

文章编号: 1004-4574(2008) 02- 0001- 07

饱和土中排桩对入射 S波隔离的三维分析

蔡袁强^{1,2}, 白光亚¹, 徐长节¹

(1 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310027; 2 温州大学 建筑与土木工程学院, 浙江 温州 325035)

摘要:基于 Biot两相饱和多孔介质理论,就饱和土中排桩对入射 S波的隔离效应进行了三维分析。使用坐标转换和 Graf加法定理,将某一桩体附近的总波场构造为入射波和所有桩体的散射波之和,通过施加桩土界面处的边界条件,利用不同阶三角函数的线性无关性,得到了问题的解析解。数值算例对排桩后面的饱和土体的竖向位移振幅衰减进行了分析,探讨了入射波频率和桩土弹性模量比等参数对饱和土中排桩隔离效果的影响。与弹性土中的相应结果比较表明:频率较低时,饱和土中排桩的隔离效果和弹性土中较为接近;频率较高时,两者之间的差别有所增大。

关键词:饱和土;排桩;散射;竖向位移;隔离效果

中图分类号: TU 435 文献标识码: A

Three-dimensional isolation analysis of a row of pile in saturated soil from incident S waves

CAI Yuan-qiang^{1,2}, DING Guang-ya¹, XU Chang-jie¹

(1 Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China
2. College of Architecture and Civil Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

Abstract Based on the Biot's two phase saturated porous medium theory, the effects of a row of pile on reducing the displacement amplitudes of soil excited by incidence of S waves were investigated. The wave field near certain pile was constructed as the sum of incident waves and scattering waves from all piles with the coordinate transformation and Graf addition theorems. By imposing continuity conditions at the soil-pile interfaces and taking account of the linear independence of trigonometric function, analytical solution of the problems were obtained. Numerical calculations of vertical displacement amplitudes of saturated soil behind a row of piles were carried out. The results indicate that at relatively lower frequency, the isolation effectiveness of a row of piles embedded in saturated soil in vertical directions is similar to that of elastic soil conditions, while the isolation effectiveness in saturated soil is better than that of elastic soil conditions with increasing frequency.

Key words saturated soil; row of piles; scattering; vertical displacement; isolation effectiveness

随着经济、科技的发展及人们生活品质的提高,人们对于周围环境越来越重视,有许多精密仪器对振动的要求与限制也愈严格。若因机器基础、交通荷载或爆破施工活动等所引起太大的振动,将会严重影响我们的生活与工作环境。一般过去的研究大都以在振源和要防护地区之间设置明沟或填充沟作为隔振屏障来解决,然而在软土和高地下水水位地区,受限于沟壁稳定性与可施工的深度,为了解决实际工程中的问题,可以利用能够贯入深层土体的排桩作为隔振屏障。Woods等^[1]运用全息照像技术的原理来模拟半空间的振动,观

收稿日期: 2007- 08- 12 修订日期: 2007- 10- 22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50778136)

作者简介: 蔡袁强(1965-),男,教授,主要从事土动力学和基础工程研究。E-mail: gyding321@yahoo.com.cn

察圆孔屏障的被动隔振效果,他们认为圆孔屏障的直径应大于 0.6倍 Rayleigh波波长,圆孔屏障间的净间距应小于 0.4倍 Rayleigh波波长。Liao和 Sangrey^[2]利用水波比拟弹性波对桩列和孔列的隔振效果进行研究,他们分析了排桩作为被动隔振屏障的可能性。Avil s和 S nchez- Sesna^[3-4]运用波动理论研究了无限长实心排桩对入射 P波、SH波和 SV波的隔振效应,结果显示实心排桩对于 SV波的隔振效率较高,对 P波的隔振效率较低。Kattis等^[5]采用三维频域边界单元法分析了一排圆形断面或方形断面的孔洞与混凝土排桩的隔振效果,其研究结果认为桩的断面形状对隔振效果影响不大,桩与桩之间的距离是主要的影响参数。高广运等^[6]从异质体(屏障)引起的瑞利波散射理论出发,根据散射波场近似的原则,分析了单排桩和多排桩的隔振问题。Tsai等^[7]用三维边界单元法对单排管桩的隔振效果进行了分析,认为桩的长度要比桩间距及屏障到振源间距离对隔振效果的影响大。

上述文献主要考虑的是单相弹性土体中排桩或孔列的隔振效果,对于饱和土体中排桩的隔振效果,目前尚未见有文献报道。本文基于 Biot两相饱和和多孔介质理论,以排桩作为屏障,对饱和土体中入射 S波隔离进行了三维分析。数值算例对饱和土体竖向位移振幅衰减进行了分析,探讨了入射波频率、桩土弹性模量比等参数对排桩隔离效果的影响。

1 饱和土的运动方程

在直角坐标系下,饱和土体中土骨架和流体的运动方程可通过骨架位移 U 和流体相对于骨架的位移 w 表示为^[8]

$$\rho \ddot{U} + (\lambda_c + \mu) \text{grad} \zeta - \alpha M \text{grad} \xi = \rho \dot{U} + \rho \dot{w} \tag{1}$$

$$\alpha M \text{grad} \zeta - M \text{grad} \xi = \rho_f \dot{U} + h \dot{w} + b \dot{w} \tag{2}$$

式中, $w = f(U - W)$; f, W 分别为土体的孔隙率和流体部分的位移; ζ, ξ 分别为土骨架膨胀比和流体的相对膨胀比; $\lambda_c = \lambda + \alpha^2 M$; λ, μ 为固体土骨架的 Lamé 常数; α, M 为表征土颗粒和孔隙流体压缩性的常数; $\rho = (1 - f)\rho_s + f\rho_f$, ρ_s 与 ρ_f 分别为土颗粒密度和流体密度; $h = \frac{\rho_f}{f}$; $b = \frac{\eta}{k_s}$, η 与 k_s 分别为流体的粘滞系数和土的渗透系数; \cdot 表示对时间 t 的导数。

根据 Helmholtz 矢量分解定理,在直角坐标下,可以把土骨架位移 U 和流体相对于骨架的位移 w 用标量势和矢量势分别表示为

$$U = \text{grad} \varphi + \text{curl} \psi \tag{3}$$

$$w = \text{grad} \chi + \text{curl} \Theta \tag{4}$$

式中, φ, ψ 分别为土骨架部分的标量势函数和矢量势函数; χ, Θ 分别为流体部分的标量势函数和矢量势函数。由文献[9]可知,饱和土体中存在 P_1, P_{II} 和 S 三种波。

2 饱和土中单排弹性桩对倾斜入射 S波的散射

土骨架中单位振幅的入射平面 S波在局部坐标系 (r_j, θ_j, z) 中可以表示为^[10]

$$\phi_1^{(inc)} = \exp(iYz) \exp(i p_3 d_{1j} \cos \theta_b) \sum_{m=0}^{\infty} \epsilon_m i^m J_m(p_3 r_j) \cos[m(\theta_j - \theta_b)] \tag{5}$$

$$\phi_2^{(inc)} = \exp(iYz) \exp(i p_3 d_{1j} \cos \theta_b) \sum_{m=0}^{\infty} \epsilon_m i^m J_m(p_3 r_j) \cos[m(\theta_j - \theta_b)] \tag{6}$$

式中, $i = \sqrt{-1}$, 是虚数单位; $p_3 = \sqrt{Y^2 - Y^2}$, $Y = Y_i \cos \varphi_i$; Y_i 为倾斜入射 S波波数, φ_i 为 S波倾斜入射时入射角; θ_b 为 S波倾斜入射时波矢量在水平面 $(x_1 O_1 y_1)$ 内投影与 x_1 轴夹角。 d_{1j} 为水平面 $(x_1 O_1 y_1)$ 内第一根桩到第 j 根桩间的距离; $J_m(\cdot)$ 为第一类 m 阶 Bessel 函数; 系数 $\epsilon_0 = 1, \epsilon_m = 2 (m \geq 1)$; 为便于使用坐标转换,这里取局部坐标系里的 $z_j (j = 1, 2, \dots, N)$ 等于整体坐标系里的 z , 其中 N 为总桩数(见图 1)。这里及以后运动量中的时间因子 $\exp(-i\omega t)$ 均被省略。

土骨架中第 k 根桩上的散射波可以表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_f^k = \exp(i\gamma z) \sum_{n=0}^{\infty} H_n^{(1)}(p_1 r_k) (A_{1n}^k \cos n\theta_k + B_{1n}^k \sin n\theta_k), \\ \Phi_s^k = \exp(i\gamma z) \sum_{n=0}^{\infty} H_n^{(1)}(p_2 r_k) (C_{1n}^k \cos n\theta_k + D_{1n}^k \sin n\theta_k), \\ \Phi_{t1}^k = \exp(i\gamma z) \sum_{n=0}^{\infty} H_n^{(1)}(p_3 r_k) (E_{1n}^k \sin n\theta_k + F_{1n}^k \cos n\theta_k), \\ \Phi_{t2}^k = \exp(i\gamma z) \sum_{n=0}^{\infty} H_n^{(1)}(p_3 r_k) (G_{1n}^k \cos n\theta_k + H_{1n}^k \sin n\theta_k). \end{array} \right. \quad (7)$$

式中, $p_1 = \sqrt{\gamma_f'^2 - \gamma^2}$, $p_2 = \sqrt{\gamma_s'^2 - \gamma^2}$, γ_f' , γ_s' 分别为饱和土中散射 P_I 波、P_{II} 波数; $H_n^{(1)}(\cdot)$ 为第一类 n 阶 Hankel 函数; A_{1n}^k , B_{1n}^k , C_{1n}^k , D_{1n}^k , E_{1n}^k , F_{1n}^k , G_{1n}^k 和 H_{1n}^k 为待定系数。

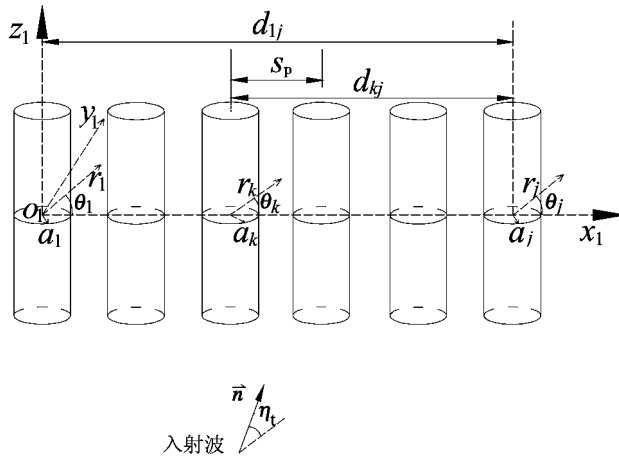


图 1 弹性波斜入射到排桩时坐标参照系统

Fig 1 Reference coordinate system for incident elastic wave arriving at a row of pile

假设弹性桩内, 部分入射波受桩体表面折射并在桩体里面形成一道驻波, 第 j 根桩内的折射波可以表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi^{(j)} = \exp(i\gamma z) \sum_{n=0}^{\infty} J_n(p_{21} r_j) (A_{2n}^j \cos n\theta_j + B_{2n}^j \sin n\theta_j), \\ \Phi_{t1}^{(j)} = \exp(i\gamma z) \sum_{n=0}^{\infty} J_n(p_{23} r_j) (C_{2n}^j \sin n\theta_j + D_{2n}^j \cos n\theta_j), \\ \Phi_{t2}^{(j)} = \exp(i\gamma z) \sum_{n=0}^{\infty} J_n(p_{23} r_j) (E_{2n}^j \cos n\theta_j + F_{2n}^j \sin n\theta_j). \end{array} \right. \quad (8)$$

式中, $p_2 = \sqrt{\gamma_1'^2 - \gamma^2}$, $p_{23} = \sqrt{\gamma_i'^2 - \gamma^2}$, γ_1' , γ_i' 分别为桩体内纵波和剪切波波数; A_{2n}^j , B_{2n}^j , C_{2n}^j , D_{2n}^j , E_{2n}^j 和 F_{2n}^j 为待定系数。

饱和土体土骨架中第 j 根桩附近的总波场可以表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi = \sum_{k=1}^N \Phi_f^k + \sum_{k=1}^N \Phi_s^k \\ \Phi_{t1} = \Phi_{t1}^{(inc)} + \sum_{k=1}^N \Phi_{t1}^k, \\ \Phi_{t2} = \Phi_{t2}^{(inc)} + \sum_{k=1}^N \Phi_{t2}^k. \end{array} \right. \quad (9)$$

在 k 系统中, 如果 $j \neq k$, 根据 Graf 加法定理, 方程 (7) 中级数的每一项应表示成局部坐标系 (r_p, θ_p, z) 的形式:

$$\text{当 } j > k \text{ 时: } H_n^{(1)}(p_g r_k) \begin{cases} \cos n \theta_k \\ \sin n \theta_k \end{cases} = \frac{1}{2} \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m \varepsilon_m J_n(p_g r_j) \begin{cases} K_m^n(p_g d_{kj}) \cos n \theta_j \\ L_m^n(p_g d_{kj}) \sin n \theta_j \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{当 } j < k \text{ 时: } H_n^{(1)}(p_g r_k) \begin{cases} \cos n \theta_k \\ \sin n \theta_k \end{cases} = \frac{1}{2} (-1)^n \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m J_n(p_g r_j) \begin{cases} K_m^n(p_g d_{kj}) \cos n \theta_j \\ L_m^n(p_g d_{kj}) \sin n \theta_j \end{cases} \quad (11)$$

式中, 要求 $r_j \leq d_{kj}$; $g = 1, 2, 3$;

$$K_m^n(p_g d_{kj}) = H_{m+n}^{(1)}(p_g d_{kj}) + (-1)^n H_{m-n}^{(1)}(p_g d_{kj}) \quad (12)$$

$$L_m^n(p_g d_{kj}) = -H_{m+n}^{(1)}(p_g d_{kj}) + (-1)^n H_{m-n}^{(1)}(p_g d_{kj}) \quad (13)$$

饱和土体中圆柱坐标系下势函数与位移、应力的关系为

$$u_r = \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi_{r1}}{\partial \theta} + \frac{1}{\gamma_t} \frac{\partial^2 \phi_{r2}}{\partial r \partial z} \quad (14)$$

$$u_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} - \frac{\partial \phi_{r1}}{\partial r} + \frac{1}{\gamma_{tr}} \frac{\partial^2 \phi_{r2}}{\partial \theta \partial z} \quad (15)$$

$$u_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z} - \frac{1}{\gamma_t} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial \phi_{r2}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi_{r2}}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi_{r2}}{\partial \theta^2} \right] \quad (16)$$

$$w_r = \frac{\partial \chi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Theta_{r1}}{\partial \theta} + \frac{1}{\gamma_t} \frac{\partial^2 \Theta_{r2}}{\partial r \partial z} \quad (17)$$

$$\sigma_{rr} = \lambda_t \gamma^2 \varphi + \alpha M \gamma^2 \chi + 2\mu \left[\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \phi_{r1}}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\gamma_t} \frac{\partial^3 \phi_{r2}}{\partial r^2 \partial z} \right] \quad (18)$$

$$\sigma_{r\theta} = 2\mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r \partial \theta} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \right] + \mu \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi_{r1}}{\partial \theta^2} - r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \phi_{r1}}{\partial r} \right) \right] - \frac{2\mu}{\gamma_t} \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi_{r2}}{\partial \theta \partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial^3 \phi_{r2}}{\partial r \partial \theta \partial z} \right] \quad (19)$$

$$\sigma_{rz} = \mu \left[2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r \partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \phi_{r1}}{\partial \theta \partial z} + \frac{1}{\gamma_t} \left[2 \frac{\partial^3 \phi_{r2}}{\partial r \partial z^2} - \frac{\partial}{\partial r} \gamma^2 \phi_{r2} \right] \right] \quad (20)$$

式中, $\gamma^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$; ξ_s 为饱和土中液相与固相势函数的比值, 下标 $g = 1, 2, 3$ 分别表示 P_1 波、 P_{II} 波和 S 波, 具体计算方法参见文献 [9]; $\varphi = \varphi_1 + \varphi_s$, $\chi = \xi_1 \varphi_1 + \xi_2 \varphi_s$, $\Theta_{r1} = \xi_3 \phi_{r1}$, $\Theta_{r2} = \xi_3 \phi_{r2}$; γ_t 为使 ϕ_{r2} 和 φ 、 ϕ_{r1} 有同样量纲的归一化因子^[10]。

假定每根桩和周围饱和土体在界面处完全联结, 桩界面处不透水, 则 $r_j = a_j$ 处边界条件可描述为

$$u_{1r} = u_{2r}, u_{1\theta} = u_{2\theta}, u_{1z} = u_{2z}, w_{1r} = 0 \quad (21)$$

$$\sigma_{1rr} = \sigma_{2rr}, \sigma_{1r\theta} = \sigma_{2\theta}, \sigma_{1rz} = \sigma_{2rz} \quad (22)$$

式中, $0 \leq \theta_j \leq 2\pi$, ($j = 1, 2, \dots, N$); 下标 1 代表饱和土体, 下标 2 代表弹性桩。

利用式 (9) 和式 (10)、(11), 得桩土界面处波场, 将其代入式 (14) ~ (20), 得桩土界面处饱和土的位移和应力; 再利用边界条件式 (21) 和 (22), 根据不同阶三角函数 $\cos n \theta$ 和 $\sin n \theta$ 线性无关的性质, 可得一组关于待定系数 $A_{1m}^j \sim F_{2n}^j$ 的无穷维线性方程组, 适当截取即可求出饱和土体中散射波场和总波场, 进而可以求得饱和土中任意点的位移和应力。

需要指出的是, 当平面 S 波倾斜入射时, 如果入射角大于临界角, 则反射的 P_1 和 P_{II} 波是消散波, 离开柱面后会快速衰减。

3 算例与分析

假定桩为无限长, 所有桩的材料参数都一致, 泊松比 ν_2 , 桩的半径为 a , 相邻两根桩的间距为 s_p , 整体屏障长度为 L 。设有振幅为 ϕ_0 的稳态平面 S 波垂直入射到排桩上, φ_t 为 Q , θ_0 为 $\frac{\pi}{2}$ 。为数值计算方便, 将所有的变量进行无量纲化:

$$\rho_t^* = \frac{\rho_t}{\rho}, m^* = \frac{h}{\rho}, \lambda^* = \frac{\lambda}{\mu}, M^* = \frac{M}{\mu}, b^* = \frac{\eta d}{k_s \sqrt{\rho \mu}}, \omega^* = \frac{\omega d}{C_s} \quad (23)$$

$$\bar{\rho}_2 = \frac{\rho_2}{\rho} E_p^* = \frac{E_p}{E_s} \tag{24}$$

式中, $d = 2a$, 为桩的直径; C_s 为土中平面 S波波速; E_p 和 E_s 分别为桩和土的弹性模量; 其它参数意义同上。

饱和土体 Bit参数取自文献 [9], 无量纲化后列于表 1, 桩的无量纲质量密度 $\bar{\rho}_2 = 1.13$, 泊松比 $\nu_2 = 0.2$ 。同时指出, 如果令参数 M^* , $\bar{\rho}_1$, m^* , b^* 和 α 为 0 那么饱和土体就退化为一般的单相弹性土介质。

表 1 饱和土体的无量纲参数

Table 1 Dimensionless parameters used in calculation

α	λ^*	M^*	$\bar{\rho}_1$	m^*	b^*
1.00	1.004	246.78	0.45	1.68	50

定义竖向归一化位移幅值 $|u_z/u_0|$ 为排桩后土体的 z 向 (竖向) 位移与入射平面 S波引起的 z 向 (竖向) 位移的比值。

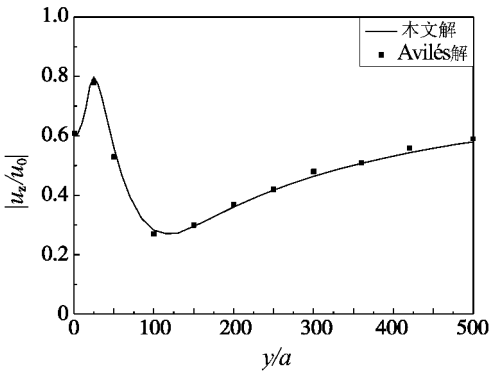


图 2 本文计算结果和 Avilés [4] 结果的比较

Fig 2 Comparison between present solutions and those of Avilés [4]

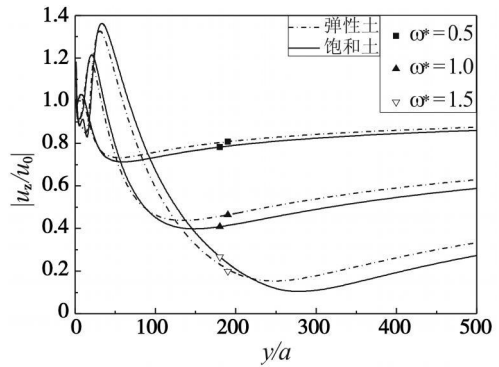


图 3 不同频率下饱和土和弹性土竖向归一化位移幅值 $|u_z/u_0|$ 随 y/a 变化曲线比较 ($N = 8$, $p/a = 3$, $E_p/E_s = 100$, $x/a = 10.5$)

Fig 3 Change of normalized vertical displacement amplitude $|u_z/u_0|$ of saturated soil and elastic soil under different wave frequencies with y/a

3.1 单排弹性桩减小土体竖向位移振幅的验证

为验证本文的准确性, 将本文退化到弹性土体中竖向偏振 SV 波垂直入射到排桩情况, 参数取自文献 [4], 得 SV 波垂直入射到排桩时土体竖向归一化位移幅值 $|u_z/u_0|$ 随 y/a 变化曲线 (见图 2), 可以看出, 所得结果和文献 [4] 的结果基本一致。

3.2 饱和土中排桩减小土体竖向位移振幅分析

图 3 为不同频率下排桩后饱和土和弹性土竖向归一化位移幅值 $|u_z/u_0|$ 随 y/a 变化曲线的比较。从图中可明显看出, 弹性土中, 随着无量纲频率的提高, 排桩后一定距离处, $|u_z/u_0|$ 的最小值在减小, 即隔离效果越来越好; 饱和土中随着无量纲频率的提高, 竖向归一化位移幅值的最小值也呈减小趋势。当无量纲频率 $\omega^* = 0.5$ 时, 排桩后弹性土和饱和土中归一化位移幅值 $|u_z/u_0|$ 较为接近, 两者之间竖向归一化位移幅值最小值差异只有 3% 左右; 而当无量纲频率增大到 $\omega^* = 1.5$ 时, 两者之间竖向归一化位移幅值最小值差异在增大, 弹性土中排桩的最佳隔离效果比饱和土中低 8%。

图 4 和图 5 分别为不同桩土弹性模量比下排桩后饱和土体竖向归一化位移幅值 $|u_z/u_0|$ 随 y/a 和 x/a 变化曲线。从图 4 中可以看出, 随着桩土弹性模量比的提高, 排桩后饱和土体竖向归一化位移幅值 $|u_z/u_0|$ 的最小值在减小, 即排桩的隔离效果越好; 但当 E_p/E_s 大于 100 时, 竖向归一化位移幅值 $|u_z/u_0|$ 减小的趋势有所缓慢。从图 5 中可以看出, 排桩中心处 ($x/a = 10.5$) 竖向归一化位移幅值 $|u_z/u_0|$ 明显小于排桩边缘处 (x/a

= 0), 即排桩中心处的隔离效果好于排桩边缘处。

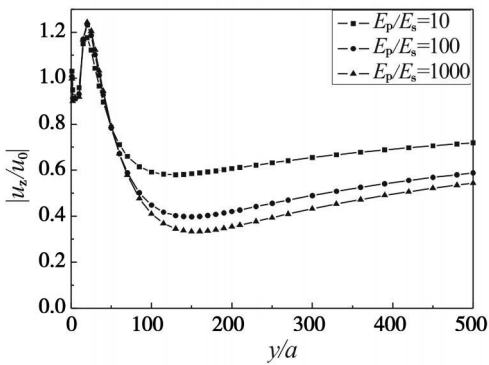


图 4 不同桩土弹性模量比下饱和土竖向归一化位移幅值 $|u_z/u_0|$ 随 y/a 变化曲线

($\omega^* = 1.0$ $N = 8$ $s_p/a = 3$ $x/a = 10.5$)

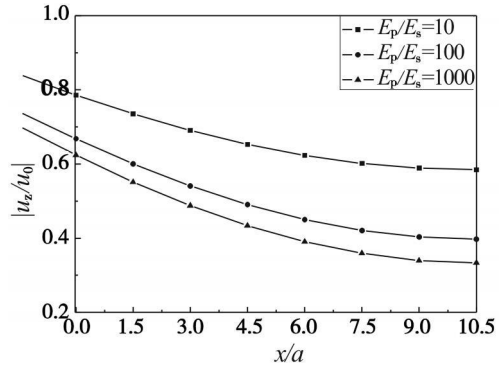


图 5 不同桩土弹性模量比下饱和土竖向归一化位移幅值 $|u_z/u_0|$ 随 x/a 变化曲线

($\omega^* = 1.0$ $N = 8$ $s_p/a = 3$ $y/a = 150$)

Fig 4 Change of normalized vertical displacement amplitude $|u_z/u_0|$ of saturated soil for different pile-soil modulus ratios with y/a ($\omega^* = 1.0$ $N = 8$ $s_p/a = 3$ $x/a = 10.5$)

Fig 5 Change of normalized vertical displacement amplitude $|u_z/u_0|$ of saturated soil for different pile-soil modulus ratios with x/a ($\omega^* = 1.0$ $N = 8$ $s_p/a = 3$ and $y/a = 150$)

图 6 为不同桩土模量比下排桩后饱和土竖向归一化位移幅值等值线图。从图中可以看出, 排桩屏障中心的隔离效果明显好于排桩边缘处。在排桩屏障中心, 最佳隔离区域并不是在紧靠排桩处, 而是出现在远离排桩一定距离处, 在这个距离之后竖向归一化位移幅值又逐渐趋于一稳定值。在桩土弹性模量比较小 ($\frac{E_p}{E_s} = 10$) 时, 排桩后最佳隔离区域也较小, 而且该区域的竖向归一化位移幅值较大 (位移幅值为 0.6); 而当桩土弹性模量比较大 ($\frac{E_p}{E_s} = 1000$) 时, 排桩后最佳隔离区域明显增大, 且该区域的竖向归一化位移幅值较小 (位移幅值为 0.4), 隔离效果明显提高。

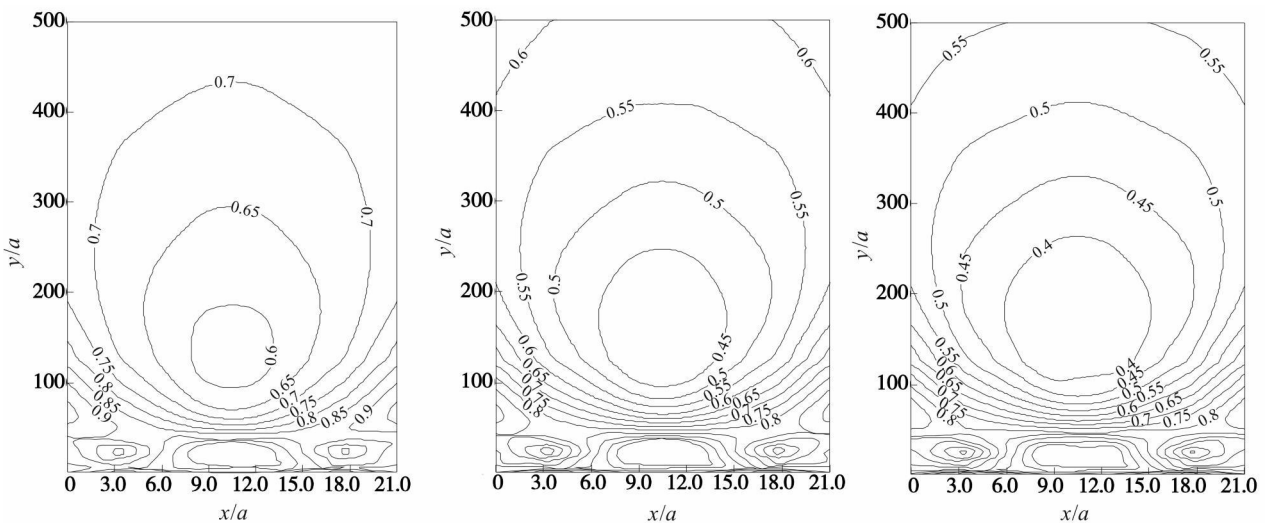


图 6 不同桩土模量比下排桩后饱和土竖向归一化位移幅值等值线图 ($\omega^* = 1.0$ $N = 8$ $s_p/a = 3$)

Fig 6 Contours of normalized vertical displacement amplitude $|u_z/u_0|$ of saturated soil behind a row of pile for different pile-soil modulus ratios

($\omega^* = 1.0$ $N = 8$ and $s_p/a = 3$)

4 结论

本文对排桩减小饱和土体竖向位移振幅进行了研究, 数值计算结果表明:

(1) 饱和土中排桩对弹性波的竖向位移隔离有一定的频率范围, 入射波频率越小, 隔离效果越差; 入射波频率越大, 散射波和入射波的相互干涉作用越强烈, 排桩的隔离效果越好。

(2) 随着桩土弹性模量比的提高, 饱和土中排桩的隔离效果越好; 在排桩屏障后, 最佳隔离区域并不是出现在紧靠排桩处, 而是在远离排桩一定距离处。

(3) 饱和土和弹性土中排桩对弹性波的竖向位移隔离比较说明: 在频率较低时, 两者之间隔离效果较为接近, 在频率较高时, 饱和土中排桩的竖向位移隔离效果与弹性土中的差别有所增大。

参考文献:

- [1] Woods R D, Bamez N E, Sangesser R Holography. A new tool for soil dynamics [J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1974, 100: 1231-1247.
- [2] Liao S, Sangrey D A. Use of piles as isolation barriers [J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1978, 104(9): 1139-1152.
- [3] Avilés J S, Sánchez-Sesma F J. Piles as barriers for elastic waves [J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1983, 109(9): 1133-1146.
- [4] Avilés J S, Sánchez-Sesma F J. Foundation isolation from vibration using piles as barriers [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1988, 114(11): 1854-1870.
- [5] 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.
- [6] Gao G Y, Li Z Y, Qin C H, et al. Three-dimensional analysis of rows of piles as passive barriers for ground vibration isolation [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 26(11): 1015-1027.
- [7] Tsai H 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 (In Press, Available online 31 July 2007).
- [8] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low frequency range [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(2): 168-178.
- [9] 吴世明. 土介质中的波 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [10] Huang W, Wang Y J, Rokhlin S I. Obliquely scattering of an elastic wave from a multilayered cylinder in a solid. Transfer matrix approach [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1996, 99(5): 2742-2754.