 cm。

2.2 ABAQUS 模拟冲击响应测试方法

为研究冲击法检测预制混凝土桥梁套管灌浆缺陷的可行性和准确性,笔者设计 10 个不同纵向孔隙长度参数的预制混凝土桥梁模型(见表 2)。对各套灌浆缺陷的长度采用 ABAQUS 模型模拟,得出混凝土桥墩套灌浆缺陷的效果。

模型内部设计缺陷类型为纵向全间隙缺陷,位置居中,缺陷长为  $L$ ,测点均设置在灌

浆全间隙的中点,套筒纵向灌浆缺陷如图 2 所示。H 测量线上从上到下的 9 个测量点为 H-1、H-2、 $\cdots$ 、H-9(见图 3)。

表 2 10 种装配式混凝土桥墩模型

模型编号	缺陷长 $L/\text{mm}$	纵向缺陷比例/ %	灌浆比例/ %
A	0	0	100
B	40	5	95
C	80	10	90
D	160	20	80
E	240	30	70
F	320	40	60
G	400	50	50
H	520	65	35
I	640	80	20
J	800	100	0

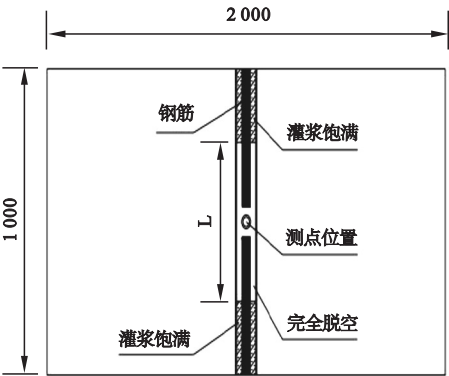


图 2 套筒纵向灌浆缺陷示意图

Fig. 2 Schematic diagram of longitudinal sleeve grouting defect

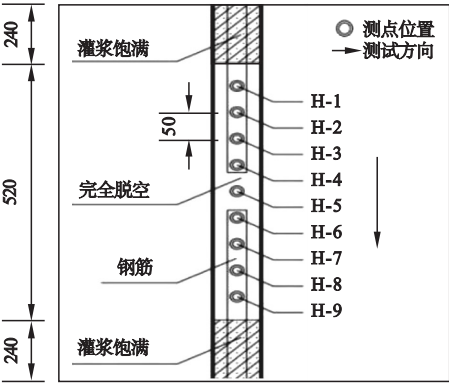


图 3 H 各测点布置示意图

Fig. 3 H layout of each measuring point

由于混凝土是不均匀介质,同一混凝土板在不同位置的波长不同。因此为了测量更准确的波速,在通道之间设置专门的测点进行波速测试。笔者对H型模型进行点分析,测点在腹股沟完全间隙中心,测点间距为50 mm。

3 模拟结果及分析

3.1 装配式桥墩冲击回波响应有限元模拟可行性

3.1.1 装配式混凝土桥墩无缺陷特征  
采用 ABAQUS Explicit 显示动态分析法

对灌浆模型 A 进行动力学分析。图 4 为模型 A 的应力云图。在 278 μs 时,由此出现的弹力波会沿着一定的方向穿过模型的外壁,直至 492 μs,其传播方向改变向下传至底端,直至 731 μs,波形已传至最下端而导致波的返回。由式(1)可知,该种波在混凝土桥墩中的传播速度是 3 842 m/s,通过对模型规格数据的测量,其方向转为传向底部前需要传播的距离是 2 000 mm,由式(2)计算得出平台模型底部弹性波传播的时间为  $5.2056 \times 10^{-4}$  s,与 492 μs 板块底部传播时间的模拟值非常接近。

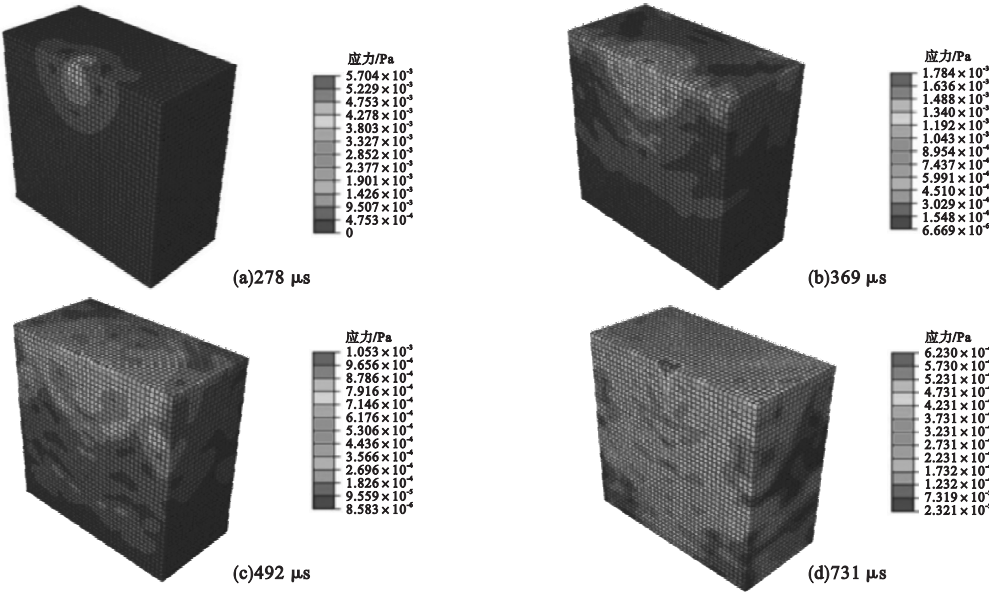


图 4 A 模型弹性波不同时刻传播应力云图

Fig. 4 Model A stress image of elastic wave propagation at different times

图 5 为模型 A 的信号图。图 5(a) 为模型信号实时状态,可以得到时域信号。图 5

(b) 将时域信号转变为频域信号,误差最小频率为  $f=0.9756$  kHz。实际频率通过计算

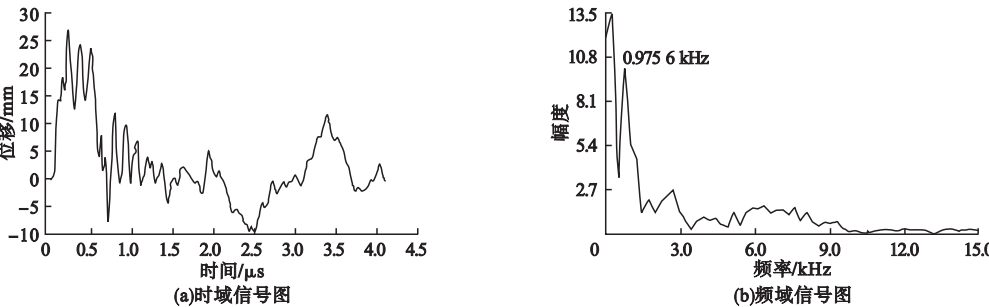


图 5 A 模型信号图

Fig. 5 A Model signal diagram

为 $f=0.922\ 1\ \text{kHz}$ ,接近模拟值 $f=0.975\ 6\ \text{kHz}$ 。因此,ABAQUS 模拟的冲击响应可检测试验厚度为 $2.0\ \text{m}$ 的无故障预制墩节点,模拟值与计算值的误差为 $5.8\%$ ,且误差小,易于操作。

3.1.2 有缺陷的装配式混凝土桥墩冲击响

对未灌浆模型 J 进行 ABAQUS Explicit 显示动态分析。图 6 为弹力波的动态传播情况。该波由发射点传至混凝土桥墩的缺陷位置需要 $24\ \mu\text{s}$ ,当 $53\ \mu\text{s}$ 时,波通过问题点向

其他方向传播,由此时传至结构底端需要 $33\ \mu\text{s}$ ;该弹性波的能量只能足够其传播 $172\ \mu\text{s}$ ,通过动态图中反映出此时的波并没有传至结构的底端。该种波在 C40 混凝土桥墩中的传播速度是 $3\ 842\ \text{m/s}$ ,通过对模型规格数据的测量,混凝土桥梁模型在冲击点处的缺陷厚度为 $100\ \text{mm}$ 。由式(2)计算缺陷弹性波传播的时间 $t=0.1/3\ 842=2.603\times 10^{-5}\text{s}$ ,很接近模拟值 $24\ \mu\text{s}$ 。

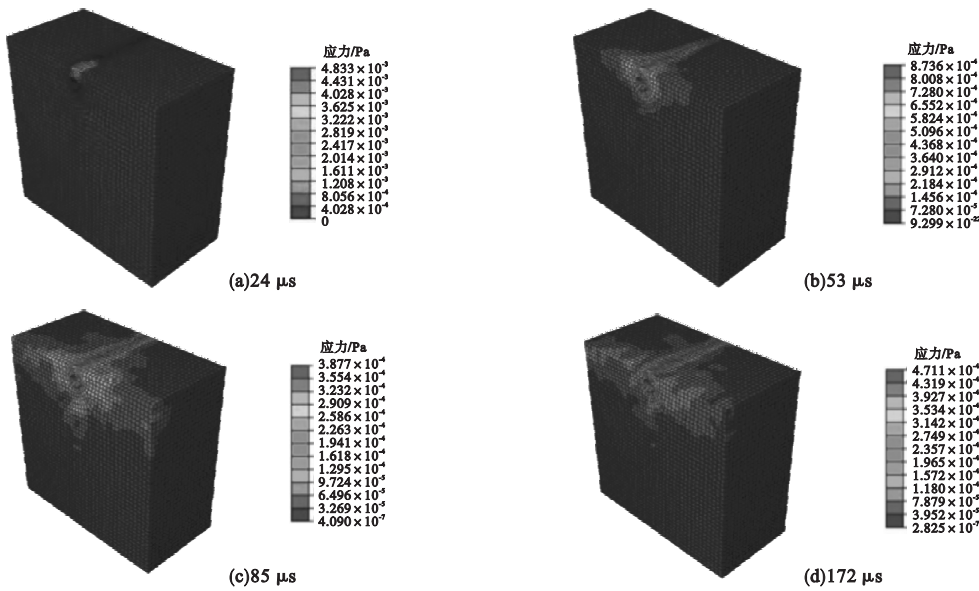


图 6 J 模型弹性波不同时刻传播应力云图

Fig. 6 Stress image of elastic wave propagation in J model at different time

图 7 为 J 模型信号图。图 7(a)是利用 ABAQUS Explicit 显示动态分析得到时域信

号。图 7(b)是图 7(a)中利用原点傅里叶变换将时域信号变换为频域信号。

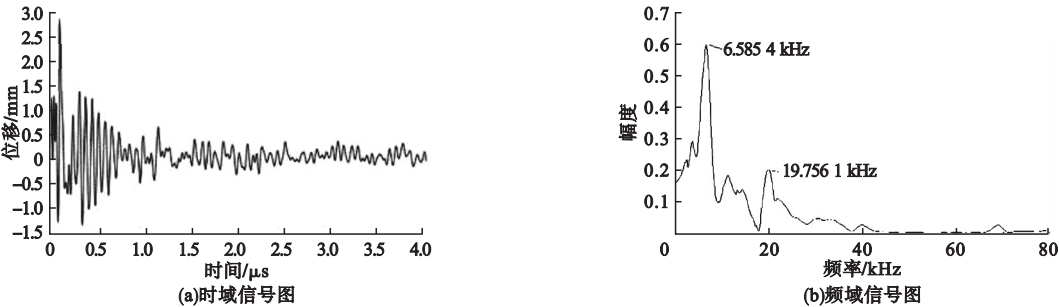


图 7 J 模型信号图

Fig. 7 J model signal graph

通过观察频率进行观测,在通过底端后的波的频率可达到最大值 $6.585\ 4\ \text{kHz}$ 。通

过式(3)计算板厚频率 $f=0.922\ 1\ \text{kHz}$ 远高于钢板厚度。根据冲击回波原理,波的反射



情况和结构的深度有关,而模型结构中其厚度较深,因此反射后仅有 30% 多,在模型底端出现的波均在其底端,尚未实现反射,频率向高频的厚度方向偏移。深度反射可按(3)式计算: $T=0.96\times3\,842/(2\times6\,585.4)=0.28\text{ m}$ ,结果与图 7(b)中弹性波传播结果一致。第 2 频率  $f=19.756\,1\text{ kHz}$ ,为缺陷的反射频率,根据式(3)缺陷密度频率的计算值  $f=0.96\times3\,842/(2\times1)$ ,与  $19.751\text{ kHz}$  的模拟值相比,相差不大,误差为 7.13%。

表 3 不同缺陷程度板底处厚度频率仿真结果

Table 3 Simulation results of thickness frequency at the bottom of the board with different degree of defects

模型编号	缺陷程度/%	板底处厚度频率		缺陷处厚度频率		误差值/%
		理论值/ kHz	模拟值/ kHz	理论值/ kHz	模拟值/ kHz	
A	饱满	0.922 1	0.975 6	18.441 6	—	—
B	5	0.922 1	6.097 6	18.441 6	—	—
C	10	0.922 1	5.853 7	18.441 6	15.609 8	15.36
D	20	0.922 1	5.853 7	18.441 6	16.829 3	8.74
E	30	0.922 1	5.609 8	18.441 6	19.024 4	3.16
F	40	0.922 1	6.829 3	18.441 6	19.512 2	5.81
G	50	0.922 1	5.121 9	18.441 6	17.560 9	4.78
H	65	0.922 1	4.390 2	18.441 6	18.780 5	1.84
I	80	0.922 1	4.878 0	18.441 6	19.268 3	4.48
J	未灌浆	0.922 1	6.585 4	18.441 6	19.7561	7.13

从表 3 分析可知,在模型 B 的频域信号中,缺陷处频率相差无几;在对模型 C 进行测验后的频率值和理论的频率值误差较大,而模型 D 到模型 J 的频率模拟值基本与缺陷处厚度频率一致,误差为 1.84% ~ 8.74%。根据实际模型中缺陷点处的频率和理论计算中应当的频率进行分析,发现运用冲击回波对其进行检测时,当可识别纵向缺陷程度达 10% 及其以上,则可以检测为全空缺陷,其建立的模型中,模型 C 的误差较大,不在结果分析内,当其问题为 5% 时,则该方法没有效果。

因此,利用 ABAQUS 模拟的冲击响应可以检测出 2.0 m 厚的复组合墩和套筒灌浆的缺陷,ABAQUS 模拟的厚度频率基本与计算值一致,可以满足无损检测的需要。

3.2 套筒灌浆缺陷程度冲击回波响应有限元模拟

分别测验 10 种模型,并记录相应的结果,对其缺陷处的频率和模型底部厚度的频率进行记录,表 3 为不同缺陷厚度频率仿真结果。

因为混凝土桥墩的缺陷的地方相较于整个桥墩范围较小,通常不超过 1/3,所以当波传至该处时通常会发生反射而不是衍射。而当波经过缺陷处向底端传播时,发生的衍射的波的频率相对较高。

3.3 各测点冲击回波响应有限元模拟

H 模型是对各测点回波响应的有限元模拟。H 模型针对 0 ~ 240 mm、240 ~ 760 mm 和 760 ~ 1 000 mm 的每个测点进行设计。表 4 为 H 模型中测量板底处厚度频率仿真结果。

表 4 H 模型中测量板底处厚度频率仿真结果

Table 4 Simulation value of the thickness frequency at the bottom of the measured plate in the H model						
测点	测点位置/ mm	板底处厚度频率		缺陷处厚度频率		误差值/%
		理论值/	模拟值/	理论值/	模拟值/	
		kHz	kHz	kHz	kHz	
H-1	290	0.922 1	6.341 5	18.441 6	—	—
H-2	340	0.922 1	4.878 0	18.441 6	—	—
H-3	390	0.922 1	4.634 1	18.441 6	19.024 4	3.16
H-4	440	0.922 1	4.390 2	18.441 6	19.512 2	5.81
H-5	500	0.922 1	4.390 2	18.441 6	18.048 8	2.13
H-6	560	0.922 1	4.634 1	18.441 6	18.780 5	1.84
H-7	610	0.922 1	4.878 0	18.441 6	19.268 3	4.48
H-8	660	0.922 1	4.146 3	18.441 6	—	—
H-9	710	0.922 1	4.046 3	18.441 6	—	—

由表 4 分析可知,H-1、H-2、H-8、H-9 测点的误差率无法测量,H-3、H-4、H-5、H-6、H-7的模拟误差率值与计算值接近,误差在 1.84%~5.81%。H-8 和 H-9 位于缺陷位置的末端,靠近灌浆缺陷和非缺陷位置的交界处,冲击法的检测结果受缺陷末端的强烈影响,0~100 mm 的缺陷末端不能检测到缺陷。因此,冲击回波法定量检测套管内注浆缺陷长度存在一定误差。

4 结 论

- (1)厚度频率用于准确识别纵向缺陷长度大于 20% 套筒长度的全空缺陷,对于纵向缺陷长度为 10% 套筒长度的全空缺陷,误差较大,全空气缺陷长度为套筒长度的 5%。
- (2)厚度频率在缺陷末端 0~100 mm 内无法识别缺陷,但可以准确识别缺陷中间范围。
- (3)通过有限元软件 ABAQUS/Explicit 模拟冲击回波法检测装配式混凝土桥墩内部缺陷的方法精确可靠,能够满足理论分析计算精度及工程实际误差需要。

参考文献

[1] 包龙生,王贺鑫,汤维维,等.采用樗卯剪力键的预应力装配式双柱桥墩拟静力分析[J].沈

阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(4):692-702.  
(BAO Longsheng,WANG Hexin,TANG Weiwei,et al. Pseudostatic analysis of assembly type double column pier based on ABAQUS [J]. Journal of Shenyang jianzhu university ( natural science),2018,34(4):692-702.)  
[2] 包龙生,王淋,于玲.基于套筒连接的装配式双柱桥墩模型的有限元分析[J].公路交通科技(应用技术版),2018,14(4):123-128.  
(BAO Longsheng,WANG Lin,YU Ling. Finite element analysis of prefabricated double-column pier model based on sleeve connection [J]. Highway traffic technology ( applied technology edition),2012,14(4):123-128.)  
[3] 郑周练,肖杨,李栋,等.基于 CT 技术的套筒灌浆连接件检测方法研究[J].施工技术,2018,47(4):69-74.  
(ZHENG Zhoulian,XIAO Yang,LI Dong,et al. Research on inspection method of sleeve grouting connector based on CT technology [J]. Construction technology,2008,47(4):69-74.)  
[4] 李向民,高润东,许清风,等.基于 X 射线数字成像的预制剪力墙套筒灌浆连接质量检测技术研究[J].建筑结构,2018,48(7):57-61.  
(LI Xiangmin,GAO Rundong,XU Qingfeng,et al. Study on inspection technology for sleeve grouting connection quality of precast shear wall based on X-ray digital radiography method [J]. Building structure,2018,48(7):57-61.)  
[5] 姜勇,吴佳晔,冯源.铁路隧道衬砌缺陷检测中地质雷达法和冲击回波法的联合应用研究[J].铁道建筑,2018,58(12):6-11.  
(JIANG Yong,WU Jiaye,FENG Yuan. Study on combined application of geological radar method and shock echo method in defect inspection of railway tunnel lining [J]. Railway engieoering,2018,58(12):6-11.)

- [6] OU Y C, WANG Pinghsung, TSAIMusen, et al. Large-scale experimental study of precast segmental un-bonded post-tensioned concrete bridge columns for seismic regions [J]. Journal of structural engineering, 2010, 136 (3):255-264.
- [7] 蒋昊,孙正华,魏晓斌,等.冲击回波法检测装配式混凝土结构浆锚搭接灌浆饱满度的试验研究[J].建筑结构,2018,48(23):22-27.  
(JIANG Yu, SUN Zhenghua, WEI Xiaobin, et al. Experimental study on testing grouting quality of grouted and splicing joints in precast structure using impact-echo method [J]. Building structure, 2018, 48(23):22-27.)
- [8] 曹慧珺,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 Huijun, SUN Wei, GONG Yuling, 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.)
- [9] ELLOBOY E, YOUNG B. Numerical simulation of concrete encased steel composite columns [J]. Journal of constructional steel research, 2011, 67(2):211-222.
- [10] 卢江波,张文伟,唐盛华,等.基于冲击回波法厚度频率识别孔道注浆状态试验研究[J].黑龙江交通科技,2018,41(7):105-107.  
(LU Jiangbo, ZHANG Wenwei, TANG Shenghua, et al. A dissertation on experimental study of grouting state identification based on impact-echo thickness frequency [J]. Communications science and technology Heilongjiang, 2018, 41(7):105-107.)
- [11] 包龙生,张远宝,桑中伟,等.波纹管连接装配式桥墩抗震性能拟静力试验与数值模拟[J].中国公路学报,2018,31(12):242-249.  
(BAO Longsheng, ZHANG Yuanbao, SANG Zhongwei, et al. Quasi-static test and numerical simulation analysis for seismic performance of fabricated assemble bridge piers base on bellows connection [J]. Chinese journal of highway and transport, 2018, 31 (12):242-249.)
- [12] LIEL A B, HASELYON C B, DEIERLEIN G G. Seismic collapse safety of reinforced concrete buildings. II: comparative assessment of nonductile and ductile moment frames [J]. Journal of structural engineering, 2010, 137 (4):492-502.
- [13] ELSAYED M, NEHDI M L. Experimental and analytical study on grouted duct connections in precast concrete construction [J]. Materials & structures, 2017, 50(4):198.
- [14] CURT B. HASELYON, ABBIE B, et al. Beam-column element model calibrated for predicting flexural response leading to global collapse of RC frame buildings [R]. PEER research report; University of California-berkeley, 2008.
- [15] 刘辉,李向民,许清风.冲击回波法在套筒灌浆密实度检测中的试验[J].无损检测,2017,39(4):12-16.  
(LIU Hui, LI Xiangmin, XU Qingfeng. Test on detection grouting compactness of grout sleeve by impact-echo method [J]. Nondestructive testing, 2017, 39(4):12-16.)
- [16] 卢江波,方志.基于冲击回波厚度频率的预应力孔道注浆状态分析[J].地震工程与工程振动,2013,33(3):239-244.  
(LU Jiangbo, FANG Zhi. Analysis of tendon grouting state of based on impact-echo thickness frequency [J]. Earthquake engineering and engineering dynamics, 2013, 33(3):239-244.)
- [17] HASELTON C B, LIEL A B, DEIERLEIN G G, et al. Seismic collapse safety of reinforced concrete buildings. I: assessment of ductile moment frames [J]. Journal of structural engineering, 2010, 137(4):481-491.
- [18] ZAREIAN F, KRAWINKLER H. Structural system parameter selection based on collapse potential of buildings in earthquakes [J]. Journal of structural engineering, 2013, 236 (8):933-943.
- [19] 汪世龙.基于冲击回波法的预应力管道灌浆缺陷检测研究[D].西安:长安大学,2018.  
(WANG Shilong. Study on defect detection of prestressed pipe grouting based on impact-echo method [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.)
- [20] 曹慧珺.基于冲击回波法对灌浆质量检测技术的应用研究[D].南昌:东华理工大学,2018.  
(CAO Huijun. Application research of grouting quality detection technology based on impact-echo method [D]. Nanchang: Donghua University of Technology, 2018.)
- [21] ŽIDONIS I. Strength calculation method for cross-section of reinforced concrete flexural member using curvilinear concrete stress diagram of EN-2 [J]. Procedia engineering, 2013, 57(1):1309-1318.
- [22] CHANG K C, OU Y C, TSAI M, et al. Cyclic behavior of precast segmental concrete bridge columns with high performance or conventional steel reinforcing bars as energy dissipation bars [J]. Earthquake engineering and structural dynamics, 2010, 39 (11):1181-1198.
- [23] 包龙生,王娟,于玲,等.在循环荷载下的节段拼装桥墩实体模型试验[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2013,29(6):1030-1034.  
(BAO Longsheng, WANG Juan, YU Ling, et al. The physical model tests on precast segmental bridge columns under cyclic loading [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29(6):1030-1034.)
- [24] 刘杰.基于冲击回波法的装配式桥墩套筒灌浆检测仿真分析[D].沈阳:沈阳建筑大学,2020.  
(LIU Jie. Simulation analysis of grouting detection of assembly type bridge piers sleeve based on impact echo method [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020.)  
(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)