

DOI: 10.11779/CJGE201806012

平面波入射下深水地基场地动力响应分析

张 奎, 李伟华*, 赵成刚

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要:建立了深水地基场地分析模型, 基于单相弹性介质、Biot 流体饱和多孔介质和理想流体弹性波动理论, 分别推导了平面 P 波或 SV 波入射时该深水地基场地波动问题的解析解, 并得到水下地层表面位移的表达式, 分析了土的刚度、饱和度及入射角等因素变化时水深对场地位移响应的影响。结果表明: 水深对水平位移峰值的影响较小, 而共振频率随着水深的增加而增大; 竖向位移峰值和共振频率并不随水深的增加而单调增加; 同一水深下, 饱和土层的刚度越小, 水平及竖向位移峰值越大, 共振频率越小; 与完全饱和相比, 土层饱和度的微小变化会使竖向位移峰值显著增大, 共振频率减小, 但水平位移峰值和共振频率基本上不受饱和度的影响; 在基本频率下, 当 P 波作用时, 水深对水平位移的影响随着入射角增加先增加后减小, 有水时在不同入射角下水深对竖向位移的影响较小; 当 SV 波入射和有水条件下, 对于不同的入射角水平位移均随着水深的增加而减小, 在入射角 35° 到 45° 范围内竖向位移随着水深的增加而减小, 除此范围外水深对竖向位移的影响较小。

关键词:深水地基场地; 饱和多孔介质; P 波; SV 波; 位移响应

中图分类号: TU312 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)06-1066-09

作者简介: 张 奎(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土地震工程方面的研究。E-mail: zhangkui@bjtu.edu.cn。

Dynamic responses of an underwater site subjected to plane P- or SV-wave incidence

ZHANG Kui, LI Wei-hua, ZHAO Cheng-gang

(School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The displacement responses of an underwater site due to plane P- or SV-wave incidence are studied. The site consists of a water layer and a saturated soil deposit overlying bedrock. Based on the wave propagation theory in single-phase elastic medium, fluid saturated porous medium and ideal fluid, the displacement formula at the interface between water and soil is developed. The effect of water depth on the displacement response is explored by a numerical example in the case of different stiffnesses and saturation degrees of the soil deposit and incident angle of plane waves. The results show that the peak value of horizontal displacement has little change with water depth. However, the resonance frequency increases with water depth. The peak value and resonance frequency of vertical displacement do not increase with water depth monotonically. For the horizontal and vertical displacements, the peak value increases and the resonance frequency decreases with the soil stiffness at the same water depth. Compared with the full saturation, a slight decrease in the saturation can obviously amplify the peak value and decrease the resonant frequency of vertical displacement. The peak value and resonance frequency of horizontal displacement are hardly affected by soil saturation. At the fundamental frequency of the site, under incident plane P-waves, the horizontal displacement increases firstly and then decreases with the increase of incident angle in the presence of water layer, and the water depth has little effect on the vertical displacement with different incident angles. In the presence of SV-wave incidence and water layer, the horizontal displacement decreases with the increase of water depth with different incident angles, and the vertical displacement decreases with the increase of water depth within the range of the incident angle of 35° to 45°, however, the water depth has little effect on the vertical displacement beyond the range.

Key words: underwater site; fluid saturated porous medium; P-wave; SV-wave; displacement response

0 引言

近年来, 水下隧道已经凭借着自身的诸多优势在世界各地得到了广泛的应用^[1]。水下隧道与普通地下

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 项目
(2015CB0578000); 国家自然科学基金项目 (51378058); 中央高校
基本科研业务费专项项目 (2015JBZ008)

收稿日期: 2017-03-27

*通讯作者 (E-mail: whli@bjtu.edu.cn)

隧道的主要区别在于上覆于土层的水体对整体系统的影响, 然而迄今有关深水地基场地动力响应问题的理论研究还很匮乏, 且当前研究主要是将多相的天然土体简化为理想的单相介质^[2-5], 但水下地层多为饱和土层, 忽视了岩土体固有的多相耦合特性, 将难以描述特殊水文地质环境下动力响应的时空特性, 实际上采用 Biot 流体饱和多孔介质波动理论^[6]更为合理。

Stoll 等^[7]研究了渗透系数、入射角等因素对水层和饱和土层交界处反射与透射系数的影响规律。Yang^[8-10]分别建立了 P 波或 SV 波作用下饱和多孔介质与单相介质交界处位移的表达式, 得到了饱和度、入射角及频率对位移幅值的影响规律。Li 等^[11]将海水层的动力刚度矩阵引入到地基场地总的刚度矩阵中, 分析了平面波作用下海水对土层水平和竖向峰值加速度的影响。Wang 等^[12-13]分别建立了 P 波和 SV 波作用下深水地基场地波动问题的解, 考虑了饱和多孔介质的饱和度、渗透系数和入射角对动水压力的影响。纵观上述研究, 目前基于 Biot 理论研究水深对场地的影响, 主要集中在土层自身的性质对动力响应的影响, 而结合土层参数和入射波的性质来考虑水深对水土交界面位移影响规律的研究还有待进一步深入。

本文建立了深水地基场地分析模型, 基于单相弹性介质、流体饱和多孔介质和理想流体弹性波动理论, 推导了平面P波和SV波入射下, 深水地基场地波动问题的解析解, 并给出水下地层表面位移表达式, 通过数值算例重点分析了土层刚度、饱和度及入射角变化时水深对位移响应的影响规律, 得到了一些初步结论。

1 深水地基场地分析模型

1.1 分析模型的建立

分析模型如图 1 所示, 基岩上覆盖一定厚度的土层和水层。假定基岩为不透水的单相弹性介质, 土层为水饱和多孔介质, 水层为理想可压缩流体。水层深度为 h_1 , 饱和土层厚度为 h_2 。符号 w, s, f 和 b 分别代表水层、饱和土层固相、液相和基岩。在水层、饱和土层及基岩表面处分别设如图 1 所示的坐标系。

1.2 基岩的波动方程

根据文献[14], 基岩的波动方程:

$$(\lambda_b + \mu_b) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u}_b + \mu_b \nabla^2 \mathbf{u}_b = \rho_b \ddot{\mathbf{u}}_b , \quad (1)$$

式中, ∇ 为梯度算子, ∇^2 为Laplace算子, λ_b , μ_b 为基岩的Lame常数, ρ_b 为基岩密度, \mathbf{u}_b 和 $\ddot{\mathbf{u}}_b$ 分别表示基岩的位移和加速度矢量。

基岩应力 σ_{mn}^b 与应变 ε_{mn}^b 、体应变 ε_v^b 的关系为

$$\sigma_{mn}^b = 2\mu_b \varepsilon_{mn}^b + \lambda_b \varepsilon_v^b \delta_{mn} \quad (m, n = x, y) . \quad (2)$$

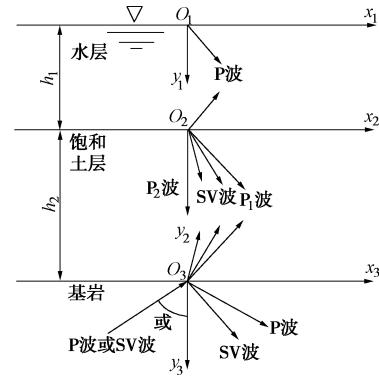


图 1 深水地基场地模型

Fig. 1 Model of underwater site

1.3 饱和土层的波动方程

Biot^[6]给出了流体饱和多孔介质的波动方程:

$$\begin{aligned} NV^2 \mathbf{u}^s + \nabla [(A + N) \mathbf{e} + Q \boldsymbol{\varepsilon}] \\ = (\rho_{11} \ddot{\mathbf{u}}^s + \rho_{12} \ddot{\mathbf{u}}^f) + b (\dot{\mathbf{u}}^s - \dot{\mathbf{u}}^f) , \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\nabla [Q \mathbf{e} + R \boldsymbol{\varepsilon}] = (\rho_{12} \ddot{\mathbf{u}}^s + \rho_{22} \ddot{\mathbf{u}}^f) - b (\dot{\mathbf{u}}^s - \dot{\mathbf{u}}^f) . \quad (3b)$$

式中 $\mathbf{e} = \operatorname{div} \mathbf{u}^s$, $\boldsymbol{\varepsilon} = \operatorname{div} \mathbf{u}^f$, \mathbf{u}^s 和 \mathbf{u}^f 分别为固相和液相位移矢量; $\rho_{11} = (1-n)\rho_s + \rho_a$, $\rho_{12} = n\rho_f + \rho_a$ 及 $\rho_{22} = -\rho_a$, 其中 ρ_s , ρ_f 及 ρ_a 分别为固相密度、液相密度、附加视质量; $b = \rho_f g n^2 / k$, 其中 g 为重力加速度, n 为孔隙度, k 为渗透系数。当固体颗粒不可压缩时,

A , N , R , Q 表达式如下:

$$N = \mu_s , \quad (4a)$$

$$A = \lambda_s + Q^2 / R , \quad (4b)$$

$$R = n K_w , \quad (4c)$$

$$Q = (1-n)K_w . \quad (4d)$$

式中 λ_s , μ_s 为干土状态下土的 Lame 常数; $1/K_w = 1/K_f + (1-S_f)/p_a$, 其中 K_w 为孔隙流体的体积模量, K_f 为水的体积模量, S_f 为土的饱和度, p_a 为孔隙流体的绝对压力。

饱和土固相应力 σ_{mn}^s , 液相应力 σ^f 与固相应变 ε_{mn}^s 的关系分别如下:

$$\sigma_{mn}^s = 2N\varepsilon_{mn}^s + \delta_{mn}(A\mathbf{e} + Q\boldsymbol{\varepsilon}) , \quad (5a)$$

$$\sigma^f = Q\mathbf{e} + R\boldsymbol{\varepsilon} . \quad (5b)$$

1.4 水层的波动方程

采用文献[14]给出的理想可压缩流体波动方程:

$$K_f \nabla \nabla \cdot \mathbf{u}_w = \rho_w \ddot{\mathbf{u}}_w , \quad (6)$$

其中, ρ_w 为水的密度, \mathbf{u}_w 和 $\ddot{\mathbf{u}}_w$ 分别为水的位移和加速度矢量。

理想流体法向应力 σ_y^w 与体应变 ε_v^w 的关系为

$$\sigma_y^w = -K_f \varepsilon_v^w . \quad (7)$$

2 深水地基场地波场分析

根据Helmholtz定律^[14], 位移可写成如下形式:

$$u = \text{grad} \phi + \text{rot} \psi \quad , \quad (8)$$

式中, ϕ 为标量势函数, ψ 为矢量势函数。将式(8)分别代入式(1)、(3)、(6)中, 并假设平面波的解形式为简谐波, 可分别得到基岩、饱和土层和水层中标量势函数 ϕ 和矢量势函数 ψ 的表达式。

2.1 基岩中的波场

对于 $y_3 > 0$ 区域, 当 P 波入射时基岩中总标量势 ϕ_b :

$$\phi_b = \sum_{l=1}^2 A_b^l \exp[i(\omega t - k_x x_3 \pm k_{bpy} y_3)] \quad , \quad (9a)$$

式中, $l=1$ 和 2 分别表示上行和下行, 且上行时符号为“+”, 反之为“-”(下同)。 i 为虚数单位, ω 为入射频率。 A_b^1 和 A_b^2 为上行和下行 P 波的幅值。 k_x 为 x 方向的波数, $k_x = \omega \sin \theta / c_{bp}$, θ 为入射角, c_{bp} 为波速, $c_{bp} = \sqrt{(\lambda_b + 2\mu_b) / \rho_b}$; k_{bpy} 为 y 方向的波数且有关系式 $k_x^2 + k_{bpy}^2 = (\omega / c_{bp})^2$ 成立。

当 P 波入射时基岩中总矢量势 ψ_b :

$$\psi_b = B_b^2 \exp[i(\omega t - k_x x_3 - k_{bsy} y_3)] \quad . \quad (9b)$$

式中 B_b^2 为待求的下行 SV 波波幅系数; k_{bsy} 为 SV 波 y 方向的波数且满足关系式 $k_x^2 + k_{bsy}^2 = (\omega / c_{bs})^2$, c_{bs} 为反射 SV 波的波速, $c_{bs} = \sqrt{\mu_b / \rho_b}$ 。

当 SV 波入射时基岩中总矢量势 ψ_b :

$$\psi_b = \sum_{l=1}^2 B_b^l \exp[i(\omega t - k_x x_3 \pm k_{bsy} y_3)] \quad , \quad (10a)$$

式中, B_b^1 和 B_b^2 为上行 SV 波和下行 SV 波的幅值。 $k_x = \omega \sin \beta / c_{bs}$, β 为入射角。

当 SV 波入射时基岩中总标量势 ϕ_b :

$$\phi_b = A_b^2 \exp[i(\omega t - k_x x_3 - k_{bpy} y_3)] \quad , \quad (10b)$$

式中, A_b^2 为待求的下行 P 波波幅系数。

2.2 饱和土层中的波场

对于 $y_2 > 0$ 区域, 饱和土层标量势及矢量势函数表达式分别为

$$\phi_{sl}^1 = A_{sl}^1 \exp[i(\omega t - k_x x_2 \pm k_{ply} y_2)] \quad , \quad (11a)$$

$$\psi_{sl}^1 = B_{sl}^1 \exp[i(\omega t - k_x x_2 \pm k_{sy} y_2)] \quad , \quad (11b)$$

式中, A_{sl}^1 , A_{sl}^2 , A_{s2}^1 , A_{s2}^2 , B_{sl}^1 , B_{sl}^2 分别为待求的上、下行 P_1 , P_2 和 SV 波的波幅系数。 k_{ply} , k_{p2y} 和 k_{sy} 分别为 P_1 , P_2 和 SV 波 y 方向的波数且满足关系式 $k_x^2 + k_{ply}^2 = (\omega / c_{p1})^2$, $k_x^2 + k_{p2y}^2 = (\omega / c_{p2})^2$, $k_x^2 + k_{sy}^2 = (\omega / c_s)^2$; c_{p1} , c_{p2} 和 c_s 分别为 P_1 , P_2 和 SV 波的波速, 表达式详见文献[6]。

固相总的标量势函数和矢量势函数分别为

$$\phi_s = \sum_{g=1}^2 \sum_{l=1}^2 \phi_{sg}^l \quad , \quad (12a)$$

$$\psi_s = \sum_{l=1}^2 \psi_{sl}^l \quad . \quad (12b)$$

液相总的标量势函数和矢量势函数分别为

$$\phi_f = \xi_1 \sum_{l=1}^2 \phi_{s1}^l + \xi_2 \sum_{l=1}^2 \phi_{s2}^l \quad , \quad (13a)$$

$$\psi_f = \xi_3 \psi_s \quad , \quad (13b)$$

式中, ξ_1 , ξ_2 , ξ_3 分别为对应于 P_1 , P_2 和 SV 波的液相参与系数, 表达式详见文献[6]。

2.3 水层中的波场

对于 $y_1 > 0$ 区域, 水层中总标量势函数表示为

$$\phi_w = \sum_{l=1}^2 A_w^l \exp[i(\omega t - k_x x_1 \pm k_{wpy} y_1)] \quad . \quad (14)$$

式中 A_w^1 , A_w^2 分别为水层中待求的上、下行 P 波的波幅系数; k_{wpy} 为水层中 P 波 y 方向的波数且满足关系式 $k_x^2 + k_{wpy}^2 = (\omega / c_w)^2$, c_w 为水层中 P 波波速, $c_w = \sqrt{K_f / \rho_w}$ 。

3 边界条件及问题的解

3.1 水层自由表面

水层表面法向应力为零:

$$\sigma_y^w = 0 \quad . \quad (15)$$

3.2 水层和饱和土层交界面

(1) 水层和土层法向位移连续:

$$u_y^w = (1-n)u_y^s + nu_y^f \quad . \quad (16)$$

(2) 土骨架切应力为零:

$$\sigma_{xy}^s = 0 \quad . \quad (17)$$

(3) 水层和土层法向应力连续:

$$-\sigma_y^w = \sigma_y^s + \sigma^f \quad . \quad (18)$$

(4) 水层和土层液相法向应力成比例:

$$-n\sigma_y^w = \sigma^f \quad . \quad (19)$$

3.3 基岩与饱和土层交界面

(1) 基岩与固相切向位移连续:

$$u_x^b = u_x^s \quad . \quad (20)$$

(2) 基岩与固相和液相法向位移连续:

$$u_y^b = u_y^s = u_y^f \quad . \quad (21)$$

(3) 基岩与土骨架切应力连续:

$$\sigma_{xy}^b = \sigma_{xy}^s \quad . \quad (22)$$

(4) 基岩与土层法向总应力连续:

$$\sigma_y^b = \sigma_y^s + \sigma^f \quad . \quad (23)$$

3.4 问题的解

将式(8)~(14)及应力应变表达式(2)、(5)、(7)代入边界条件式(15)~(23), 可以得到待定波幅系数的表达式, 其矩阵形式为

$$AX = B \quad , \quad (24)$$

式中, $A = [a_{ij}]$ 为 10×10 的系数矩阵 (a_{ij} 具体表达式见附录)。 X 为 10×1 的待求波幅矩阵, 具体形式为

$$X = [A_b^2 \ B_b^2 \ A_{sl}^1 \ A_{sl}^2 \ A_{s2}^1 \ A_{s2}^2 \ B_s^1 \ B_s^2 \ A_w^1 \ A_w^2]^T \quad . \quad (25)$$

B为 10×1 的矩阵, 当P波入射时:

$$\mathbf{B} = A_b^1 [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 -a_{61} \ a_{71} \ 0 \ a_{91} -a_{10,1}]^T。 \quad (26a)$$

当SV波入射时:

$$\mathbf{B} = B_b^1 [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ a_{62} -a_{72} \ 0 -a_{92} \ a_{10,2}]^T。 \quad (26b)$$

求解式(24)便可得到深水地基场地波场的波幅系数矩阵 \mathbf{X} , 从而可以确定场地中各点动力响应的解析解, 如位移、应力、应变等可由关系式(5)、(8)求得。本文重点分析水土交界面处饱和土固相位移, 将式(12)代入式(8), 可以得到水土交界面处饱和土固相的水平和竖向位移(忽略上标s):

$$u_x = -ik_x A_{s1}^1 - ik_x A_{s1}^2 - ik_x A_{s2}^1 - ik_x A_{s2}^2 + ik_{sy} B_s^1 - ik_{sy} B_s^2, \quad (27)$$

$$u_y = ik_{p1y} A_{s1}^1 - ik_{p1y} A_{s1}^2 + ik_{p2y} A_{s2}^1 - ik_{p2y} A_{s2}^2 + ik_x B_s^1 + ik_x B_s^2。 \quad (28)$$

分析中, 考虑水土交界面处水平及竖向位移放大系数 u_x/u_0 和 u_y/u_0 , 其中 u_0 为入射波引起的位移, 如下所示:

当P波入射时:

$$u_0 = -i(\omega/c_{bp}) A_b^1。 \quad (29a)$$

当SV波入射时:

$$u_0 = i(\omega/c_{bs}) B_b^1。 \quad (29b)$$

引入无量纲频率 ω/ω_1 , 其中 ω_1 为深水地基场地的基本频率,

$$\omega_1 = \pi/(2h_2/c_s + 2h_1/c_w)。 \quad (30)$$

4 数值算例

4.1 验证分析

为验证本文方法的正确性, 分别选取文献[12, 13]的计算参数, 利用本文方法计算了P波和SV波入射时饱和土层中的孔压, 分别与文献[12, 13]中图3(a)的结果进行了验证。

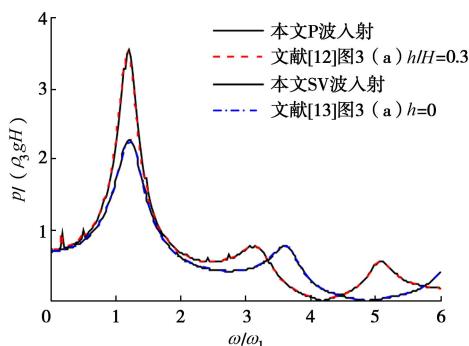


图2 对比结果

Fig. 2 Comparative results

对比结果如图2所示。从图中可以看到二者结果基本一致, 验证了本文方法的有效性。

4.2 计算参数

选取土层厚度 $h_2=100$ m, 水层深度 h_1 为 $0h_2$, $1h_2$, $2h_2$, $3h_2$ 。水的密度 $\rho_w=100$ kg/m³ 体积模量 $K_f=2.0$ GPa, 基岩密度 $\rho_b=2483$ kg/m³, 饱和土层孔隙度 $n=0.6$ 、固相密度 $\rho_s=2640$ kg/m³, 液相密度 $\rho_f=1000$ kg/m³, 附加质量 $\rho_a=0$ 。入射波幅值 A_b^1 或 B_b^1 等于1。其他的计算参数见表1。计算中考虑3组不同刚度的土层对场地位移响应的影响: 第1组土层较软($c_s=68.2$ m/s); 第2组土层中软($c_s=215.7$ m/s); 第3组土层中硬($c_s=373.0$ m/s)。

表1 土层和基岩的材料参数

Table 1 Material parameters of porous soil and bedrock

序号	λ_s /MPa	μ_s /MPa	k /(m·s ⁻¹)	S_r	λ_b /GPa	μ_b /GPa	c_s ($\omega/\omega_1=10$)
1	17.98	7.70					68.2
2	179.80	77.0	10^{-3}	1.0	15.3	7.65	215.7
3	537.60	230.4					373.0

4.3 P波作用下位移放大系数的影响

图3给出了当饱和土层采用表1中3组土性参数, P波分别以 $\theta=0^\circ$, 25° 入射到基岩, 不同水深 (h_1 为 $0h_2$, $1h_2$, $2h_2$, $3h_2$) 时水土交界面处水平和竖向位移随相对频率的变化曲线。从图中可以看出, 由于水层的存在, 深水地基场地的位移响应与无水场地有明显的区别, 而且水深的变化对位移的峰值和共振频率均有显著的影响。对于竖向位移, 以图3(a1)和3(a3)为例, 在计算的频率范围内, $2h_2$ 水深的位移峰值和共振频率最大, 其次是 $3h_2$ 水深, 最小的是 $1h_2$ 水深, 这说明深水场地的竖向位移峰值和共振频率并不随水深的增加而单调增加。从图3(a2)可以发现, 水深的变化对水平位移峰值影响较小, 而共振频率随着水深的增加呈增大的趋势。

为对比土层刚度对位移的影响, 图3(b1)、(b2)、(b3)、(c1)、(c2)、(c3) 分别给出了采用表1第2组和第3组参数的位移图。总结以上图形可以发现, 水深对位移的影响与土层的刚度有关, 饱和土层的刚度越小水层的影响越明显; 同一水深下, 饱和土层的刚度越小, 水平及竖向位移峰值越大, 共振频率越小。产生这种现象主要是由于饱和土层的刚度越小, 聚集地震波的能量越多, 水平及竖向位移峰值越大, 而且饱和土层刚度减小, 自振频率减小, 对应位移的敏感频率也相应地减小。

为研究饱和度对深水地基场地位移响应的影响, 图4给出了P波以 $\theta=25^\circ$ 斜入射到基岩, 土层采用表1中第3组土性参数(保证其他参数不变, 只改变土层饱和度 $S_r=0.99$, 0.97, 0.95), 水深分别为 $0h_2$, $1h_2$,

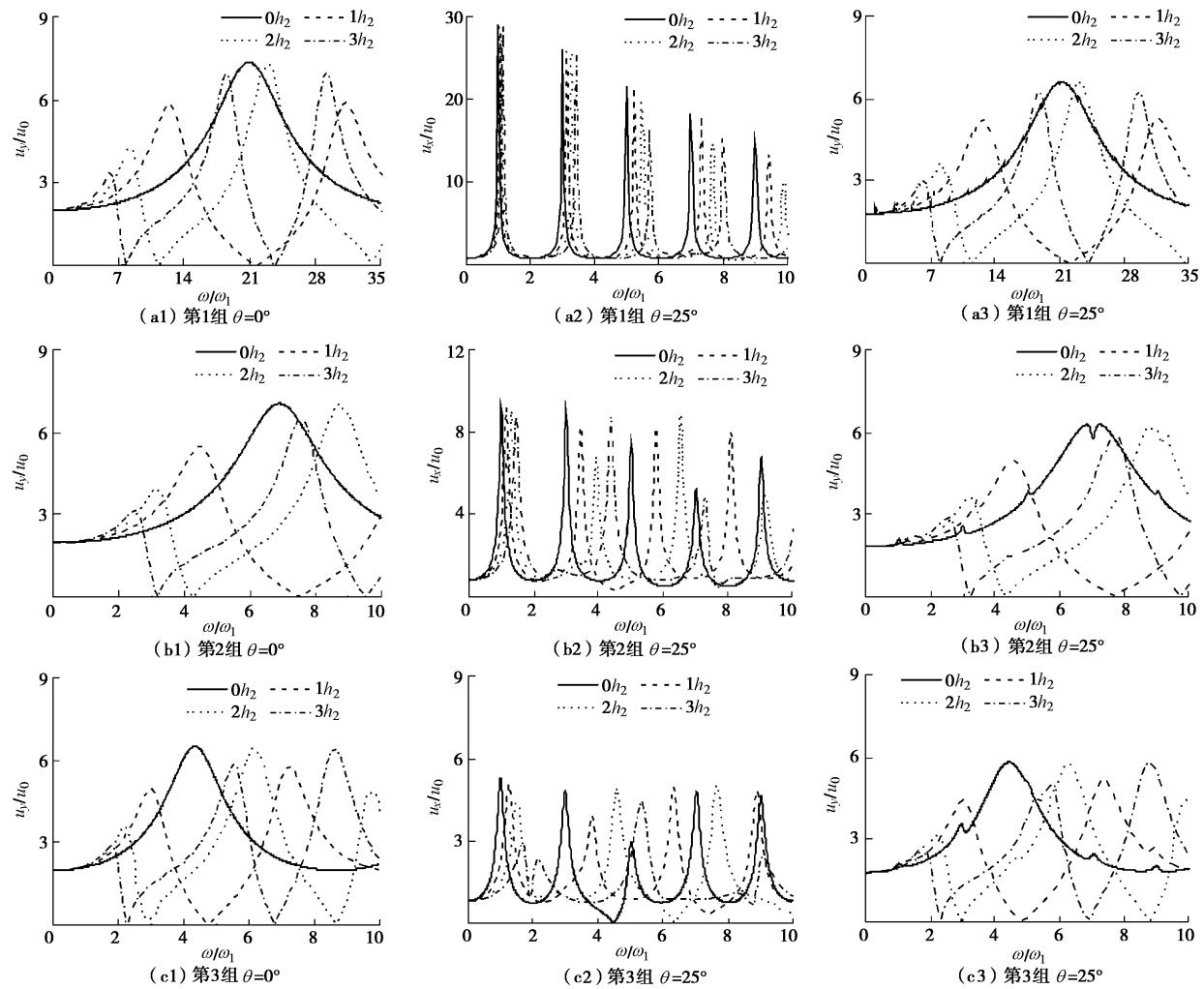


图 3 当 P 波以 $\theta=0^\circ$ 和 25° 入射时不同水深下 $y_2=0$ 处位移与相对频率的关系曲线

Fig. 3 Displacements at $y_2=0$ vs frequency with different water depths and P-wave incident angle θ of 0° and 25°

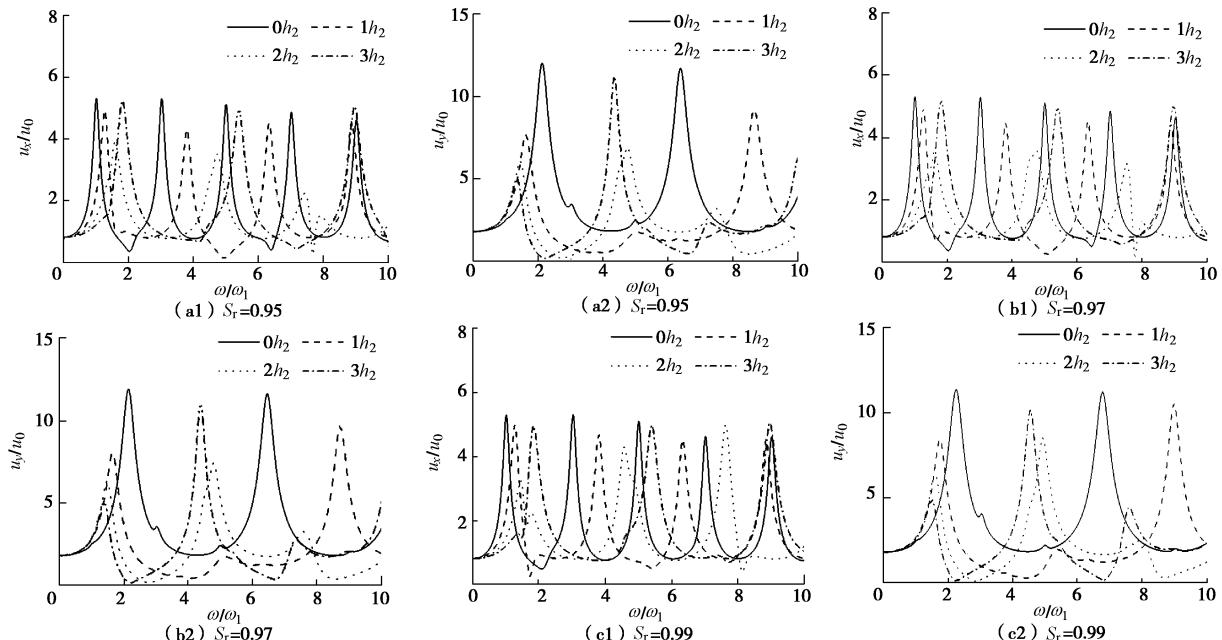


图 4 当 P 波以 $\theta=25^\circ$ 入射时不同饱和度和水深下 $y_2=0$ 处位移与频率的关系曲线 (第 3 组土性参数)

Fig. 4 Displacements at $y_2=0$ vs frequency with different saturations and water depths with P-wave incident angle θ of 25° for the 3rd group of parameters

$2h_2$ 和 $3h_2$ 条件下水土交界面处水平和竖向位移随相对频率的变化曲线。与完全饱和(如图 3(c2)、(c3)所示)相比, 可以看出, 饱和度的微小变化能显著地增大竖向位移峰值并减小共振频率, 但水平位移峰值和共振频率基本上不受饱和度的影响, 且水层对深水场地位移响应的影响也依赖于土层饱和度的变化。

图 5 给出了 P 波入射时, 土层采用表 1 中 3 组土性参数, 在水深分别为 $0h_2$, $1h_2$, $2h_2$, $3h_2$ 的 $\omega/\omega_1=1$ 下水土交界面处水平和竖向位移随入射角变化的分布曲线。从图中可以看出, 不同水深下, 水平位移均在垂直入射时的零值增大到入射角 60° 附近时的最大值, 最后再次减小到掠入射时的零值; 竖向位移在垂直入射时为最大值, 而后随着入射角的增大而减小至掠入射时的零值。从图中还可以看出, 水深对场地位移响应的影响与入射角显著相关, 水深对水平位移的影响随着入射角增加先增加后减小; 有水与无水时竖向位移与入射角的关系曲线不同, 有水时不同入射角下水深对竖向位移的影响较小。

掠入射时的零值。从图中还可以看出, 水深对场地位移响应的影响与入射角显著相关, 水深对水平位移的影响随着入射角增加先增加后减小; 有水与无水时竖向位移与入射角的关系曲线不同, 有水时不同入射角下水深对竖向位移的影响较小。

4.4 SV 波作用下位移放大系数的影响

图 6 给出了当饱和土层采用表 1 中 3 组土性参数, SV 波分别以 $\beta=0^\circ$, 25° 入射到基岩, 不同水深($h_1=0h_2$, $1h_2$, $2h_2$, $3h_2$)时水土交界面处水平和竖向位移随相对频率的变化曲线。以图 6(a1)、(a2) 为例, 在计算的频率范围内, 水深对水平位移峰值的影响较小, 但共振频率随着水深的增加而增加; 以图 6(a3)

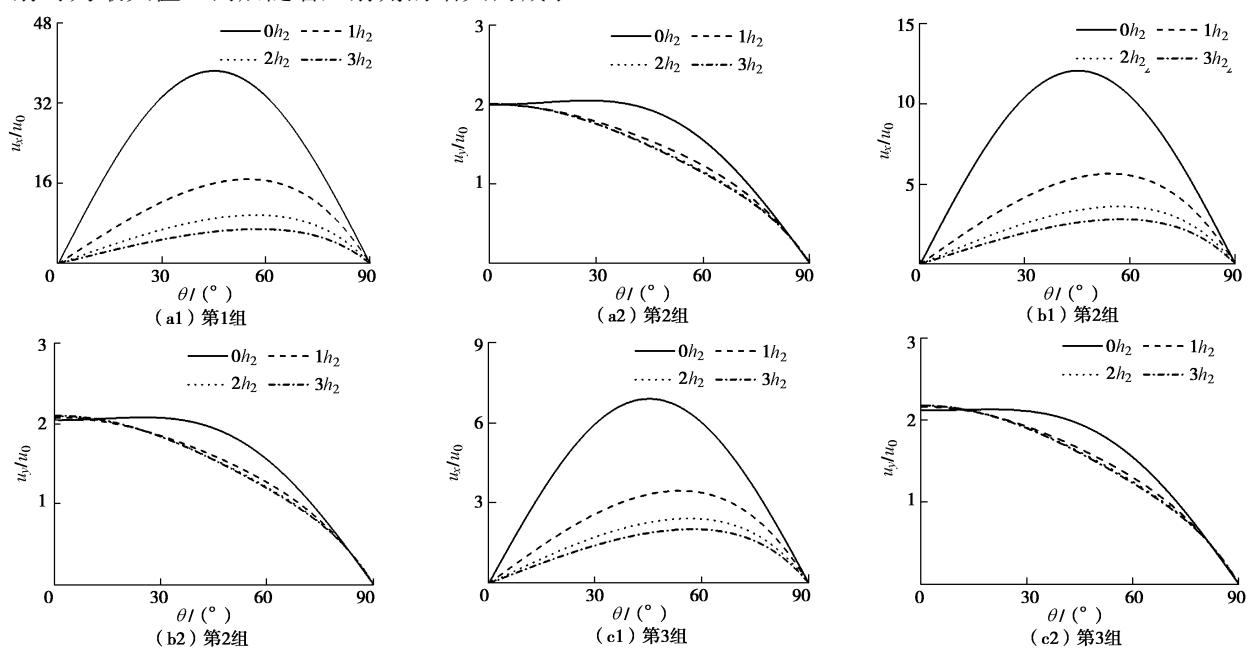
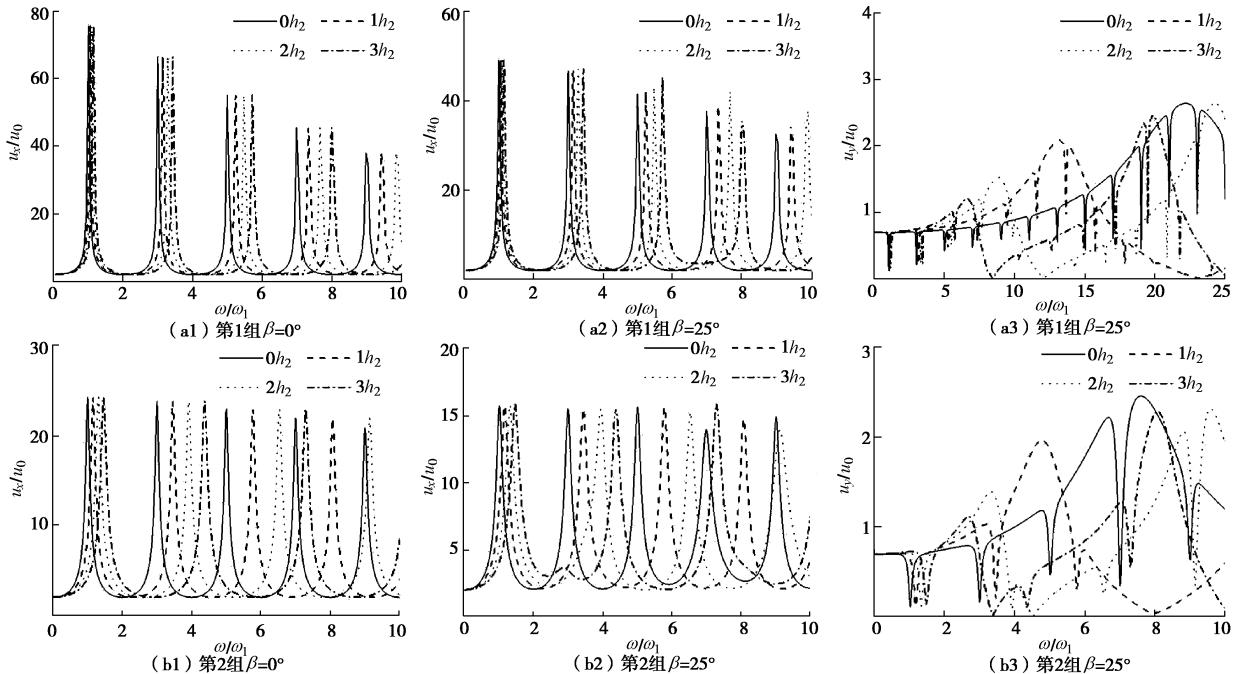


图 5 当 $\omega/\omega_1=1$ 和不同水深时 $y_2=0$ 处位移与 P 波入射角的关系曲线

Fig. 5 Displacements at $y_2=0$ vs P-wave incident angle with different water depths at $\omega/\omega_1=1$



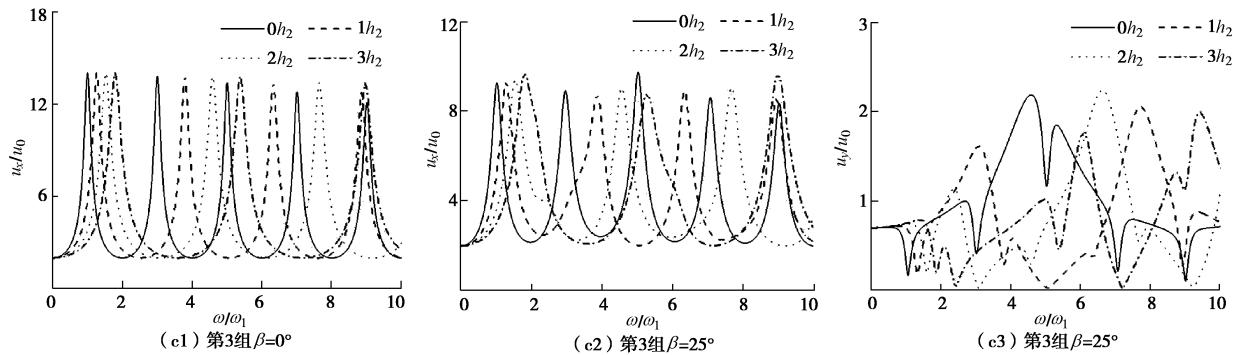


图 6 当 SV 波入射角 $\beta=0^\circ$ 和 25° 时不同水深下 $y_2=0$ 处位移与相对频率的关系曲线

Fig. 6 Displacements at $y_2=0$ vs frequency with different water depths and SV-wave incident angle β of 0° and 25°

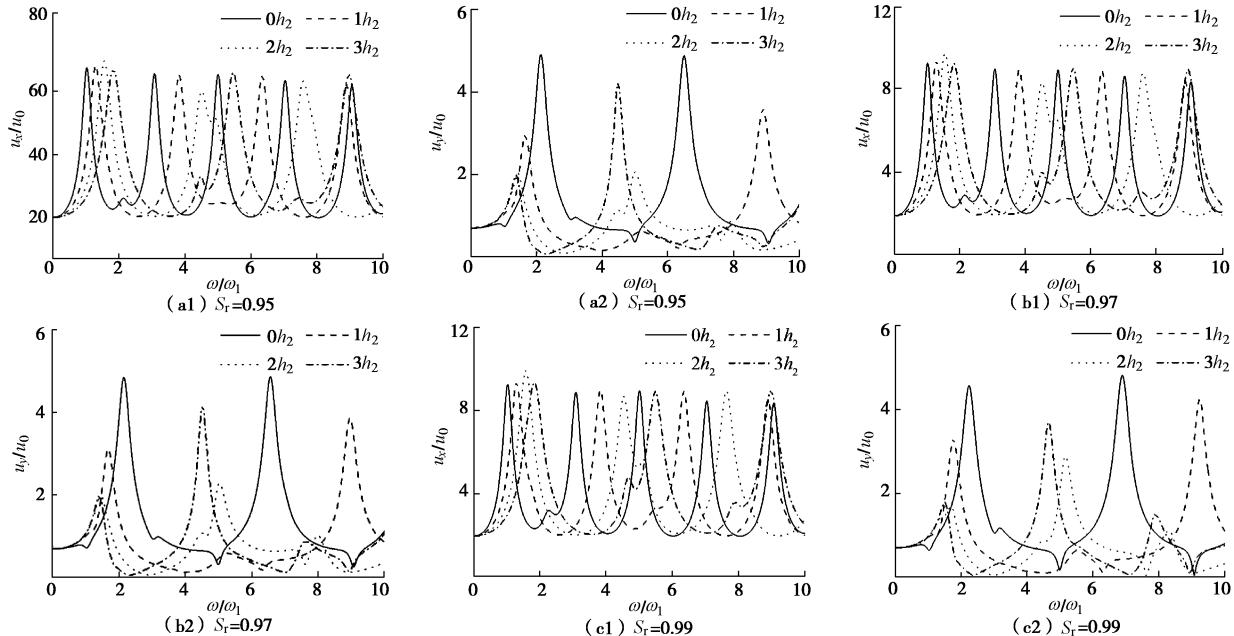


图 7 当 SV 波入射角 $\beta=25^\circ$ 时在不同饱和度和水深下 $y_2=0$ 处位移与频率的关系曲线 (第 3 组土性参数)

Fig. 7 Displacements at $y_2=0$ vs frequency with different saturations and water depths with SV-wave incident angle β of 25° for the 3rd group of parameters

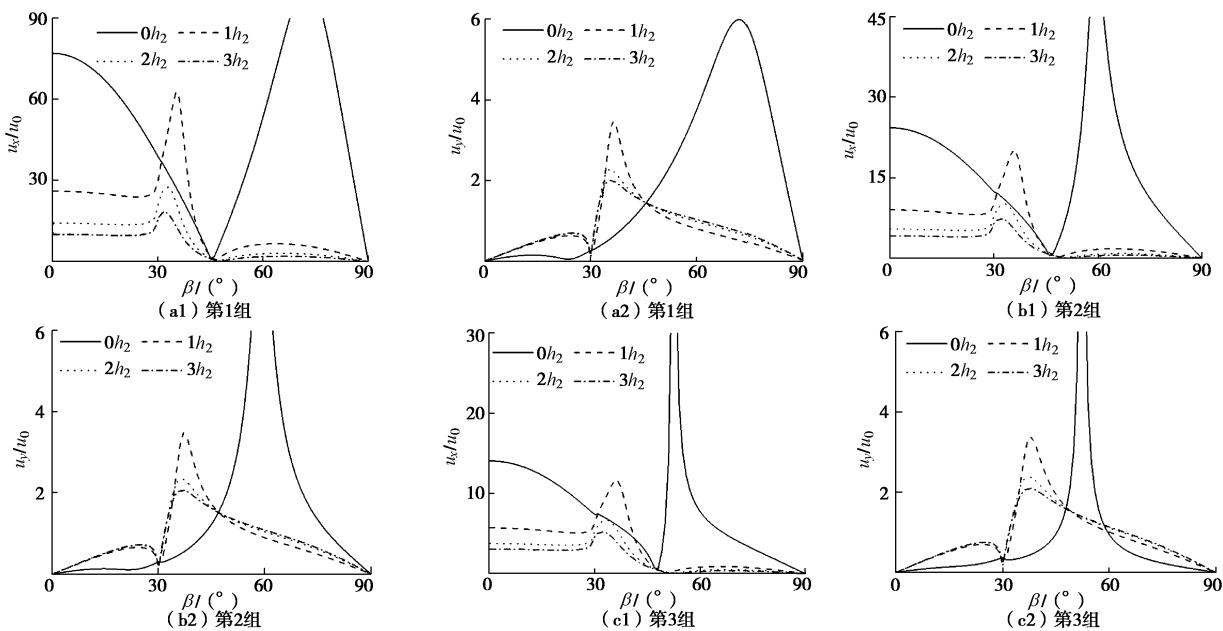


图 8 当 $\omega/\omega_1=1$ 和不同水深时 $y_2=0$ 处位移与 SV 波入射角的关系曲线

Fig. 8 Displacements at $y_2=0$ vs SV-wave incident angle with different water depths at $\omega/\omega_1=1$

为例, 坚向位移在 $2h_2$ 水深时位移峰值和共振频率最大, 其次是 $3h_2$ 水深, 而最小的是 $1h_2$ 水深, 这说明深水场地的坚向位移峰值和共振频率并不随水深的增加而单调增加。

为了对比土层的刚度对位移的影响, 图 6 (b1)、(b2)、(b3)、(c1)、(c2)、(c3) 分别给出了采用表 1 第 2 组和第 3 组参数的位移图。总结以上图形可以发现, 水深对位移的影响与土层的刚度有关, 同一水深下饱和土层的刚度越小, 水平及坚向位移峰值越大, 共振频率越小。

图 7 给出了 SV 波以 $\beta=25^\circ$ 斜入射到基岩, 土层采用表 1 中第 3 组土性参数 (保证其他参数不变, 只改变饱和度 S_f 为 0.99, 0.97, 0.95), 水深分别为 $0h_2$, $1h_2$, $2h_2$, $3h_2$ 条件下水土交界面处水平和坚向位移随相对频率的变化曲线。与完全饱和 (如图 6 (c2)、(c3) 所示) 相比, 可以看出, 饱和度的微小变化能显著地增大坚向位移峰值并减小共振频率, 但水平位移峰值和共振频率基本上不受饱和度的影响, 且水层对深水场地位移响应的影响也依赖于土层饱和度的变化。

图 8 给出了 SV 波入射时, 土层采用表 1 中 3 组土性参数, 在水深分别为 $0h_2$, $1h_2$, $2h_2$, $3h_2$ 的 $\alpha/\omega_l=1$ 下水土交界面处水平和坚向位移随入射角的变化曲线。从图中可以看到, 水深对深水地基场地位移的影响与入射角密切相关。有水时不同的入射角下, 水平位移均随着水深的增加而减小; 而在 β 为 $35^\circ \sim 45^\circ$ 范围内, 坚向位移随着水深的增加而减小, 除此范围外水深对坚向位移的影响较小。

5 结 论

本文基于单相弹性介质、流体饱和多孔介质和理想可压缩流体弹性波动理论, 推导了平面 P 或 SV 波入射下, 深水地基场地波动问题的解, 并给出水土交界面处位移的表达式, 通过数值算例, 进一步分析了土层的刚度、饱和度及入射角变化时水深对场地位移响应的影响规律, 得到了以下 4 点初步结论。

(1) 水深对水平位移峰值的影响较小, 而共振频率随着水深的增加而增大; 坚向位移峰值和共振频率并不随水深的增加而单调增加。

(2) 同一水深下饱和土层的刚度越小, 水平及坚向位移峰值越大, 共振频率越小。

(3) 与完全饱和相比, 土层饱和度的微小变化会使得坚向位移峰值显著增大, 共振频率减小, 但水平位移峰值和共振频率基本上不受饱和度的影响。

(4) 在基本频率下, 当 P 波入射时, 水深对水平位移的影响随着入射角增加先增加后减小, 有水时

在不同入射角下水深对坚向位移的影响较小; 当 SV 波入射时, 在有水条件下, 对于不同的入射角水平位移均随着水深的增加而减小, 在 $\beta=35^\circ$ 到 45° 范围内坚向位移随着水深的增加而减小, 除此范围外水深对坚向位移的影响较小。

本文重点关注水深变化对水土交界面处位移响应的影响, 限于篇幅, 对于应变、应力的研究将另文介绍。且受饱和多孔介质波动理论的限制, 本文仅在弹性范围内, 对深水地基场地位移响应进行了初步研究, 所得结论有一定局限性。

参 考 文 献:

- [1] 王梦恕. 水下交通隧道发展现状与技术难题——兼论“台湾海峡海底铁路隧道建设方案”[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2161 - 2172. (WANG Meng-shu. Current developments and technical issues of underwater traffic tunnel-discussion on construction scheme of Taiwan strait undersea railway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2161 - 2172. (in Chinese))
- [2] 王艳宁, 张兴业, 袁有为, 等. 沉管隧道有限元与等效质点抗震分析比较[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(5): 869 - 876. (WANG Yan-ning, ZHANG Xing-ye, YUAN You-wei, et al. Comparison of seismic analyses by finite element method and equivalent mass-spring method on immersed tube tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(5): 869 - 876. (in Chinese))
- [3] 陈贵红, 高 波, 赵玉光. 沉管隧道抗震研究[J]. 地震研究, 2006, 29(1): 60 - 64. (CHEN Gui-hong, GAO Bo, ZHAO Yu-guang. Earthquake-resistant research of immersed tunnels[J]. Journal of Seismological Research, 2006, 29(1): 60 - 64. (in Chinese))
- [4] 朱镜清, 周 建. 海底地震动估计的一个流体力学基础[J]. 地震工程与工程振动, 1991, 11(3): 87 - 93. (ZHU Jing-qing, ZHOU Jian. A fluid mechanics basis for estimating undersea ground motion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1991, 11(3): 87 - 93. (in Chinese))
- [5] 朱镜清, 李金成. 海水对海底地震动的影响问题[C]// 中国地震学会第四次学术大会论文摘要集. 北京, 1992. (ZHU Jing-qing, LI Jin-cheng. Problem of effects of seawater on undersea ground seismic motion[C]// Proc of China Seismological Society of the 4th Academic Conference. Beijing, 1992. (in Chinese))
- [6] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid I. low frequency range[J]. The

- Journal of the Acoustical Society of America, 1956, **28**(2): 168 - 178.
- [7] STOLL R D, KAN T K. Reflection of acoustic waves at a water-sediment interface[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1981, **69**(1): 149 - 156.
- [8] YANG J. Influence of water saturation on horizontal and vertical motion at porous soil interface induced by incident P wave[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, **19**(8): 575 - 581.
- [9] YANG J. Saturation effects on horizontal and vertical motions in a layered soil-bedrock system due to inclined SV waves[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2001, **21**(6): 527 - 536.
- [10] YANG J. Importance of flow condition on seismic waves at a saturated porous solid boundary[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, **221**(3): 391 - 413.
- [11] LI C, HAO H, LI H, et al. Theoretical modeling and numerical simulation of seismic motions at seafloor[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, **77**: 220 - 225.
- [12] WANG Jin-ting, ZHANG Chu-han, JIN Feng. Analytical solutions for dynamic pressures of coupling fluid-solid-porous medium due to P wave incidence[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, **3**(2): 263 - 271.
- [13] WANG Jin-ting, ZHANG Chu-han, JIN Feng. Analytical solutions for dynamic pressures of coupling fluid-porous medium-solid due to SV wave incidence[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2009, **33**(12): 1467 - 1484.
- [14] ACHENBACH J D. 弹性固体中波的传播[M]. 徐植信, 等译. 上海: 同济大学出版社, 1992. (ACHENBACH J D. Wave propagation in elastic solids[M]. XU Zhi-xin, et al trans. Shanghai: Tongji University Press, 1992. (in Chinese))
- 附录:**
- 本文式(24)中矩阵 A 各系数 a_{ij} 的表达式(为书写方便, 零项已忽略)
- $$a_{19} = a_{1,10} = 1, \quad a_{23} = -a_{24} = (1-n)k_{p1y} + n\xi_1 k_{p1y},$$
- $$a_{25} = a_{26} = (1-n)k_{p2y} + n\xi_2 k_{p2y},$$
- $$a_{27} = a_{28} = (1-n)k_x + n\xi_3 k_x,$$
- $$a_{29} = a_{2,10} = -k_{wp} \exp(ik_{wp} h_1);$$
- $$a_{33} = -a_{34} = 2k_x k_{p1y}, \quad a_{35} = -a_{36} = 2k_x k_{p2y},$$
- $$a_{37} = a_{38} = k_x^2 - k_{sy}^2;$$
- $$a_{43} = a_{44} = [A + (1 + \xi_1)Q + R\xi_1](k_x^2 + k_{p1y}^2) + 2\mu_s k_{p1y}^2,$$
- $$a_{45} = a_{46} = [A + (1 + \xi_2)Q + R\xi_2](k_x^2 + k_{p2y}^2) + 2\mu_s k_{p2y}^2,$$
- $$a_{47} = -a_{48} = 2\mu_s k_x k_{sy}, \quad a_{49} = -\rho_w \omega^2 \exp(ik_{wp} h_1),$$
- $$a_{4,10} = -\rho_w \omega^2 \exp(-ik_{wp} h_1);$$
- $$a_{53} = a_{54} = (Q + R\xi_1)(k_x^2 + k_{p1y}^2),$$
- $$a_{55} = a_{56} = (Q + R\xi_2)(k_x^2 + k_{p2y}^2),$$
- $$a_{59} = n\rho_w \omega^2 \exp(ik_{wp} h_1),$$
- $$a_{5,10} = n\rho_w \omega^2 \exp(-ik_{wp} h_1).$$
- $$a_{61} = a_{62} = -k_x, \quad a_{63} = k_x \exp(ik_{p1y} h_2),$$
- $$a_{64} = k_x \exp(-ik_{p1y} h_2), \quad a_{65} = k_x \exp(ik_{p2y} h_2),$$
- $$a_{66} = k_x \exp(-ik_{p2y} h_2), \quad a_{67} = -k_{sy} \exp(ik_{sy} h_2),$$
- $$a_{68} = k_{sy} \exp(-ik_{sy} h_2); \quad a_{71} = -k_{bp}, \quad a_{72} = -k_x,$$
- $$a_{73} = -k_{p1y} \exp(ik_{p2y} h_2), \quad a_{74} = k_{p1y} \exp(-ik_{p1y} h_2),$$
- $$a_{75} = -k_{p2y} \exp(ik_{p2y} h_2), \quad a_{76} = k_{p2y} \exp(-ik_{p2y} h_2),$$
- $$a_{77} = -k_x \exp(ik_{sy} h_2), \quad a_{78} = -k_x \exp(-ik_{sy} h_2);$$
- $$a_{83} = (1 - \xi_1)k_{p1y} \exp(ik_{p1y} h_2),$$
- $$a_{84} = (1 - \xi_1)k_{p1y} \exp(-ik_{p1y} h_2),$$
- $$a_{85} = (1 - \xi_2)k_{p2y} \exp(ik_{p2y} h_2),$$
- $$a_{86} = (1 - \xi_2)k_{p2y} \exp(-ik_{p2y} h_2),$$
- $$a_{87} = (1 - \xi_3)k_x \exp(ik_{sy} h_2),$$
- $$a_{88} = (1 - \xi_3)k_x \exp(-ik_{sy} h_2);$$
- $$a_{91} = -2\mu_b k_x k_{bp}, \quad a_{92} = \mu_b(k_x^2 k_{bsy}^2),$$
- $$a_{93} = -2\mu_s k_x k_{p1y} \exp(ik_{p1y} h_2),$$
- $$a_{94} = 2\mu_s k_x k_{p1y} \exp(-ik_{p1y} h_2),$$
- $$a_{95} = -2\mu_s k_x k_{p2y} \exp(ik_{p2y} h_2),$$
- $$a_{96} = 2\mu_s k_x k_{p2y} \exp(-ik_{p2y} h_2),$$
- $$a_{97} = -\mu_s(k_x^2 - k_{sy}^2) \exp(ik_{sy} h_2),$$
- $$a_{98} = -\mu_s(k_x^2 - k_{sy}^2) \exp(-ik_{sy} h_2);$$
- $$a_{10,1} = -[\lambda_b k_x^2 + (\lambda_b + 2\mu_b)k_{bp}^2], \quad a_{10,2} = 2\mu_b k_x k_{bsy},$$
- $$a_{10,3} = [(A + Q\xi_1 + Q + R\xi_1)(k_x^2 + k_{p1y}^2) + 2\mu_s k_{p1y}^2] \exp(ik_{p1y} h_2),$$
- $$a_{10,4} = [(A + Q\xi_1 + Q + R\xi_1)(k_x^2 + k_{p1y}^2) + 2\mu_s k_{p1y}^2] \exp(-ik_{p1y} h_2),$$
- $$a_{10,5} = [(A + Q\xi_2 + Q + R\xi_2)(k_x^2 + k_{p2y}^2) + 2\mu_s k_{p2y}^2] \exp(ik_{p2y} h_2),$$
- $$a_{10,6} = [(A + Q\xi_2 + Q + R\xi_2)(k_x^2 + k_{p2y}^2) + 2\mu_s k_{p2y}^2] \exp(-ik_{p2y} h_2),$$
- $$a_{10,7} = 2\mu_s k_x k_{sy} \exp(ik_{sy} h_2),$$
- $$a_{10,8} = -2\mu_s k_x k_{sy} \exp(-ik_{sy} h_2).$$