

DOI: 10.11779/CJGE20230514

移动荷载作用下层状横观各向同性饱和土中排桩的隔振效应

杨 帅^{1,2}, 贾敏才^{*1,2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 利用有限元-边界元耦合法评估了移动荷载下层状横观各向同性饱和土中排桩的隔振效果。利用有限元法将排桩离散成单桩以及桩单元, 基于 Bernoulli-Euler 梁理论得到桩的有限元矩阵方程; 在桩-土边界, 土体单元与桩单元进行了等节点离散, 并以层状饱和地基的解析层元基本解作为核函数, 利用边界积分法得到桩-土界面处地基的柔度矩阵; 基于两阶段理论, 将侧摩阻力响应与移动荷载直接引起的振动进行耦合, 结合边界元法得到饱和地基的边界元方程; 考虑 Bernoulli-Euler 梁和土体之间不发生相对滑移和脱开的位移协调条件, 耦合有限元和边界元方程, 得到排桩的动力响应方程; 计算有无排桩隔振下某一观测点的位移, 即可结合隔振理论分析排桩的隔振效率。在验证所提方法准确性的基础上, 分析了桩长、桩身刚度、移动荷载速度以及横观各向同性参数对排桩隔振效应的影响。结果表明: 最优桩长约等于 2 倍瑞利波长, 超过该值隔振效果提高不大; 桩与地基的刚度差越大, 隔振效果越好; 荷载速度超过剪切波速, 桩基隔振表现反而更好。

关键词: 层状横观各向同性饱和土; 排桩; 移动荷载; 隔振效应; 有限元-边界元耦合法

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)06-1263-07

作者简介: 杨 帅(1994—), 男, 博士研究生, 主要从事岩土解析理论研究。E-mail: 2010282@tongji.edu.cn。

Vibration isolation effects of pile barriers in layered transversely isotropic foundations under moving loads

YANG Shuai^{1,2}, JIA Mincai^{*1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of China Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The vibration isolation effects of pile rows in saturated layered transversely isotropic soils due to moving loads are evaluated using the finite-element-boundary-element coupled method. The finite element matrix equations for the pile are obtained based on the Bernoulli-Euler beam theory by discretizing the pile rows into single piles and pile units using the finite element method. At the pile-soil boundary, the soil and pile units are discretized with equal nodes, and the analytical layer-element basic solution for the layered transversely isotropic saturated foundation consolidation problem is used as the kernel function to obtain the flexibility matrix using the boundary integral method. Further, based on the two-stage theory, the influences of lateral friction resistance and the vibration directly caused by the moving loads are coupled, and the boundary element equations are obtained by combining the boundary element method. The displacement coordination conditions of no relative slip and dislocation between the piles and the soils are used to couple the finite element and boundary element equations, and the dynamic response equation for the pile rows is obtained. Then, the displacement of an observation point after the pile rows without and with the pile vibration isolation is calculated separately, and the isolation efficiency is obtained by combining with the vibration isolation theory. The accuracy of the proposed method is verified by comparing with the existing numerical results, and the effects of the load velocity and different pile materials on the vibration isolation effects are analyzed. The results show that two times the Rayleigh wavelength is the optimal pile length, and the vibration isolation effects will not improve greatly beyond the critical value. The greater the difference in stiffness between the pile and foundation, the better the vibration isolation effects. When the load speed exceeds the shear wave speed, the vibration isolation performance is better instead.

Key words: layered transversely isotropic soil; pile row; moving load; vibration isolation effect; finite-element-

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40972214)

收稿日期: 2023-06-06

*通信作者 (E-mail: mincai_jia@tongji.edu.cn)

0 引言

交通荷载引起的振动在土木、交通工程等领域中是一个广泛关注的问题。虽然这些振动不足以造成土体立刻发生破坏,但长时间反复发生的这类振动通过土体介质传播到周边环境和建筑,会对周围设施及生产、生活产生诸多不利影响。为了隔离或缓解这类振动,通常利用隔振沟或隔振桩来进行处理。由于隔振沟的不稳定性和深度的限制^[1-2],利用桩来减少振动具有更为重要的实际意义。

当前主要利用试验和数值方法来研究屏障的隔振效应。Onur 等^[3]和 Nitish 等^[4]利用室内试验研究了单一或多种复合的不同屏障的隔振效率,并讨论了荷载频率以及载荷与屏障之间距离对隔振变化的影响。Liang 等^[5]则是采用离心机试验评估了桩基屏障缓解振动的效果,并指出隔振效应对低频率不敏感。然而,由于试验模型尺度和测试精度的限制,得到的隔振效率方面的数据并不精确。近年来很多学者采用数值方法来研究隔振问题。Cai 等^[6]和 Zhang 等^[7]分别应用有限元法(FEM)和边界元法(BEM)分析了深沟或桩基屏障的隔振效应。但是这些数值方法由于需要对整个计算域进行划分节点,因此有着模型建立复杂的缺点,而且这样的模型对计算时间和内存空间上都有着较高的要求。为了提高计算效率,提出一种合适的数值方法来研究和分析桩基隔振问题是非常重要的。

此外,目前关于桩基屏障隔振效应的研究,多是针对各向同性地基。然而,长期风化沉积形成的自然地基具有明显的各向异性特性。在此过程中,土颗粒存在取向性,这使得在同一水平内不同方向上物理力学性质接近,而竖直方向上力学性质不同,即在水平向地基是各向同性的,而竖直向则显示各向异性。这类土层可认为是横观各向同性地基模型^[8-9]。Ai 等^[10]则利用边界元-有限元耦合法研究了横观各向同性土体中桩基屏障的隔振表现。对于饱和土体中的孔隙水压力也是不可忽视的因素,到目前为止,在饱和横观各向同性地基中桩基隔振效应研究还不多。除此之外,解析层元法主要鉴于研究横观各向同性干土^[10-11]或渗透各向异性饱和土^[12],还未见用于横观各向同性饱和土地基。

采用于 Bernoulli-Euler 梁理论,利用两节点梁单元对桩进行离散;基于层状饱和和横观各向同性地基解析层元解答^[13],结合两阶段理论思想,推导得到饱和地基的边界元方程;结合位移协调条件,推导出桩基的动力响应方程;采用隔振相关理论,计算能评估隔

振效应的振幅比。最后,通过数值算例与已有的结果以及有限元数值模拟解比对进行验证,并探讨了荷载移动速度、土体横观各向同性参数和隔离桩参数对隔振效应的影响。

1 桩的有限元方程

图 1 为移动荷载作用下,层状横观各向同性饱和土体中隔振桩基屏障的动力模型。长为 $2a$, 宽为 $2b$ 的竖向矩形简谐荷载 $P\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t}$ (其幅度为 P , 频率为 ω) 在地基表面沿 y 轴方向以恒定速度 v 移动。横观各向同性饱和地基的竖向弹性模量为 E_v , 水平向弹性模量为 E_h , 竖向弹性模量为 G_v , 水平向泊松比为 μ_h , 竖向应力产生水平向应变的泊松比为 μ_{vh} , 渗透系数为 k , 饱和土体的密度为 ρ 。有 m 根桩位于层状饱和地基中, 且排列方向与荷载移动方向平行, 桩与地基之间不发生相对滑移与脱开。其中, 每根桩的弹性模量为 E_p , 桩长为 L , 桩径为 d , 桩密度为 ρ_p , 以及桩间距为 d_s 。此外, 荷载中心与桩基屏障之间的距离为 D_s 。每根桩用 Bernoulli-Euler 梁来进行模拟, 结合有限元法利用两节点梁单元来进行离散。假定桩被离散为 n 个单元数, 则每根桩基屏障的节点数为 $n+1$ 。结合文献^[14], 排桩隔振系统中某一单桩 i 的有限元方程为

$$k_i^p u_i^p - \omega^2 M_i^p u_i^p = \delta_i^p \quad (1)$$

式中: u_i^p 和 δ_i^p 分别为第 i 根桩上的节点位移和摩阻力; k_i^p 和 M_i^p 分别为桩 $i(n+1) \times (n+1)$ 的刚度矩阵和质量矩阵。

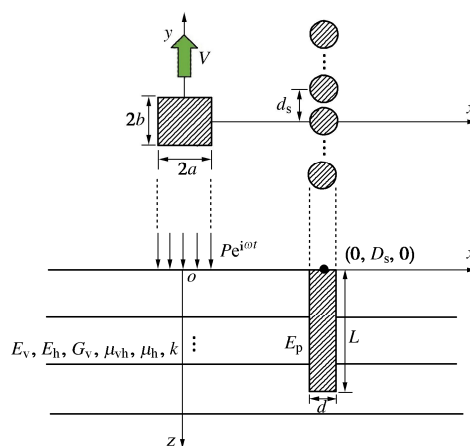


图 1 移动荷载作用下层状横观各向同性饱和土体中隔振桩基屏障的动力模型

Fig. 1 Dynamic model for vibration isolation pile barriers in layered transversely isotropic saturated soils under moving loads

将式(1)的单桩情况扩展到整个排桩系统,并对时间进行 Laplace 积分变换,从而组装得到群桩的有

限元方程:

$$\tilde{\delta}^p(s) = k^p \tilde{U}^p(s) - \omega^2 M^p \tilde{U}^p(s) \quad (2)$$

式中: $\tilde{\delta}^p(s) = [\tilde{\delta}_1^p(s), \tilde{\delta}_2^p(s), \dots, \tilde{\delta}_m^p(s)]^T$; $\tilde{U}^p(s) =$

$$[\tilde{u}_1^p(s), \tilde{u}_2^p(s), \dots, \tilde{u}_m^p(s)]^T; k^p = \begin{bmatrix} k_1^p & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & k_m^p \end{bmatrix}; s \text{ 为}$$

关于时间 t 在 Laplace 变换域内的变换参数, 上标“~”表示经过 Laplace 变换后的变量。

2 饱和地基的边界元方程

针对移动荷载下被动桩与土之间的边界振动问题, 则是利用两阶段理论来进行解决。桩土边界上的动力响应变化由移动荷载直接在边界上引起的振动以及侧摩阻力导致的振动影响组成的。文献[13]利用解析层元法求解了移动荷载下层状饱和横观各向同性地基的动力响应问题。因此, 由外荷载直接在桩土边界上引起的位移响应为

$$u_{ml}(t) = \psi(t)P(t) \quad (3)$$

式中: $u_{ml}(t)$ 为移动荷载引起的位移变化; $\psi(t)$ 为土体柔度矩阵, 并以此作为核函数; $P(t)$ 为外荷载。

由于动力荷载和地下水的存在, 侧摩阻力沿深度是随时间变化的。以式(3)的解析层元解作为核函数, 同时对时间进行 Laplace 积分变换, 则对于桩身上由侧摩阻力引起的某一点的位移响应为^[14]

$$\tilde{u}(A, s) = s\tilde{\psi}(A, s) \cdot \tilde{\delta}(A, s) \quad (4)$$

式中: $\tilde{u}(A, s)$ 为侧摩阻力引起的点 A 的位移; $\tilde{\delta}(A, s)$ 为土体的侧摩阻力。

现假定土层单元与桩单元进行等节点离散, 分为 n 个单元数。对于沿整个桩身 L 的位移响应, 则需要对核函数 $\tilde{\psi}$ 进行积分得到^[14]

$$\tilde{u}^s(s) = \sum_{e=1}^n \tilde{\delta}_e^s(s) \int_{L^e} s\tilde{\psi}(s) dL^e = \tilde{\Phi}(s) \tilde{\delta}^s(s) \quad (5)$$

式中: $\tilde{u}^s(s)$ 为土体摩阻力引起的位移; $\tilde{\delta}_e^s(s)$ 为土体单元 e 上的节点摩阻力; $\tilde{\Phi}(s)$ 为地基的柔度矩阵,

$$\tilde{\Phi}(s) = s \begin{bmatrix} \tilde{\Phi}^{(1,1)}(s) & \cdots & \tilde{\Phi}^{(1,n+1)}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{\Phi}^{(n+1,1)}(s) & \cdots & \tilde{\Phi}^{(n+1,n+1)}(s) \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)}, \text{ 其中的}$$

元素为土体单元的节点柔度系数; $\tilde{\delta}^s(s) = [\tilde{\delta}_1^s(s), \tilde{\delta}_2^s(s), \dots, \tilde{\delta}_n^s(s)]^T$ 。

基于两阶段理论, 将式(3), (5)进行耦合得到桩 i 的边界元方程:

$$\tilde{u}_i^s(s) = \tilde{\Phi}_i(s) \tilde{\delta}_i^s(s) + \tilde{u}_{ml,i}(s) \quad (6)$$

式中: $\tilde{u}_i^s(s)$, $\tilde{\Phi}_i(s)$, $\tilde{\delta}_i^s(s)$, $\tilde{u}_{ml,i}(s)$ 分别为桩 i 的土节点位移, 土体柔度矩阵, 边界力以及外荷载引起的位移。

将式(6)进行扩展, 组装得到群桩的边界元方程:

$$\tilde{U}^s(s) = \tilde{U}_{ml}(s) + \tilde{\varphi}(s) \tilde{\zeta}^s(s) \quad (7)$$

式中: $\tilde{U}^s(s) = [\tilde{u}_1^s(s), \tilde{u}_2^s(s), \dots, \tilde{u}_m^s(s)]^T$; $\tilde{U}_{ml}(s) =$

$[\tilde{u}_{ml,1}(s), \tilde{u}_{ml,2}(s), \dots, \tilde{u}_{ml,m}(s)]^T$, $\tilde{\zeta}^s(s) = [\tilde{\delta}_1^s(s), \tilde{\delta}_2^s(s), \dots, \tilde{\delta}_m^s(s)]^T$ 为群桩情况下的参数; $\tilde{\varphi}(s) =$

$\begin{bmatrix} \tilde{\Phi}_{1,1}(s) & \cdots & \tilde{\Phi}_{1,m}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{\Phi}_{m,1}(s) & \cdots & \tilde{\Phi}_{m,m}(s) \end{bmatrix}$, 其中, $\tilde{\Phi}_{m,m}(s)$ 为第 m 行、第 m 列根桩的土体柔度矩阵。

3 桩-土动力响应方程

假定桩基屏障和土体之间不存在相对滑动和脱离, 结合相互作用力理论, 在桩-土界面上, 地基对桩的反作用力与桩对地基的边界力大小相同, 方向相反。因此, 有以下位移协调条件:

$$\begin{cases} \tilde{U}^s(s) = \tilde{U}^p(s), \\ \tilde{\zeta}^s(s) = -\tilde{\delta}^p(s). \end{cases} \quad (8)$$

利用式(8), 可将桩的有限元方程(2)与地基的边界元方程(7)进行耦合得到桩-土的动力响应方程:

$$\tilde{U}^p(s) = (I - \tilde{\varphi}(s)k^p + \omega^2 \tilde{\varphi}(s)M^p) \tilde{U}_{ml}(s) \quad (9)$$

4 桩基的隔振效应

为了评估桩基屏障的隔振效果, 利用振幅减小比作为参考指标, 即计算排桩后地基表面某一观测点在有桩隔振与无桩情况下的振幅比。其中, 在无桩条件下计算观测点 B 的振幅 $\tilde{u}_B(r, 0, s)$ $\left[r = \sqrt{x^2 + y^2} \right]$ 相当

于可转换为移动荷载下自由波场的基本解, 即可通过式(3)计算获得。在桩基屏障隔振的系统中, 结合式(5), 受桩 i 缓解振动影响的振幅可表示为

$$\tilde{u}_{BP,i}(r, 0, s) = \tilde{u}_{B,i}(r, 0, s) - \tilde{\Psi}_i(s) \tilde{\xi}_i^s(s) \quad (10)$$

式中: $\tilde{u}_{BP,i}(r, 0, s)$ 为受桩基 i 隔振的振幅; $\tilde{\Psi}_i(s) = [\tilde{\Phi}_{i,1}(s), \tilde{\Phi}_{i,2}(s), \dots, \tilde{\Phi}_{i,n+1}(s)]$ 以及 $\tilde{\xi}_i^s(s) = [\tilde{\delta}_{i,1}^s(s), \tilde{\delta}_{i,2}^s(s), \dots, \tilde{\delta}_{i,n+1}^s(s)]^T$ 分别为受其他桩影响的桩 i 的土体柔度矩阵和边界力。

将式(10)应用于每根桩基, 从而扩展到群桩隔振下的振幅表达式:

$$\tilde{u}_{BP}(r, 0, s) = \tilde{u}_B(r, 0, s) - \tilde{\Psi}(s) \tilde{\xi}^s(s), \quad (11a)$$

$$\tilde{\Psi}(s) \tilde{\xi}^s(s) = \sum_{i=1}^m \tilde{\Psi}_i(s) \tilde{\xi}_i^s(s) \quad (11b)$$

式中: $\tilde{\Psi}(s) = [\tilde{\Psi}_1(s), \tilde{\Psi}_2(s), \dots, \tilde{\Psi}_m(s)]$, $\tilde{\xi}^s(s) = [\tilde{\xi}_1^s(s), \tilde{\xi}_2^s(s), \dots, \tilde{\xi}_m^s(s)]$, $\tilde{u}_B(r, 0, s) = \tilde{u}_{B,i}(r, 0, s)$ 。

根据文献[15], 桩基屏障的隔振效率可表示为

$$\tilde{A}_{rv}(s) = \frac{1}{D} \cdot \int_D \tilde{A}_r(r, 0, s) dS, \quad (12a)$$

$$\tilde{A}_r(r, 0, s) = \frac{\tilde{u}_{BP}(r, 0, s)}{\tilde{u}_B(r, 0, s)}. \quad (12b)$$

式中: $\tilde{A}_{rv}(s)$ 为观测区域 D 的平均振幅减小比; $\tilde{A}_r(r, 0, s)$ 为观测点 B 的振幅减小比; D 为观测区域的面积。

结合式(9), (5), 可求解桩基屏障隔振下的振幅; 利用式(3)求解无桩条件下的振幅; 将其代入式(11), 再结合式(12)即可得到变换域内的振幅减小比。利用 Laplace 逆变换, 最终获得了层状饱和横观各向同性地基中桩基屏障的隔振效应解。

5 数值计算与分析

5.1 验证分析

为了验证方法的准确性, 与已有的数值结果进行比对。现采用 Tsai 等^[16]的数值算例来进行验证。土体介质退化为均质弹性半空间。其中, 拉梅常数为 $\lambda = \mu = 132 \text{ MN/m}^2$, 土体密度为 $\rho_s = 1750 \text{ kg/m}^3$ 。隔振系统有 8 根桩的单排桩在弹性地基中, 且每根桩的参数: $L = 5 \text{ m}$, $d = 1 \text{ m}$, $E_p = 206.18 \text{ GPa}$, $d_s^* = (d_s - d)/\lambda_r$, 其中, 瑞利波长 λ_r 为 5 m 。一个竖向简谐点荷载 $P e^{2\pi f i t}$ 作用于地基表面, 其中振幅为 $P = 100 \text{ kN}$ 以及频率为 $f = 50 \text{ Hz}$, 且荷载与排桩之间的距离 D_s 为 10 m 。图 2 为本研究和文献[16]关于桩间距对平均幅值减小比影响的数值结果。

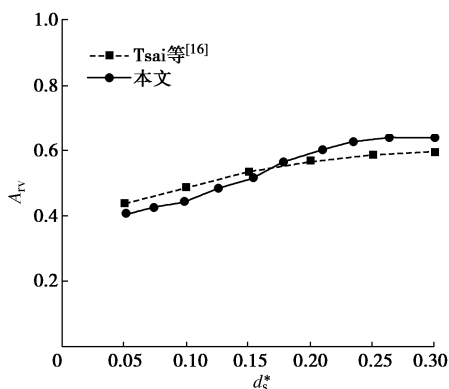


图 2 本文桩间距对平均幅值减小比的影响与文献[16]的比对
Fig. 2 Comparison between effect of pile spacing on average amplitude reduction ratio and that of Reference [16]

由图 2 可知, 随着桩间距的增加, 平均幅值减小比增加, 这表明隔振效果下降, 这是因为有更多振动波穿过桩基屏障。此外, 该研究的计算结果与文献[16]数值结果吻合度较好, 这证明了该理论计算方法的准

确性。

为了进一步验证所提出方法的准确性, 现利用 ABAQUS 软件来进行有限元数值模拟计算, 并且建立了移动荷载作用下饱和横观各向同性土体与桩基屏障的模型体系。现采用的饱和地基的竖向弹性模量 E_v 为 49.2 MPa , 剪切模量 G_v 为 20 MPa , 水平向弹性模量 E_h 为 25 MPa , 水平向、竖向的泊松比 μ_h , μ_v 均为 0.25 , 渗透系数 k 为 10^{-7} m/s , 土体密度 ρ 为 2000 kg/m^3 , 孔隙率为 0.5 。在介质中, 有 10 根单排桩作为屏障隔振系统, 每根桩的参数: $E_p = 30 \text{ GPa}$, $L = 10 \text{ m}$, $d = 1 \text{ m}$, $d_s = 1.25 \text{ m}$, $D_s = 4 \text{ m}$, $\rho_p = 2400 \text{ kg/m}^3$ 。此外, 一个均匀分布的长 \times 宽为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, 幅值为 150 kN 的矩形荷载在地基表面上以速度 $0.4 C_s$ 移动, 其中剪切波速 $C_s = \sqrt{G_v / \rho}$ 。地基和桩所采用的单元类型分别是 C3D8P 和 C3D8R, 模型侧面和底部边界设置为黏弹性边界, 顶面为自由边界, 图 3 为模型计算结果云图。图 4 为不同桩间距下该方法和有限元法的平均幅值减小比的变化情况。

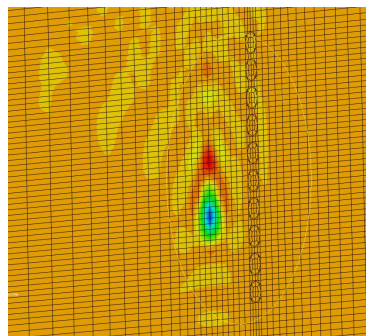


图 3 模型计算结果云图

Fig. 3 Cloud diagram of calculated results by model

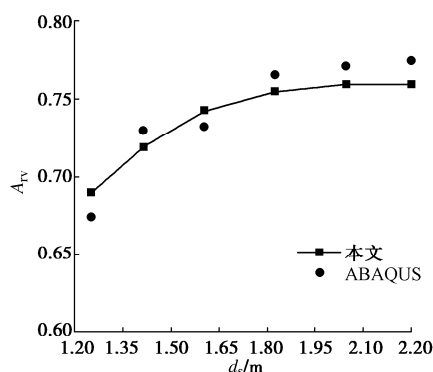


图 4 本文在不同桩间距下的平均幅值减小比与有限元解的比对
Fig. 4 Comparison between average amplitude reduction ratio for different pile spacings and FE solution

从图 4 可知, 本文得到的结果和有限元数值解吻合度较高, 从而本文方法的准确性得到进一步的验证。

5.2 算例分析

在被动桩基屏障的隔振系统中, 频率为 50 Hz 的矩形简谐荷载在地基表面上移动, 其他荷载参数以及

桩土模型参数采用 5.1 节中与有限元解比对的参数。根据文献[2], 饱和地基的瑞利波长 λ_r 为 5 m。观测点的位置与荷载中心点的距离为 6 m, 且两点都在 x 轴上。在以下算例中, 通过改变其中一个参数来分析桩基隔振的变化, 而其他参数均同以上数值。

(1) 桩长对桩基隔振影响

为了探讨桩长对隔振效应的影响, 桩长 L 分别取 5, 10, 15 m 等 3 种工况来进行分析计算。图 5 为不同桩长下在区域 $-1 < y/\lambda_r < 1$, $0 < x/\lambda_r < 2$ 内振幅比 A_r 的轮廓分布。图 6 所示为桩长对振幅比沿 x 方向上的影响。

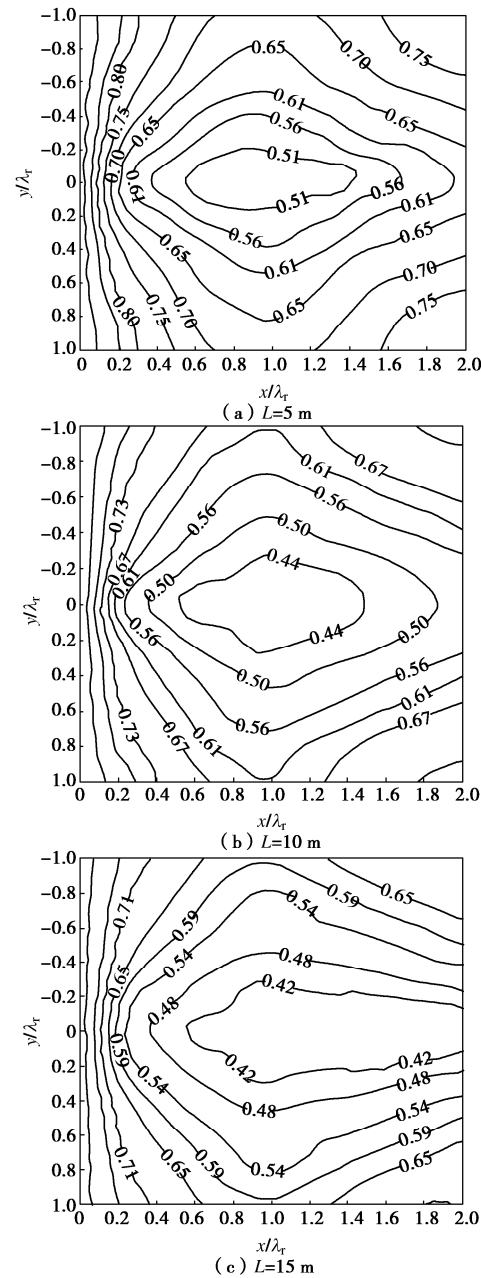


图 5 不同桩长下在区域 $-1 < y/\lambda_r < 1$, $0 < x/\lambda_r < 2$ 内振幅比 A_r 的轮廓分布

Fig. 5 Contour distribution of amplitude ratio A_r in the region $-1 < y/\lambda_r < 1$, $0 < x/\lambda_r < 2$ at different pile lengths

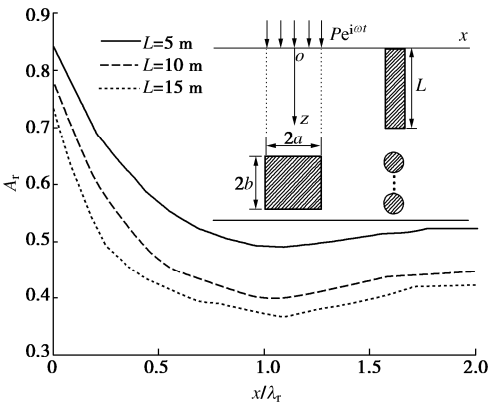


图 6 桩长对振幅比沿 x 方向上的影响

Fig. 6 Effects of pile length on amplitude ratio along x -direction

从图 5 中可知, 不同桩长工况下振幅比的轮廓分布状况类似, 大致上都是关于 x 轴对称。此外, 对于 L 为 5, 10, 15 m 的 3 种工况, 平均振幅比分别为 0.712, 0.669, 0.656。结合图 6 可知, 增加桩长可提高隔振效应。特别是当 $L/\lambda_r < 2$ 时, 隔振效果提高得更显著; 超过这一临界值, 隔振效率改变不明显。这是因为移动荷载引起地基振动来源于瑞利波在地基中传播。因此, 相比瑞利波长 λ_r , 桩长 L 需要足够长才能起到良好的隔振作用。

(2) 桩身刚度对桩基隔振影响

在实际工程中, 水泥土类桩的弹性模量 E_p 一般为 100~200 MPa, CFG 桩多为 10~20 GPa, 而钢筋混凝土桩的刚度可达 30 GPa 左右。因此, 桩的弹性模量 E_p 分别采用 200, 10, 30 GPa 来计算分析桩的刚度对隔振效应的影响。图 7 为不同刚度桩沿 x 轴的振幅比变化。图 8 所示为不同桩长下桩的刚度与平均振幅比之间的变化关系。

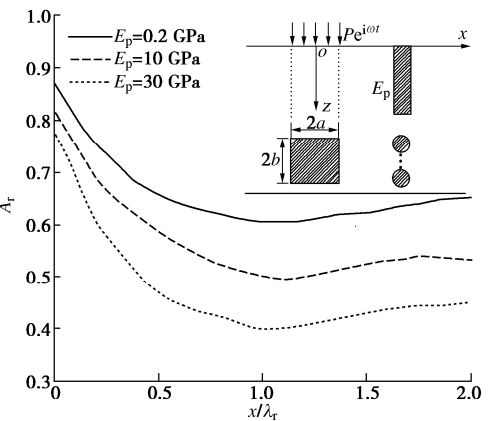


图 7 不同桩的刚度下沿 x 轴的振幅比变化

Fig. 7 Variation of amplitude ratio along x -axis for different pile stiffnesses

从图 7, 8 中可知, 桩的刚度越大, 桩缓解振动的能力越强, 表明排桩隔振的效果取决于地基与隔振物的刚度差, 刚度差别越大, 隔振效果越好。这也进一步证明了在饱和土体中采用钢筋混凝土排桩的隔振效

果会明显好于刚度较小的水泥土类桩。

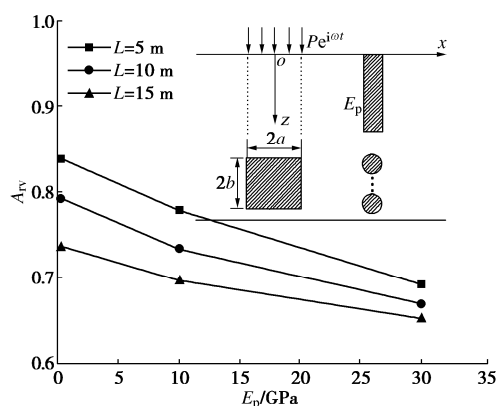


图 8 不同桩长下桩的刚度与平均振幅比之间的变化关系

Fig. 8 Variation relationship between pile stiffness and average amplitude ratio at different pile lengths

(3) 荷载移动速度对桩基隔振影响

为了研究荷载速度对隔振效果的变化, 现针对移动速度分别为 $0, 0.4C_s, 0.8C_s, 1.2C_s$ 的 4 种情况进行计算分析。图 9 为不同速度下振幅比沿 x 轴方向的变化曲线。图 10 为不同桩的刚度下速度对平均振幅比的影响。

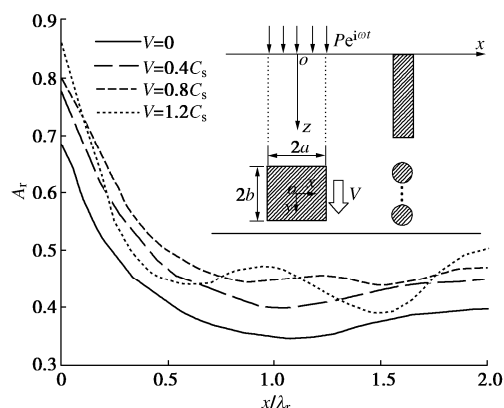


图 9 不同速度下振幅比沿 x 轴方向的变化曲线

Fig. 9 Variation curves of amplitude ratio along x -axis at different speeds

从图 10 中可知, 剪切波速 C_s 是荷载速度对桩基隔振效应影响变化的临界值。当移动速度小于剪切波速时, 随着速度的增加, 桩基的隔振效率减小。然而, 速度超过剪切波速, 荷载速度继续增加, 桩基的隔振效果反而增加。这主要是因为荷载速度较大时, 在地基中会产生较高频率的振动波, 而这类波的波长一般较短, 这使得有更多的波被桩基屏障反射, 导致更少能量的波穿过桩基, 从而表现出更好的隔振效果。而且当速度达到 $1.2C_s$ 时, 在同一区域内产生了波数较多而且相对密集的高频率短波, 在穿过排桩后, 由于反射作用而出现波较多的叠加现象, 使得出现波动的情况。此外, 不同桩的类型有着类似的隔振变化规律。

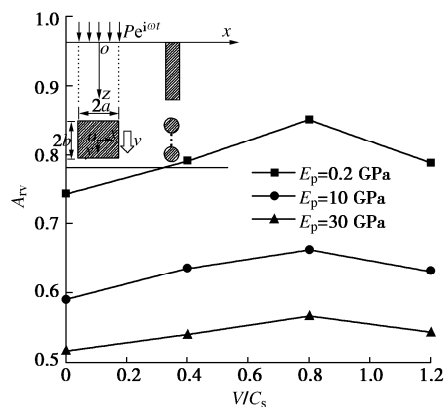


图 10 不同桩的刚度下速度对平均振幅比的影响

Fig. 10 Effects of velocity on average amplitude ratio at different pile stiffnesses

(4) 土体横观各向同性对桩基隔振影响

为了探讨土体横观各向同性对桩基隔振效应的影响, 现采用其中一横观各向同性参数 $n = E_h / E_v$ 来进行分析计算。参数 n 分别取为 $0.5, 0.9, 1.3$ 等 3 种情况。图 11 为不同桩刚度下土体横观各向同性参数与平均振幅比的关系。从图 11 中可知, 对于同一排桩系统, 土体的横观各向同性参数 n 越大, 桩所表现出的隔振效果更佳。这主要是由于参数 n 越大, 土体的水平抵抗变形能力增加, 这使得振动波在介质中传播时衰减得更快, 从而观测区域振幅减小。

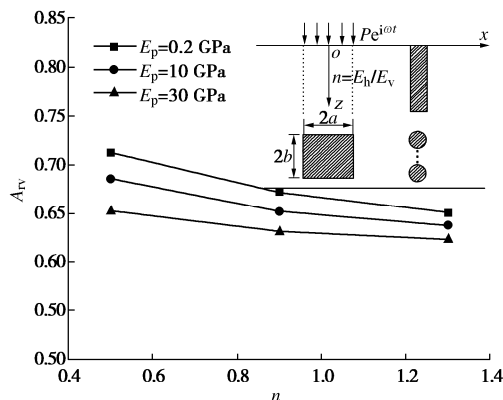


图 11 不同桩刚度下土体横观各向同性参数与平均振幅比的关系

Fig. 11 Relationship between transversely isotropic parameter and average amplitude ratio at different pile stiffnesses

6 结 论

基于两阶段理论, 采用有限元-边界元耦合方法解决了移动荷载下层状横观各向同性饱和地基中桩基隔振问题。结合数值算例验证了方法的准确性, 并得到 4 点结论。

(1) 增加桩长能够提高桩基屏障的隔振能力。然而存在临界值即 2 倍的瑞利波长, 超过这一最优桩长,

桩基缓解振动能力提高不明显。

(2) 桩与土体的刚度差别越大, 桩基在饱和地基中的隔振表现更好。饱和土体中混凝土类桩的隔振效果要优于水泥搅拌桩。

(3) 随着移动荷载速度的增加, 桩基屏障的隔振表现并不是一直减小的, 存在大小约等于剪切波速的临界值。当速度增加超过这一临界值, 由于高速荷载产生了较短波长, 使得更少的波跨过桩基屏障, 所以桩基的隔振效果反而提高。

(4) 当土体的横观各向同性参数增加时, 会引起振动波在地基内传播过程中能量衰减得更多, 桩基表现出的隔振效果更好。

参考文献:

- [1] LU J F, XU B, WANG J H. A numerical model for the isolation of moving-load induced vibrations by pile rows embedded in layered porous media[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2009, **46**(21): 3771-3781.
- [2] LU J F, XU B, WANG J H. Numerical analysis of isolation of the vibration due to moving loads using pile rows[J]. *Journal of Sound Vibration*, 2009, **319**(3/4/5): 940-962.
- [3] ONUR T, DENIZ U, BURAK F N. Assessing vibration isolation performance of single and coupled wave barriers through field experiments[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, **354**: 129156.
- [4] NITISH J, AMARNATH H, PRADIPTA C. Full scale field studies for assessing the vibration isolation performance of single and dual trenches[J]. *Transportation Geotechnics*, 2023, **39**: 100932.
- [5] LIANG F Y, LI T D, QIAN Y, et al. Investigating the seismic isolation effect of the cushioned pile raft foundation in soft clay through dynamic centrifuge tests[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, **142**: 106554.
- [6] CAI C Z, GAO L, HE X H, et al. The surface wave attenuation zone of periodic composite in-filled trenches and its isolation performance in train-induced ground vibration isolation[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, **139**: 104421.
- [7] ZHANG X, LU J F. A wavenumber domain boundary element method model for the simulation of vibration isolation by periodic pile rows[J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2013, **37**(7/8): 1059-1073.
- [8] LINGS M L, PENNINGTON D S, NASH D F T. Anisotropic stiffness parameters and their measurement in a stiff natural clay[J]. *Géotechnique*, 2000, **50**(2): 109-125.
- [9] YIMSIRI S, SOGA K. Cross-anisotropic elastic parameters of two natural stiff clays[J]. *Géotechnique*, 2011, **61**(9): 809-814.
- [10] AI Z Y, CAO Z. Vibration isolation of row of piles embedded in transverse isotropic multi-layered soils[J]. *Computers and Geotechnics*, 2018, **99**: 115-129.
- [11] 艾智勇, 李志雄. 冲刷作用下层状横观各向同性土中群桩水平振动响应[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(4): 613-618. (AI Zhiyong, LI Zhixiong. Horizontal vibration of a pile group in transversely isotropic layered soils under scour conditions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(4): 613-618. (in Chinese))
- [12] AI Z Y, LI P C, SONG X Y, et al. Analysis of an axially loaded pile in saturated multi-layered soils with anisotropic permeability and elastic superstrata[J]. *Computers and Geotechnics*, 2018, **98**: 93-101.
- [13] YANG S, JIA M C. Analytical layer-element solution for layered transversely isotropic saturated media subjected to rectangular moving loads[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023, **171**: 107877.
- [14] YANG S, JIA M C. Horizontal dynamic behavior of partially embedded pile groups in layer cross-anisotropic poroelastic saturated soils under lateral cyclic and axial coupling loadings[J]. *Ocean Engineering*, 2023, **281**: 114803.
- [15] WOODS R D, BARNETT N E, SAGESSET R. Holography a new tool for soil dynamics[J]. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1974, **100**: 1231-1247.
- [16] TSAI P H, FENG Z Y, JEN T L. Three-dimensional analysis of the screening effectiveness of hollow pile barriers for foundation-induced vertical vibration[J]. *Computers and Geotechnics*, 2008, **35**(3): 489-499.