

文章编号:1673-9469(2023)01-0001-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.01.001

装配式剪力墙套筒灌浆缺陷的冲击回波识别研究

徐海峰,姚菲*,阿布力克木·阿布拉

(河海大学土木与交通学院,江苏南京210098)

摘要:针对套筒灌浆质量的检测与评定方法问题,利用冲击回波法对装配式剪力墙套筒灌浆缺陷开展了识别研究,分别建立了双层布置的直径为18、20、25 mm钢筋灌浆套筒的装配式剪力墙模型,进行了冲击回波有限元分析;开展了不同灌浆质量下的装配式剪力墙试件冲击回波试验,研究了不同冲击荷载下回波信号的频谱特征和时频特征。研究表明:不同的冲击荷载下回波信号频谱呈现不同的分布特征,5 mm钢球作用下灌浆区域和无灌浆区域的频谱图和时频图具有差异性,能够识别冲击点近侧的套筒内部的灌浆情况,试验结果与有限元分析结果相吻合。

关键词:冲击回波法;装配式剪力墙;套筒;灌浆缺陷;冲击源

中图分类号: TH165.3

文献标识码: A

Study on Impact Echo Identification of Sleeve Grouting Defects in Prefabricated Shear Wall

XU Haifeng, YAO Fei*, Abulikemu · Abula

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: The grouting defects of rebar sleeve greatly affects the connection performance of the prefabricated shear wall. Therefore, it is necessary to study the detection and evaluation method of the grouting quality of the sleeve. The grouting defects of fabricated shear wall sleeves were identified by using the impact echo method, and the fabricated shear wall models with double rows of 18, 20 and 25 mm grouting sleeves were established respectively, and the impact echo finite element analysis was performed. The impact-echo test of fabricated shear wall specimens under mass was carried out, and the spectral characteristics and time-frequency characteristics of echo signals under different impact loads were studied. The results show that the echo signal spectrum presents different distribution characteristics under different impact loads. The frequency spectrum and time-frequency diagram of the grouting area and the non-grouting area under the impact of 5 mm steel balls are different, which can identify the grouting situation inside the sleeve near the impact point. The test results are consistent with the finite element analysis results.

Key words: impact-echo method; fabricated shear wall; sleeve; grouting defects; impact source

装配式建筑是今后建筑业发展的重要方向。套筒灌浆连接是装配式混凝土结构构件的主要连接方式,在连接可靠的情况下,装配式建筑的性能可“等同现浇”。然而在实际施工中常常由于施工水平的参差不齐,极易由于套筒堵塞、操作不当等原因造成各类灌浆缺陷,带来安全隐患。许多学

者对套筒灌浆缺陷的检测方法开展了研究,姜绍飞等^[1-2]面向未埋入混凝土时的裸露套筒展开研究;李向民等^[3]采用X射线工业CT技术对钢筋套筒试件进行了检测试验,但是由于设备的特殊性,目前只限于室内试验而不适宜于现场检测;Wu等^[4-5]通过在钢筋套筒表面粘贴传感器来进行测

收稿日期:2022-06-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51408188)

作者简介:徐海峰(1995-),男,安徽巢湖人,硕士研究生,主要从事结构检测与加固研究。

* 通讯作者:姚菲(1983-),女,湖南凤凰人,博士,副教授,主要从事结构检测与加固研究。

量,尚未有套筒埋入混凝土内部的检测研究。

冲击回波法(Impact-Echo, IE)通过冲击应力波在不同介质界面产生的反射信号来测量介质厚度或检测介质内部缺陷,具有精度高、测深大、无需耦合剂、可单面测试等优点,在许多领域中被使用^[6-9]。刘辉等^[10]对不同类型的灌浆密实度的套筒试件进行了IE法检测试验。结果表明套筒处于构件中间时该方法可以对灌浆密实度进行定性判断,但定量结果与预设缺陷比例存在一定的误差。有研究表明,冲击源对冲击回波信号中是否包含检测区域特征频率(板厚频率和缺陷频率)存在很大影响。Colla等^[11]研究表明信号参数会受到冲击源产生的应力波频率的严重影响,并且指出波中心频率可能比最大有效频率有作用。姚菲等^[12]采用IE法对尚未埋入剪力墙的套筒灌浆缺陷进行了检测,给出了相应的冲击源参数选取建议。冲击源的选择对IE法检测结果有重要影响,在采用IE法检测装配式剪力墙内的套筒灌浆缺陷时,由于试件内部反射界面多,缺陷尺寸小,因此有必要对不同冲击源的检测结果进行研究,以提高识别精度,本文基于此展开研究。

1 IE原理与冲击源的选择

IE法的基本原理是^[13]:冲击源在被检测构件表面产生瞬态冲击应力波,在构件内部传播过程中遇到介质声阻抗变化的界面(空洞缺陷、裂缝或者构件边界),发生了多次反射导致共振频率的产生,被传感器接收到,通过快速傅里叶(FFT)变换后的频谱图中获取峰值频率,如图1所示。峰值频率 f 和构件厚度(或缺陷深度) T 之间的计算关系见式(1)。



图1 冲击回波法检测原理示意图

Fig. 1 Diagram of the principle of impact-echo testing

$$f = \frac{\beta C_p}{\alpha T} \quad (1)$$

式中, β 为截面形状系数,板状结构取0.96, C_p 为纵波波速, α 是与反射系数 R 有关的系数,反射系数 R 为负数时 $\alpha = 2$,反射系数 R 为正数时 $\alpha = 4$ 。

当冲击应力波由介质1垂直入射到介质2时,两种介质之间界面上的反射系数 R 由式(2)计算:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2)$$

式中, Z_1 为介质1的声阻抗, Z_2 为介质2的声阻抗。

对于两层介质,频谱图峰值频率可以利用纵波在两种介质内往返传播的总时间取倒数的方法计算,表达式如式(3):

$$f_h = \frac{1}{\frac{2h_1}{\beta C_{p1}} + \frac{2h_2}{\beta C_{p2}}} \quad (3)$$

式中, h_1 为第一层介质厚度, h_2 为第二层介质厚度, C_{p1} 为第一层介质纵波波速, C_{p2} 为第二层介质纵波波速。

在IE法检测中,产生的应力波与三个重要参数有关:冲击持续时间,冲击钢球直径,冲击钢球冲击动能。根据Hertz弹性解^[14],当钢球冲击在介质表面时,冲击持续时间 t_c 可以表示为

$$t_c = 5.97 \left[\rho_s \left(\frac{1 - \nu_s^2}{\pi E_s} + \frac{1 - \nu_p^2}{\pi E_p} \right) \right]^{0.4} \cdot \frac{d}{2h^{0.1}} \quad (4)$$

式中, ρ_s 为钢球密度, ν_s 为钢球泊松比, E_s 为钢球弹性模量, ν_p 为介质泊松比, E_p 为介质弹性模量, d 为钢球直径, h 为钢球下落高度。钢球的材料参数: $\rho_s = 7850 \text{ kg/m}^3$, $E_s = 2 \times 10^{11} \text{ Pa}$, $\nu_s = 0.3$;混凝土材料参数: $\rho_p = 2400 \text{ kg/m}^3$, $E_p = 3 \times 10^{10} \text{ Pa}$, $\nu_p = 0.2$,材料参数代入公式(4)可以得出钢球在混凝土表面的冲击持续时间:

$$t_c = 0.0046 \text{ d} \quad (5)$$

根据Sansalone^[15]等人研究成果,在该钢球冲击下的最大有效频率 f_{\max} 可以表示为

$$f_{\max} = \frac{1.25}{t_c} \quad (6)$$

根据最大有效频率公式(6)取倒数,可以获得最小有效周期 T_{\min} :

$$T_{\min} = \frac{t_c}{1.25} \quad (7)$$

进一步地,可将该钢球冲击下产生应力波的最小有效应力波波长,利用公式表示为

$$\lambda_{\min} = C_p \cdot T_{\min} = \sqrt{\frac{E_p(1 - \nu_p)}{\rho_p(1 + \nu_p)(1 - 2\nu_p)}} \cdot \frac{t_c}{1.25} \quad (8)$$

根据公式(8)可知,冲击钢球在介质表面的冲击持续时间越短,由冲击产生的冲击应力波波长

越短。例如 3 mm 冲击钢球冲击混凝土表面时产生的最小有效应力波波长约为 41 mm, 20 mm 冲击钢球产生的最小有效应力波波长约为 274 mm, 最小有效应力波波长直接影响了 IE 法能够检测到的缺陷尺寸。根据衍射原理, 当障碍物的尺寸小于波长时, 会出现明显的衍射现象, 冲击回波法主要利用反射波对缺陷进行识别。因此应力波的反射非常重要。此外, 冲击能量亦不能过小, 否则反射信号尤其是较深处的缺陷反射信号不易被传感器接收到。IE 法常用的冲击钢球直径从几毫米到十几毫米不等, 针对本文所研究的灌浆缺陷尺寸与深度, 选定 3~10 mm 作为钢球直径的变化范围。

2 数值模拟研究

2.1 数值模型建立

建立了三个装配式剪力墙二维模型, 除套筒尺寸及套筒内钢筋直径不同外(分别为 18、20 与 25 mm), 其余参数均相同。其中钢筋直径为 25 mm 的剪力墙数值模型如图 2 所示。剪力墙模型宽度为 1 m, 厚度为 200 mm, 灌浆套筒保护层厚度为 30 mm, 套筒为双排布置, 每排套筒间距 100 mm。图 3 展示了模型局部详图, 一共分为四种测试工况: 双排密实、近侧密实、远侧密实与双排脱空。

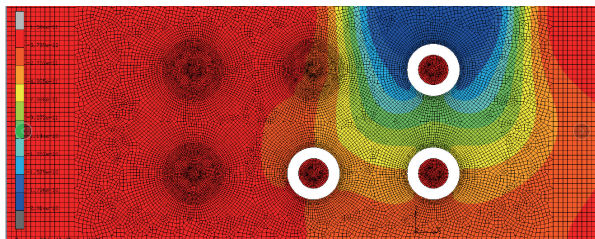
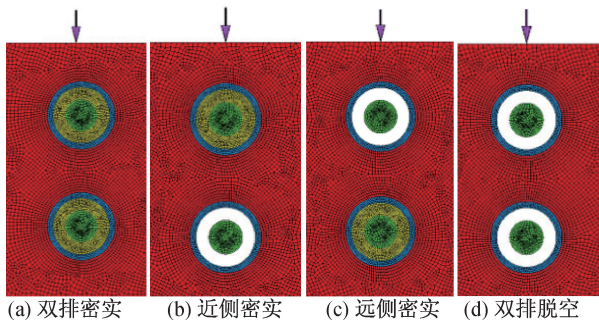


图 2 带灌浆缺陷的装配式剪力墙数值模型局部
Fig. 2 Local numerical model of prefabricated shear wall with grouting defects



(a) 双排密实 (b) 近侧密实 (c) 远侧密实 (d) 双排脱空

图 3 不同缺陷工况的局部详图(以 25 mm 钢筋为例)

Fig. 3 Partial details of different defect conditions (taking 25 mm steel as an example)

IE 法的数值模拟中, 网格的大小应符合应力波在单元内传播的尺寸要求。根据 Hsiao 等^[16]人的研究结果, 网格尺寸可取在介质内传播的应力波波长的 1/10。

$$l_{\min} \leq \frac{\lambda_{\min}}{10} \quad (9)$$

式中, l_{\min} 为网格最小单元尺寸, λ_{\min} 为最小有效应力波波长。考虑到模型的多介质属性, 取网格实际尺寸为计算值的 1/2。由于选定的冲击源最小直径为 3 mm, 对应的应力波波长为 41 mm, 网格尺寸取:

$$l_c = \frac{\lambda_{\min}}{10} \times \frac{1}{2} = \frac{41}{10} \times \frac{1}{2} \approx 2(\text{mm}) \quad (10)$$

表 1 给出了模型中采用的相关材料参数。

表 1 材料参数表

Tab. 1 Table of material parameters

材料	弹性模量 E/Pa	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比	纵波波速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
混凝土	3×10^{10}	2 500	0.2	3 651
套筒	2×10^{11}	7 850	0.3	5 856
灌浆料	3×10^{10}	2 500	0.2	3 651
钢筋	2×10^{11}	7 850	0.3	5 856

根据 IE 法基本原理, 采用半正弦函数冲击荷载表达式, 通过设置不同的冲击持续时间可以获得不同的冲击荷载, 本文使用的冲击持续时间分别为 12、20、40 μs , 以集中力的方式施加在有限元模型上。冲击荷载时程曲线与频谱见图 4、图 5。

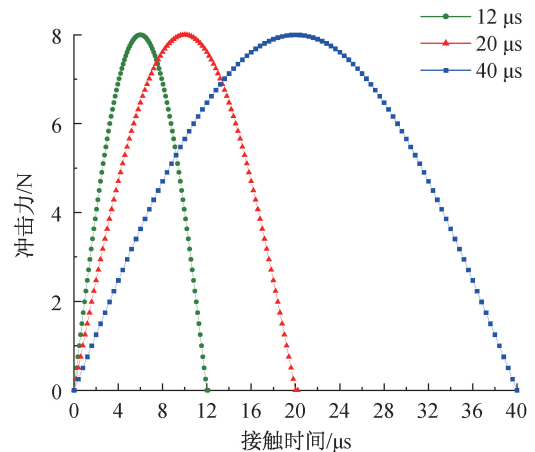


图 4 半正弦冲击力

Fig. 4 Half-sine impact load function

2.2 各界面特征频率理论值计算

应力波传播至剪力墙钢筋套筒灌浆料的材料介质分层情况较复杂, 假定每个材料分界处都存

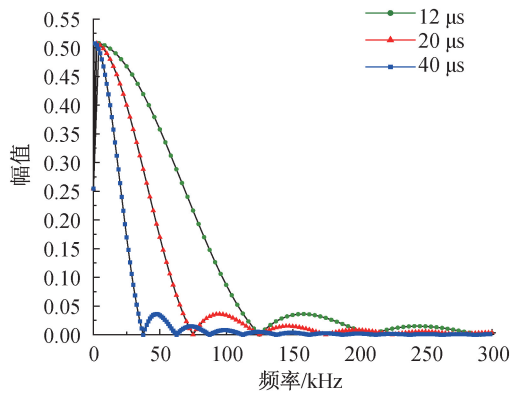


图5 半正弦冲击力频谱图

Fig. 5 Frequency spectrum of impact load

在冲击应力波的反射频率,如图6所示。图6中各界面的反射频率只是理论存在,并不是所有频率都能被检测出。本文所关注的是套筒内注浆质量,因此根据公式(1)~(3)计算出剪力墙厚度频率 f_{normal} 、套筒表面反射频率 f_1 与灌浆料表面反射频率 f_2 的理论计算值,见表2。

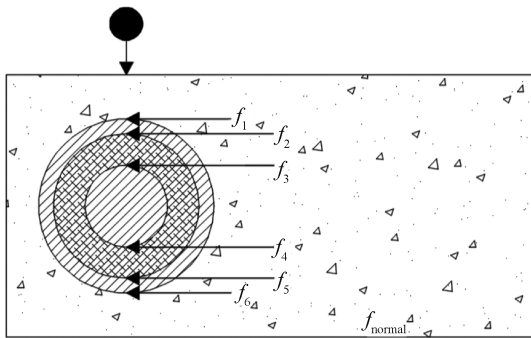


图6 可能存在的反射频率界面

Fig. 6 Possible reflection frequency interface

表2 各模型主要界面的反射频率理论计算值

Tab. 2 Theoretical calculation values of reflection frequency of the main interface of each model

构件	f_{normal} /kHz	f_1 /kHz	f_2 /kHz
18 mm 钢筋套筒构件	8.76	29.21	54.98
20 mm 钢筋套筒构件	8.76	29.21	54.45
25 mm 钢筋套筒构件	8.76	29.21	53.42

2.3 结果分析

获取离冲击点3 cm处节点的竖向加速度时程曲线,对信号进行快速傅里叶变换,得到冲击回波信号的频谱图,3种尺寸的钢筋套筒构件展现了相似的频谱特征规律,这里以20 mm钢筋套筒构件为例进行分析,如图7所示。

从图7(a)(b)可以看出,在12 μs冲击荷载下,灌浆密实与脱空工况在高频段出现较多的重

叠,峰值较多,分布频段较广;从图7(c)(d)可以看出,在20 μs冲击荷载下,无论是灌浆一侧还是无灌浆一侧,频谱图都存在正常部位板厚频率 $f_{normal} \approx 8.76$ kHz。灌浆密实一侧频谱图存在28 kHz左右的峰值频率,接近于 $f_1 = 29.21$ kHz,无灌浆一侧存在一个高度较低的40 kHz左右的频率。从以上频谱特征可以有效区别灌浆一侧和无灌浆一侧。从图7(e)(f)可以看出,在40 μs冲击荷载作用下,无论灌浆是否密实,信号频谱主要是以墙厚频率 f_{normal} 为主要特征,可以认为40 μs冲击荷载不利于检测套筒内部的灌浆情况。

3 试验研究

3.1 试件设计

通过图7可以看出,冲击荷载持续时间越短,频谱图的主频越高;冲击荷载持续时间越长,主频越低。在20 μs的冲击荷载下,双排密实与双排脱空、近侧密实与远侧密实的低频都为8.74 kHz,与正常部位的板厚频率8.76 kHz对应。通过上述分析,可以观察到不同冲击持续时间对回波信号频谱特性的影响。随着冲击持续时间的延长,频谱中的高频振幅越来越小,最终在冲击时间为40 μs时完全消失。说明冲击信号的对测试回波信号的频谱特征有很大的影响。为了研究冲击钢球直径对冲击回波信号特征频率的影响,分别制备了3、5、8和10 mm四种直径的冲击钢球,并用手敲击激发信号。在距离撞击点约3 cm处放置传感器进行信号采集。冲击钢球和试件如图8所示。套筒灌浆情况示意图如图9所示。套筒构件的具体几何尺寸见表3。在实验室建立灌浆套筒双排布置的装配式剪力墙模型。与有限元模型相似,缺陷设置方式分三类:第一类是双排套筒都灌入高强度灌浆料;第二类是双排套筒中的一排灌入高强度灌浆料,另一排套筒不灌入高强度灌浆料;第三类是双排套筒都不灌入高强度灌浆料。试件长度为800 mm,宽度为600 mm。剪力墙厚度为200 mm,每列套筒间距为200 mm,两排套筒间距为100 mm。套筒保护层厚度为30 mm(套筒最外层至混凝土外表面距离)。每种灌浆套筒剪力墙构件内部插入相对应直径的螺纹钢,灌浆料采用高强度灌浆料。图10展示了18 mm钢筋套筒剪力墙构件的具体设计尺寸,内部灌浆情况的剖视图,有助于理解构件内部的具体情况。试件模板由双向侧板及底板构成,在长边侧板上进行定位与开孔,并在其

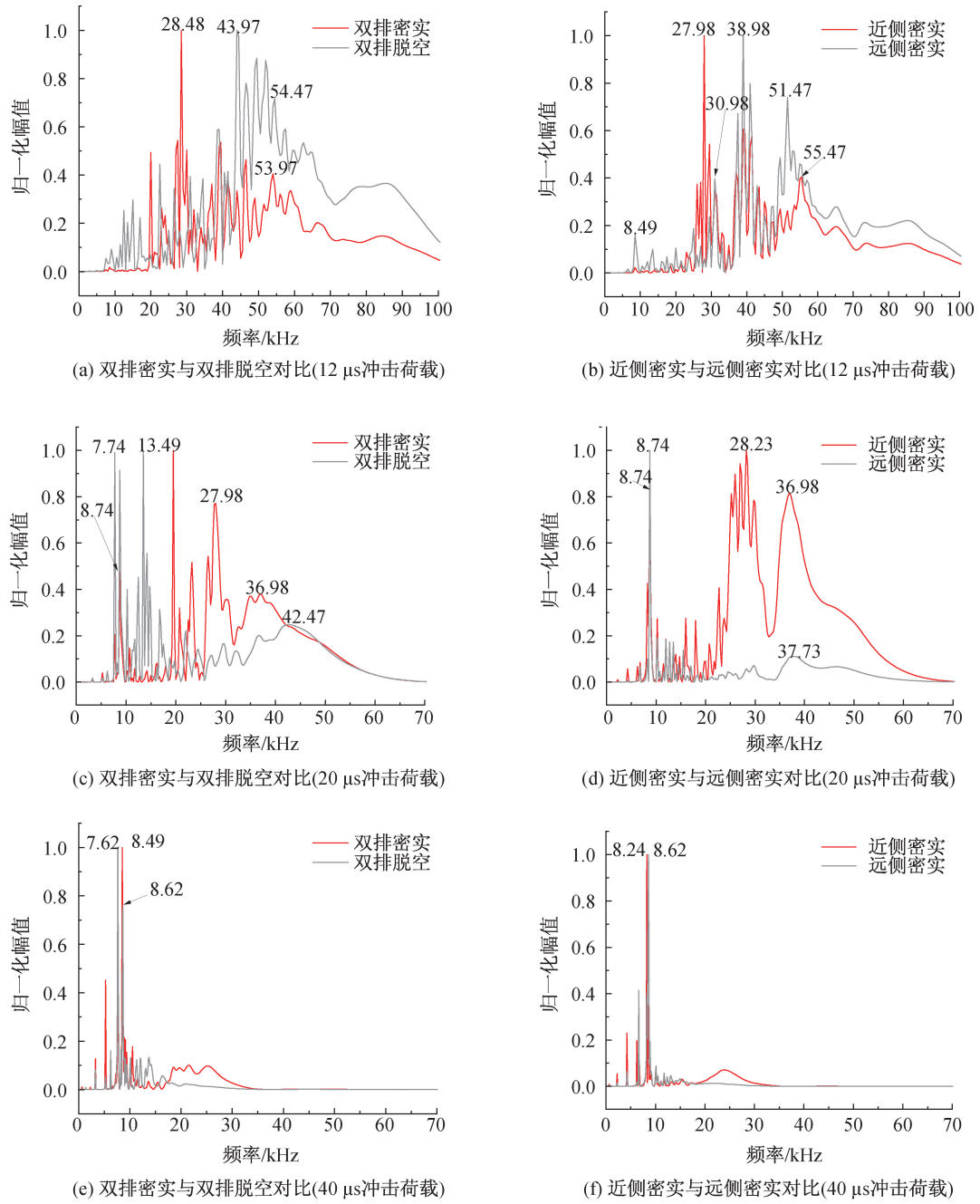
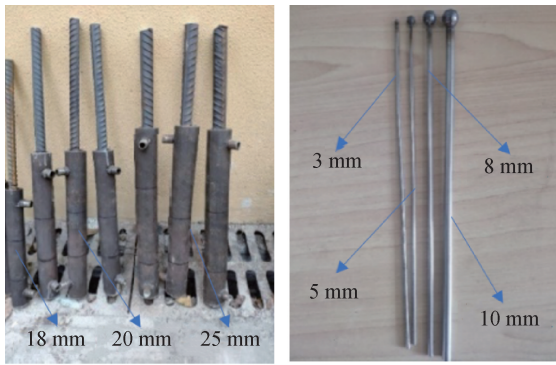


图 7 不同冲击荷载下 20 mm 钢筋套筒的频谱图

Fig. 7 Frequency spectrum of 20 mm rebar sleeve under different impact loads



(a) 不同直径钢球图 (b) 不同直径钢筋套筒

图 8 冲击钢球和试件

Fig. 8 Impact steel balls and sleeves

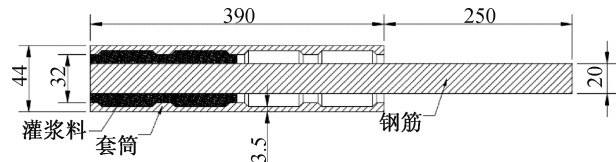


图 9 钢筋灌浆套筒灌浆示意图(单位:mm)

Fig. 9 Diagram of steel grouting sleeve(unit:mm)

一侧采用双层板分别钻取孔,以便于固定灌浆套筒以及筒内连接钢筋。由于灌浆时需使试件竖立,故在双层板侧使用橡胶及胶带封堵孔口,防止漏浆。

表3 套筒规格统计表

Tab. 3 Statistical table of sleeve specifications

钢筋直径 /mm	套筒外径 /mm	套筒净内径 /mm	套筒长度 /mm	套筒壁厚 /mm
18	41	30	348	3
20	44	32	390	3.5
25	53	38	480	4.5

3.2 冲击回波信号频域分析

3种尺寸的钢筋套筒构件展现了相似的频谱特征规律,这里以25 mm钢筋套筒构件为例进行分析,如图11所示。

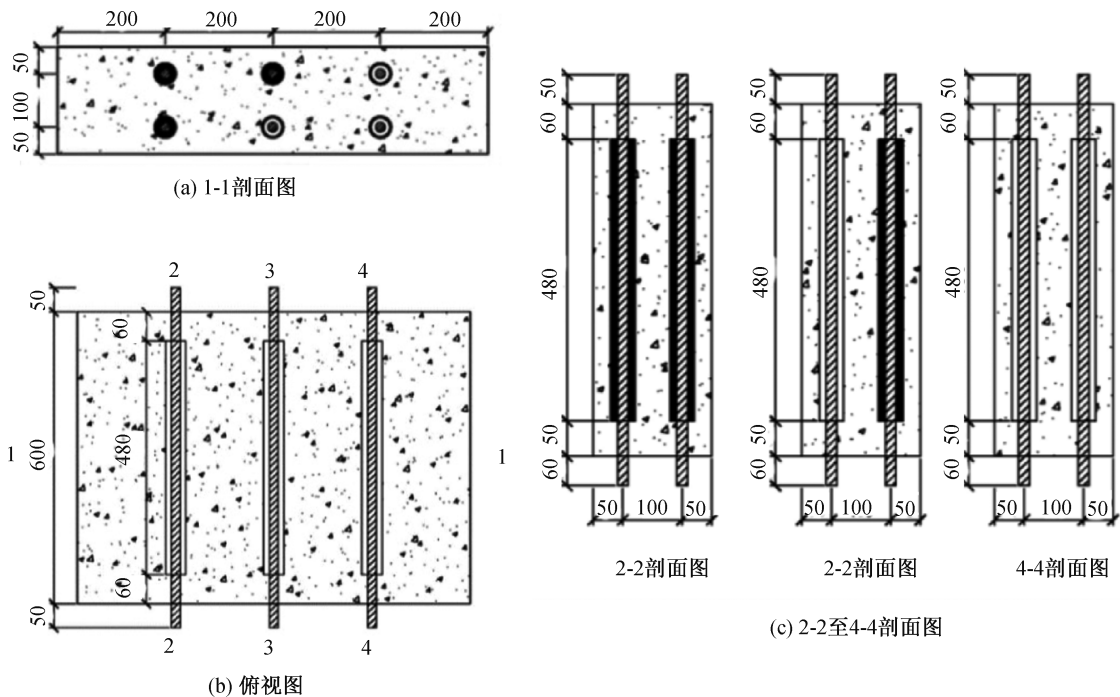
通过比较不同尺寸钢球的冲击信号频域可以发现,3 mm钢球与5 mm钢球的回波信号频谱图均包含高频成分,而8 mm、10 mm钢球的信号主要在低频,这与数值模拟结果一致。其中,从图11(a)(b)中可知无论灌浆密实与否,3 mm钢球冲击下均产生多峰值的高频成分;从图11(c)(d)中则能够较为清晰地区分灌浆密实与脱空工况;图11(e)~(h)的频谱图中仅存在低频成分,无法对灌浆密实程度进行区分。

3.3 冲击回波信号时频分析

时频分析是在遵循测不准原理的前提下,同时获得信号的频率信息和时间信息的一种方法。

常用的时频域分析方法有短时傅里叶变换和小波变换。傅里叶变换对频率的分辨率最高,但是对于不平稳突变信号效果不理想。用时频域分析方法对冲击回波信号进行分析,可以得到冲击回波信号在时间上的频率方法,有利于辨认多层介质缺陷情况。小波变换是一种时频表示方法。其基本思想是认为自然界中各种信号中不同频率的分量具有不同的时变特征。通常,低频分量的频谱特性随时间缓慢变化。随着时间的推移,高频分量的频谱特性变化更快。因此,根据这一规律对时频轴进行非均匀划分,可以在遵循测不准原理的前提下,在不同的时频域获得更合适的时频分辨率。本文选取25 mm钢筋套筒构件的冲击回波信号,对其进行小波变换分析,小波函数选用cmor4-1。变换结果如图12所示。

对比图12(a)~(d)发现,双排密实与近侧密实的时频图比较相似,均在8 kHz左右出现墙厚频率带(图12(a)(b)中绿色虚线框所示部分),在25 kHz左右出现高频带(图12(a)(b)中红色虚线框所示部分)。而远侧密实与双排脱空的时频图较为相似。此现象说明远排套筒的灌浆情况对近侧套筒的冲击回波信号影响极小,本文所采用方法仅能判断靠近测试点一侧的套筒灌浆质量,若要测试远侧套筒,需要更换测试面。



注:2-2为双排套筒都灌入灌浆料;3-3为一排套筒灌入灌浆料,另一排套筒不灌入灌浆料;4-4为双排套筒都不灌入灌浆料。

图10 18 mm钢筋灌浆套筒CAD设计图(单位:mm)

Fig. 10 CAD design diagram of 18 mm steel grouting sleeve (unit: mm)

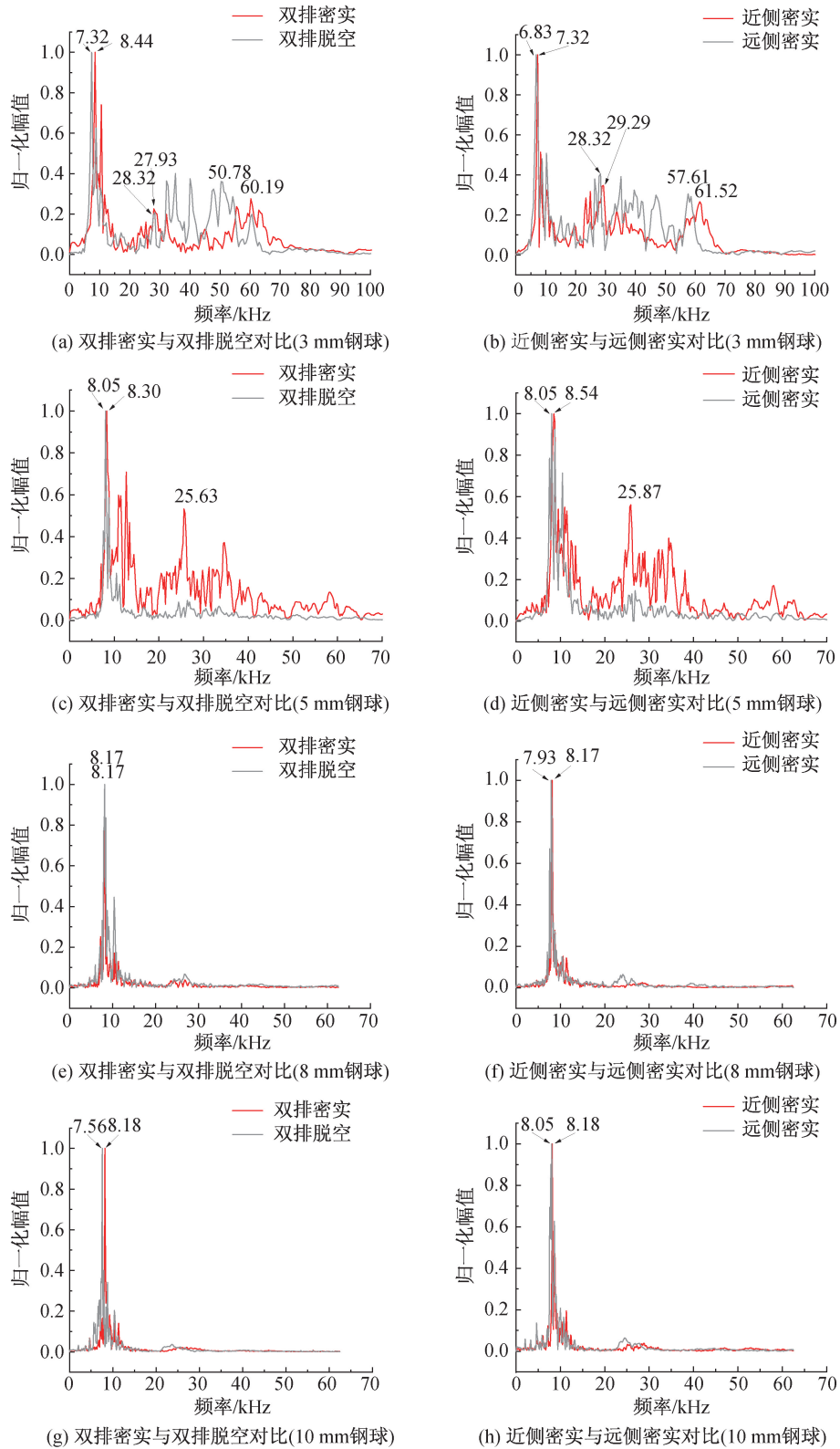


图 11 不同直径的冲击钢球作用下 25 mm 钢筋套筒频谱图

Fig. 11 Frequency spectrum of 25 mm rebar sleeve under different impact steel balls

4 结论

1) 冲击荷载对回波信号的频率特征有较大影

响。冲击持续时间越短,则回波信号包含的界面反射高频频率信息越多。试验结果表明,在 8、10 mm 冲击钢球作用下,频谱图中只存在墙厚频

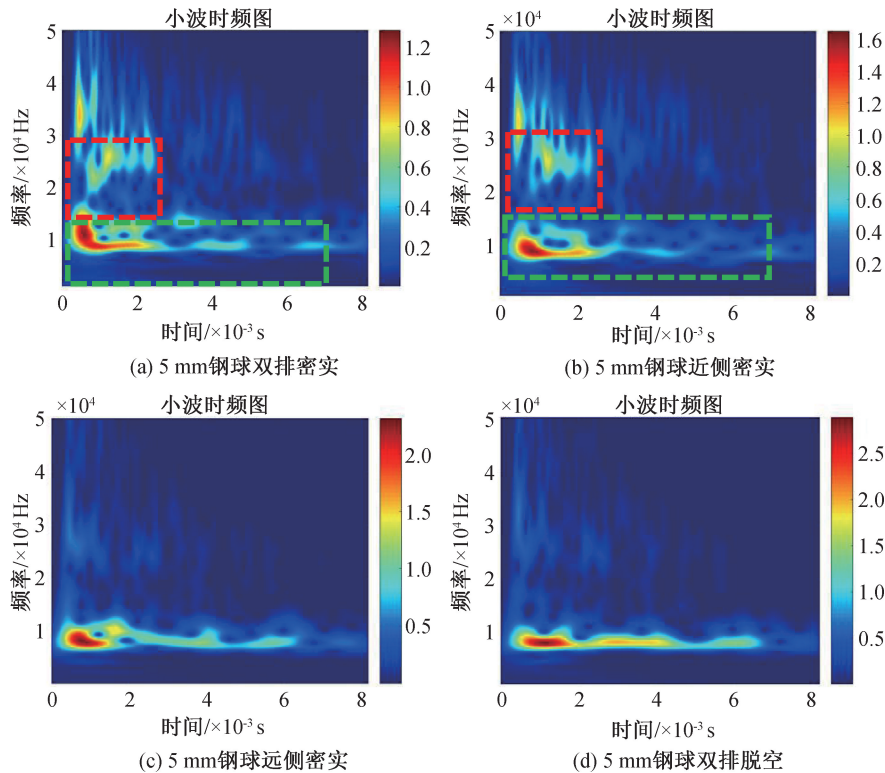


图 12 5 mm 钢球冲击下的 25 mm 钢筋套筒时频图

Fig. 12 Time-frequency diagram of 25 mm rebar sleeve under 5 mm steel ball

率,不能识别 18、20、25 mm 钢筋套筒中的灌浆缺陷,5 mm 冲击钢球可以有效地区分套筒内部的灌浆情况,并且室内试验结果与有限元分析结果吻合。

2) 冲击回波试验及有限元分析结果显示,对于双排布置的套筒,下排套筒的灌浆情况对检测上排套筒内部是否存在灌浆料几乎没有影响,可以较准确地判断靠近测试点一侧的套筒灌浆质量,若要测试远侧套筒,需要更换测试面。

参考文献:

- [1] 姜绍飞,蔡婉霞. 灌浆套筒密实度的超声波检测方法[J]. 振动与冲击, 2018, 37(10): 43-49.
- [2] LI D, LIU H. Detection of Sleeve Grouting Connection Defects in Fabricated Structural Joints Based on Ultrasonic Guided Waves[J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(8): 1-12.
- [3] 高润东,李向民,张富文,等. 基于 X 射线工业 CT 技术的套筒灌浆密实度检测试验[J]. 无损检测, 2017, 39(4): 6-11.
- [4] WU C, YANG C, MA S, et al. Feasibility Study on Grouting Compactness Detection in Sleeves Using Piezoelectric Transducers[J]. Applied Sciences-Basel, 2020, 10(1): 1-11.
- [5] XU B, FAN X, WANG H, et al. Experimental Study on Grout Defects Detection for Grouted Splice Sleeve Connectors Using Stress Wave Measurement[J]. Construction and Building Materials, 2021, 274: 121755.
- [6] 梁臣,冯海林,方益明,等. 基于冲击回波的原木内部空洞位置检测方法研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(11): 265-272.
- [7] JIANG W, XIE Y, WU J, et al. Influence of Age on the Detection of Defects at the Bonding Interface in the CRTS III Slab Ballastless Track Structure Via the Impact-Echo Method[J]. Construction and Building Materials, 2020, 265: 120787.
- [8] KANG J M, SONG S, PARK D, et al. Detection of Cavities Around Concrete Sewage Pipelines Using Impact-Echo Method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 65: 1-11.
- [9] LIN Y F, YE J W, LO C M. Application of Impact-Echo Method for Rockbolt Length Detection[J]. Construction and Building Materials, 2022, 316: 125904.
- [10] 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.
- [11] COLLA C, LAUSCH R. Influence of Source Frequency on Impact-Echo Data Quality for Testing Concrete Structures[J]. Ndt & E International, 2003, 36(4): 203-213.

(下转第 20 页)

参考文献:

- [1] 蒋永明,陈志强,钱惠军. 预制混凝土板桩在内河航道中的应用研究[J]. 山西建筑,2010,36(12):359-360.
- [2] 张惠英,丁玉森. 砂浆灌注板桩防渗墙在白屈港套闸工程中的应用[J]. 人民长江,1997(2):24-25.
- [3] 徐智刚,陈龙,王福喜. U型板桩振动施工动力响应特性现场试验研究[J]. 水利建设与管理,2018,38(1):34-40.
- [4] BYOUNGIL K, JAEKYU K, SEUNGHYUN L, et al. Driveability Analysis of U-type Sheet Pile Using WEAP Program[J]. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 2006, 7(4):671-678.
- [5] 罗绍武. 浅谈先张法U型预应力混凝土板桩在水利工程中的应用[J]. 湖南水利水电,2016(6):26-29.
- [6] 周海斌. 先张法预应力钢筋混凝土U型板桩作为支护桩的应用研究[D]. 苏州:苏州科技学院,2014.
- [7] 葛波. 太嘉河堤防护岸U型板桩施工技术应用探析[J]. 安徽建筑,2020,27(5):58-60.
- [8] 郭英. 极寒地质条件下波浪桩钻孔成桩设备选型及施工技术研究[J]. 铁道建筑技术,2018(12):29-33.
- [9] 钟可圳. 中小河流综合治理工程PPP项目中波浪桩施工技术的应用[J]. 工程技术研究,2020,5(12):112-113.
- [10] 黄建华,彭浪,朱永涛. 先张法预应力混凝土波形板桩力学性能研究[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(3):688-696.
- [11] 闫彭彭. 预制波浪桩在堤防加固工程中的应用[J]. 水科学与工程技术,2020(1):60-62.
- [12] SEED H B, REESEL C. The Action of Soft Clay Along Friction Piles[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1957, 122(1):731-754.
- [13] ROY M, BLANCHET R, TAVENAS F, et al. Behaviour of a Sensitive Clay During Pile Driving[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1981, 18(2):67-85.
- [14] YANG J, THAM L G, LEE P K K, et al. Observed Performance of Long Steel H-piles Jacked into Sandy Soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE, 2006, 132(1):24-35.
- [15] 张正旋. 预应力钢绞线超高强混凝土H型桩弯剪性能研究[D]. 杭州:浙江大学,2019.
- [16] 雷华阳,李肖,陆培毅,等. 管桩挤土效应的现场试验和数值模拟[J]. 岩土力学,2012,33(4):1006-1012.
- [17] 赵少飞,戴志广,刘鑫,等. 扰动土-结构接触面抗剪强度特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(1):67-71+228.
- [18] 李昕睿. 考虑位移效应刚性挡土墙被动土压力计算方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2010.
- (责任编辑 王利君)
-
- (上接第8页)
- [12] YAO F, ABULIKEMU A. Effect of Impact Source on Detection Quality in Impact Echo Testing of Sleeve Grouting[J]. Materials Testing, 2020, 62(9):927-935.
- [13] JIANG W, XIE Y, WU J, et al. Identifying Bonding Interface Flaws in CRTS III Type Ballastless Track Structure Using the Impact-Echo Method[J]. Engineering Structures, 2021, 227:111429.
- [14] SOLANKI M T, VAKHARIA D. Extending Hertz Equation for an Elastic Contact Between a Layered Cylindrical Hollow Roller and Flat Plate Through an Experimental Technique[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2017, 69(2):312-324.
- [15] SANSALONE M, STREETT W. Impact-Echo. Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry[M]. US: Bullbrier Press, 1997.
- [16] HSIAO C, CHENG C, LIOU T, et al. Detecting Flaws in Concrete Blocks Using the Impact-Echo Method[J]. Ndt & E International, 2008, 41(2):98-107.
- (责任编辑 王利君)