

刘晶磊,刘航,薛晓峰,等.均质介质中排桩对瑞利波的阻隔试验分析[J].地震工程学报,2020,42(6):1579-1589.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1579
LIU Jinglei, LIU Hang, XUE Xiaofeng, et al. Test on the Dilution Effect on the Rayleigh Wave of Row Piles in Homogeneous Medium[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(6): 1579-1589. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1579

均质介质中排桩对瑞利波的阻隔试验分析

刘晶磊^{1,2,3}, 刘航^{1,2,3}, 薛晓峰^{1,2,3}, 刘杰^{1,2,3}

(1. 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;

2. 河北建筑工程学院 土木工程学院, 河北 张家口 075000;

3. 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: 本文通过室外试验的方法并绘制二维等值线图以及将波长和双桩变量进行归一化处理来分析瑞利波通过双桩时周边土体振动的变化, 结果表明: 在桩间、桩前存在振动加强的现象, 其中桩间以及桩角处振动强度最大; 桩长与波长的比值的增加会使得桩前、桩间土体振动加强, 同时也会使得双桩的隔振效果提升。当比值为 0.691~0.781 的范围内时, 各点处变化幅度趋于平缓; 桩间距的增加会使得双桩失去相互影响作用, 当桩间距与波长的比值在 0.34~0.42 时, 桩前、桩间以及桩后的 A_r 值趋近于 1, 即不存在振动加强以及衰减现象; 桩径的增加可提升双桩的隔振效果, 同时随着桩径与波长的比值增加, 桩前、桩间的 A_r 值均有较小幅度的增加; 振源距的增加会使得双桩的隔振效果增强, 随着振源距与波长的比值的增加, 桩前的 A_r 值降低了 0.13 左右, 桩间仅仅降低了 0.068 左右, 而桩后的 A_r 值降低了 0.108 左右, 隔振效果增强, 但增强的幅度较小。

关键词: 瑞利波; 室外试验; 均质介质; 等值线图; 归一化参数

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)06-1579-11

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1579

Test on the Dilution Effect on the Rayleigh Wave of Row Piles in Homogeneous Medium

LIU Jinglei^{1,2,3}, LIU Hang^{1,2,3}, XUE Xiaofeng^{1,2,3}, LIU Jie^{1,2,3}

(1. Hebei Key Laboratory of Diagnosis, Reconstruction and Anti-Disaster of Civil Engineering, Zhangjiakou 075000, Hebei, China;

2. School of Civil Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, Hebei, China;

3. Hebei Innovation Center of Transportation Infrastructure in Cold Region, Zhangjiakou 075000, Hebei, China)

Abstract: In this study, we used an outdoor testing method to draw a two-dimensional contour map, and we normalized the wavelength and double-pile variables to analyze the vibration of the surrounding soil when a Rayleigh wave passes through a double pile. The results show that the vibration in the soil strengthens between and in front of the piles, with the greatest vibration intensity in the soil is between the piles and at the pile angle. Increases in the ratio of the pile length to wavelength strengthen the vibration of the soil between and in front of the piles, and also im-

收稿日期: 2019-10-28

基金项目: 河北省青年拔尖人才计划项目(BJ2016018); 2018年张家口市科技局科技计划项目(1811009B-13); 河北建筑工程学院研究生创新基金(XB201924)

第一作者简介: 刘晶磊(1981—), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 土的动力特性、高速铁路路基隔振。E-mail: kingbest_1118@163.com。

prove the vibration-isolation effect of double piles. When the ratio is in the range of 0.691—0.781, the variation range of each point is gentle. An increase in the pile spacing causes double piles to lose their mutual influence. When the ratio of the pile spacing to wavelength is between 0.34 and 0.42, the A_r value of the soil between, in front of, and behind the piles approaches 1, i. e., there is no vibration strengthening or attenuation. Increasing the pile diameter can improve the vibration-isolation effect of double piles, whereby as the ratio of the pile diameter to the wavelength increases, the A_r values of the soil between and in front of the piles increase slightly. An increase in the distance of the vibration source strengthens the vibration-isolation effect of double piles. As the ratio of the vibration-source distance to the wavelength increases, the A_r value of soil in front of the pile decreases by about 0.13, that between the piles decreases by about 0.068, and that behind the pile decreases by approximately 0.108. The vibration-isolation effect is also enhanced, but the amplitude of this enhancement is small.

Keywords: Rayleigh wave; outdoor test; homogeneous medium; contour map; normalized parameters

0 引言

振动污染已成为人们日益关注的问题^[1-4],然而在实际的工程隔振中,空沟由于土体稳定性,工程造价等问题,沟深往往设置的较浅,当入射波的波长较大时,空沟所能起到的隔振效果会大大降低^[5]。在实际中,空沟对于中高频的振动有着显著的隔振效果,对于低频与中频,往往采用排桩进行工程隔振,这样土体的稳定性则得到了保障^[6]。

排桩作为实际工程中常用的一种有效的隔振方式,许多学者对选择排桩隔振进行了研究,Woods^[7]运用全息照相技术,分析了空井、排桩的隔振效果,并提出当进行排桩隔振时,单桩的直径要大于 $1/6$ 被屏蔽波长的结论。刘晶磊等^[8]通过室外试验研究了多种非连续屏障的隔振效果,结果表明,非连续屏障的空心率越大,其隔振效果越差。虞红海^[9]针对强夯施工的振动通过室外试验研究了砂石桩的隔振效果,并得出了隔振效果随着砂石桩桩间距减小而增强的结论。时刚等^[10]通过饱和半解析边界元法分析了单排桩的远场被动隔振,结果表明,桩身剪切模量、桩间距、桩身等变量均对隔振效果有着重要的影响。徐平^[11]通过波函数展开法研究了弹性空心桩对 P 波的隔离问题,结果表明桩土模量比的增加,对最佳隔离区与隔振效果均有提高作用。李志毅等^[12]以瑞利波散射积分方程首次研究了多排桩的远场被动隔振效果,提出多排桩隔振体系的隔振效果主要取决于排桩的排数,截面尺寸对其影响较小。高广运等^[13]应用 ABAQUS 有限元软件并结合实测结果研究了桩网复合路基对列车引起的振动的隔离,结果表明路堤高度越高,列车动荷载所引起的地面振动越小。孙立强等^[14]通过室外试验研究了

各种隔振措施的隔振效果,结果表明桩间距越小隔振效果越好。

以上学者的研究中,试验、数值模拟、有限元分析是其所采用的最重要的方法,其研究的主要内容主要是排桩本身结构特点对隔振效果的影响,同时桩后的隔振效果也是以上学者研究的主要内容,本文在前述学者的基础上,从二维等值线图入手,对桩前、桩间以及桩后的土体振动随几何参数的变化情况进行探究,进而丰富排桩隔振的机理性研究。

1 试验概况

1.1 场地概况

为避免人工活动对测试结果的影响,试验场地的位置位于偏远的郊区,试验所采用的土质为砂性土,同时为了保证振动波在土体中传播时遇到较大的杂质而影响试验的结果,试验之前在场地中开挖一个 $2\text{ m} \times 4\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的坑,在填充砂土的过程中,将原场地砂子经过 5 mm 筛子筛过之后回填坑内,并对土体进行分层夯实,将其含水率控制在 $13\% \sim 15\%$,土体的密度控制在 $1.80 \sim 1.90\text{ g/cm}^3$ 。

1.2 仪器概况

本试验采用 WS-Z30 型振动台控制系统进行测试,其中包括激振器、信号发生器、电荷放大器、功率放大器、加速度传感器(灵敏度为 4 PC/ms^{-2} ,频率响应范围为 $0.2 \sim 8\,000\text{ Hz}$,质量为 28.50 g ,测量范围为 50 m/s^2),数据采集控制仪等。试验仪器设备图如图 1 所示。

1.3 研究内容与试验安排

本文通过室外试验系统的研究瑞利波在经过双

桩时土体振动的变化,并通过变换不同的双桩参数,土体的振动变化情况这一研究目的,双桩就可满足对其分别进行分析。对于研究桩前、桩间以及桩后要求。试验变量见表 1 所列。



图 1 试验仪器

Fig.1 Test equipment

表 1 试验变量			
Table 1 Test variables			
桩长/cm	桩间距/cm	桩径/cm	振源距/cm
40	18	5	60
70	36	10	80
100	54	15	100

为了使得试验结果更加具有可控性、操作性,本试验所采用的振动波为正弦波,采样频率为 5 000 Hz,激振时间设置为 5 s,在进行数据采集时,选取波段较为稳定的 2~5 s 的范围内最大的加速度值作为测试的结果。在整个激振的过程中,保持电荷放大器数值保持一致,并连续激振三次,选取平均加速度值作为测试的最终结果以减小误差。激振频率选择为 30 Hz、60 Hz 以及 90 Hz,图 2 为传感器的

摆放。在试验材料的选取上,已有研究表明,桩土剪切模量比越大,隔振效果越好^[15],故本文在土质为砂性土的基础下,选择 C₃₀ 混凝土桩进行试验。

由图 2 可知,1# 传感器位于桩前 26 cm 处,2# 传感器位于两个桩的中心,由于摆放角度都是 11.25°,在桩周位置处摆放的传感器由于半径小而紧密,这样的布置更能准确的测得桩周围土体的振动变化。图 2 中,1# 传感器可测得桩前振动的变化,2# 传感器则测得在桩间土体振动的变化,而 3# 传感器则主要对应的是双桩的隔振效果。

1.4 隔振效果评价指标

本文选取 A_r 值作为隔振效果的评价指标, A_r 值的计算方法如式 1 所示:

$$A_r=a_1/a_0 \tag{1}$$

式中: a_1 表示设置双桩时传感器所测得的加速度值; a_0 表示无桩时各测试点的加速度值。

1.5 瑞利波波长的测试

本试验通过表面波谱法^[16]对砂性土中的波速进行测试,波速测试的激振器以及传感器的摆放见图 3 所示。

按照表面波普法对 #a 与 #b 的传感器所接受的信号进行处理,并用相干函数表示对接受信号的质量进行评定,当相干系数的值大于 0.85^[17]时,则表示接受信号的质量高。

经过计算以及相应的处理,当频率为 150 Hz 时的相位差为 147.45,且信号的相关性良好,并测得瑞利波的波速平均值为 109.99 m/s,波长最大为 11 m,最小为 0.55 m。当频率为 30 Hz 时,瑞利波的波长为 3.66 m,60 Hz 时为 1.83 m,频率为 90 Hz 时则为 1.22 m。

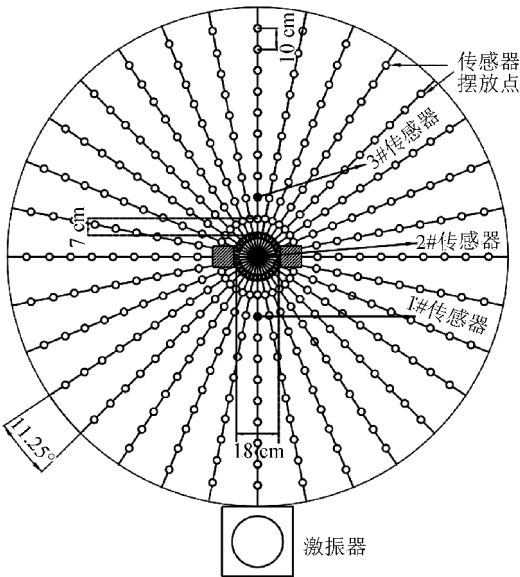


图 2 传感器摆放

Fig.2 Layout of sensors

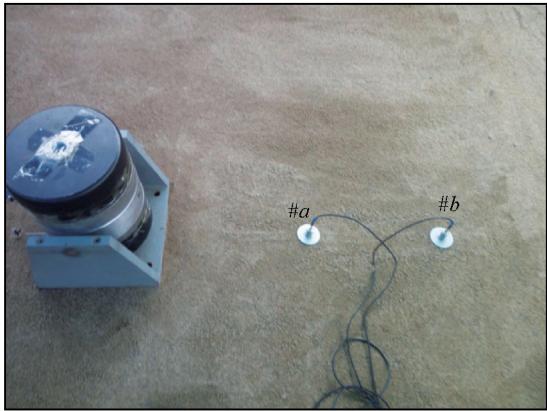


图 3 瑞利波波速测试
Fig.3 Rayleigh wave velocity test

2 双桩参数的归一化处理

本文将双桩几何变量与瑞利波波长进行结合来探讨当几何参数变化时,1#~3#传感器的变化,参数的归一化过程见下:

(1) 桩长参数 L

$$L=l/L_R$$

式中: l —桩长, L_R —瑞利波波长

(2) 桩间距参数 W

$$W=w/L_R$$

式中: w —桩间距, L_R —瑞利波波长

(3) 桩径参数 D

$$D=d/L_R$$

式中: d —桩径, L_R —瑞利波波长

(4) 振源距参数 S

$$S=s/L_R$$

式中: s —振源距, L_R —瑞利波波长

3 试验结果及分析

3.1 桩长参数变化时的振动分析

为了研究当桩长变化时二维等值线图及1#~3#传感器的变化,控制桩间距、桩径以及振源距离不变,工况安排见表2所列。

表 2 桩长工况安排

Table 2 Pile length conditions				
工况编号	桩长/cm	桩间距/cm	桩径/cm	振源距/cm
1	40	18	10	100
2	70	18	10	100
3	100	18	10	100

由于篇幅的原因,本文仅展示当激振频率为60 Hz时的二维等值线图,对上述工况安排按试验步骤进行测试,测试并绘制的二维等值线图如图4所示。同时将桩后隔振效果最好的区域定义为最佳隔振区域。

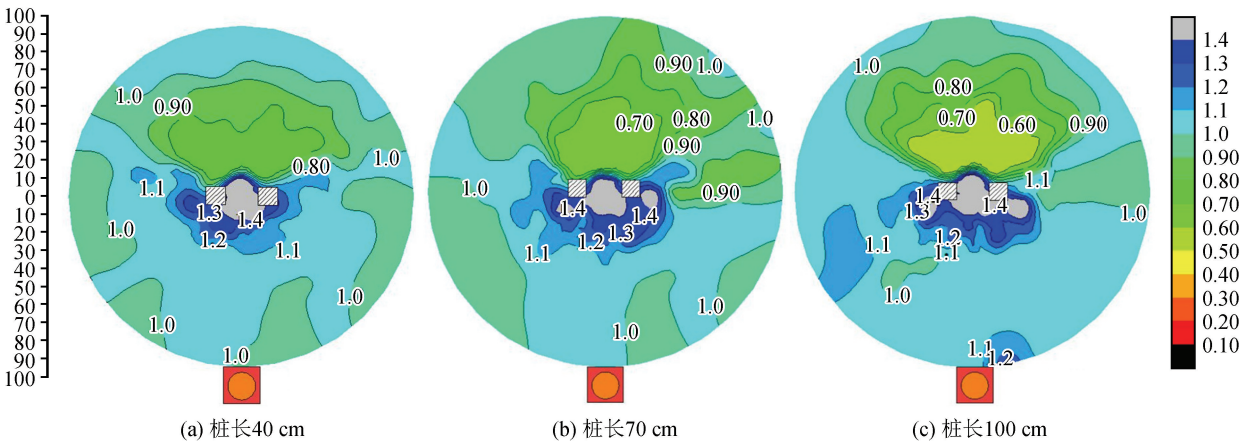
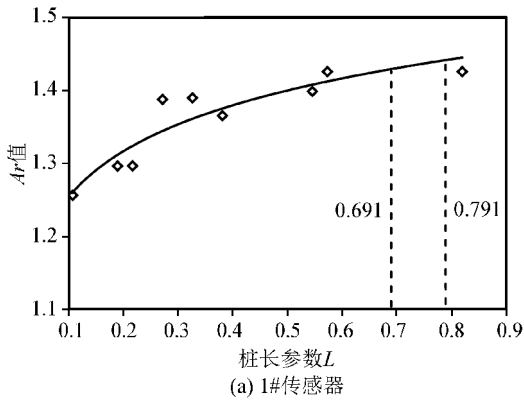


图 4 双桩桩长二维等值线图
Fig.4 Two-dimensional contour map of length of double pile

由图4可以看出,在桩前以及桩与桩之间存在 A_r 值增大的区域,其中以桩与桩之间的 A_r 值增长较大,靠近桩后的等值线较为密集,随着距离振源越远,出现了 A_r 值较小的区域,本文定义此区域为最佳隔振区域。当桩长为40 cm时,在桩与桩之间存在着 A_r 值大于1.4的区域,桩前则为 A_r 值在1.1~1.4的区域,最佳隔振区域的 A_r 值为0.7~0.8的范围内,当距离增加到70 cm之后, A_r 值继而恢复了

1.0~1.1的范围,双桩的影响范围并未波及到此区域。当桩长为70 cm时,不仅在桩间存在 A_r 值在1.4以上的范围,在桩角处也出现了 A_r 大于1.4的区域,最佳隔振区域的 A_r 值在0.6~0.7的范围内,双桩桩后100 cm的范围内的 A_r 值均在1.1以下。随着桩长继续增加到100 cm,双桩的桩间与桩前仍然存在 A_r 值放大的现象,而不同于桩长为40 cm与70 cm的是,最佳隔振区域的 A_r 值在0.5~0.6的范

围内,这说明随着桩长的增加,双桩的隔振效果提升。



本文将桩长参数 L 引入,分析 1#~3# 传感器的 A_r 值变化,绘制结果见图 5 所示。

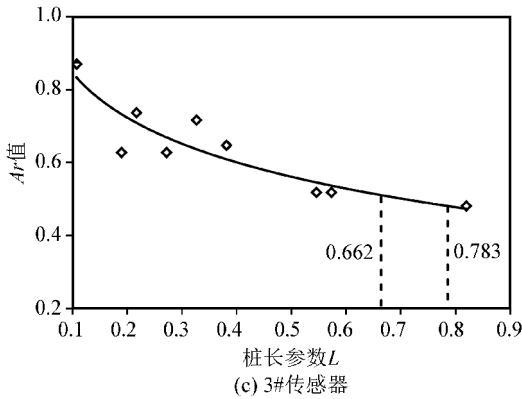
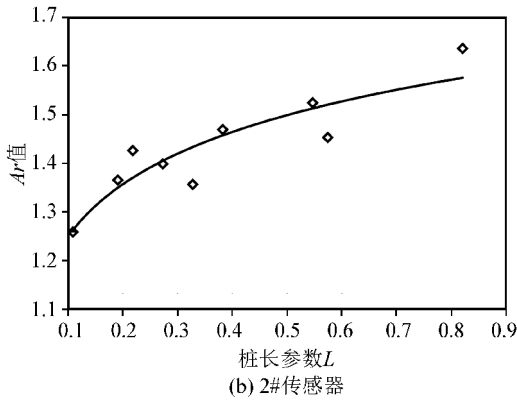


图 5 各传感器 A_r 值与参数 L 的线性分析

Fig.5 Linear analysis of A_r value and parameter L of each sensor

选用显著性水平 $\alpha=0.05$,各传感器的 A_r 值与 L 值的拟合曲线见表 3 所列。

表 3 各传感器随 L 值变化的拟合曲线

Table 3 Fitting curve of A_r value of each sensor with L value				
工况	拟合方程	自由度 f	相关系数 R	临界值 R_{af}
1	$A_r=0.101\ln L+1.47$	9	0.892	0.666
2	$A_r=0.162\ln L+1.61$	9	0.811	0.666
3	$A_r=-0.183\ln L+0.442$	9	0.806	0.666

由表 3 可知,各工况的相关系数 R 均大于临界值 R_{af} ,说明拟合方程可较好的反应参数 L 与各传感器 A_r 值之间的关系。

由图 5 可知,1#传感器的 A_r 值随着 L 值的增加而增加,其曲线的整体趋势为上凸状,说明当 L 值在 0.691 的范围内可使得桩前土体的振动急剧增加,当 L 值在 0.691~0.791 的范围内,拟合曲线的趋势趋于平缓,继续增加 L 值使得桩前土体的振动变化较小。

对于 2#传感器,拟合曲线的整体趋势同样为上凸状, L 值在 0.642 以内的范围内增加同样会使得桩间的土体振动幅度增加,而到 0.642~0.781 之后, L 值的增加会使得桩间 A_r 值的变化较小,但其

A_r 值仍然在增加。

3#传感器主要测得双桩的隔振效果,从图 5 可以看出随着 L 值的增加,拟合曲线的整体趋势下降明显,当 L 值在 0.662 以内增加,隔振效果得到明显的提升,当 L 值在 0.662~0.783 的范围内时,曲线整体趋势趋于平缓, A_r 值变化较小。

综合分析图 4、图 5,双桩的隔振特点在于桩前、桩间存在 A_r 值增大的现象,随着桩长的增加,双桩的隔振效果增加。当 L 值的取值范围在 0.691~0.781 的范围内时,桩前、桩间土体振动加强变缓,隔振效果提升缓慢。

3.2 桩间距参数变化时的振动分析

桩间距是布置排桩的重要变量,已有研究表明,桩间距对排桩的隔振效果起到决定作用^[18]。为了研究桩间距变化时双桩的二维等值线图变化,本试验对桩长、振源距、桩径控制不变,工况安排见表 4 所列。

按上述工况安排进行测试,并分析当桩间距变化时二维等值线图相应的变化,测试结果见图 6 所示。

由图 6 可以看出,随着桩间距的增加,双桩的隔振效果逐渐变差,当双桩桩间距为 18 cm 时,双桩桩

表 4 桩间距工况安排

Table 4 Pile spacing conditions

工况编号	桩长/cm	桩间距/cm	桩径/cm	振源距/cm
1	70	18	10	100
2	70	36	10	100
3	70	54	10	100

后的最佳隔振区域的 A_r 值在 $0.6 \sim 0.7$ 的范围内,随着桩间距的增加,当双桩的桩间距为 36 cm 时,桩间 A_r 值增大的区域的 A_r 值减小到了 $1.2 \sim 1.3$ 的范围内,而桩后最佳隔振区域的 A_r 值虽然仍为 0.6

~ 0.7 的范围,但此区域的面积被限制在了桩后较小的范围内,随着桩间距继续增加到 54 cm,桩间的 A_r 值已经减小到了 $1.0 \sim 1.1$ 的范围内,桩后最佳隔振区域的 A_r 值仍然在 $0.6 \sim 0.7$ 的范围内,最佳隔振区域同样被限制在了桩后的一小部分范围内,此时桩间距已达到 0.3 倍波长左右,双桩已失去了整体性的隔振特性,其隔振特点与单桩相似。

同样在研究桩间距变化时 1#~3# 传感器所测得的 A_r 值与桩间距参数 W 的关系,拟合的图形见图 7 所列。

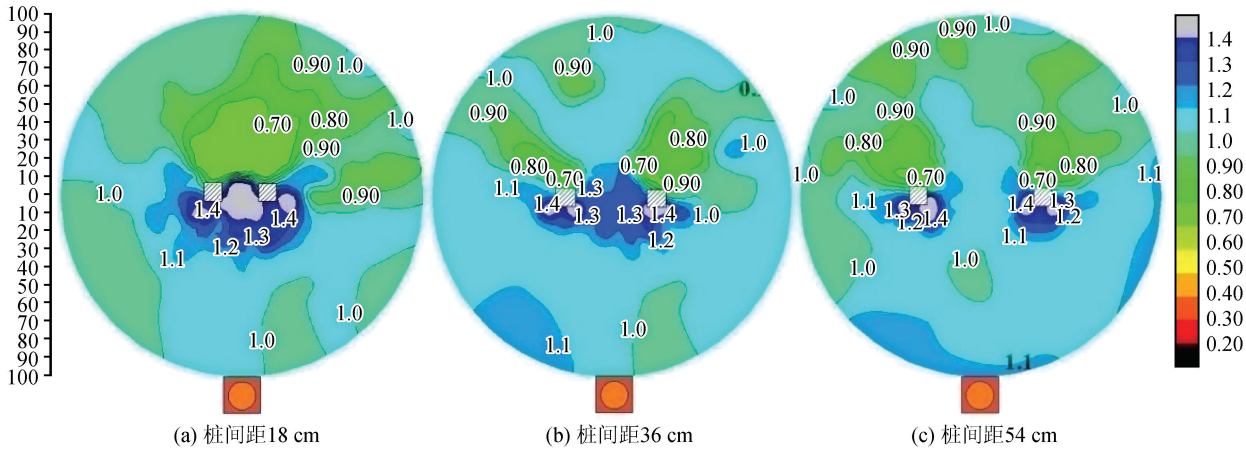


图 6 双桩桩间距二维等值线图

Fig.6 Two-dimensional contour map of double-pile spacing

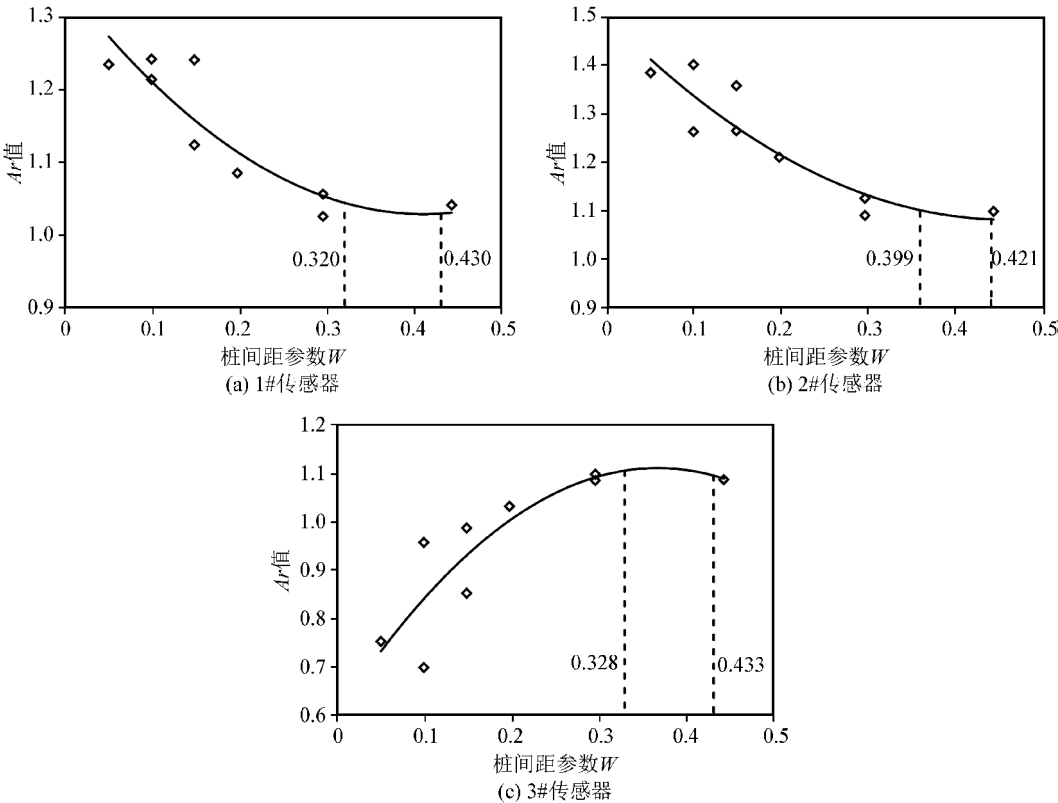


图 7 各传感器 A_r 值与参数 W 的线性分析

Fig.7 Linear analysis of A_r value and parameter W of each sensor

选用显著性水平 $\alpha=0.05$,各传感器的 A_r 值与 W 值的拟合曲线见表 5 所列。

表 5 各传感器随 W 值变化的拟合曲线

Table 5 Fitting curve of A_r value of each sensor with W value				
工况	拟合方程	自由度 f	相关系数 R	临界值 R_{af}
1	$A_r=1.34-1.54W+1.87W^2$	9	0.820	0.666
2	$A_r=1.50-1.82W+1.99W^2$	9	0.830	0.666
3	$A_r=0.605-2.73W+3.76W^2$	9	0.706	0.666

由表 5 可知,各工况的相关系数 R 均大于临界值 R_{af} ,其趋势可以较好地反映各传感器 A_r 值随着 W 变化的趋势。

由图 7 可知,1#传感器的 A_r 值随着 W 值的增加而减小。曲线整体降低幅度较大,说明桩间距对桩前土体振动的影响程度较大,当 W 值增加到 0.320~0.430 范围内时,其曲线的趋势区域平缓并接近 $A_r=1$ 附近。

2#传感器的 A_r 值同样随着桩间距参数 W 的增加而降低,当 W 值增加到 0.399~0.421 的范围内时,曲线的趋势接近于 $A_r=(1\sim1.1)$,桩间相互影响的作用基本消失。

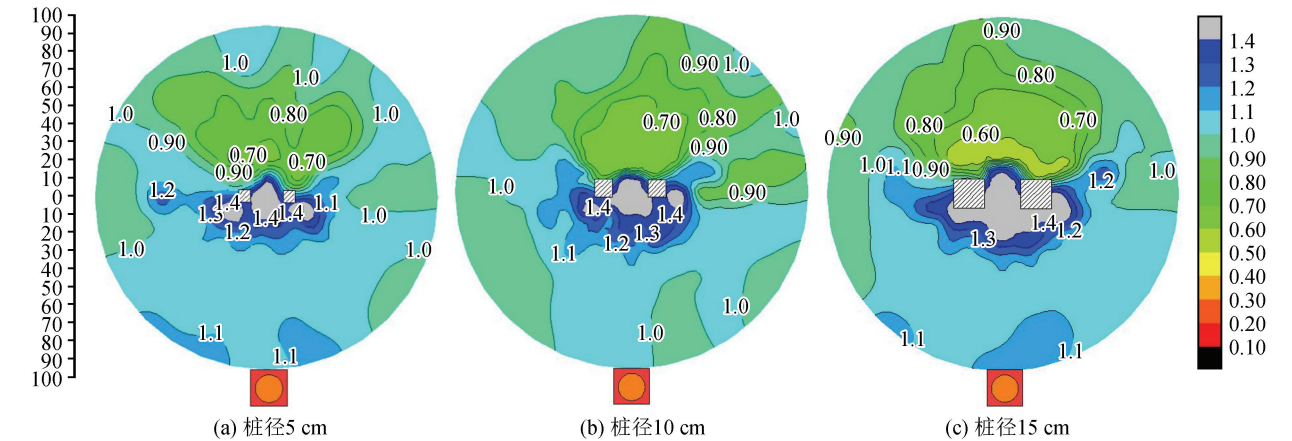


图 8 双桩桩径等值线图

Fig.8 Two-dimensional contour map of double-pile diameter

由图 8 可知,当桩径为 5 cm 时,桩后最佳隔振区域的 A_r 值在 0.6~0.7 的范围内,但其所占据的面积非常小,仅仅被限制在桩后一小段范围内。随着桩径增加到 10 cm,桩后 A_r 值在 0.6~0.7 的范围已在桩后占据较大的面积,随着桩径继续增加到 15 cm,桩后最佳隔振区域的 A_r 值达到了 0.5~0.6 的范围内,说明随着桩径的增加,双桩的隔振效果提升。将桩径参数 D 与各传感器的 A_r 值进行拟合,拟合图见图 9。

各传感器的 A_r 值与 D 值的拟合曲线见表 7

3#传感器的趋势随着 W 值的增加而增加,这说明双桩的隔振效果随着桩间距参数 W 的增加而降低,并且当 W 值增加到 0.328~0.433 的范围内时,曲线趋势趋于平缓,其 A_r 值在 1~1.1 的范围内,双桩基本失去整体隔振效果。

综合分析图 6、图 7,当桩间距达到 0.34~0.42 的范围内时,桩与桩之间相互影响的作用基本消失,桩间、桩前基本不存在 A_r 值增大的现象,同时也基本不存在隔振效果。

3.3 桩径参数变化时的振动分析

为了研究当桩径变化时双桩的二维等值线图变化以及 1#~3#传感器的变化,对桩长、桩间距、振源距控制不变,工况安排见表 6。

表 6 桩径工况安排

Table 6 Pile diameter conditions				
工况编号	桩长/cm	桩间距/cm	桩径/cm	振源距/cm
1	70	18	5	100
2	70	18	10	100
3	70	18	15	100

对上述工况进行测试并绘制二维 A_r 值等值线图,等值线图见图 8 所示。

所列。

由表 7 可知,各工况的相关系数 R 均大于临界值 R_{af} ,其相关性良好,可以反映参数 D 与 A_r 值的关系。

由图 9 可知,在本试验所采取的桩径情况下,随着桩径参数 R 的增加,1#传感器与 2#传感器均呈现增长的趋势。其中 1#传感器增长幅度为 0.08,2#传感器为 0.06,两者变化均较小,这说明桩径参数 D 的增加会使得桩前与桩间土体的振动加强,但其变化较小。

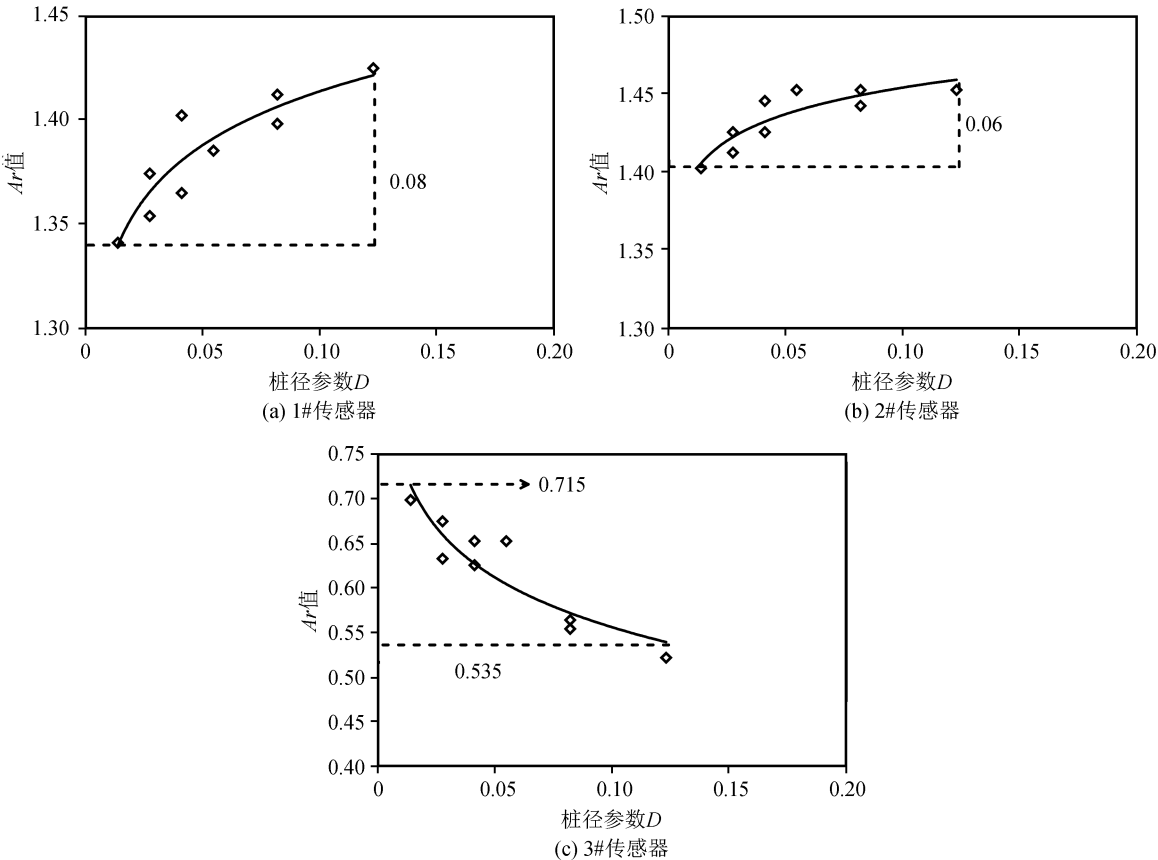


图9 各传感器 A_r 值与参数 D 的线性分析

Fig.9 Linear analysis of A_r value and parameter D of each sensor

表7 各传感器随 D 值变化的拟合方程
Table 7 Fitting equation of A_r value of each sensor with D value

工况	拟合方程	自由度 f	相关系数 R	临界值 R_{af}
1	$A_r=0.04\ln D+1.50$	9	0.827	0.666
2	$A_r=0.02\ln D+1.51$	9	0.783	0.666
3	$A_r=-0.048\ln D+0.371$	9	0.829	0.666

由图9同样可以看出,随着桩径的增加,双桩的隔振效果增强,其 A_r 值由0.715降低到了0.535,降低了0.18左右,降低幅度相比于桩长较小。

综合分析图8、图9,桩径参数的增加会使得桩前、桩间土体振动加强,但变化程度较小,同时,桩径参数 D 的增加会增强双桩的隔振效果。

3.4 振源距参数变化时的振动分析

为了研究当振源距变化时双桩的二维等值线图变化以及1#~3#传感器的变化,对桩长、桩间距、桩径控制不变,工况安排见表8。

表8 振源距工况安排

Table 8 Source distance conditions

工况编号	桩长/cm	桩间距/cm	桩径/cm	振源距/cm
1	70	18	10	60
2	70	18	10	80
3	70	18	10	100

对上述工况进行测试并绘制二维 A_r 值等值线图,等值线图见图10所示。

由图10可知,当振源距为60 cm时,双桩桩前 A_r 值增大的范围相比于振源距为80 cm、100 cm时的工况较大,在桩前 A_r 值增大的范围内,其中桩前 A_r 值大于1.4的范围在振源距为60 cm时连成了一个整体。在图10中同样可以看出,随着振源距离的增加,桩后最佳隔振范围的 A_r 均在0.6~0.7的范围内,但此区域的面积发生了变化,当振源距为60 cm时, A_r 值在0.6~0.7范围内的面积要明显小于振源距为80 cm和100 cm的情况。各传感器与参数 S 的拟合图形见图11。

选取显著性水平 $\alpha=0.05$,上述各工况拟合曲线的相关参数见表9所列。

由表5可知,各工况的相关系数 R 均大于临界值 R_{af} ,其拟合方程可以较好的反应各传感器的 A_r 值与振源距参数 S 的关系。

由图11可知,在本试验所采取的振源距情况下,随着振源距参数 S 的增加,1#传感器的 A_r 值呈现降低的趋势,其 A_r 值从1.460降低到了1.330,降低了0.13左右,降低幅度较小,但降低的速率较

快。2#传感器的 A_r 值也呈现出了降低的趋势,其 A_r 值从 1.434 降低到了 1.366,仅仅降低了 0.068,降低幅度很小。对于在振源距变化下双桩的隔振效

果,可以看出随着振源距参数的增加,3#传感器的 A_r 值呈现出了下降的趋势,其 A_r 值从 0.746 降低到了 0.638, A_r 值降低了 0.108 左右,隔振效果增强。

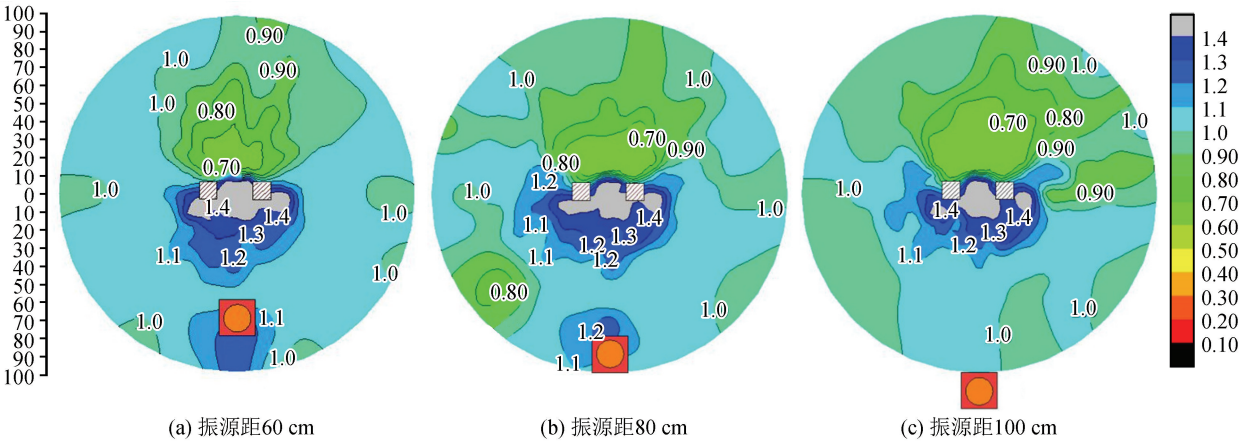


图 10 双桩振源距等值线图

Fig.10 Two-dimensional contour map of source distance of double pile

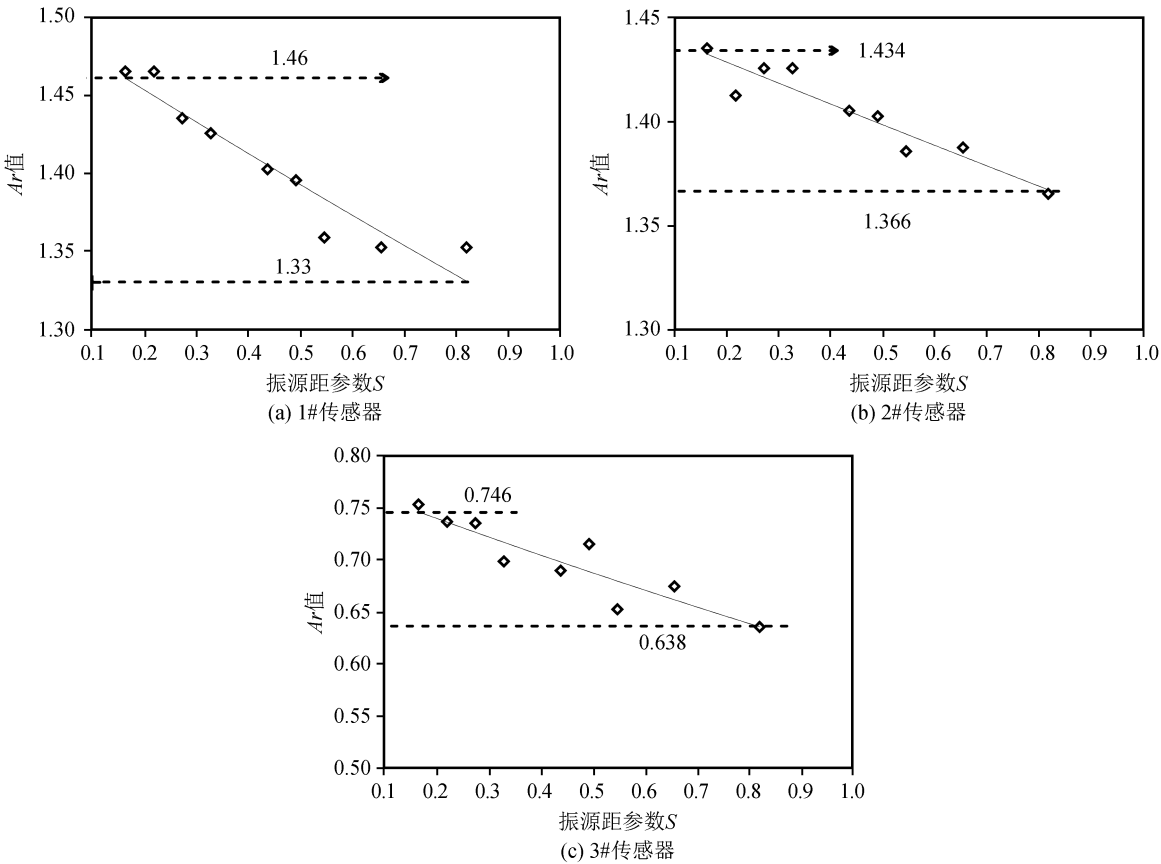


图 11 各传感器 A_r 值与参数 S 的线性分析

Fig.11 Linear analysis of A_r value and parameter S of each sensor

综合分析图 10、图 11,随着振源距参数 S 的增加,桩前、桩间土体振动减弱,其中桩前土体的 A_r 值降低 0.13 左右,桩间土体的 A_r 值降低 0.068 左右,而双桩的隔振效果增强,其 A_r 值降低 0.108 左右。

4 结论

本文通过室外试验的方法并从一维、二维角度分析了瑞利波通过双桩时桩前、桩间以及桩后区域

表 9 各传感器随 S 值变化的拟合曲线

Table 9 Fitting equation of A_r value of each sensor with S value

工况	拟合方程	自由度 f	相关系数 R	临界值 R_{af}
1	$A_r=1.50\times S^{-0.142}$	9	0.906	0.666
2	$A_r=1.45\times S^{-0.071}$	9	0.897	0.666
3	$A_r=0.77\times S^{-0.244}$	9	0.831	0.666

的变化,并得出了以下结论:

(1) 双桩桩前、桩间均存在 A_r 值放大的区域,其中桩间区域的 A_r 值大部分大于 1.4。

(2) 桩长参数 L 的增加会使得桩前、桩间土体振动加强,提升双桩的隔振效果,当 L 值在 0.691~0.781 的范围内时,桩前、桩间土体振动加强幅度变得缓慢,隔振效果提升缓慢。

(3) 桩间距的增加会使得双桩失去相互影响的作用,当 W 值为 0.34~0.42 的范围内时,桩间、桩前以及桩后的 A_r 值趋近于 1。

(4) 桩径参数 D 的增加会使得桩前、桩间土体振动加强,但增加幅度很小,随着桩径参数 D 的增加,桩前 A_r 值增加了 0.08 左右,而桩间土体的 A_r 值也仅仅增加了 0.06 左右,双桩桩后的 A_r 值降低了 0.18 左右,隔振效果提升较小。

(5) 随着振源距参数 S 的增加,桩前、桩间土体振动减弱,其中桩前的 A_r 值降低了 0.13 左右,桩间的 A_r 值降低了 0.068 左右,两者降低幅度均较小。对与双桩的隔振效果,随着 S 的增加, A_r 值降低了 0.108 左右,隔振效果有较小幅度的增强。

参考文献(References)

[1] 刘维宁,马蒙,刘卫丰,等.我国城市轨道交通环境振动影响的研究现状[J].中国科学:技术科学,2016,46(6):547-559.
LIU Weining,MA Meng,LIU Weifeng,et al.Overview on Current Research of Environmental Vibration Influence Induced by Urban Mass Transit in China[J].Scientia Sinica Technologica,2016,46(6):547-559.

[2] 谢伟平,赵娜,何卫,等.地铁上盖物业振动舒适度分析[J].土木工程学报,2013,46(6):90-96.
XIE Weiping,ZHAO Na,HE Wei,PENG Ying.Analysis on Vibration Serviceability of Over-track Buildings[J].China Civil Engineering Journal,2013,46(6):90-96.

[3] 吴兵,傅学怡,孟美莉,等.深圳火车站高架轻轨列车振动效应分析[J].工业建筑,2013,43(08):133-137.
WU Bing,FU Xueyi,MENG Meili,et al.Analysis of Vibration of Effects of Elevated Light Rail Train Through Shenzhen North Railway Station[J].Industrial building,2013,43(08):133-137.

[4] 高广运,朱林圆,李卫华,等.上海地铁一号线人民广场振动测试与分析[J].地震工程学报,2014,36(3):429-433.

GAO Guangyun,ZHU Linyuan,LI Huawei,et al.Vibration-Test and Analysis at People's Square of Shanghai Metro Line 1[J].China Earthquake Engineering Journal,2014,36(3):429-433.

[5] 时刚,高广运.饱和土半解析边界元法及在双排桩被动隔振中的应用[J].岩土力学,2010,31(增刊2):59-64.
SHI Gang,GAO Guangyun.Semi-analytical Boundary Element Method in Saturated Soil and Its Application to Analysis of Double Row of Piles as Passive Barriers[J].Rock and Soil Mechanics,2010,31(Supp2):59-64.

[6] 邱畅,高广运,岳中琦,等.屏障隔振系统失效机理的探讨[J].西北地震学报,2003,(3):198-203.
QIU Chang,GAO Guangyun,YUE Zhongqi,et al.Research on the Failure Mechanism of Barrier for Isolating Vibration[J].Northwestern Seismological Journal,2003,(3):198-203.

[7] WOODS R D,Barnet N E,Sangesser R.A new tool for Soil Screening of Surface Waves in Soil Dynamics[J].Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1974, 100(11):1234-1247.

[8] 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 Jinglei,FENG Guishuai,WANG Jianghua,et al.Model Test for Effects of Rail Transit's Single Row Discontinuous Vibration Isolation Barriers[J].Journal of Vibration and Shock,2018,37(11):175-182,201.

[9] 虞红海.砂石桩非连续屏障隔振试验研究[J].水运工程,2018(2):203-205,210.
YU Honghai.Experimental Research on Vibtation Isolation by Discontinuous Barrier on Sand-gravel Pile[J].Port & Waterway Engineering,2018(2):203-205,210.

[10] 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 Gang,GAO Guangyun.Three-dimensional Analysis of a Row of Piles as Passive Barriers in Saturated Soil[J].Journal of Vibration Engineering,2010,23(5):546-553.

[11] 徐平.单排弹性空心管桩屏障对平面 P 波的隔离[J].固体力学学报,2010,31(2):157-163.
XU Ping.Isolation of Plane P Waves by Discontinuous Barriers Composed of a Row of Elastic Hollow Pile Piles[J].Chinese Journal of Solid Mechanics,2010,31(02):157-163.

[12] 李志毅,高广运,邱畅,等.多排桩屏障远场被动隔振分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(21):3990-3995.
LI Zhiyi,GAO Guangyun,QIU Chang,et al.Analysis of Multi-row of Piles as Barriers for Isolating Vibration in far Field[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(21):3990-3995.

[13] 高广运,戴益波,雷丹,等.高铁桩网复合路基环境振动影响因素分析[J].振动与冲击,2018,37(23):253-260.
GAO Guangyun,DAI Yibo,LEI Dan,et al.Factors Affecting Environment Vibration of Speed Railway's Pile-net Composite Subgrade[J].Journal of Vibration and Shock,2018,37

(23):253-260.

[14] 孙立强,李嘉,刘彬,等.空沟、碎石填充沟和排桩隔振效果试验研究[J].地震工程学报,2015,37(2):342-348.
SUN Liqiang, LI Jia, LIU Bin, et al. Experimental Study on Vibration-isolation Effects of Open Trench, Gravel-filled Trench, and Piles in a Row[J]. Northwestern Seismological Journal, 2015, 37(2): 342-348.

[15] 高广运,李佳,李宁,等.三维层状地基排桩远场被动隔振分析[J].岩石力学与工程学报,2013,32(S1):2934-2943.
GAO Guangyun, LI Jia, LI Ning, et al. Three-dimensional Analysis of Far-field Passive Vibration Isolation for Row of Piles in Layered Foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2013, 32(S1): 2934-2943.

[16] 吴世明,曾国熙,陈云敏,等.利用表面波频谱分析测试土层波速[J].地震工程与工程振动,1988,8(4):28-31.
WU Shiming, ZENG Guoxi, CHEN Yunmin, et al. Measurement of Wave Velocity of Soil Deposits by Spectral Analysis of Surface Waves[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1988, 8(4): 28-31.

[17] 陈云敏,吴世明,曾国熙.表面波频谱分析法及其应用[J].岩土工程学报,1992,(03):61-65.
CHENG Yunmin, WU Shiming, ZENG Guoxi. Surface Wave Spectrum Analysis Method and its Application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, (03): 61-65.

[18] 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.

(上接第 1464 页)

[15] 梅卫萍,李清河,张元生,等.由地壳速度结构判断郯庐断裂带江苏段未来大震位置[J].地震工程学报,2015,37(3):693-701.
MEI Weiping, LI Qinghe, ZHANG Yuansheng, et al. Location of Future Large Earthquakes in Jiangsu Segment of Tanlu Fault Zone Based on the Crustal Velocity Structure[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(3): 693-701.

[16] 熊振,李清河,张元生,等.郯庐断裂带鲁苏皖段地壳速度结构的分段特征及其地质意义[J].地球物理学报,2016,59(7):2433-2443.
XIONG Zhen, LI Qinghe, ZHANG Yuansheng, et al. Segmentation of Crustal Velocity Structure beneath the Shandong-Jiangsu-Anhui Segment of the Tanlu Fault Zone and Adjacent Areas and Its Geological Implications[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(7): 2433-2443.

[17] 熊振,李清河,张元生,等.郯庐断裂带鲁苏皖段未来强震可能发生地段初探[J].地震地质,2016,38(4):964-977.
XIONG Zhen, LI Qinghe, ZHANG Yuansheng, et al. Preliminary Discussion on the Possible Area of Strong Earthquake Occurrence in Future along the Shandong-jiangsu-anhui Segment of Tancheng-lujiang Fault Zone[J]. Seismology and Geology, 2016, 38(4): 964-977.

[18] 高维明,林趾祥,郑朗荪,等.鲁南地震危险性评定及烈度区划研究成果概述[J].中国地震,1988,4(3):1-3.
GAO Weiming, LIN Zhixiang, ZHENG Langsun, et al. Introduction on the Study of Assessment of the Seismic Hazards and Seismic Intensity Zonation in South Shandong Province [J]. Earthquake Research in China, 1988, 4(3): 1-4.

[19] 高维明,郑朗荪.郯庐断裂带的活断层分段与潜在震源区的划分[J].中国地震,1991,7(4):87-91.
GAO Weiming, ZHENG Langsun. Active Fault Segmentation and the Identification of Potential Seismic Zones along the Tanlu Fault[J]. Earthquake Research in China, 1991, 7(4): 87-91.

[20] 吴庆举,田小波,张乃铃,等.计算台站接收函数的最大熵谱反褶积方法[J].地震学报,2003,25(4):382-389.
WU Qingju, TIAN Xiaobo, ZHANG Nailing, et al. Receiver Function Estimated by Maximum Entropy Deconvolution[J]. Acta Seismologica Sinica, 2003, 25(4): 382-389.

[21] ZHU L P, KANAMORI H. Moho Depth Variation in Southern California from Teleseismic Receiver Functions[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2000, 105 (B2): 2969-2980.

[22] AKI K, CHOUE T B. Origin of Coda Waves: Source, Attenuation, and Scattering Effects[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1975, 80(23): 3322-3342.

[23] 范小平,李清河,何海兵,等.长白山天池火山区 S 波包络展宽的特征[J].地震地质,2009,31(4):598-606.
FAN Xiaoping, LI Qinghe, HE Haibing, et al. Characters of S-wave Envelope Broadening in Changbaishan Tianchi Volcano [J]. Seismology and Geology, 2009, 31(4): 598-606.

[24] 张国民,傅征祥,桂燮泰,等.地震预报引论[M].北京:地震出版社,2001.
ZHANG Guomin, FU Zhengxiang, GUI Xietai, et al. Introduction to Earthquake Prediction[M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 2001.