刘晶磊,吴浩,张冲冲,等.单排弹性实心桩对 SH 波的散射求解问题[J].地震工程学报,2024,46(1):59-65.DOI:10.20000/j. 1000-0844.20220704001

LIU Jinglei, WU Hao, ZHANG Chongchong, et al. An approach for solving the scattering of SH waves by elastic solid piles in one row[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(1):59-65. DOI:10.2000/j.1000-0844.20220704001

单排弹性实心桩对 SH 波的散射求解问题

刘晶磊^{1,2,3}, 吴浩^{1,2,3}, 张冲冲⁴, 曹晋源^{1,2,3}, 李秀欣^{1,2,3}

(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;

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;

4. 上海金茂建筑装饰有限公司,北京 100020)

摘要:采用波函数展开法结合格拉夫加法定理分析单排实心弹性桩的 SH 波散射问题,通过改变单 一变量,分析桩土剪切模量之比、桩体个数等因素对排桩隔振的影响效果,得到如下结论:当无量纲 频率为低频和中频时,排桩后无量纲位移曲线在无限远处趋于 0,随着桩体根数的增加隔振效果逐 渐提高;在排桩后 0~70a(a 为桩径)范围内无量纲位移之比变化幅度较大,且不稳定,隔振效果较 差;当桩土剪切模量之比小于 500 时,在 250a~380a 范围内减隔振效果较好;当桩土剪切模量之 比大于或等于 500 时,隔振效果并不会随着其增加而大幅增加,即此时可将桩体认为是刚性桩体。 当无量纲频率为中频时,在 100a~120a 范围内隔振效果较好,之后此范围内无量纲位移之比先骤 升后逐渐下降,但当无量纲频率上升为高频时,各桩体根数下排桩隔振效果相差不大,且会在距离 排桩更近处就已经达到很好的隔振效果。

关键词:波函数展开法;格拉夫加法定理;隔振效果 中图分类号:TU435 文献标志码:A 文章编号:1000-0844(2024)01-0059-07 DOI:10.20000/j.1000-0844.20220704001

An approach for solving the scattering of SH waves by elastic solid piles in one row

LIU Jinglei^{1,2,3}, WU Hao^{1,2,3}, ZHANG Chongchong⁴, CAO Jinyuan^{1,2,3}, LI Xiuxin^{1,2,3}

(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 Engineering, Zhangjiakou 075000, Hebei, China;

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

(4. Shanghai Jinmao Construction & Decoration Co., Ltd., Beijing 100020, China)

Abstract: The scattering issue of shear horizontal (SH) waves from solid elastic piles in a single row was analyzed using the wave function expansion technique and Graf's addition theorem. By changing a single variable, we analyzed the effects of the pile-soil shear modulus ratio and the number of piles on the vibration isolation capabilities of row piles. Our results show that when di-

收稿日期:2022-07-04

基金项目:2022 年度河北省高等学校科学研究重点项目(ZD2022017);河北省创新能力提升计划项目(21567614H);2023 年张家口市 市级科技计划财政资助项目(2311007A)

第一作者简介:刘晶磊,男,河北张家口人,博士,副教授,主要从事土的动力特性、铁路路基研究。E-mail:kingbest_1118@163.com。 通信作者:张冲冲,男,河北衡水人,硕士,主要从事铁路路基研究。E-mail:z1978535778@163.com。

mensionless frequency is low to medium, the dimensionless displacement curve beyond the row piles tends to zero at infinity. As the number of piles increases, the vibration isolation effect also gradually improves. However, the ratio of dimensionless displacement changes greatly in the range of 0-70a following the piles, leading to unstable and poor vibration isolation performance. When the pile-soil shear modulus ratio is less than 500, the vibration isolation effect within the range of 250a-380a proves to be satisfactory. Conversely, when the pile-soil shear modulus ratio is equal to or exceeds 500, there is no substantial increase in the vibration isolation effect. This suggests that the pile can be regarded as a rigid pile at this time. In instances of medium dimensionless frequency, the vibration isolation effect performs well within the 100a-120a range. The ratio of dimensionless displacement in this range experiences a sudden increase before gradually decreasing. However, as the dimensionless frequency escalates to high frequencies, the vibration isolation effect shows minor variation with different numbers and exhibits good performance close to the row piles. **Keywords**: wave function expansion method; Graf's addition theorem; vibration isolation effect

0 引言

列车运行引起振动造成的危害不仅会给社会发展造成严重的经济损失,还会使人产生一系列心理和生理的健康问题。因此,减弱或者消除振动造成的影响成为亟待解决的问题。目前,被动隔振领域具有较多的研究成果,其中连续型隔振屏障,例如空沟、填充沟、地下连续墙等隔振措施在实际工程中应用较广泛。非连续型隔振屏障,例如单排桩、多排桩等隔振措施因为施工成本较高,导致其应用发展受到了限制。但由于非连续型隔振屏障具有简便、维护成本较低,且能够应用于地质条件较差的地区,在加强地基承载力的同时能够保持自身强度,因此非连续型隔振屏障仍有其研究价值。

振动波的散射作用在非连续型隔振屏障的隔振 机理中起着决定性作用,国内外学者对其展开了多 方面的研究。Avilés 等^[1]采用波动理论,得出了均 质弹性土体中单排弹性实心桩屏障对平面 SV 波的 阻隔效果,以及单排刚性实心桩屏障对平面 SV 波、 P 波和 SH 波阻隔效果的精确解。徐平等^[2]采用波 函数展开法,得到了非连续弹性圆柱实心桩屏障对 人射平面 P 波和 SH 波散射系数的理论解。夏唐代 等[3]和孙苗苗[4]运用多重散射理论,分析任意布置 的排桩屏障对弹性波的散射问题并进行了解析求 解。Pu 等^[5]采用毕奥特理论和 Floquet-Bloch 理论 简化分析桩-土系统,发现瑞利波衰减的频率范围和 屏蔽能力分别与理论衰减区和衰减系数相吻合。蔡 袁强等[6]基于饱和土弹性波动方程,考虑土体和水 耦合作用的影响,分析了全空间均质饱和土中弹性 排桩对入射平面S波的散射问题。侯键等^[7]对于平 面 SH 波入射下刚性桩隔振屏障的散射问题提出多 重散射求解法,求得了 SH 波入射下任意排列、任意 半径固定刚性桩多重散射的精确解。Ren 等^[8]基于 Bornitz 方程,提出了层状均质介质的衰减模型,并 用其估算软土区域高等级公路的典型路基和地基中 不同深度的垂直振动水平。章敏等[9]研究了双层非 饱和地基中 Rayleigh 波的传播特性问题,发现 Rayleigh 波波速随着饱和度的增加呈线性下降趋势,对 于上软下硬地层,上覆层厚度的增加会导致波速减 小,并逐渐趋向于上覆土本身的 Rayleigh 波速。时 刚等^[10]以薄层法(TLM)基本解作为动力 Green 函 数的饱和土半解析边界元法,有效地分析了饱和半 空间的土-结构动力相互作用问题。陈炜昀等[11]分 析了非饱和地基表面不透水(气)和透水(气)两类条 件下 Rayleigh 波的弥散特性。刘中宪等^[12]运用一 种高精度的间接边界积分方程法,对 P 波、SV 波下 二维排桩的隔振效果进行了宽频带计算分析。

上述研究多采用单重散射求解排桩散射问题, 而实际散射作用是经过无限重散射综合得出的结 果。本文采用波函数展开法结合格拉夫(Graf)加法 定理分析单排实心弹性桩的 SH 波散射问题,将三 维矢量波问题简化为二维标量波问题,将波函数按 Fourier-Bessel 级数展开,依据边界条件求解出级数 展开式中的系数,最终得到平面直角坐标系下的总 波场位移公式;通过改变单一变量,研究桩土剪切模 量之比、桩体个数两因素对排桩隔振的影响效果,并 给出实际工程的参考数值。

1 公式模型

假设单排圆柱弹性实心桩位于各向同性半无限 均质弹性地基中,入射 SH 波的偏振方向与桩轴一 致,因此不会与其他体波(P波、SV波等)中的波传 播和散射问题产生耦合效应;同时假定桩身长度远 大于直径,将繁琐的三维数学散射求解问题简化为 较为简单的二维平面问题。

设入射 SH 波入射角为 Ψ ,整体直角坐标系 (x,y)对应的极坐标系为(r,θ),排桩沿x 轴横向布 置,y 轴为桩体排列的法线方向,桩体标号记为 $j(1 \le j \le N$),任意桩体j都有独立的直角坐标系 (x_j, y_j)和极坐标系(r_j, θ_j),以桩体圆心为坐标原 点 O_j ,半径为a,沿x 轴等间距排列,桩间距为 b_o 土体材料性质由其拉梅常数 λ_1, μ_1 及质量密度 ρ_1 确定;桩体材料性质由其拉梅常数 λ_2, μ_2 及质量密 度 ρ_2 确定;土体中相应的波速为 c_1 ,桩体中相应的 波速为 c_2 。

如图 1 所示,选取一个桩体单元为研究对象,设 该桩体为 *l* 号桩体,采用波函数展开法设立该桩体 在(*r*_{*l*},*θ*_{*l*})坐标系下的散射波场,并应用 Graf 加法 定理将其余桩体的散射波场在(*r*_{*l*},*θ*_{*l*})坐标系下表 示,叠加入射波场和所有桩体在土体区域中的散射 波场后,结合桩体域中的透射波场,根据桩土位移边 界条件和应力求解待定系数,从而得到单排分布桩 体模型的解析结果。



图1 单排实心桩、入射平面 SH 波及坐标系

Fig.1 Single-row solid pile, incident plane SH wave and coordinate system

入射平面 SH 简谐体波应当满足 Helmholtz 方程^[13]:

$$\frac{\partial \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial \omega}{\partial y^2} + k_1^2 \omega = 0 \tag{1}$$

式中: $k_1 = \frac{\omega}{c_1}$ 为土体中SH波的波数, c_1 为土体中波速, ω 为圆频率。

利用桩体的分布特性,l号桩体的散射波场与1号 桩体的散射波场相位差为 exp($ik_1d_{1l}\cos \Psi$),满足上述 方程的入射 SH 波在坐标系(x_l , y_l)下可表示为:

$$\omega_1^{\text{inc}}(x_l, y_l) = \omega_0 \exp(ik_1 d_{1l} \cos \Psi) \exp[ik_1 (x_l \cos \Psi + y_l \sin \Psi)]$$
(2)

式中:ω1inc 为土体中入射波场位移;ω0 为入射平面

SH 波的位移幅值; k_1 为土体中 SH 波的波数;i 表示 虚数单位; d_{1l} 为l 号桩距l 号桩的间距。为简化书 写,式中的时间因子 exp($-i\omega t$) 已略去。

根据波函数展开法,入射平面 SH 波的位移在 极坐标系(r_i , θ_i)下的 Fourier-Bessel 级数形式为:

$$\omega_{1}^{\text{inc}}(r_{l},\theta_{l}) = \omega_{0} \exp(\mathrm{i}k_{1}d_{1l}\cos\Psi) \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_{m}i^{m}J_{m}(k_{1}r_{l}) \cdot \cos m(\theta_{l}-\Psi)$$
(3)

式中: $J_m(\bullet)$ 为第一类 Bessel 函数; ϵ_m 为 Neumamm 因子, $\epsilon_m = 1$ (m = 0), $\epsilon_m = 2$ ($m \neq 0$);m 为入射波展 开式级数截断项。

土体中由于桩体的存在,任意 j 号桩体都会对 入射平面 SH 波产生散射作用而形成散射波,同时 由于散射位移场不是关于 x 轴对称的,散射波场 $sin(n\theta_j)$ 的系数不为0,结合波函数展开法可将散射 位移场表达为:

 $\omega_{1,j}^{\rm sc}(r_j,\theta_j) = \exp(\mathrm{i}k_1 d_{1j}\cos\Psi)$

 $\sum_{n=0}^{\infty} H_n^{(1)}(k_1 r_j) [A_n^j \cos(n\theta_j) + B_n^j \sin(n\theta_j)]$ (4)

式中:上标 sc 表示散射; $H_n^{(1)}(\cdot)$ 为第一类 Hankel 函数; A_n^j 、 B_n^j 均为散射待定系数;n为散射波展开时 级数截断项。

首先为实现所有桩体散射波场的叠加,应用 Graf 加法定理^[14],将所有非"*l*"号桩体的散射波场 统一转换为极坐标系(r_l , θ_l)下的表示,即: $\omega_{1,j}^{se}(r_l,\theta_l) = \exp(ik_1d_{1j}\cos\Psi)$.

$$\left[\sum_{n=0}^{\infty} A_n^j (-1)^n \sum_{m=0}^{\infty} J_m(k_1 r_l) \frac{\varepsilon_m}{2} K_m^n(k_1 d_{jl}) \cdot \cos(m\theta_l) + \sum_{n=0}^{\infty} B_n^j (-1)^n \cdot \sum_{m=0}^{\infty} J_m(k_1 r_l) \frac{\varepsilon_m}{2} L_m^n(k_1 d_{jl}) \sin(m\theta_l)\right]$$
(5)

其中:

$$\begin{cases} K_{m}^{n}(k_{1}d_{jl}) = H_{n+m}^{(1)}(k_{1}d_{jl}) + (-1)^{m}H_{n-m}^{(1)}(k_{1}d_{jl}) \\ L_{m}^{n}(k_{1}d_{jl}) = -H_{n+m}^{(1)}(k_{1}d_{jl}) + (-1)^{m}H_{n-m}^{(1)}(k_{1}d_{jl}) \end{cases}$$
(6)

然后,将入射波场式(3)和桩体的散射波场式 (4)叠加,可得土体中在(r_i , θ_i)坐标系下的总波场 位移 $\omega_1(r_i, \theta_i)$:

$$\boldsymbol{\omega}_{1}(\boldsymbol{r}_{l},\boldsymbol{\theta}_{l}) = \boldsymbol{\omega}_{1}^{\text{inc}}(\boldsymbol{r}_{l},\boldsymbol{\theta}_{l}) + \boldsymbol{\omega}_{1,l}^{\text{sc}}(\boldsymbol{r}_{l},\boldsymbol{\theta}_{l}) + \sum_{j=1}^{p(j\neq l)} \boldsymbol{\omega}_{1,j}^{\text{sc}}(\boldsymbol{r}_{l},\boldsymbol{\theta}_{l})$$
(7)

同理根据式(4),1号桩体内的透射波场位移

式中: C_n^t 、 D_n^t 为桩体中透射波场的待定系数; k_2 为 桩体中 SH 波的波数。

根据桩体-土边界的应力和位移连续条件,在 r_i = a 处,有:

$$\begin{cases} \omega_1(r_l, \theta_l) = \omega_2(r_l, \theta_l) \\ \mu_1 \frac{\partial \omega_1(r_l, \theta_l)}{\partial r_l} = \mu_2 \frac{\partial \omega_2(r_l, \theta_l)}{\partial r_l} \end{cases}$$
(9)

将式(3) ~ (6) 代入式(7) 可得到(r_i , θ_i) 坐标 系下的总波场位移:

$$\omega_{1}(r_{l},\theta_{l}) = \omega_{1}^{\text{inc}}(r_{l},\theta_{l}) + \omega_{1,l}^{\text{sc}}(r_{l},\theta_{l}) + \sum_{j=1}^{p(j\neq l)} \omega_{1,j}^{\text{sc}}(r_{l},\theta_{l})$$
(10)

将式(7)和式(8)代入式(9)可得到:

$$\omega_{0} \exp(ik_{1}d_{1l}\cos\Psi) \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_{m}i^{m}J_{m}(k_{1}r_{l})\cos(m\theta_{l}) + \exp(ik_{1}d_{1l}\cos\Psi) \sum_{m=0}^{\infty} H_{m}^{(1)}(k_{1}r_{l})A_{m}^{l}\cos(m\theta_{l}) + \\ \sum_{j=1}^{p(j\neq 0)} \exp(ik_{1}d_{1j}\cos\Psi) \Big[\sum_{n=0}^{\infty} A_{n}^{j}(-1)^{n} \sum_{m=0}^{\infty} J_{m}(k_{1}r_{l}) \frac{\varepsilon_{m}}{2} K_{m}^{n}(k_{1}d_{jl})\cos(m\theta_{l}) \Big] = \\ \sum_{m=0}^{\infty} J_{m}(k_{2}r_{l})C_{m}^{l}\cos(m\theta_{l})$$
(11)
$$\omega_{0} \exp(ik_{1}d_{1l}\cos\Psi) \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_{m}i^{m}J_{m}^{'}(k_{1}r_{l})\cos(m\theta_{l}) + \exp(ik_{1}d_{1l}\cos\Psi) \sum_{m=0}^{\infty} H_{m}^{(1)'}(k_{1}r_{l})A_{m}^{l}\cos(m\theta_{l}) + \\ \frac{k_{2}\mu_{2}}{k_{1}\mu_{1}} \sum_{j=1}^{p(j\neq 0)} \exp(ik_{1}d_{1j}\cos\Psi) \Big[\sum_{n=0}^{\infty} A_{n}^{j}(-1)^{n} \sum_{m=0}^{\infty} J_{m}^{'}(k_{1}r_{l}) \frac{\varepsilon_{m}}{2} K_{m}^{n}(k_{1}d_{jl})\cos(m\theta_{l}) \Big] = \\ \sum_{m=0}^{\infty} J_{m}^{'}(k_{2}r_{l})C_{m}^{l}\cos(m\theta_{l})$$
(12)
$$\omega_{0} \exp(ik_{1}d_{1l}\cos\Psi) \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_{m}i^{m}J_{m}(k_{1}r_{0})\sin(m\theta_{l}) + \exp(ik_{1}d_{1l}\cos\Psi) \sum_{m=0}^{\infty} H_{m}^{(1)'}(k_{1}r_{l})B_{n}^{l}\sin(m\theta_{l}) + \\ \sum_{j=1}^{p(j\neq 0)} \exp(ik_{1}d_{1j}\cos\Psi) \Big[\sum_{n=0}^{\infty} B_{n}^{j}(-1)^{n} \sum_{m=0}^{\infty} J_{m}(k_{1}r_{l}) \frac{\varepsilon_{m}}{2} L_{m}^{n}(k_{1}d_{jl})\sin(m\theta_{l}) \Big] = \\ \sum_{m=0}^{\infty} J_{m}(k_{2}r_{l})D_{m}^{l}\sin(m\theta_{l})$$
(13)
$$\omega_{0} \exp(ik_{1}d_{1l}\cos\Psi) \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_{m}i^{m}J_{m}^{'}(k_{1}r_{l})\sin(m\theta_{l}) + \exp(ik_{1}d_{1l}\cos\Psi) \sum_{m=0}^{\infty} H_{n}^{(1)'}(k_{1}r_{l})B_{n}^{0}\sin(m\theta_{l}) +$$

$$\frac{k_{2}\mu_{2}}{k_{1}\mu_{1}}\sum_{j=1}^{p(j\neq l)}\exp(ik_{1}d_{1j}\cos\Psi)\left[\sum_{n=0}^{\infty}B_{n}^{j}(-1)^{n}\sum_{m=0}^{\infty}J_{m}^{'}(k_{1}r_{l})\frac{\varepsilon_{m}}{2}L_{m}^{n}(k_{1}d_{jl})\sin(m\theta_{l})\right] = \sum_{n=0}^{\infty}J_{m}^{'}(k_{2}r_{l})D_{m}^{l}\sin(m\theta_{l})$$
(14)

将 A_n^l 、 B_n^l 的系数解代入到式(10),即可得到在 (r_l , θ_l)坐标系下的总波场 ω_1 。

对位移场的频率进行归一化处理,设土体中的 无量纲频率 η 为:

$$\eta = \frac{\omega a_1}{\pi c_1} = \frac{2a_1}{\lambda_1} = \frac{k_1 a_1}{\pi}$$
(15)

式中: λ_1 为土体中 SH 波的波长; c_1 为土体中平面 SH 波波速。

2 有效性验证

模拟试验地基选在室内,尺寸为4m(长)×4m (宽)×1.4m(高),上层为深 0.4m的匀质黏土层, 下层为深 1 m 的匀质砂层,如图 2 所示。土体参数列于表1,试验所用混凝土桩强度等级为C30,密



图 2 地基构造(单位:mm) Fig.2 Foundation structure (Unit:mm)

度 $\rho=2$ 374 kg/m³,剪切模量 $G=12.78\times10^3$ MPa, 桩径为10 cm(长)×10 cm(宽)的实心方桩,以单倍 桩距沿中线横向布置,如图 3 所示。

Table 1 Soil pa	rameters of the to	est site
	黏土	砂土
湿密度/(g/cm ³)	1.63	1.95
含水量/%	28.5	19.1
重度/(kN/m ³)	19.6	18.0
饱和度/%	87.9	74.4
孔隙比	0.716	0.610
液限/%	36.5	-
朔限/%	21.3	_



图 3 试验仪器 Fig.3 Test equipment

试验采用 WS-Z30 振动台控制系统,主要包括 激振器、信号发生器和核心部件三部分,其中核心部 件包括电荷放大器、功率放大器、数据采集控制器、 加速度计放大器及加速度传感器等。各部分及其连 接详见图 3。

理论分析模型与模型试验变量参数均取 7 根 桩,桩径 a 取 10 cm,桩间距 b 取 2 倍的桩径,均用 $|\omega/\omega_0|$ 表示归一化后的无量纲位移,其中 ω 为平 面 SH 波入射下自由场和散射场的总位移, ω_0 为平 面 SH 波入射下位移幅值,通过比较两种结果(表 2),并得出曲线图(图 4)。结果表明,本算例与模拟 试验结果变化趋势一致,从而验证了本算例的正 确性。

3 结果分析

3.1 桩土剪切模量对排桩隔振效果的影响

桩间距是影响入射波、散射波与透射波在同一 介质点合相位大小的重要因素。为了分析桩土剪切 模量对排桩隔振效果的影响,桩径 a 取 1,桩间距 b 分别取 1a、2a、3a、5a,其余变量参数取值与有效性 验证部分一致,绘制出不同桩土剪切模量之比下排 桩 后的无量纲位移曲线(图5)。由图5可知,随着

表 2 数据对比参照表 Table 2 Data comparison and reference table

桩后距离	无量纲位移 $ \omega/\omega_0 $															
	а	2a	3 <i>a</i>	4a	5a	6 <i>a</i>	7 <i>a</i>	8 <i>a</i>	9 <i>a</i>	10a	11a	12a	13a	14a	15a	16 <i>a</i>
理论分析模型	2.10	0.11	1.03	2.49	1.06	2.61	0.70	1.84	1.88	0.76	2.12	0.61	1.58	1.63	0.73	1.63
模拟试验	2.30	0.01	1.11	1.94	1.13	2.18	0.82	1.86	1.13	1.00	1.81	0.50	1.93	1.83	1.17	1.47



桩间距 b 的增加,排桩隔振效果逐渐变好,但当桩间 距 b 由 3a 增加至 5a 时,排桩隔振效果明显变差; 在排桩后 0~70a 范围内,无量纲位移之比变化幅 度较大,且尚不稳定,隔振效果较差;之后无量纲位 移之比逐渐下降至稳定值。当桩土剪切模量之比小 于 500 时,排桩后无量纲位移曲线在 250a~380a 范围内出现最低点,后又呈现上升趋势;当桩土剪切 模量之比大于或等于 500 时,排桩后无量纲位移无 最低点且几乎无变化,此时可将桩体认为是刚性 桩体。

3.2 桩体根数对排桩隔振效果的影响

为了分析桩体根数对排桩隔振效果的影响,桩 间距 b 取 3a,桩土剪切模量之比取 500,其余变量参 数取值与 2.1 节一致,绘制出不用桩体根数下排桩 后的无量纲位移曲线(图 6)。由图 6 可以看出,当 无量纲频率为 0.4 时,排桩后无量纲位移曲线与以 上规律一致,在无限远处趋于 0,同时随着桩体根数 的增加无量纲位移之比降低。当无量纲频率为 1.5 时,0~90a范围内无量纲位移之比变化较大,且在



Fg.6 Variation curve of the number of piles with distance at different frequencies

率为 3.0 时,各桩体根数下排桩隔振效果相差不大, 排桩后无量纲位移在 20a 处下降至 1 以下,与之前 两个无量纲频率相比,排桩在更靠前的位置达到更 好的隔振效果。

4 结论

本文采用波函数展开法结合格拉夫加法定理分 析单排实心弹性桩的 SH 波散射问题,通过改变单 一变量,研究桩土剪切模量之比、桩体个数因素对排 桩隔振的影响效果,并结合实际工程的参考数值,得 到如下结论:





Fig.5 Variation curve of pile-soil shear modulus ratio with distance under different pile spacings

100a~120a 范围内隔振效果较好,之后该范围内无量纲位移之比先骤升后逐渐下降至1。当无量纲频

(1) 在排桩后 0~70a 范围内,无量纲位移之比 变化幅度较大,且不稳定,隔振效果较差。当桩土剪 切模量之比小于 500 时,在 250a~380a 范围内隔 振效果较好;当桩土剪切模量之比大于等于 500 时, 随着桩土剪切模量之比增加,隔振效果并不会大幅 增加,即此时可将桩体认为是刚性桩体。

(2)当无量纲频率为 0.4 时,排桩后无量纲位 移曲线在无限远处趋于 0,随着桩体根数的增加,隔 振效果逐渐提高。当无量纲频率为 1.5 时,0~90a 范围内无量纲位移之比变化较大,在 100a~120a 范围内隔振效果较好,之后此范围内无量纲位移之 比先骤升后逐渐下降至 1。当无量纲频率为 3.0 时, 各桩体根数下排桩隔振效果相差较小,排桩后无量 纲位移在 20a 处就已经下降至 1 以下,与之前两个 无量纲频率相比,可在更靠前的位置达到良好隔振 效果。

参考文献(References)

- [1] AVILÉS J, SÁNCHEZ-SESMA F J.Foundation isolation from vibrations using piles as barriers [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1988, 114(11):1854-1870.
- [2] 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 saturatated soils [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31 (5): 120-127.

[3] 夏唐代,孙苗苗,陈晨.多重散射问题的改进算法以及双排非连 续弹性屏障对水平向剪切波的隔离研究[J].岩土力学,2011, 32(8):2402-2408.

XIA Tangdai, SUN Miaomiao, CHEN Chen. An improved method for multiple scattering and isolation of horizontal shear wave using double row of elastic discontinuous barrier[J].Rock and Soil Mechanics,2011,32(8):2402-2408.

 [4] 孙苗苗.任意排列的空心管桩屏障对 SH 波的多重散射[J].岩 土力学,2014,35(4):943-950,958.
 SUN Miaomiao.Multiple scattering of SH waves by rows of ar-

bitrarily arranged tubular piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014.35(4):943-950,958.

- [5] PU X B, SHI Z F. Surface-wave attenuation by periodic pile barriers in layered soils[J].Construction and Building Materials, 2018, 180:177-187.
- [6] 蔡袁强,丁光亚,徐长节.饱和土中单排弹性桩对平面 S 波的屏 蔽[J].岩土工程学报,2008,30(7):964-969.

CAI Yuanqiang, DING Guangya, XU Changjie. Screening of plane S waves by a row of elastic piles in saturated soil[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(7):964-969. [7] 侯键,夏唐代,孙苗苗,等.任意排列的固定刚性桩屏障对 SH 波的多重散射[J].浙江大学学报(工学版),2012,46(7):1269-1274.

HOU Jian, XIA Tangdai, SUN Miaomiao, et al. Multiple scattering of plane SH wave by arbitrary configuration of rigid pile as barrier for vibration isolation[J].Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2012,46(7),1269-1274.

- [8] REN X W, WU J F, TANG Y Q, et al. Propagation and attenuation characteristics of the vibration in soft soil foundations induced by high-speed trains[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 117:374-383.
- [9] 章敏,尚微,周忠超,等.双层非饱和地基中 Rayleigh 波的传播 特性[J].岩土力学,2017,38(10):2931-2938.
 ZHANG Min,SHANG Wei,ZHOU Zhongchao, et al.Propagation characteristics of Rayleigh waves in double-layer unsaturated soils[J].Rock and Soil Mechanics,2017,38(10):2931-2938.
- [10] 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(Suppl02):59-64.
- [11] 陈炜昀,陈国兴,刘志军,等.不同边界条件下非饱和土地基中的 Rayleigh 波传播[J].水利学报,2015,46(11):1329-1336.
 CHEN Weiyun, CHEN Guoxing, LIU Zhijun, et al. Propagation of Rayleigh wave in unsaturated soil at different boundary conditions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015,46 (11):1329-1336.
- [12] 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 discontinu-

ous 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.

[13] 夏唐代,孙苗苗,陈晨.SH 波入射下多重散射的改进算法及任 意桩布置形式的隔振研究[J].振动工程学报,2010,23(4): 409-414.

> XIA Tangdai, SUN Miaomiao, CHEN Chen. An improved method for multiple scattering under SH incident waves and analysis of vibration isolation[J].Journal of Vibration Engineering,2010,23(4):409-414.

[14] 袁晓铭,廖振鹏,圆弧形凹陷地形对平面 SH 波散射问题的级数解答[J].地震工程与工程振动,1993,13(2):1-11.
 YUAN Xiaoming,LIAO Zhenpeng.Series solution for scattering of plane SH waves by a canyon of circular-arc cross section[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1993,13(2):1-11.