

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201905011

单排非连续排桩几何参量对减隔振效果的影响

贺涛¹, 刘晶磊^{2,3,4}, 刘桓^{2,3,4}, 刘鹏泉^{2,3,4}, 张冲冲^{2,3,4}

(1. 中交一公局第三工程有限公司, 北京 100024; 2. 河北省土木工程诊断、改造与抗灾重点实验室, 河北 张家口 075000; 3. 河北建筑工程学院土木工程学院, 河北 张家口 075000; 4. 河北省寒冷地区交通基础设施工程技术创新中心, 河北 张家口 075000)

摘要: 为了研究砂土地基中单排非连续排桩几何参量对减隔振效果的影响, 以振动波在岩土介质中的传播特性为理论基础, 构造评价隔振效果的无量纲指标 A_{RC} (加速度消耗率) 和 S_p (面积增加比), 结合地表加速度消耗率等值线图, 分析 A_{RC} 分别为 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 时对应的排桩几何参量与 S_p 之间的关系。结果表明: 各 A_{RC} 条件下, 桩后屏蔽区面积均表现为长桩时较大, S_p 值分布于 0%~9%; 桩间距对 S_p 的影响表现为小间距时桩后屏蔽区面积较大, S_p 分布范围在 0%~28%; 振源距对 S_p 的影响与桩长相反, S_p 值处于 5%~12%; 关于布置形式对 S_p 的影响, 振源正对桩间中心这一布置形式在桩长和间距变化时对 S_p 的影响较大, 而在振源距这一参量变化时, 布置形式的差异对 S_p 值的影响不存在明显区别。

关键词: 砂土地基; 单排桩; 浅层隔振; 隔振效果

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)05-1045-07

Influence of Geometric Parameters of Single Row Discontinuous Row Piles on Vibration Reduction and Isolation

HE Tao¹, LIU Jinglei^{2,3,4}, LIU Huan^{2,3,4}, LIU Pengquan^{2,3,4}, ZHANG Chongchong^{2,3,4}

(1. The No. Three Engineering Co., Ltd. of CCCC First Highway Engineering Co., Ltd, Beijing 100024, China;

2. Hebei Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Diagnosis, Renovation and Disaster Relief, Zhangjiakou 075000, China; 3. Hebei University of Architecture, Hebei Institute of Civil Engineering and Architecture, Zhangjiakou 075000, China; 4. Hebei Cold Area Transportation Infrastructure Engineering Technology Innovation Center, Zhangjiakou 075000, China)

Abstract: In order to study the influence of geometric parameters of single row discontinuous row piles on vibration reduction and isolation, dimensionless indicators A_{RC} (Acceleration consumption rate) and S_p (Area increase ratio) that evaluates the vibration isolation effect was constructed based on the propagation characteristics of vibration waves in a geotechnical medium. Combined with the equipotential line diagram of acceleration consumption rate, the relationship between the geometric parameters of corresponding row piles and S_p in A_{RC} of 0.2, 0.3, 0.4, and 0.5 is analyzed. The results show that under various A_{RC} conditions, the area of the shielded area behind the pile was large when the pile was

* 收稿日期: 2019-05-07; 修回日期: 2019-08-30

作者简介: 贺涛(1981—), 男, 高级工程师。主要从事道路工程方面的研究。E-mail: 35490151@qq.com

通讯作者: 刘晶磊(1981—), 男, 副教授, 博士后。主要从事铁路交通振动响应与相应减隔振措施方面的研究。

E-mail: kingbest_1118@163.com

long, and S_p values were distributed between 0%~9%. The influence of pile spacing on S_p was shown as the shielding area behind the pile was large when the pile spacing was small, and the distribution range of S_p was 0%~28%. The influence of vibration source distance on S_p was opposite to that of the pile length, and the S_p value was between 5%~12%. As for the influence of layout pattern on S_p , when the vibration source was on the center between piles, the change of pile length and spacing had a great influence on S_p . However, when the parameter of vibration source distance changes, the layout pattern had no significant influence on the S_p value.

Keywords: sand foundation; single row pile; shallow layer vibration isolation; effect of vibration isolation

引言

隔振屏障是降低机械运作、轨道交通、土建施工等引起的振动的主要方式,其类别有多种,其中以排桩、沟槽及填充沟槽较多,可分为连续型隔振屏障和非连续型隔振屏障两类^[1]。目前,关于地下混凝土连续墙、沟槽等类型的隔振屏障试验研究及理论分析已经趋于成熟,具有较好的隔振效果^[2],但有些地区工程地质条件复杂,设置连续型屏障施工难度较大,此时,大多选择设置以空心或实心排桩为主的非连续型屏障,其制备布桩范围较广,施工难度较低,且具有受工程地质条件限制较少,稳定度较高等优点。

关于非连续型隔振屏障,国内外学者均进行了大量的探究。韦红亮等^[3]采用有限元方法建立列车-大地-排桩耦合模型,得出单排桩的材料参数及桩径、桩深等几何参数对隔振效果规律影响较大。时刚等^[4]通过边界元法对饱和多孔介质地基隔振效果进行研究,结果表明:单排桩隔振屏障可以有效的衰减瑞利波,且桩径、桩身及材料剪切模量越大,屏障隔振效果越好。徐满清^[5]采用虚拟桩法,探究了饱和地基移动荷载作用下单排桩的被动隔振效果,结果表明:排桩的隔振效果会受到移动荷载速度的影响,其他条件一定时,移动荷载速度越慢,单排桩隔振效果越好。J. Aviles等^[6-7]通过波函数展开法探究了P波、瑞利波、SH波及SV波等对单排桩隔振规律的影响效果。S. E. Kattis等^[8]通过三维BEM数值分析,探究了单排桩的隔振规律,但出现了分析计算时间过长,且计算量过大的问题,基于此现象,S. E. Kattis等^[9]通过对复合材料力学相关方法的理论分析,提出单排桩隔振可近似于填充沟隔

振,结果表明:可以在保证计算结果的基础上较大程度减小计算量,缩短分析时间。刘晶磊等^[10]分析比较了轨道交通非连续隔振屏障的隔振规律,得出混凝土桩的隔振效果比隔振井要好。

综上所述,关于排桩隔振规律的探究,多数学者采用较多的是理论分析及数值模拟计算的方法,试验验证较少,因此本文以验证及完善当前学者理论数值分析结果为目的进行探究,主要分析了均质地基中,非连续单排桩隔振屏障不同几何参数对隔振效果的影响规律。

1 相关理论

波是指将某一物理量的振动在空间逐点传递时形成的运动,根据振动的方向和波的传播方向又可以将波分为纵波、横波和表面波等,其在介质中传播时具有叠加、衍射、折射等性质。这些振动波在生活中不仅影响仪器测量和设备加工的精度^[11],而且也会对周围居民的生活和工作环境产生不良影响,严重时,还会威胁建筑结构的安全和稳定。工程建设时,通过设置隔振屏障来进行振动波的阻碍和吸收,但实际中隔振屏障并不能够完全吸收和阻断振动波的传播,存在多种作用机制可使振动波“穿越”屏障传播到屏障后方区域中。因此,屏障隔振效果的优劣是以传递到屏障后方振动波能量的大小作为衡量指标,隔振屏障后方区域存在的振动波能量越少屏障的隔振效果越好。

以非连续隔振屏障对点源振动的隔离为例,振动波“穿越”隔振屏障的方式除常见的反射^[12]作用外,还存在绕射^[13]、透射^[14]及散射^[15]方式,在“振源-地基土-隔振屏障-地基土”这一作用体系中存在有反射波、绕射波、透射波、散射波,如图1所示。

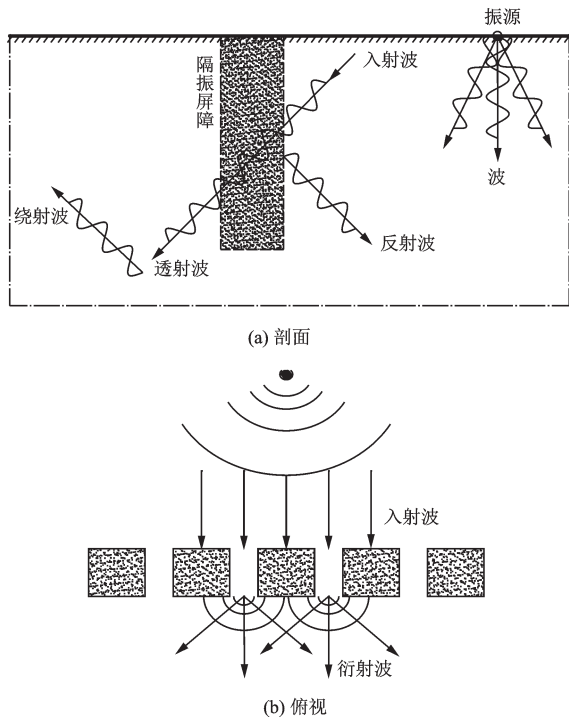


图1 振动波传播示意

Fig.1 Schematic diagram of vibration wave propagation

2 试验概况

根据振动波的传播规律,对于传统的振动控制措施而言,中低频振动能量相对高频需要经过更长的传播距离才能实现足够的衰减。为此国内外学者通过理论算法提出了一些隔振措施,可以在一定的空间范围内有效的减小中低频的能量。受此启发,本文试验采用60 Hz的正弦波作为激励信号,模拟列车运行过程中在某一点产生的振动,通过试验进一步验证理论,并为工程实际问题提供参考。

本文为了减小机械运作、人工活动等引起的振动对试验的扰动,将试验场地选择在远离市区的均质地基,试验场地中砂土地基的尺寸为长3 m×宽2 m×高1.5 m,待场地砂土沉降稳定后,整平地表,开展相关试验。

试验所用到的主要设备是一套型号为WS-Z30的振动台组合体系。这套组合体系主要由信号发生器及放大器、激振器、加速度传感器、数据采集器及控制仪、ICP适配器等组成。激振器控制机柜及信息采集器如图2所示。

试验隔振屏障采用单排桩形式,试验用桩由C30混凝土浇筑而成,其截面尺寸为0.1 m×0.1 m,长度分为0.3 m和0.5 m两种。试验采用加速度传感器11个,其中1个为基准传感器,其余供试验数

据采集用。传感器测量范围为50 m/s²,电荷灵敏度为4 pc/ms⁻²,本试验中采样时间控制为3 s,采样频率控制在5 000 Hz。传感器场地布置如图3所示。



图2 设备

Fig.2 Photograph of equipments



图3 传感器场地布置

Fig.3 Layout of sensors in the field

3 试验方案

图4、5分别表示试验场地及振源中心与排桩相对位置示意图。本文试验开展区域为2 m(长)×1.6 m(宽),用于布桩及数据采集,分析排桩不同几何参数对隔振效果影响规律。激振器布置在试验区域的中心长轴线上,排桩的中心轴线与信号数据采集区短轴平行。排桩的长度定义为桩长 h ;排桩之间的净距定义为桩间距 a ;排桩区与激振器之间

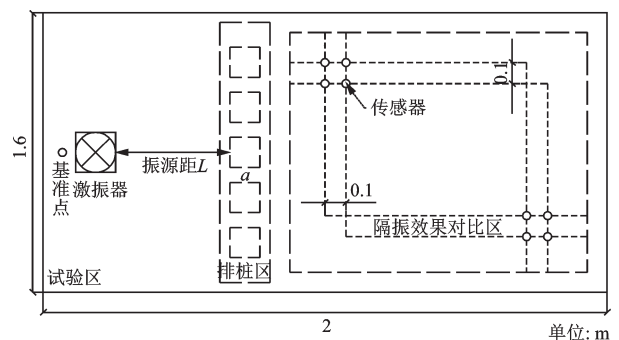


图4 试验场地示意

Fig.4 Schematic diagram of the test site

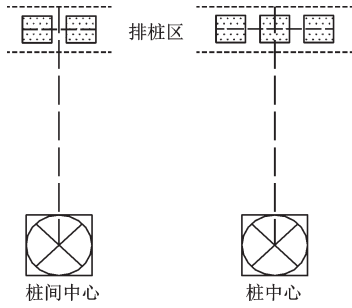


图5 振源中心与排桩相对位置

Fig.5 Relative positions of the vibration source center and row piles

的净距定义为振源距 l 。

由于试验测点数量较多,因此本试验按照振源距由小到大的顺序依次对试验场地中不同振源距位置区域进行加速度数据采集工作,为了校准数据及减小误差,在距激振器 0.1 m 位置处布设基准传感器,采集基准加速度。

本试验以振幅损耗率 A_{RC} 作为隔振效果评价指标,如式(1)所示:

$$A_{RC} = \frac{A_{MP}}{A_B} \quad (1)$$

式中, A_{MP} 为不同测点处加速度振幅最大值; A_B 为基准点处加速度振幅最大值。

A_{RC} 值域下等值线中所包络的面积增加比以 S_p 表示,计算公式如式(2)所示:

$$S_p = \frac{S_2 - S_1}{S} \quad (2)$$

式中, S_1 为排桩几何参数取值小的参数面积; S_2 为同 S_1 相同参数类别影响下取值大的参数面积; S 为测试区域总面积。

为探究单排非连续排桩的几何参量对减隔振效果的影响,本文制定相关试验工况进行探究,试验变量见表 1。

表 1 试验变量

Table 1 List of test variables

试验工况	桩数/根	桩长 h /m	桩间距 a /m	振源距 l /m	振源正对位置
工况 1	2	0.3	0.1	0.2	桩间中心
工况 2	2	0.5	0.1	0.2	桩间中心
工况 3	2	0.3	0.1	0.4	桩间中心
工况 4	2	0.3	0.3	0.2	桩间中心
工况 5	3	0.3	0.1	0.2	桩中心
工况 6	3	0.5	0.1	0.2	桩中心
工况 7	3	0.3	0.1	0.4	桩中心
工况 8	3	0.3	0.3	0.2	桩中心

4 试验结果与分析

本文通过采集不同测点位置处的加速度值绘制二维等值线图,计算振幅损耗率 A_{RC} 及面积增加比 S_p ,分析其变化规律,探究单排非连续隔振屏障不同几何参数变化对隔振效果的影响规律。

4.1 桩长 h

为了探究桩长 h 变化对单排桩隔振规律的影响,对工况 1、工况 2 和工况 5、工况 6 进行对比分析,试验结果如图 6 所示。

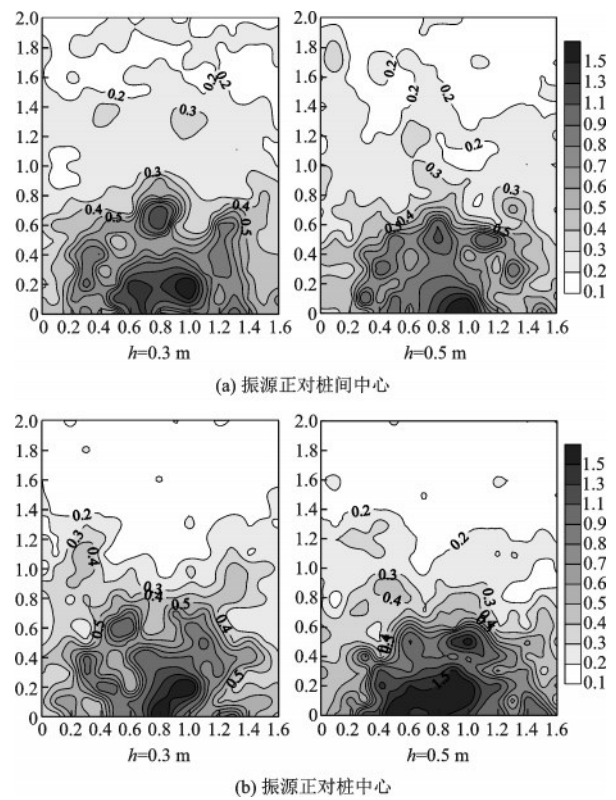


图 6 桩长影响下的等值线

Fig.6 Contour map under the influence of pile length

由图 6 可知,桩长 h 为 0.3 m 时,单排桩隔振屏障后方范围区域 A_{RC} 较小值的等值线包络范围较小,此时,该桩长参数下单排桩的隔振效果相对较差;桩长 h 为 0.5 m 时,屏障后方范围区域 A_{RC} 较小值的等值线包络范围明显变大,单排桩的隔振效果变好。但是,由于隔振屏障的中轴线与振源的相对位置存在差异,发现,当振源正对桩间中心时,在单排桩屏障中轴线位置区域 A_{RC} 值较大,出现了波的叠加现象,较轴线两侧位置区域隔振效果明显较

差,当振源正对桩中心时,在中轴线两侧位置区域 A_{RC} 值较大,存在波的叠加,其隔振效果较中轴线位置隔振效果较差。

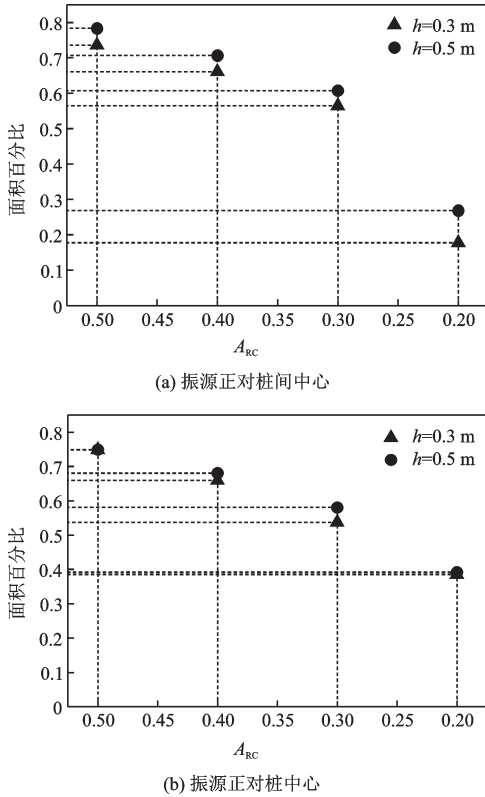


图7 桩长影响下的面积百分比

Fig.7 Area percentage under the influence of pile length

由图7可知, A_{RC} 值为0.2~0.5, 桩长在0.3 m增大到0.5 m时, 包络面积占比增大, 单排桩隔振效果也随之变好, 可发挥较好的隔振作用。如图7所示, 当 A_{RC} 值取0.2、0.3、0.4、0.5, 振源正对桩间中心时, 面积增加比 S_p 分别为9.05%、4.27%、4.58%、4.75%; 当振源正对桩中心时, 面积增加比 S_p 分别为0.71%、4.34%、2.20%、0.04%。综上所述, 桩长由0.3 m增大到0.5 m, 振源正对桩间中心的单排桩屏障 S_p 增幅比振源正对桩中心时 S_p 大, 由此可知, 当振源正对桩间中心时, 桩长的变化对单排桩隔振效果的影响相对较大。

4.2 桩间距 a

为了探究桩间距 a 变化对单排桩隔振规律的影响, 对工况1、工况4和工况5、工况8进行对比分析, 试验结果如图8所示。

图8可知, 桩间距 a 为0.1 m时, 单排桩隔振屏

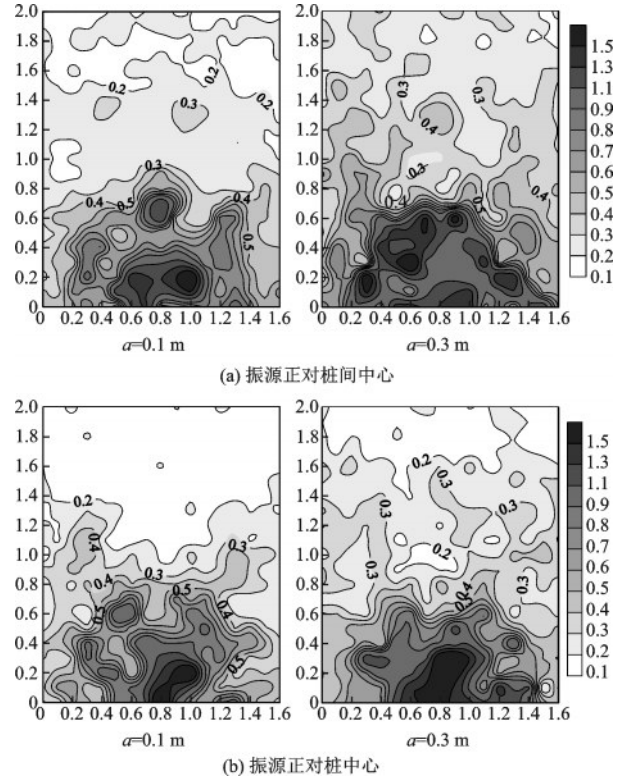


图8 桩间距影响下的等值线

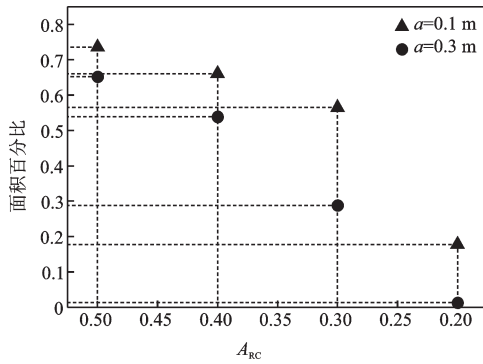
Fig.8 Contour map under the influence of pile spacing

障后方屏蔽范围区域较为统一, 且主要集中在中轴线位置区域, 隔振效果较好; 桩间距 a 为0.3 m时, 屏障后方屏蔽范围区域较为分散, 且 A_{RC} 值较大值包络范围区域面积明显增大, 此时, 隔振效果变差。由此可知, 当桩间距由0.1 m增大到0.3 m时, 单排桩隔振屏障的整体隔振作用出现了明显的衰减。

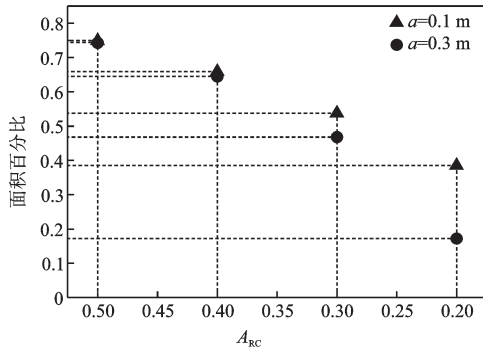
图9可知, A_{RC} 值为0.2~0.5, 桩间距在0.1 m增大到0.3 m时, 包络面积占比减小, 单排桩隔振效果也随之变差, 不能发挥较好的隔振作用。由图9可知, 当 A_{RC} 值取0.2、0.3、0.4、0.5, 振源正对桩间中心时, 面积增加比 S_p 分别为-16.51%、-27.69%、-12.23%、-8.35%; 当振源正对桩中心时, 面积增加比 S_p 分别为-21.27%、-6.90%、-1.41%、-0.55%。综上所述, 桩间距由0.1 m增大到0.3 m, 振源正对桩间中心的单排桩屏障 S_p 增幅比振源正对桩中心时 S_p 大, 由此可知, 当振源正对桩间中心时, 桩间距的变化对单排桩隔振效果的影响相对较大。

4.3 振源距 l

为了探究振源距 l 变化对单排桩隔振规律的影响, 对工况1、工况3和工况5、工况7进行对比分析,



(a) 振源正对桩间中心



(b) 振源正对桩中心

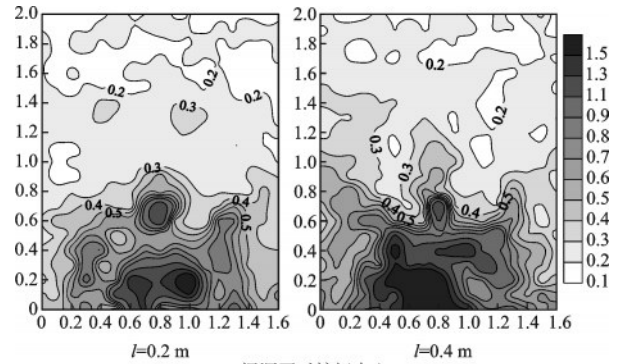
图9 桩间距影响下的面积百分比

Fig.9 Area percentage under the influence of pile spacing

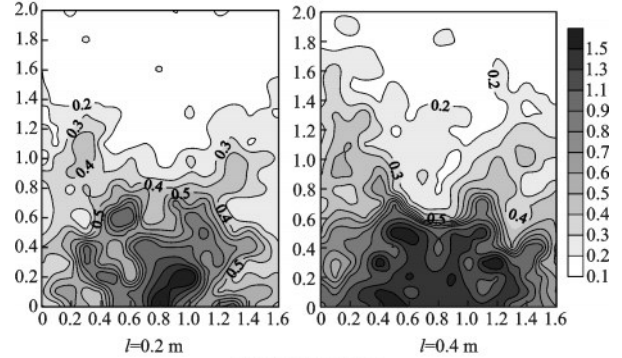
试验结果如图10所示。

由图10可知,振源距 l 为0.2 m时,单排桩隔振屏障后方范围区域 A_{RC} 较小值的等值线包络范围较大,且随着距屏障距离的增大, A_{RC} 值为0.1~0.3也随之增大,此时,该振源距参数下单排桩的隔振效果相对较好;振源距 l 为0.4 m时,屏障后方范围区域 A_{RC} 较小值的等值线包络范围减小,且分布区域变的较为分散, A_{RC} 较大值的等值线包络范围呈后移趋势,此时,该振源距参数下单排桩的隔振效果相对变差。

图11可知, A_{RC} 值为0.2~0.5,振源距在0.2 m增大到0.4 m时,包络面积占比减小,单排桩隔振效果也随之变差。当 A_{RC} 值取0.2、0.3、0.4、0.5,振源正对桩间中心时,面积增加比 S_p 分别为-7.11%、-9.17%、-5.37%、-7.13%;当振源正对桩中心时,面积增加比 S_p 分别为-11.39%、-6.87%、-8.71%、-8.45%。综上所述,振源距由0.2 m增大到0.4 m,振源正对桩间中心的单排桩屏障 S_p 增幅和振源正对桩中心时 S_p 增幅相差不大,由此可知,当振源正对桩间中心或者正对桩中心时,振源距的变化对单排桩隔振效果的影响无较大差异。



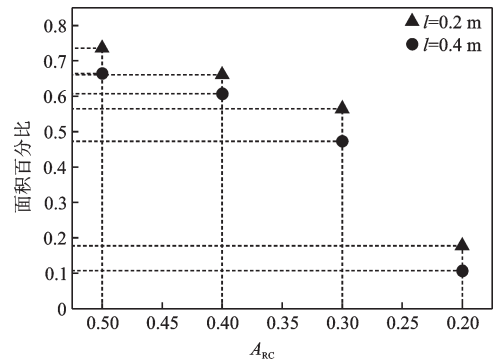
(a) 振源正对桩间中心



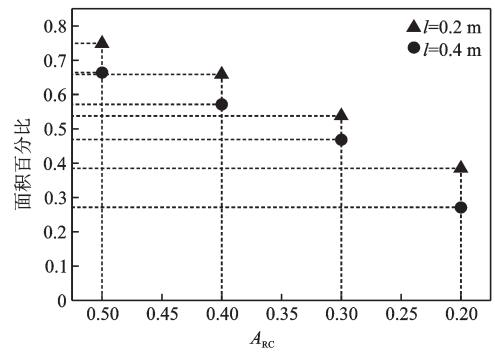
(b) 振源正对桩中心

图10 振源距影响下的等值线

Fig.10 Contour map under the influence of vibration source distance



(a) 振源正对桩间中心



(b) 振源正对桩中心

图11 振源距影响下的百分比

Fig.11 Area percentage under the influence of vibration source distance

5 结 论

通过开展室外试验,绘制 A_{RC} 二维等值线图,探究单排非连续排桩不同几何参量对减隔振效果的影响规律,主要研究成果如下:

(1) 桩长参数变化对单排桩屏障隔振效果影响较大,且桩长取较大值时,隔振效果较好;振源与排桩区的相对位置对隔振规律有一定影响,即振源正对桩间中心与振源正对桩中心两种布桩方式下,随桩长的增大,前者布桩形式下面积增加比的增幅更大些。

(2) 桩间距也是影响隔振效果的重要参数,桩间距取较大值时, A_{RC} 较小值范围区域明显减小,且变的较为分散,由此可知,桩间距越小,隔振效果相对越好。振源与排桩区的相对位置对隔振规律也有一定影响,随桩间距的增大,振源正对桩间中心时面积增加比增幅相比较振源正对桩中心更大些。

(3) 振源距变化对隔振效果也有一定影响,振源距越小,隔振效果越好。关于布置形式对 S_p 的影响,振源正对桩间中心这一布置形式在桩长和间距变化时对 S_p 的影响较大,而在振源距这一参量变化时,布置形式的差异对 S_p 值的影响不存在明显区别。

参考文献:

[1] Woods R D. Screening of surface waves in soils [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, 1968, 94(4): 951-979.

[2] 刘晶磊,张雷刚,宋绪国,等. 高速铁路空沟减隔振措施数值分析与模型试验[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(3): 42-46.

Liu J L, Zhang L G, Song X G, et al. Numerical analysis and model test of vibration reduction by open trench on high-speed railway [J]. Railway Standard Design, 2017, 61(3): 42-46. (in Chinese)

[3] 韦红亮,吕绍棣. 铁路环境振动单排桩隔振数值分析[J]. 华东交通大学学报, 2008, 25(2): 10-15.

Wei H L, Lv S D. Numeric analysis on railway environment vibration isolation by row of piles [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2008, 25(2): 10-15. (in Chinese)

[4] 时刚,高广运. 饱和地基中单排桩远场被动隔振研究[J]. 振动工程学报, 2010, 23(5): 546-553.

Shi G, Gao G Y. Three-dimensional analysis of a row of piles as passive barriers in saturated soil [J]. Journal

of Vibration Engineering, 2010, 23(5): 546-553. (in Chinese)

[5] 徐满清. 饱和土体中排桩对移动荷载的被动隔振效果分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3997-4005.

Xu M Q. Analysis of passive isolation of vibration due to moving loads using pile rows embedded in a poroelastic half space [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3997-4005. (in Chinese)

[6] Aviles J, Sanchez-Sesma F J. Piles as barriers for elastic waves [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109(9): 1134-1146.

[7] Aviles J, Sanchez-Sesma F J. Foundation isolation from vibration using piles as barriers [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1988, 114(11): 1854-1870.

[8] Kattis S E, Polyzos D, Beskos D E. Vibration isolation by a row of piles using a 3-D frequency domain BEM [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 46(5): 713-728.

[9] Kattis S E, Polyzos S, Beskos D E. Modelling of pile wave barriers by effective trenches and their screening effectiveness [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1999, 18(1): 1-10.

[10] 刘晶磊,冯桂帅,王建华,等. 轨道交通单排非连续隔振屏障隔振效果模型试验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(11): 175-182, 201.

Liu J L, Feng G Sh, Wang J H, et al. Model tests for effects of rail transit's single row discontinuous vibration isolation barriers [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(11): 175-182, 201. (in Chinese)

[11] 许孙曲,王桂英. 关于振动控制[J]. 振动、测试与诊断, 1993, 13(1): 64-66.

Xu S Q, Wang G Y. On the Control of Vibration [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 1993, 13(1): 64-66. (in Chinese)

[12] Baron M L, Matthews A T. Diffraction of a pressure wave by a cylindrical cavity in an elastic medium [J]. Journal of Applied Mechanics, 1961, 83(E): 347-354.

[13] Mal A K, Knopoff L. Transmission of Rayleigh waves past a step change in elevation [J]. Bulletin of the Seismological Society of American, 1965, 55(2): 319-334.

[14] Tyutekin V V. Scattering of plane waves by a cylindrical cavity in an isotropic elastic medium [J]. Soviet Physics-Acoustics, 1959, 5: 105-109.

[15] Viktorov I A. The effects of surface defects on the propagation of Rayleigh waves [J]. Soviet Physics-Doklady, 1958, 3: 304-306.

(本文责编:周小潭)