

单排空心管桩屏障对平面SV波的隔离效果研究

徐平^{1,2}, 夏唐代¹, 周新民¹

(1. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 郑州大学交通运输工程系, 河南 郑州 450002)

摘要: 参考圆柱坐标系下一排圆柱体对弹性波的多重散射, 根据桩土界面处应力和位移连续的条件, 得到了非连续空心管桩屏障对入射平面SV波散射系数的理论解。通过引入无量纲位移幅值, 即屏障后土体的竖向位移与入射平面SV波引起的竖向位移的比值, 比较了不同形式的屏障对入射平面SV波的隔离效果。讨论了桩间距、屏障的位置和管桩的剪切模量(刚度)对单排空心管桩屏障对平面SV波隔离效果的影响, 为非连续屏障的隔振设计提供了理论依据。
关键词: 空心管桩; 非连续屏障; 平面SV波; 隔振设计

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)01-0131-06

作者简介: 徐平(1977-), 男, 山东五莲人, 博士, 主要从事土动力学方面的研究。E-mail: plian127@gmail.com。

Study on effect of barrier of a row of hollow pipe piles on isolation of incident plane SV waves

XU Ping^{1,2}, XIA Tang-dai¹, ZHOU Xin-min¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Department of Transportation Engineering, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: According to the multiple scattering of elastic waves by a row of cylinders in cylindrical coordinate systems, supposing that the interface of hollow pipe piles and soils was coherent, and stresses and displacements were continuous, a theoretical solution of scattering coefficients of incident plane SV waves by the barrier of a row of hollow pipe piles was obtained. By studying the normalized vertical displacement amplitude, the ratio of vertical displacement amplitude of soils behind the barrier to the amplitude of the incident SV waves, the effects of different types of barriers on the isolation of incident plane SV waves were compared, and the influence of displacement between the center of the two adjacent hollow pipe piles, the location of the barriers and the shear modulus or rigidity of the hollow pipe piles on the effect of isolation of the incident plane SV waves were discussed, and it would provide theoretical basis for the design of discontinuous barrier for vibration isolation.

Key words: hollow pipe pile; discontinuous barrier; plane SV wave; vibration isolation design

0 引言

建筑施工、铁路和公路交通、工业和爆破等人类活动引起的振动日益频繁,当振动强度超出人类生活、精密仪器、建筑物及其基础的容许范围时,就必须采取减小振动的措施加以缓解,这就是通常意义上的隔振,隔振已经成了非常重要的环境和工程问题^[1]。

考虑被隔离体的位置,可以将隔振类型分成两类,即主动隔振和被动隔振^[2-3]。考虑屏障本身的几何特性,屏障又可以分为连续屏障和非连续屏障。连续屏障是指屏障是连续的整体,如开口沟渠,用泥浆、锯屑和沙子等填充的沟或混凝土刚性墙等;非连续屏障由间断的屏障单体构成,如圆柱形排孔和排桩等^[2-4]。

目前,关于连续屏障理论和试验的研究已经比较成熟^[1,5-10]。尽管空沟的隔振效果较理想,但是对于低

频人工振源,按照文献[2]提供的标准,要做十几米的空沟,在实际工程中就很难实现,另外对于一些软土地和高地下水位的地区,就更加困难。为了解决这个问题,就出现了深度限制较低的非连续屏障隔振技术。

关于非连续屏障也进行了大量的研究:文献[11]通过建立一个二维流体中的声波传播模型,模拟了一排固体或空心桩体的隔振;文献[4, 12]运用波动理论,得出了均质弹性土体中刚性、弹性单排实心桩对P波、S波的精确解;文献[13]提供了均质土中竖向桩入射体波的桩土互动分析,并对一排桩用于隔振时桩间距、入射频率和桩刚度等参数进行了分析,表明刚性桩比柔性桩隔振更有效;文献[14, 15]采用先进的频域边

界元技术, 计算了三维单排实心桩和方桩隔振问题的模型, 桩和土体之间通过其界面的平衡和协调建立耦合, 并假定桩和土体都是弹性或黏弹性, 结论表明: 排桩的长度、入土深度、整体宽度是影响隔振效果的因素, 而桩间距是影响排桩隔振效果的决定性因素。

到目前为止, 关于单排非连续空心管桩屏障的隔振效果的研究未见报道。相对于实心圆柱桩, 空心管桩不仅能够节省大量材料, 而且对剪切波具有更好的隔离效果; 相对于隔振沟, 空心管桩不需要任何支护形式, 施工方便、造价低, 而且能够达到隔振设计深度的要求, 适应于任意的场地。因此, 单排非连续空心管桩屏障对于工程隔振具有良好的应用前景。

本文运用波函数展开法, 即将土体中的散射位移场及空心管桩中的折射位移场展开成波函数的级数, 然后根据桩土界面的边界连续条件得到位移场的散射和折射系数, 通过比较屏障后土体的竖向位移幅值与入射平面 SV 波的位移幅值之比, 研究了单排非连续弹性和刚性空心管桩屏障对平面 SV 波 (引起质点沿管桩轴向的振动) 的隔离效果。

1 位移场的势函数表示

1.1 入射平面 SV 波的位移场

设单排空心管桩屏障位于各向同性的均质弹性土体中, 如图 1 所示, 管桩的内外半径分别为 a_l 和 b_l ($l=1, 2, 3, \dots, N$, N 为管桩总数), 两相邻管桩中心之间的间距为 s_l , 平面 SV 波入射角为 α , 为了得到对 SV 波多次散射的准确解, 采用一组圆柱坐标系统, d_{jl} 为参考坐标系 (r_j, θ_j) 的原点和局部坐标系 (r_l, θ_l) 的原点之间的距离。

取入射平面 SV 波的竖向位移幅值为 w_0 , 则在参考坐标系 (r_l, θ_l) 下, 入射 SV 波的位移场可表示波函数的级数形式:

$$w^{\text{inc}}(r_l, \theta_l) = w_0 \exp(i k_s d_{jl} \cos \alpha) \cdot \sum_{m=0}^{+\infty} \varepsilon_m i^m J_m(k_s r_l) \cos m(\theta_l - \alpha) \quad (1)$$

式中 上标 inc 表示入射; $J_m(\bullet)$ 为 m 阶第一类 Bessel

函数; k_s 为土体中 SV 波的波数; ε_m 为 Neumann 因子, $\varepsilon_0 = 1$, $\varepsilon_m = 2 (m \neq 0)$; i 为虚数单位, $i = \sqrt{-1}$; 为研究和讨论方便, 式 (1) 及以下的讨论中都略去了公共时间因子 $e^{-i\omega t}$ 。

1.2 散射 SV 波的位移场

在运用分离变量法^[16]对第 j ($1 \leq j \leq N$) 根空心管桩的散射 SV 波位移场 $w_j^{\text{sc}}(r_j, \theta_j)$ 进行求解时, 由于散射位移场不是关于 x 轴对称的, 即波函数展开时 $\sin m\theta_j$ 的系数不为 0, 于是 $w_j^{\text{sc}}(r_j, \theta_j)$ 可设成

$$w_j^{\text{sc}}(r_j, \theta_j) = \sum_{m=0}^{+\infty} A_m^j H_m^{(1)}(k_s r_j) \cos m\theta_j + \sum_{m=1}^{+\infty} B_m^j H_m^{(1)}(k_s r_j) \sin m\theta_j \quad (2)$$

式中 上标 sc 表示散射; A_m^j 和 B_m^j 为待定复系数; $H_m^{(1)}(\bullet)$ 为 m 阶第一类 Hankel 函数。

于是, 土体中点 (r_l, θ_l) 处总的轴向位移为

$$w(r_l, \theta_l) = w^{\text{inc}}(r_l, \theta_l) + \sum_{j=1}^N w_j^{\text{sc}}(r_j, \theta_j) \quad (3)$$

单排空心管桩对 SV 波的散射位移场与单排实心桩屏障的完全一致, $w(r_l, \theta_l)$ 的表达式见文献[12]。

1.3 空心管桩内的折射 SV 波的位移场

和单排管桩对波的散射一样, 管桩内的折射位移场也不是关于 x 轴对称的, 参考单个圆柱壳体内折射波的势函数表示形式^[17], 则第 l ($1 \leq l \leq N$) 根空心管桩内部的折射位移场可设成

$$\tilde{w}_l^{\text{sc}}(r_l, \theta_l) = \sum_{m=0}^{+\infty} \left[C_m^l J_m(\tilde{k}_s^l r_l) + E_m^l N_m(\tilde{k}_s^l r_l) \right] \cos m\theta_l + \sum_{m=1}^{+\infty} \left[D_m^l J_m(\tilde{k}_s^l r_l) + F_m^l N_m(\tilde{k}_s^l r_l) \right] \sin m\theta_l \quad (4)$$

式中 上标 ~ 表示与空心管桩有关的变量、参数等; $N_m(\bullet)$ 为 m 阶 Neumann 函数; $\tilde{k}_s^l$ 为第 l ($1 \leq l \leq N$) 根管桩内 SV 波的波数; C_m^l , D_m^l , E_m^l 和 F_m^l 为待定复系数。

2 平面 SV 波散射系数的求解

2.1 单排刚性空心管桩屏障

考虑一般情况下, 不存在固定刚性空心管桩的外

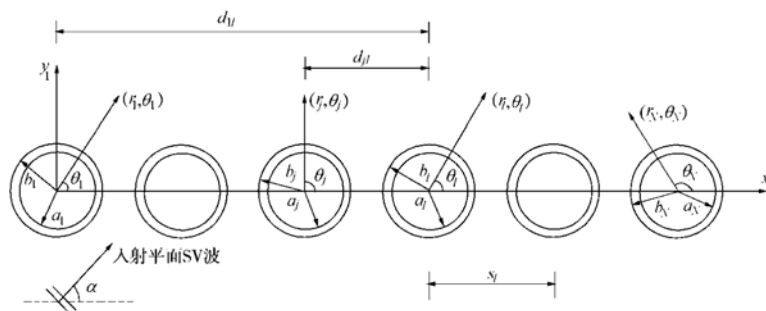


图 1 单排空心管桩屏障、入射平面 SV 波及柱坐标系

Fig. 1 Barrier of a row of hollow pipe piles, incident plane SV waves and cylindrical coordinate systems

在约束力, 假定刚性空心管桩和周围土体在交界面处完全联结, 管桩将作刚体移动, 则边界的位移条件为

$$w(r_l, \theta_l) \Big|_{r=b_l} = \bar{w}_l(r_l, \theta_l) \Big|_{r=b_l}, \quad (5)$$

式中, $1 \leq l \leq N$, $\bar{w}_l(r_l, \theta_l)$ 为第 l 根刚性管桩的轴向位移, $\bar{w}_l(r_l, \theta_l)$ 受下述的刚体运动方程所控制:

$$\oint_A \mu \frac{\partial w(r_l, \theta_l)}{\partial r_l} dA = -\tilde{m}_l \omega^2 \bar{w}_l(r_l, \theta_l), \quad (6)$$

式中, μ 为土体的剪切模量, $\tilde{m}_l = \tilde{\rho}_l \pi (b_l^2 - a_l^2)$, 为第 l 根管桩单位长度的质量, $\tilde{\rho}_l$ 为第 l 根管桩的密度。

将散射位移场 $w(r_l, \theta_l)$ 的表达式代入式 (5)、(6), 根据三角函数积分的正交性及不同阶三角函数线性无关的性质, 最终可以得到关于单排刚性管桩对平面 SV 波的散射系数 A_m^j 和 B_m^j 精确解的无穷线性方程组:

$$\begin{aligned} & (1 - \delta_{l1}) \sum_{j=1}^{l-1} \sum_{n=0}^{+\infty} A_n^j \left[(-1)^m K_m^n(k_s d_{jl}) - \delta_{m0} R_1^l H_n^{(1)}(k_s d_{jl}) \right] + \\ & (1 - \delta_{lN}) \sum_{j=l+1}^N \sum_{n=0}^{+\infty} A_n^j \left[(-1)^n K_m^n(k_s d_{jl}) - \delta_{m0} R_1^l H_n^{(1)}(k_s d_{jl}) \right] + \\ & A_m^l \left[\frac{2}{\varepsilon_m} \frac{H_m^{(1)}(k_s b_l)}{J_m(k_s b_l)} - \delta_{m0} R_2^l \right] \\ & = (\delta_{m0} R_1^l - 2i^m) w_0 \exp(i k_s d_{l1} \cos \alpha) \cos m\alpha \\ & \quad (m = 0, 1, 2, \dots, +\infty, \quad l = 1, 2, 3, \dots, N). \end{aligned} \quad (7a)$$

$$\begin{aligned} & (1 - \delta_{l1}) \sum_{j=1}^{l-1} \sum_{n=1}^{+\infty} B_n^j (-1)^m L_m^n(k_s d_{jl}) + B_m^l \frac{H_m^{(1)}(k_s r_l)}{J_m(k_s r_l)} + \\ & (1 - \delta_{lN}) \sum_{j=l+1}^N \sum_{n=1}^{+\infty} B_n^j (-1)^n L_m^n(k_s d_{jl}) \\ & = -2w_0 i^m \exp(i k_s d_{l1} \cos \alpha) \sin m\alpha \\ & \quad (m = 1, 2, 3, \dots, +\infty, \quad l = 1, 2, 3, \dots, N). \end{aligned} \quad (7b)$$

其中

$$K_m^n(k_s d_{jl}) = H_{n+m}^{(1)}(k_s d_{jl}) + (-1)^m H_{n-m}^{(1)}(k_s d_{jl}), \quad (8a)$$

$$L_m^n(k_s d_{jl}) = -H_{n+m}^{(1)}(k_s d_{jl}) + (-1)^m H_{n-m}^{(1)}(k_s d_{jl}), \quad (8b)$$

$$R_1^l = \frac{4\zeta_l}{k_s b_l (1 - \zeta_l^2)} \frac{J_1(k_s b_l)}{J_0(k_s b_l)}, \quad (9a)$$

$$R_2^l = \frac{4\zeta_l}{k_s b_l (1 - \zeta_l^2)} \frac{H_1^{(1)}(k_s b_l)}{J_0(k_s b_l)}, \quad (9b)$$

式中, $\zeta_l = \rho / \tilde{\rho}_l$ 为土体与第 l 根管桩的密度之比, $\zeta_l = a_l / b_l$ 为第 l 根管桩的内外半径之比。

2.2 单排弹性空心管桩屏障

假定管桩和周围土体的界面为完全联结, 则在管桩与土体的界面处位移和应力连续, 管桩内边界完全自由, 应力为 0, 于是对于任一 l ($1 \leq l \leq N$) 根管桩:

$$(w^{\text{inc}} + w^{\text{sc}}) \Big|_{r=b_l} = \tilde{w}_l^{\text{sc}} \Big|_{r=b_l}, \quad (10a)$$

$$(\tau_{rz}^{\text{inc}} + \tau_{rz}^{\text{sc}}) \Big|_{r=b_l} = \tilde{\tau}_{rz}^{\text{sc}} \Big|_{r=b_l}, \quad (10b)$$

$$\tilde{\tau}_{rz}^{\text{sc}} \Big|_{r=a_l} = 0. \quad (10c)$$

将散射位移场 $w(r_l, \theta_l)$ 和式 (4) 代入式 (11) 根据不同阶三角函数线性无关的性质, 最终可以得到关于单排弹性空心管桩对平面 SV 波的散射系数 A_m^j 和 B_m^j 精确解的无穷线性方程组:

$$\begin{aligned} & (1 - \delta_{l1}) \sum_{j=1}^{l-1} \sum_{n=0}^{+\infty} A_n^j (-1)^m K_m^n(k_s d_{jl}) + \\ & (1 - \delta_{lN}) \sum_{j=l+1}^N \sum_{n=0}^{+\infty} A_n^j (-1)^n K_m^n(k_s d_{jl}) + \\ & \frac{2}{\varepsilon_m} A_m^l \frac{H_m^{(1)'}(k_s b_l) - R_m^l H_m^{(1)}(k_s b_l)}{J_m'(k_s b_l) - R_m^l J_m(k_s b_l)} \\ & = -2w_0 \exp(i k_s d_{l1} \cos \alpha) i^m \cos m\alpha \\ & \quad (m = 0, 1, 2, \dots, +\infty, \quad l = 1, 2, 3, \dots, N). \end{aligned} \quad (11a)$$

$$\begin{aligned} & (1 - \delta_{l1}) \sum_{j=1}^{l-1} \sum_{n=1}^{+\infty} B_n^j (-1)^m L_m^n(k_s d_{jl}) + \\ & (1 - \delta_{lN}) \sum_{j=l+1}^N \sum_{n=1}^{+\infty} B_n^j (-1)^n L_m^n(k_s d_{jl}) + \\ & B_m^l \frac{H_m^{(1)'}(k_s b_l) - R_m^l H_m^{(1)}(k_s b_l)}{J_m'(k_s b_l) - R_m^l J_m(k_s b_l)} \\ & = -2w_0 \exp(i k_s d_{l1} \cos \alpha) i^m \sin m\alpha \\ & \quad (m = 1, 2, \dots, +\infty, \quad l = 1, 2, 3, \dots, N; \quad R_m^l). \end{aligned} \quad (11b)$$

其中

$$R_m^l = \sqrt{\frac{\xi_l}{\zeta_l}} \frac{J_m'(\tilde{k}_s^l b_l) N_m'(\tilde{k}_s^l a_l) - J_m'(\tilde{k}_s^l a_l) N_m'(\tilde{k}_s^l b_l)}{J_m(\tilde{k}_s^l b_l) N_m(\tilde{k}_s^l a_l) - J_m(\tilde{k}_s^l a_l) N_m(\tilde{k}_s^l b_l)}, \quad (12)$$

式中, $\xi_l = \tilde{\mu}_l / \mu$, 为第 l 根空心管桩与土体的剪切模量之比。

在式 (9) 和式 (12) 中取内半径为 $a_l = 0$, 则式 (7) 和式 (11) 为刚性和弹性实心桩屏障散射系数的理论解。

3 隔离效果分析

设所有空心管桩的参数都一致, 桩列均匀布置, 取管桩的外半径 $b=1$ 。设 SV 波垂直入射 ($\alpha = \pi/2$), 取坐标系的原点为屏障的中心处, 如图 2 所示。

对位移场的频率进行归一化处理:

$$\eta = \frac{\omega b}{\pi c_s} = \frac{2b}{\lambda_s} = \frac{k_s b}{\pi}, \quad (13)$$

式中, η 为归一化后土体中位移场的频率, λ_s 为土体中 SV 波的波长。

取 $\eta = 0.4$, 即 $\lambda_s / b = 5$, 管桩数量 $N = 8$, 土与管桩的密度之比 $\zeta = 0.74$, 内半径与外半径之比 $a/b = 0.5$, 桩间距 $s_l/b = 3$, 即相邻管桩之间的孔隙间距 $s/b = 1$, 绘制了不同模量比 ξ 的弹性空心管桩屏障后中心处 (图 2 所示的 $x/b = 0$) 的归一化位移 $|w/w_0|$

(即屏障后的竖向位移与入射平面 SV 波的竖向位移的比值)随 y/b 的变化曲线, 以及屏障后 $y/b=150$ 处的 $|w/w_0|$ 随 x/b (x 为图 2 中的坐标) 的变化曲线, 如图 3 (a)、(b) 所示。

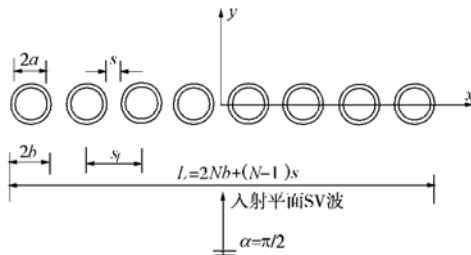


图 2 单排管桩屏障、平面入射 SV 波及参考坐标系

Fig. 2 Discontinuous barrier of hollow pipe piles, incident plane SV waves and rectangular coordinate systems

从图 3 可以看出, 随着管桩剪切模量的增大, 屏障对 SV 波的隔离效果显著提高, 特别是当 ξ 从 10 提高到 50 时, 提高最快, 随着 ξ 的进一步地增大, 隔离效果提高缓慢, 当 ξ 超过 500 后, 隔离效果基本不再发生变化, 此时的弹性空心管桩屏障可以说完全接近于刚性空心管桩屏障, 下面的研究中取弹性空心管桩模量比的最佳值 $\xi = 500$, 当然, 得出的结论也适应于刚性空心管桩。

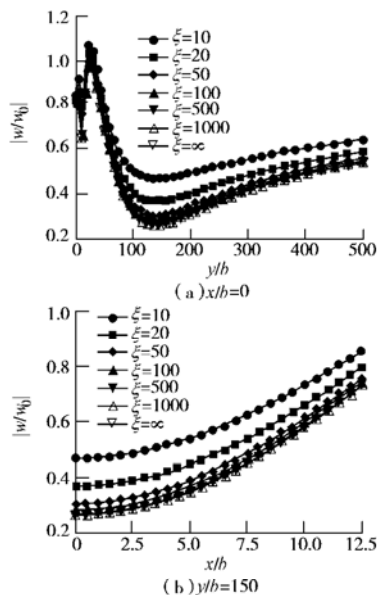


图 3 剪切模量对弹性空心管桩屏障隔离效果的影响

Fig. 3 Effect of shear modulus on the isolation of barriers of elastic hollow pipe piles

取 $\xi = 500$, 其它参数和图 3 相同, a/b 分别取 0、0.3、0.6 和 0.9, 绘制了空心管桩屏障中心处的 $|w/w_0|$ 随 y/b 的变化曲线, 以及屏障后 $y/b=200$ (此处为最佳隔离位置) 的 $|w/w_0|$ 随 x/b (x 为图 2 中的坐标) 的变化曲线, 如图 4 所示。从图 4 可以看出, 虽然在屏障后 s/b 小于 140 的区域内, 内半径较大 ($a/b=0.9$)

的屏障产生较大的 $|w/w_0|$, 容易产生位移的放大, 但当 s/b 大于 140 后, $a/b=0.9$ 的屏障产生的 $|w/w_0|$ 最小, 而且保持到无穷远处 (理论上讲), 也就是说管壁越薄, 隔离效果越好, 另外 $a/b < 0.3$ 的空心管桩屏障的隔离效果和实心桩屏障基本相近。

从图 3 (b) 和图 4 (b) 还可以看出, 不同模量、不同内半径的空心管桩屏障后的 $|w/w_0|$ 随着 x/b 的增大而增大, 也就是说, 越靠近屏障中心处, 隔离效果最好, 相反地, 越靠近屏障边缘, 隔离效果越差。

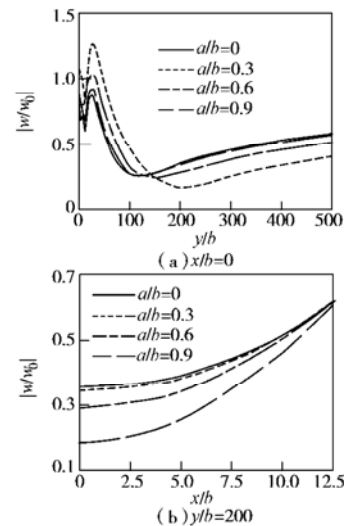


图 4 内半径对空心管桩屏障隔离效果的影响

Fig. 4 Effect of inner radius on the isolation of barriers of elastic hollow pipe piles

取 $\xi = 500$, 其它参数和图 3 相同, a/b 分别取 0 和 0.9, 绘制了屏障后不同 x/b (x 为图 1 中的坐标) 处的 $|w/w_0|$ 随 y/b 的变化曲线, 如图 5 (a)、(b) 所示。

根据前面的分析, 当 $\xi > 500$ 后, 弹性桩屏障完全可以等价于刚性桩屏障, 所以图 5 (a) 和文献[12]中取 $\xi = 1000$ 时得到的结果完全相同。从图 5 可以看出, 在屏障后紧靠屏障的较小区域容易产生位移的波动, 甚至放大, 不过在离屏障较远的区域内, $|w/w_0|$ 的变化曲线还是比较平缓、比较有规律的: 无论是实心桩屏障还是空心管桩屏障, 在相同的 y/b 处, 越靠近屏障中心, $|w/w_0|$ 的值越小, 即隔离效果越好, 这和从图 3 (b) 和 4 (b) 分析得出的结论是一致的; 另外比较图 5 (a)、(b) 可以看出, 不同 x/b 处, $a/b=0.9$ 的空心管桩屏障的隔离效果都好于实心桩屏障, 这和从图 4 分析得出的结论是相同的。

引入位移场的透射系数^[4]

$$TI_w(s, y) = \frac{1}{L} \int_0^L \left| \frac{w(x, y)}{w_0} \right| dx, \quad (14)$$

a/b 分别取 0、0.3、0.6 和 0.9, 绘制了空心管桩屏障后 y/b 为 150 和 200 处的 TI_w 随 s/b 的变化曲线,

如图6所示。从图6可以看出,当 s/b 最小时, TI_w 最小,随着 s/b 的增大, TI_w 急骤增大,并当 $s/b=3.0$ 左右,达到最大值,之后,随着 s/b 的进一步增大, TI_w 基本处于稳定值,不发生较大的变化,此时屏障的平均隔离效果(整个屏障宽度内隔离效果的平均)仅为10%左右,屏障已经基本不起隔离作用,另外从图6还可以看出,所有的管壁屏障的 TI_w 在 $s/b=0.5$ 处都为最小,此处的 TI_w (平均隔离效果)还随着管桩 a/b 的增大,即壁厚的减小而减小,也就是说平均隔离效果随着壁厚的减小而增大,这与图4(a)和图5(a)得出的结论是完全一致的。

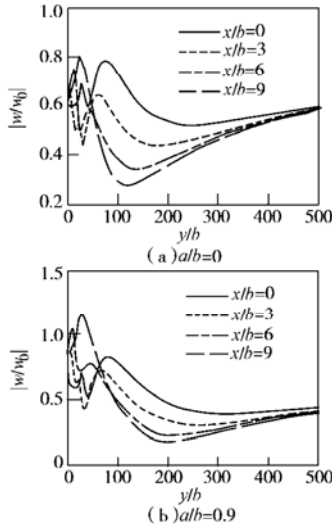


图5 屏障后不同位置处的隔离效果

Fig. 5 The isolation effect at different places behind barrier of hollow pipe piles

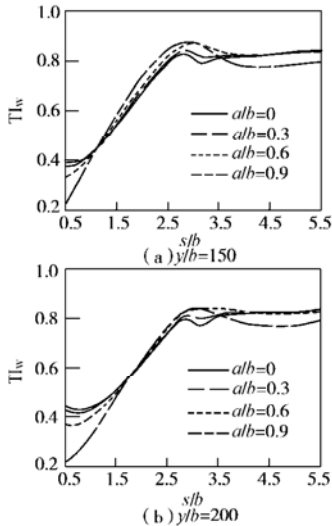


图6 空心管桩屏障后不同 y/b 处的 TI_w 随 s/b 的变化曲线

Fig. 6 Variation of TI_w with s/b at different places of y/b behind barrier of hollow pipe piles

根据上面的分析得出结论: a/b 越大,屏障的隔离效果越好。下面仅研究 $\xi=500$ 和 $a/b=0.9$ (此种情况最理想)的弹性空心管桩屏障的一些特性,当然,

结论同样适用于刚性管桩屏障。

s/b 分别取0.5、1.0、1.5和2.0,其它参数和图3相同,绘制了屏障后中心处的 $|w/w_0|$ 随 y/b 的变化曲线,以及屏障后 $y/b=150$ 处的 $|w/w_0|$ 随 x/b (x 为图2中的坐标)的变化曲线,如图7所示。

图7(a)可看出,从整体来讲, $s/b=0.5$ 的空心屏障的隔离效果在 $y/b=150$ 处最佳,但随着 y/b 的增大,优势逐渐减小,不过从整体来讲,空心管桩的隔离效果还是随着 s/b 的减小而提高;从图7(b)可以看出,在屏障后最佳隔离效果的 $y/b=150$ 处,从屏障中心到屏障边缘, $s/b=0.5$ 的空心管桩屏障的隔离效果一直都是最好。这和图6得出的结论是完全一致的。

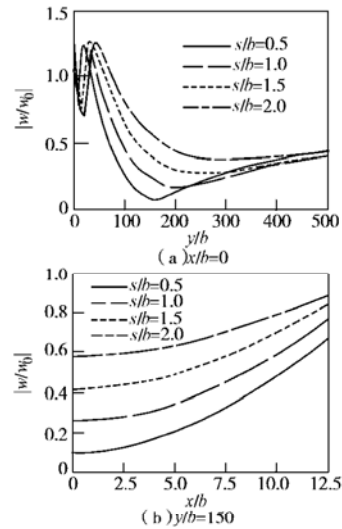


图7 桩间距对空心管桩屏障隔离效果的影响

Fig. 7 Effect of distance between two piles on the isolation of barriers of elastic hollow pipe piles

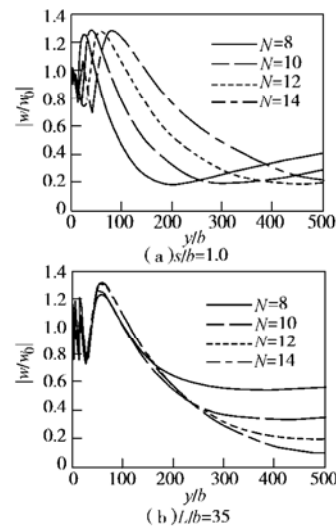


图8 桩数量对空心管桩屏障隔离效果的影响

Fig. 8 Effect of the number of piles on the isolation of barriers of elastic hollow pipe piles

固定 $s/b=1.0$ 或固定屏障的宽度 $L/b=35$,空心管桩的数量 N 分别为8、10、12和14,分别绘制了两

种情况下的空心管桩屏障后中心处的 $|w/w_0|$ 随 y/b 的变化曲线, 如图 8 (a)、(b) 所示。比较图 8 可以看出, 如果忽略产生位移放大现象的屏障后靠近屏障的较小区域, N 对隔离效果的影响还是比较大、比较有规律的: 当 $s/b=1.0$ 时, 随着 N 的增大, 即屏障宽度的增大, 屏障对平面 SV 波的最佳隔离位置在向前推移, 而且最佳隔离的区域在扩大, 最佳隔离效果不变,

无限长均质材料, 运用波函数展开法和 Graf 加法定理, 根据桩土边界的应力、位移连续等条件, 得到了刚性、弹性空心管桩屏障对 SV 波的散射系数的理论解, 分析了桩土模量比、空心管桩的内半径(即管壁厚度)、桩间距等因素对非连续屏障对平面 SV 波的隔离效果的影响, 以及屏障后不同位置处的隔离效果的变化规律, 结果表明:

(1) 非连续弹性屏障的隔离效果随着剪切模量的增大而提高, 当桩土的剪切模量比达到 500 时, 弹性空心管桩和实心桩的隔离效果已经等价于刚性空心管桩和实心桩屏障, 而当模量比超过 500 后, 隔离效果不再提高。

(2) 非连续空心管桩屏障的隔离效果随着管壁厚度的减小而提高, 当管桩退化为空腔时, 空心管桩屏障可以近似于部分充填材料(混凝土)的隔沟。

(3) 非连续空心管桩屏障的隔离效果随着桩间距的减小而提高, 因为随着桩间距的减小, 管桩内空间占总的屏障比例就会提高, 而空气中不传播弹性波。

(4) 当桩间距固定时, 非连续空心管桩屏障对平面 SV 波的最佳隔离区域随着管桩数量的增大, 即屏障宽度的增大而扩大; 当宽度固定时, 非连续空心管桩屏障的最佳隔离效果随着管桩数量的增大, 即桩间距的增大而提高。

参考文献:

- [1] AHMAD S, AL-HUSSAINI T M, FISHMAN K L. Investigation on active isolation of machine foundations by open trenches [J]. J Geotech Engng, 1996, **122**: 454 - 461.
- [2] WOODS R D. Screening of surface waves in soils [J]. J Solids Mech and Found Div, ASCE, 1968, **94**(4): 951 - 979.
- [3] KLEIN R, ANTES H, LE Houédec D L. Efficient 3D modelling of vibration isolation by open trenches [J]. Computers and Structures, 1997, **64**: 809 - 817.
- [4] AVILÉS J, SÁNCHEZ-SESMA F. Piles as barriers for elastic waves [J]. J Geotech Engng, 1983, **119**(9): 1133 - 1146.
- [5] MAY T W, BOLT B A. The effectiveness of trenches in reducing seismic motion [J]. J Earthq Engng Struct Dyn, 1982, **10**: 195 - 210.
- [6] AHMAD S, AL-HUSSAINI T M. Simplified design for vibration screening by open and in-filled trenches [J]. J Geotech Engng, 1991, **117**(1): 67 - 88.
- [7] AL-HUSSAINI T M, AHMAD S. Design of wave barriers for prediction of horizontal ground vibration [J]. J Geotech Engng, 1991, **117**(4): 616 - 636.
- [8] YANG Y B, HUNG H H. Parametric study of wave barriers for reduction of train-induced vibrations [J]. Int J Numer Meth Engng, 1997, **40**(20): 3729 - 3747.
- [9] LIAO S, SANGREY D A. Use of piles as isolation barriers [J]. J Geotech Engrg Div, ASCE, 1978, **104**(9): 1139 - 1152.
- [10] AVILÉS J, SÁNCHEZ-SESMA F. Foundation isolation from vibrations using piles and barriers [J]. J Geotech Engng ASCE, 1988, **114**(11): 1854 - 1870.
- [11] BOROOMAND B, KAYNIA A M. Vibration isolation by an array of piles[C]// Proc Soil Dyn Earthq Eng Karlsruhe Germany, 1992: 683 - 691.
- [12] KATTIS S E, POLYZOS D, BESKOS D E. Modelling of pile wave barriers by effective trenches and their screening effectiveness [J]. J Soil Dyn Earthq Engng, 1999, **18**(1): 1 - 10.
- [13] KATTIS S E, POLYZOS D, BESKOS D E. Vibration isolation by a row of piles using a 3-D frequency domain BEM [J]. Int J Numer Meth Engng, 1999, **46**(5): 713 - 728.
- [14] PAO Y H, MOW C C. Diffraction of elastic waves and dynamic stress concentrations [M]. New York: Crane and Russak, 1973.
- [15] VEKSLER N, IZBICKI J L, CONOIR J M. Elastic wave scattering by a cylindrical shell [J]. J Wave Motion, 1999, **29**(3): 195 - 209.