

赵大威,刘航,刘晶磊,等.混凝土单桩对瑞利波的阻隔机理试验研究[J].地震工程学报,2021,43(3):693-703.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.693

ZHAO Dawei, LIU Hang, LIU Jinglei, et al. Experimental Study on the Barrier Mechanism of Concrete Single Pile to Rayleigh Wave[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(3): 693-703. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.693

混凝土单桩对瑞利波的阻隔机理试验研究

赵大威¹, 刘 航^{1,2}, 刘晶磊^{1,2}, 张 楠^{1,2}

(1. 河北建筑工程学院 土木工程学院, 河北 张家口 075000;

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)

摘要:通过室外试验的方法绘制相对加速度的二维等值线图,并依据桩周土体的振动情况进行区域划分,进一步研究单桩几何尺寸变化时其周围土体振动区域的变化情况。结果表明:单桩桩前、桩两侧存在振动加强区,桩前的振动加强现象更强,以桩角处尤为明显;当桩长与波长的比值在0.109~0.840时,隔振区、反射区的面积增长幅度较大,而绕射区的面积则迅速减小,当比值在0.840~0.962时,隔振区、反射区以及绕射区的面积变化很小,数据趋于缓和;桩径与波长的比值对桩周振动区域的影响较大,随着比值在0.013~0.163之间增大,隔振区与反射区的面积分别增加了0.249 m²、0.129 m²,增长的速率均较快,而绕射区的面积以较快的速率降低了0.088 m²;振源距与波长的比值对隔振区与反射区的面积影响较大,当比值在0.163~0.961时,隔振区与反射区的面积急速下降,当比值在0.961~1.068时,变化趋势趋于缓和,对于绕射区面积,随着比值的增加,绕射区的面积仅仅增加了0.037 m²。

关键词:室外试验;砂土地基;几何尺寸;瑞利波;振动区域

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2021)03-0693-11

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.693

Experimental Study on the Barrier Mechanism of Concrete Single Pile to Rayleigh Wave

ZHAO Dawei¹, LIU Hang^{1,2}, LIU Jinglei^{1,2}, ZHANG Nan^{1,2}

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

2. Hebei Key Laboratory of Diagnosis, Reconstruction and Anti-Disaster of Civil, Zhangjiakou 075000, Hebei, China)

Abstract: In this paper, a two-dimensional contour plot of relative acceleration is drawn through outdoor experiments, and the area division is carried out according to the vibration of soil around pile. Furthermore, the changes of soil vibration area around single pile with different geometric size are analyzed. The results show that there are vibration strengthening areas in front of and on

收稿日期: 2020-04-07

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: 赵大威(1982—), 男, 高级工程师, 研究方向为环境健康监测。E-mail: 229541171@qq.com。

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

both sides of the single pile, and the vibration strengthening phenomenon in front of the pile is stronger, especially at the pile corner. With the ratio of pile length to wavelength in a range of $0.109-0.840$, the areas of vibration isolation zone and reflection zone increase greatly, while the area of diffraction zone decreases rapidly; when the ratio increases from 0.840 to 0.962 , the areas of vibration isolation zone, reflection zone, and diffraction zone change little. The ratio of pile diameter to wavelength has a great influence on the vibration area around the pile. As the ratio increases from 0.013 to 0.163 , the areas of vibration isolation zone and reflection zone increase by 0.249 m^2 and 0.129 m^2 , respectively, while the area of diffraction zone decreases by 0.088 m^2 . The ratio of source distance to wavelength has a great influence on the area of vibration isolation zone and reflection zone. When the ratio is in the range of $0.163-0.961$, the areas of vibration isolation zone and reflection zone decrease rapidly; when the ratio is in the range of $0.961-1.068$, the change trend tends to be gentle, and the area of diffraction area only increases by 0.037 m^2 .

Keywords: outdoor test; sand foundation; geometric size; Rayleigh wave; vibration area

0 引言

近年来,我国经济建设稳步增长,伴随而来的振动问题也日益引起人们的注意。通常在建筑物的设计中,地震作为不确定因素同样夹杂在建筑物的结构稳定性设计中^[1],但由于交通方式的改变,在原有环境中增加高铁、地铁等交通工具极大地影响建筑物的结构稳定^[2]。爆破、强夯、打桩、轨道交通等人工活动产生的振动对古建筑的安全以及精密仪器的使用产生了严重的影响^[3-5]。如何降低振动波对周围环境的影响是学者们研究的重要方向^[6],通常阻断振动波的方法是在振动波的传播路径上设置屏障,屏障可分为连续屏障与非连续屏障^[7]。空沟作为一种连续屏障,在土质较好的地层中可发挥较好的隔振作用。然而在实际的工程隔振中,由于土体稳定性以及工程造价等问题,空沟的深度受到限制^[8],而当入射波的波长较大时,空沟的隔振效果则大大减弱,此时采用排桩进行隔振,则可不受地形的约束,同时也可达到良好的隔振效果。部分学者选择对主动隔振进行隔振效果的试验分析,然而在实际工程中,主动隔振并不是一种有效的经济手段,其花费往往巨大^[9]。

国内外许多学者对排桩被动隔振时的隔振机理、隔振效果进了试验分析与数值模拟。在试验方面,Woods等^[10]通过室外试验对单排桩的设计提供了准则,即桩径必须大于被屏蔽波长的 $1/6$,然而在实际工程中,当波长较长时,桩径需要很大才能满足要求。高广运^[11]通过数值计算与试验相结合的方法,突破了 Woods 提出的桩径大于 $1/6$ 的理论,并

取得了良好的隔振效果。孙成龙等^[12]实测了排桩在铁路工程中的隔振效果,指出排桩的隔振效果并不是随着桩排数的增加而增加。在数值方面,Kattis等^[13]运用频域边界元法研究了单排桩在三维层面上的隔振问题,指出桩间距是影响隔振效果的最重要的因素,并提出排桩可作为填充沟来进行隔振。Avlies等^[14-15]采用波函数展开法研究了单排桩对P波、SH波、瑞利波的振动隔离问题,指出桩的刚度越强,隔振效果越好。徐平等^[16]运用波函数展开法研究了单排桩对振动波的隔离问题,指出隔振效果随着桩间距的减小而提高。李志毅等^[17]以瑞利波散射积分方程为基础,在三维层面对多排桩远场被动的隔振效果进行了分析,结果指出多排桩的桩径与桩间净距对隔振效果的影响小。刘中宪等^[18]采用IBIEM的方法研究了多排桩对P波、SV波的隔离问题,指出桩径、桩间距的优化设计能有效提高隔振效果。孙苗苗等^[19]从多重散射理论的角度出发,研究了任意排列、任意截面多排桩对P波、SV波的散射问题,结果表明桩间距、排间距、桩材料均对隔振效果有较大的影响。

以上学者的研究中,隔振机理以及隔振效果是研究的主要内容,本文在此基础上,通过室外试验并将单桩尺寸与瑞利波波长建立联系来分析当单桩几何参数变化时桩周土体的振动区域变化情况,对单桩周围土体的振动区域进行了研究。

1 理论基础

振动波在土体中的传播主要有P波、S波和R

波,而 S 波在空间上的振动可分解为 SH 波与 SV 波。当 P 波与 SV 波相互干涉时,在介质表面则形成了瑞利波。瑞利波(R 波)以其衰减速度慢的特点在土体表面进行传播时,对地表振动的影响最大。

当在土体中设置单桩时,瑞利波遇到单桩会发生绕射、透射、散射等现象^[20],而绕射波则可分为桩

边绕射与桩身绕射,如图 1 所示。然而单桩并不能阻挡全部的波能量,瑞利波仍会以某种方式影响单桩后面的土体。

在图 1 中,单桩桩前主要为反射波的作用,而在桩两侧则主要为绕射波,桩后的隔振效果则主要取决于绕射波与透射波的作用。

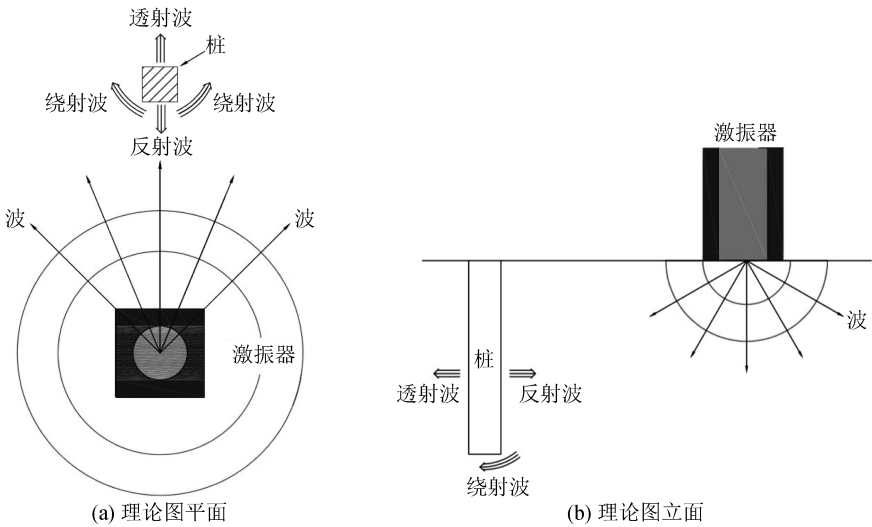


图 1 振动波传播理论图

Fig.1 Theoretical diagram of vibration wave propagation

2 试验概况

2.1 场地概况

为了防止人工振动与噪声对结果产生不利的影响,本试验场地位于郊区偏远地带。通过试验,确定了场地的土质主要为砂性土,同时为了消除土壤中的杂质以及边界效应对振动波的影响,在试验场地中间开挖出一个平面尺寸为 2 m×4 m,深度为 5 m 的坑,并将原有场地砂子经过 5 mm 孔筛筛过之后回填坑

内,在回填过程中已分层夯实。试验场地砂层含水率控制在 13%~15%,密度控制在 1.80~1.90 g/cm³。

2.2 仪器概况

在本文中,试验仪器采用 WS-Z30 型振动台控制系统,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 0.2~8 000 Hz,质量为 28.50 g,测量范围为 50 m/s²)、数据采集控制仪等。试验仪器设备如图 2 所示。

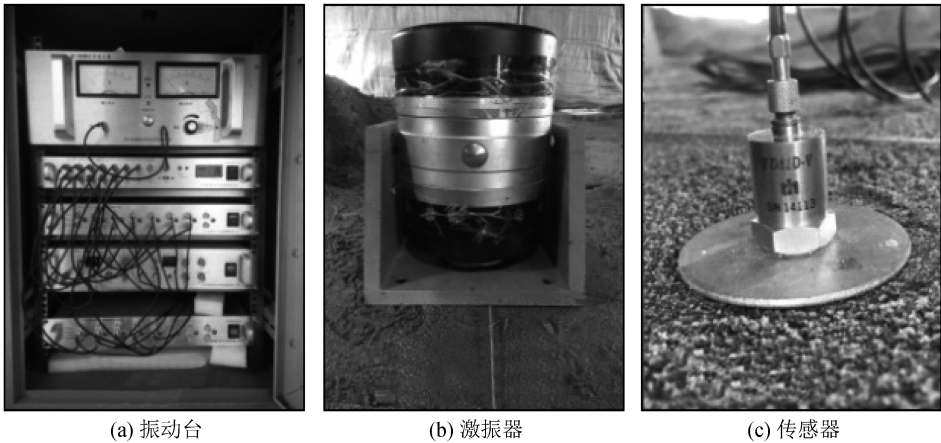


图 2 试验仪器

Fig.2 Test equipment

2.3 试验安排

本试验中,激振器作为振源。由于正弦波输出稳定,且操作简单,故本试验采取的振动波类型为正弦波。试验频率的选择基于文献[20],为了使拟合方程的拟合程度更加准确,因此试验所采用的频率为 30 Hz、60 Hz、90 Hz、120 Hz。采样频率设置为 5 000 Hz,激振时间为 5 s。在整个激振过程中,电

荷放大器的数值始终保持一致。表 1 为本次试验的变量,传感器摆放见图 3。

表 1 试验变量及取值

Table 1 Test variables and values		
桩长/cm	桩径/cm	振源距/cm
40	5	60
70	10	80
100	15	100

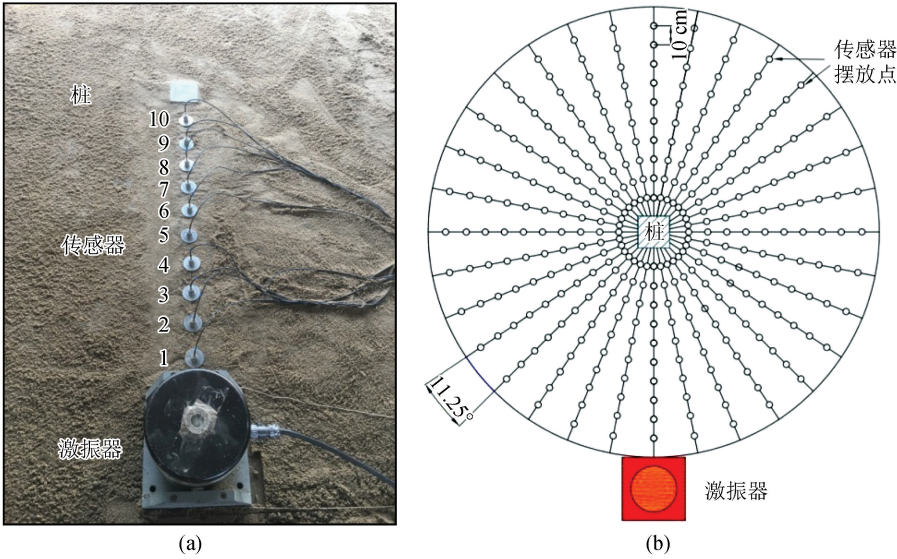


图 3 传感器摆放详图
Fig.3 Layout of sensors

3 试验评价指标

本试验通过绘制二维 A_r 等值线图来分析单桩周围振动区域的变化。同时 A_r 值越小则代表隔振效果越好^[21]。其计算方法如下:

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

式中: a_1 表示设置单桩时各测试点的振幅加速度值; a_0 表示无桩时各测试点的振幅加速度值。

4 波长测试及数据采集

4.1 瑞利波波长的测试

本文选用表面波普法^[22]测试砂性土中的瑞利波波速。相关仪器摆放见图 4 所示。

经过信号采集及处理,当激振频率为 150 Hz 时的相位差为 147.45,且信号的相关性良好,经计算可得瑞利波的平均波速为 109.99 m/s。瑞利波的波长可由公式 2 计算可得:

$$L_R = V_R/f \tag{2}$$

式中: L_R 为瑞利波波长; V_R 为瑞利波的波速; f 为频率。



图 4 瑞利波波速测试
Fig.4 Rayleigh wave velocity test

4.2 数据采集方法

传感器收集数据后反馈到计算机进而进行存储。数据采集如图 5 所示。

如图 5 所示,数据采集的时间段在 2~5 s 内,此区段内波形较为稳定。采用此区段的最大加速度值作为一次测试的加速度值,采集过程中连续激振并采集三次,选择三次加速度的平均值以减小误差并作为测试结果。

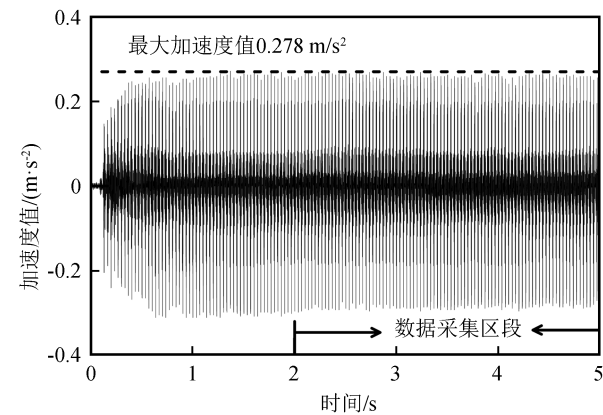


图 5 数据采集示意图

Fig.5 Schematic diagram of data acquisition

5 几何参数对桩周振动区域的影响

5.1 参数归一化处理

本文将瑞利波波长与单桩尺寸建立联系来分析几何参数变化时单桩振动区域的变化。参数归一化过程如下：

(1) 桩长参数 L

$$L = l / L_R$$

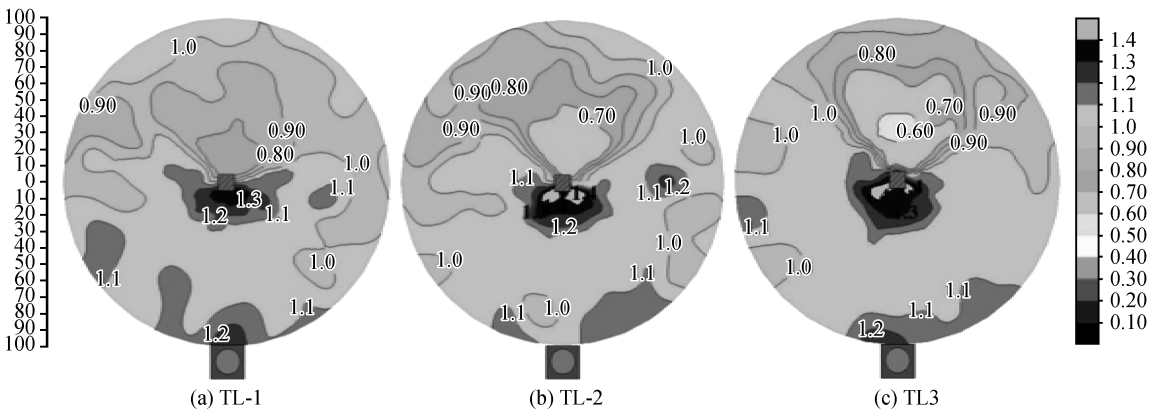


图 6 桩长变化下二维等值线图

Fig.6 Two-dimensional contour map with different pile length

在图 6 中,桩前、桩两侧存在着 A_r 值放大的现象,在桩后则存在 A_r 值减小的区域。在桩前放大的区域中,当桩长为 40 cm 时,桩前的 A_r 值最大在 1.3 以上,而当桩长为 70 cm 和 100 cm 时,桩前放大区域的 A_r 值达到了 1.4 以上,且放大的区域集中体现在桩角处,说明桩长的增加会使得桩前放大区域的 A_r 值有所增加。在桩两侧存在着 A_r 值在 1~1.1 的区域,这是由于绕射波所导致的,但其 A_r 值并未达到 1.2 以上。在桩后存在着单桩的隔振区域,当桩长为 40 cm 时,桩后的隔振区域的 A_r 值最小在 0.8 以上,其所能达到的隔振效果非常弱,但随

式中: l 为桩长; L_R 为瑞利波波长。

(2) 桩径参数 D

$$D = d / L_R$$

式中: d 为桩径; L_R 为瑞利波波长。

(3) 振源距参数 S

$$S = s / L_R$$

式中: s 为振源距; L_R 为瑞利波波长。

5.2 桩长参数对桩周振动区域的影响

为了研究桩长参数变化时桩周围振动区域的变化,对桩径、振源距控制不变,工况的选取列于表 2。

表 2 桩长工况安排

Table 2 Test arrangement of pile length			
工况编号	桩长/cm	桩径/cm	振源距/cm
1	40	10	100
2	70	10	100
3	100	10	100

通过不同的频率对表 2 中的工况进行测试,将测试的结果绘制成关于桩长的二维等值线图,测试的结果见图 6。本试验条件下,桩长参数 L 的取值范围在 0.109~1.091。

着桩长增加到 100 cm 时,桩后的隔振区域的 A_r 值达到了 0.5~0.6,说明当桩长增加,单桩的隔振效果得到了增强。

徐平^[23]以位移比小于 0.5 的区域为研究对象研究了多排桩对平面弹性波的多重散射问题。由于单桩在桩后很难达到良好的隔振效果,排除试验场地等偶然因素的影响,本文以 A_r 值小于 0.7 的区域作为隔振区,用 γ 来表示,分析桩后的隔振区域的变化。并定义桩前 A_r 值大于 1.1 的区域为反射区,用 α 来表示,桩两边 A_r 值在 1~1.1 的区域定义为绕射区,用 β 来表示。三个变量均以面积的形式进

行表示。

由于桩长为 40 cm 时,单桩桩后隔振区域的 A_r 值并没在 0.7 以下,以工况 TL-2 为例进行区域划分,如图 7 所示。

在图 7 中, γ 为单桩桩后 A_r 小于 0.7 的区域。 β 的划分范围为线 L_1 与 A_r 值在 1.1~1.2 的交汇区域,线 L_1 与桩前侧相重合。 α 主要为线 L_1 与桩前 A_r 值大于 1.1 的交汇区域,本文将桩长参数变化对应的 γ 、 α 、 β 的变化进行拟合,拟合结果如图 8 所示。

上述各工况拟合方程如表 3 所列,显著性水平 α 取 0.05。

由表 3 可知各工况的 R 值较大且均大于 R_{af} ,其拟合方程可较好地反映各变量与 L 值的关系。

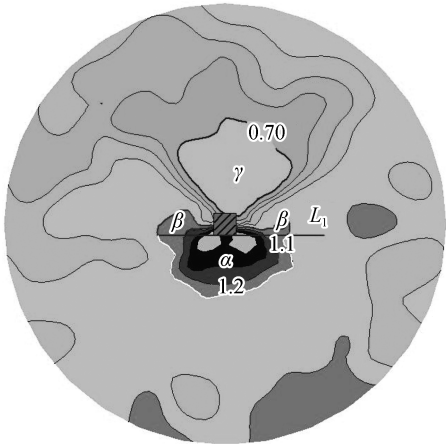


图 7 参数区域划分
Fig.7 Parameter area division

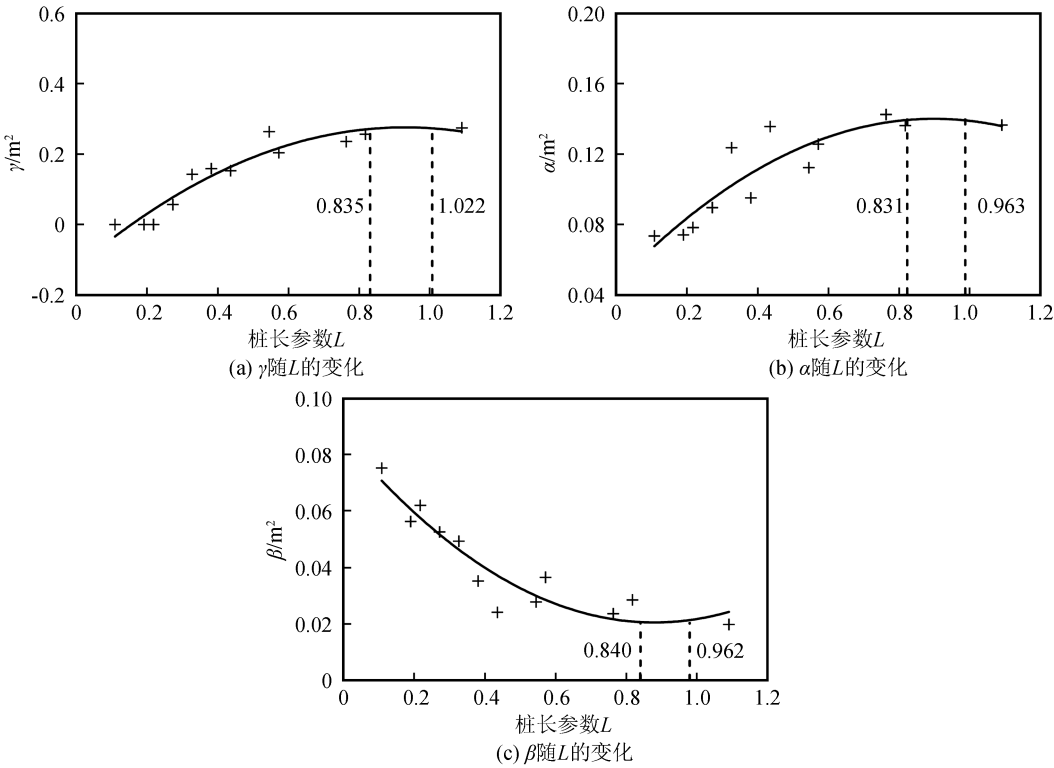


图 8 γ 、 α 、 β 随 L 变化图
Fig.8 Change of γ , α , β with L

表 3 各变量随 L 值变化的拟合曲线			
Table 3 Fit curve of each variable with L			
拟合方程	自由度 f	相关系数 R	临界值 R_{af}
$\gamma = -0.12 + 0.85L - 0.46L^2$	12	0.920	0.567
$\alpha = 0.05 + 0.208L - 0.12L^2$	12	0.812	0.567
$\beta = 0.09 - 0.15L + 0.08L^2$	12	0.876	0.567

如图 8 所示,随着 L 的增加, γ 的值呈现出增加的趋势,当 L 值在 0.109~0.835 的范围内时,随着 L 的增加,桩后 γ 区域的面积增长迅速,而当 L 值

增加到 0.835~1.022 的范围内时,数据增长较为缓慢,趋势趋于平缓。

对于 α ,当 L 的值在 0.109~0.831 范围内时, α 值呈现出迅速增长的趋势,而当 L 值在 0.831~0.963 的范围内时,桩前反射区的面积增长幅度很小,数据趋于平缓。

对于 β 值,随着 L 值的增加, β 值呈现出减小的趋势,当 L 值在 0.109~0.840 的范围内时,拟合曲线的降低趋势明显,当 L 值达到 0.840~0.962 的范

围内时, β 值变化很小。

综合分析图 8, 当桩长参数 L 的值在 0.840 ~ 0.962 的范围内时, 隔振区、反射区以及绕射区面积的变化趋于平缓, 继续增加桩长对各区域面积影响很小。

5.3 桩径参数对桩周振动区域的影响

桩径是设置排桩隔振的重要变量。在本试验中, 同样分析了在桩径变化情况下振动波遇单桩时

桩周围土体的振动区域变化情况。在研究单桩桩径这一变量时, 对桩长、振源距保持不变, 工况安排列于表 4, 图 9 为其绘制的二维等值线图。

表 4 桩径工况安排

Table 4 Test arrangement of Pile diameter			
工况编号	桩长/cm	桩径/cm	振源距/cm
TD-1	70	5	100
TD-2	70	10	100
TD-3	70	15	100

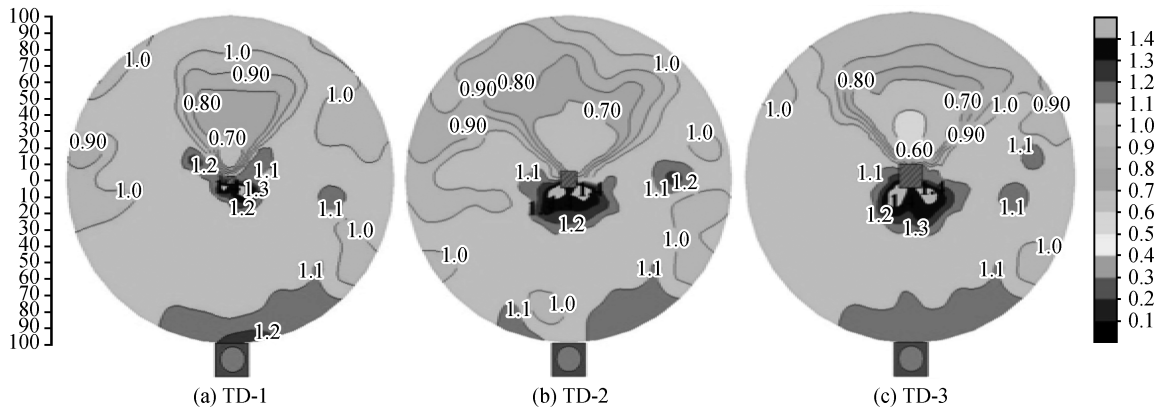


图 9 桩径变化下二维等值线图

Fig.9 Two-dimensional contour map of pile diameter change

在图 9 中, 桩径的变化对桩周围振动区域的影响较大, 具体体现在: 桩后隔振区、桩前反射区、桩两侧绕射区的影响。当桩径减小到 5 cm 时, 桩后的隔振区域被限制在了桩后的一段小范围内; 当桩径增加到 15 cm 时, 桩后隔振区域的面积明显增大。在反射区域, 桩径的改变虽然都使得桩前存在 A_r 值 1.2~1.4 的区域, 但不同的是区域面积随着桩径的增加而增加。对于桩两侧的绕射区域, 在图 9 中, 工况 TD-1 的绕射区域的面积要明显大于工况 TD-3。将桩径参数 D 与 γ 、 α 、 β 进行拟合, 拟合图形见图 10。本文中, 桩径的取值范围为 0.013~0.163。

γ 、 α 、 β 与桩径参数 D 拟合方程的相关参数列于表 5。

由表 5 可知各工况的 R 值较大且均大于 R_{at} , 其拟合方程可较好地反映各变量与 D 值的关系。

由图 10 可知, 桩径参数 D 对各区域面积的影响较大且并未出现数据的缓和段。随着桩径参数 D 的增加, γ 值从 0 增加到了 0.249 m^2 , 曲线整体趋势较陡, 增长速度较快。对于 α , 拟合曲线整体呈现出上升的趋势, α 值从 0.029 m^2 增加到了 0.158 m^2 , 增长速度较快。对于 β 值, 随着 D 值的增加, β 呈现出降低的趋势, 其值从 0.095 m^2 降低到了 0.007 m^2 , 整体降低速度较大, 但幅度很小。

综合分析图 9、图 10, 桩径参数在 0.013~0.163 的范围内增加会使得桩后隔振区、桩前反射区的面积增加明显, 但会使得桩两侧绕射区的面积急剧下降。

5.4 振源距参数 S 对桩周振动区域的影响

为了研究振源距变化时桩周围振动区域的变化, 需控制桩长、桩径保持不变。在本试验中, 通过改变不同的振源距来表示振源的位置。工况安排列于表 6, 图 11 为绘制的二维等线图。

从图 11 中可以看出, 当振源距为 60 cm、80 cm 时, 桩前、桩两侧均存在 A_r 值增大的现象, 同样在桩角处 A_r 值增大更加明显。在桩前的反射区中, 两个工况的 A_r 值在桩前相似, 不同的是反射区的面积发生了变化。对于桩后隔振区, 当振源距为 60 cm 时, 桩后 A_r 值在 0.5~0.6 的区域占据了大部分, 同时在区域中间出现了 A_r 值在 0.4~0.5 的区域。当振源距增加到 80 cm 时, 隔振区在桩后的面积有所减小, 并且 A_r 值在 0.4~0.5 的范围消失, 最小 A_r 值的隔振区在 0.5~0.6 之内。在图 11 中同时可以看出, 振源距从 60 cm 增加到 80 cm 时, 绕射区的面积发生了明显的变化, 当振源距为 60 cm 时, A_r 在 1~1.1 的区域成块状出现, 而当振源距增加到 80 cm 时, 绕射区呈连续状出现。

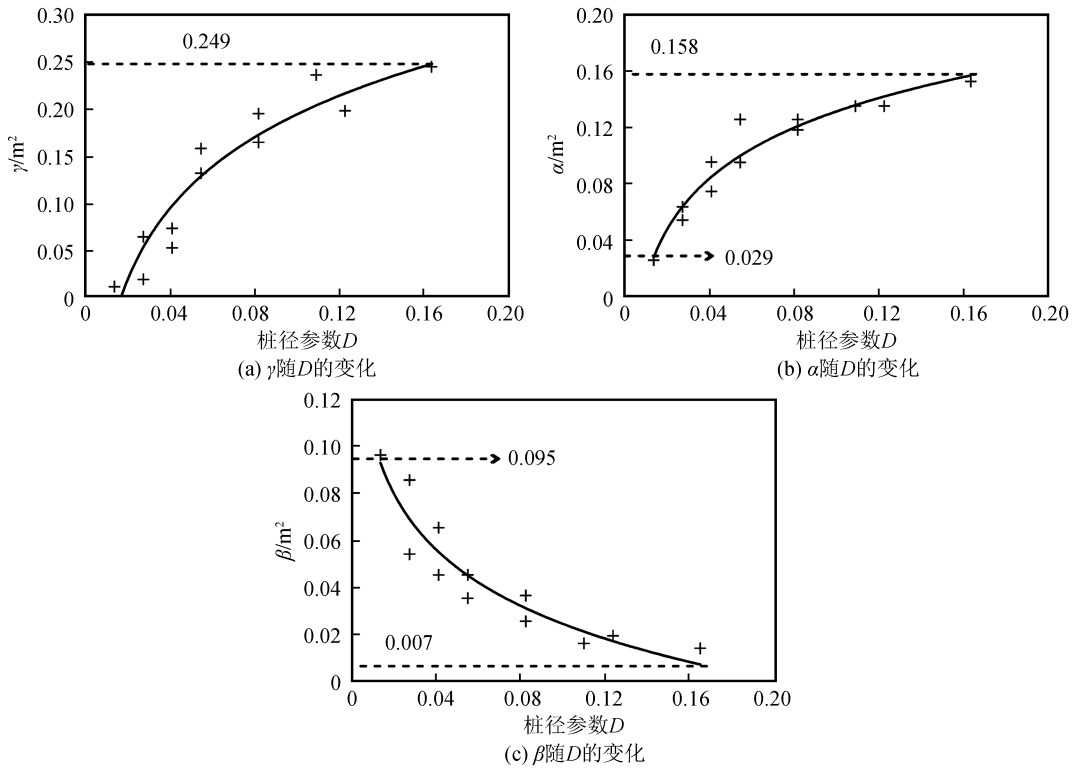


图 10 γ 、 α 、 β 随 D 变化图

Fig.10 γ 、 α 、 β with D changes

表 5 各变量随 D 值变化的拟合曲线

拟合方程	自由度 f	相关系数 R	临界值 R_{at}
$\gamma=0.11\ln D+0.44$	12	0.895	0.567
$\alpha=0.05\ln D+0.25$	12	0.933	0.567
$\beta=-0.03\ln D-0.05$	12	0.829	0.567

表 6 振源距工况安排

工况编号	桩长/cm	桩径/cm	振源距/cm
TS-1	70	10	60
TS-2	70	10	80
TS-3	70	10	100

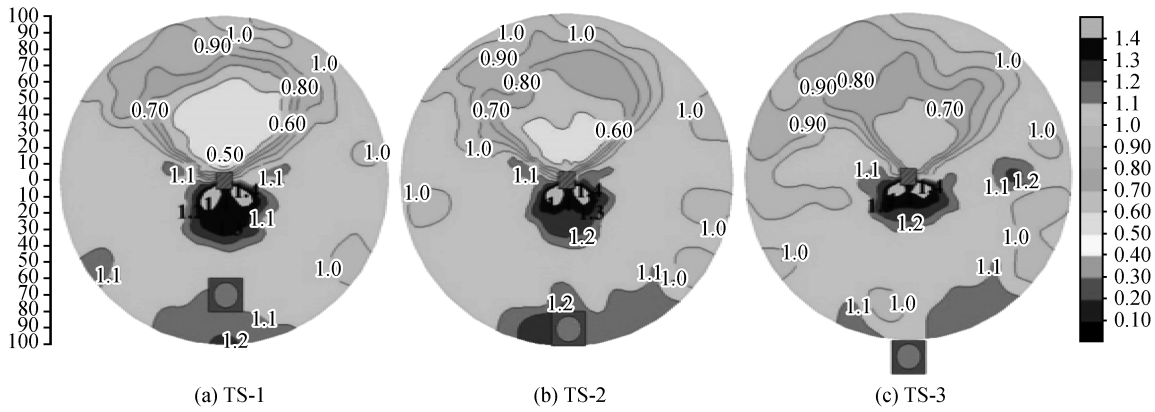


图 11 振源距变化下二维等值线图

Fig.11 Two-dimensional contour map of different vibration source distance

将隔振区、反射区以及绕射区的面积与振源距参数 S 值进行拟合,拟合图形见图 12,相关拟合图形的拟合方程详见表 7,其中显著性水平 α 取值为 0.05。本试验中振源距参数的取值范围为 0.163~

1.091。
表 7 中各拟合方程的相关系数 R 均较大且大于临界值 R_{at} ,其拟合方程可较好地反映各区域面积变化与参数 S 的相关性。

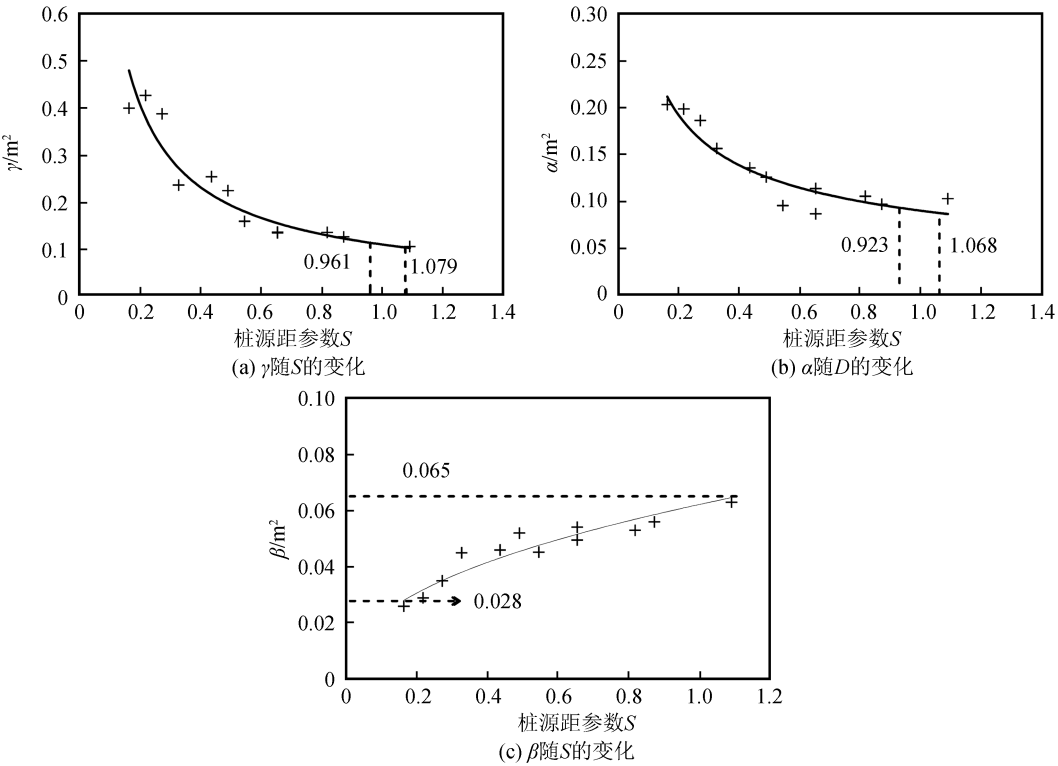


图 12 γ 、 α 、 β 随 S 变化图
Fig.12 Change of γ 、 α 、 β with S

表 7 各变量随 S 值变化的拟合曲线

拟合方程	自由度 f	相关系数 R	临界值 R_{af}
$\gamma=0.11S^{-0.81}$	12	0.922	0.567
$\alpha=0.09S^{-0.47}$	12	0.837	0.567
$\beta=0.06S^{0.44}$	12	0.903	0.567

由图 12 可知,振源距对桩周振动区域的面积影响较大。对于 γ ,随着 S 值的增加, γ 整体呈现出下降的趋势,当 S 值在 0.163~0.961 范围内时,增加 S 值可使得 γ 值降低明显,而当 S 值继续增加到 0.961~1.079 的范围内时, γ 值变化很小,数据出现了缓和段。对于 α , S 值的增加同样使得 α 值降低明显,但相比于 γ 值, α 值的降低幅度较小。当 S 值在 0.163~0.923 范围内时, α 值下降迅速,当 S 值在 0.923~1.068 的范围内时, α 值虽然仍是降低的趋势,但数据开始缓和,变化幅度很小。对于 β 值, β 与 S 值几乎成线性增加,但增长幅度很小,数据整体较为缓和,随着 S 值的增加, β 值从 0.028 增加到了 0.065。

综合分析图 11、图 12,当 S 值达到 0.961~1.068 的范围内时,隔振区、反射区的面积变化较小,而绕射区的面积随着 S 值的增加而增加。

5 结论

本文通过室外试验绘制了二维等值线图,研究了单桩桩长、桩径、振源距、激振频率变化情况下桩前、桩后以及桩两侧振动区域的变化,得出了以下结论:

- (1) 桩前、桩两侧存在振动加强区,并且桩两侧的振动区的 A_r 值要低于桩前的加强区,在桩前加强区中,以桩角处更加突出。
- (2) 桩长参数 L 对隔振区、反射区以及绕射区的面积变化影响较大,当 L 值在 0.109~0.840 的范围内时,隔振区、反射区的面积迅速增加,而绕射区的面积减小。当 L 值在 0.840~0.962 的范围内时,隔振区、反射区以及绕射区的面积变化很小,拟合曲线趋势趋于平缓。
- (3) 桩径参数 D 对各区域的面积影响较大,随着桩径参数 D 在 0.013~0.163 的范围内增加时,隔振区与反射区的面积呈现出较大幅度的增长,分别增长了 0.249 m^2 、0.129 m^2 ,而绕射区的面积降低了 0.088 m^2 ,降低幅度较小,但降低的速率较快。
- (4) 振源距参数 S 对单桩周围振动区域的影响较大。当 S 值在 0.163~0.961 的范围内时,隔振

区与反射区的面积呈现出急速下降的趋势,当 S 值在 $0.961 \sim 1.068$ 的范围内时,两处面积的变化趋于缓和,但仍在减小。而绕射区的面积几乎随着 S 值的增加呈现出线性增加的状态,但增加幅度较小,仅仅增加了 0.037 m^2 。

参考文献(References)

- [1] 韩腾飞,李晓东,邱金凯,等.大型焦炭塔 TMD 减振方案研究[J].建筑结构,2019,49(4):134-138.
HAN Tengfei, LI Xiaodong, QIU Jinkai, et al. Study on TMD vibration reduction scheme for large coke tower[J]. Building Structure, 2019, 49(4): 134-138.
- [2] 叶鹏飞,刘文光,田坤.地铁临近建筑结构楼板的隔振效果实测与分析[J].建筑结构,2020,50(3):72-76.
YE Pengfei, LIU Wenguang, TIAN Kun. Measurement and analysis of vibration isolation effect of building floor near subway[J]. Building Structure, 2020, 50(3): 72-76.
- [3] 万佳,孟宪杰,魏剑伟,等.水平加速度作用下古建筑木构架初始运动状态影响因素的研究[J].太原理工大学学报,2020,51(1):97-103.
WAN Jia, MENG Xianjie, WEI Jianwei, et al. Parameters study on initial motion state of Chinese traditional timber structure under horizontal acceleration[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2020, 51(1): 97-103.
- [4] 白婷婷,康静文,沙艳云,等.太原地铁 2 号线环境振动影响预测与评价[J].太原理工大学学报,2018,49(5):686-690.
BAI Tingting, KANG Jingwen, SHA Yanyun, et al. Prediction and evaluation of environmental vibration caused by line 2 of Taiyuan metro[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2018, 49(5): 686-690.
- [5] 吴兵,傅学怡,孟美莉,等.深圳火车北站高架轻轨列车振动效应分析[J].工业建筑,2013,43(8):133-137.
WU Bing, FUXUEYI, MENG Meili, et al. Analysis of vibration effects of elevated light rail train through Shenzhen north railway station[J]. Industrial Construction, 2013, 43(8): 133-137.
- [6] 陈学军,余思喆,宋宇,等.采矿爆破振动波在岩溶区的传播影响因素分析[J].地质力学学报,2018,24(5):692-698.
CHEN Xuejun, YU Sizhe, SONG Yu, et al. Analysis of factors influencing the propagation of mining blasting vibration wave in karst area[J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24(5): 692-698.
- [7] 高广远,杨先健.排桩隔振的理论与应用[J].建筑结构学报,1997,18(4):58-69.
GAO Guangyun, YANG Xianjian, WANG Yisun, et al. Theory and application of vibration isolation by piles in rows[J]. Journal of Building Structures, 1997, 18(4): 58-69.
- [8] 时刚,高广远.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.
- [9] 刘晶磊,赵倩,梅名彰,等.轨道交通荷载下桩板结构主动隔振效果研究[J].地震工程学报,2020,42(1):7-14.
LIU Jinglei, ZHAO Qian, MEI Mingzhang, et al. Active vibration isolation effect of the pile-plank structures under rail traffic loads[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(1): 7-14.
- [10] WOODS R D, BAMNET N E, SANGESSER R. A new tool for soil screening of surface waves in soil dynamics[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, 1974, 100(11): 1234-1247.
- [11] 高广运.非连续屏障地面隔振理论与应用[D].杭州:浙江大学,1998.
- [12] 孙成龙,高亮.铁路排桩隔振效果实测分析[J].铁道建筑,2016,56(3):163-167.
SUN Chenglong, GAO Liang. Field measurement and analysis on vibration isolation effects of multi-rows of piles for railway engineering[J]. Railway Engineering, 2016, 56(3): 163-167.
- [13] 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.
- [14] AVILES J, SANCHEZ-SESMA F J. Piles as barriers for elastic waves[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109(9): 1134-1146.
- [15] AVILES J, SANCHEZ-SESMA F J. Foundation isolation from vibration using piles as barriers[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1988, 114(11): 1854-1870.
- [16] 徐平,邓亚虹,吴明.饱和土体中多排桩屏障对压缩快波的隔离[J].工程力学,2014,31(5):120-127.
XU Ping, DENG Yahong, WU Ming. Isolation of fast compressive waves by barriers composed of several rows of piles in saturated soils[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(5): 120-127.
- [17] 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.
- [18] 刘中宪,王少杰.非连续群桩屏障对平面 P、SV 波的隔离效应:二维宽频带间接边界积分方程法模拟[J].岩土力学,2016,37(4):1195-1207.
LIU Zhongxian, WANG Shaojie. Isolation effect of discontinuous pile-group barriers on plane P and SV waves: Simulation based on 2D Broadband indirect boundary integration equation method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4): 1195-1207.
- [19] 孙苗苗,夏唐代.多排任意排列的弹性桩屏障对平面 P 波或 SV 波多重散射[J].振动与冲击,2014,33(6):148-155.
SUN Miaomiao, XIA Tangdai. Multiple scattering of P and SV waves by multi-row arbitrarily arranged elastic piles barrier[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(6): 148-155.

[20] 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 Jianhua, 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.

[21] 刘晶磊,于川情,刘桓,等.隔振沟槽几何参数对隔振效果的影响研究[J].振动工程学报,2018,31(6):930-940.
LIU Jinglei, YU Chuanqing, LIU Huan, et al. Influence of geometric parameters of isolation trench on vibration isolation effect[J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(6): 930-940.

[22] 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(3):61-65.
CHEN Yunmin, WU Shiming, ZENG Guoxi. Surface wave spectrum analysis method and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992(3): 61-65.

[23] 徐平.多排桩非连续屏障对平面弹性波的隔离[J].岩石力学与工程学报,2012,31(增刊1):3159-3166.
XU Ping. Isolation of plane elastic waves by discontinuous barriers composed of several rows of piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Suppl): 3159-3166.

(上接第 692 页)

[8] 田敬学,张庆贺.盾构法隧道的纵向刚度计算方法[J].中国市政工程,2001(3):35-37.
TIAN Jingxue, ZHANG Qinghe. Calculation of longitudinal rigidity of shield tunnels[J]. China Municipal Engineering, 2001(3): 35-37.

[9] 黄钟晖.盾构法隧道错缝拼装衬砌受力机理的研究[D].同济大学,2001.
HUANG Zhong-hui. Research on the mechanism of the staggered assembled lining of shield tunnel[D]. Tongji University, 2001.

[10] 小泉淳.盾构隧道管片设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2012.
KOIZUMI A. Shield tunnel segment design[M]. Beijing: China Architecture & Building, 2012.

[11] 梁建文,于军港,张季,等.基于黏弹性边界的地下隧道非线性地震响应分析模型[J].地震工程学报,2014,36(3):434-440.
LIANG Jianwen, YU Jungang, ZHANG Ji, et al. A nonlinear seismic response analysis model for underground tunnels based on the viscous-spring boundary[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(3): 434-440.

[12] LIANG Jiali, LIANG Jianwen. Earthquake response analysis of tunnels at a complex saturated site[?]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2020.

[13] 刘晶波,杜义欣,闫秋实.黏弹性人工边界及地震动输入在通用有限元软件中的实现[J].防灾减灾工程学报,2007,27(增刊):37-42.
LIU Jingbo, DU Yixin, YAN Qiushi. Realization of viscoelastic artificial boundary and earthquake input in general finite element software[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007, 27(Suppl): 37-42.

[14] 梁建文,梁佳利,张季,等.深厚软土地中三维凹陷地形非线性地震响应分析[J].岩土工程学报,2017,39(7):1196-1205.
LIANG Jianwen, LIANG Jiali, ZHANG Ji, et al. Nonlinear seismic response of 3D canyon in deep soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(7): 1196-1205.

[15] 刘前,刘瑜,梁建文,等.基于反应位移法的复杂软土盾构隧道横断面抗震分析[J].地震工程学报,2020,42(5):1217-1224.
LIU Qian, LIU Y, LIANG Jian-wen, et al. Seismic transverse analysis of shield tunnel in complex soft soil based on the response deformation method[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(5): 1217-1224.

[16] 建筑抗震设计规范:GB 50011-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Code for seismic design of buildings: GB 50011-2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.