

李伟华, 赵成刚. 2015. 地下水位变化对地震地面运动的影响. 地震学报, 37(3): 482–492. doi:10.11939/jass.2015.03.011.
Li W H, Zhao C G. 2015. Effects of the groundwater level variation on earthquake ground motions. *Acta Seismologica Sinica*, 37(3): 482–492. doi:10.11939/jass.2015.03.011.

地下水位变化对地震地面运动的影响^{*}

李伟华^{*} 赵成刚

(中国北京 100044 北京交通大学土木建筑工程学院)

摘要 本文以 Biot 提出的流体饱和多孔介质波动理论为基础, 建立了成层地基模型, 把地下水位以下的饱和土层用水饱和多孔介质模拟, 地下水位以上土层用气饱和多孔介质模拟. 通过研究入射平面简谐波在成层地基中的传播, 分析了地下水位变化对地震地面运动的影响. 结果表明: P 波入射下, 当土体骨架相对刚度较小时, 地下水位变化对地表位移尤其是竖向地表位移幅值影响较大, 随着地下水位的下降, 竖向位移逐渐增加, 相对应的峰值频率逐渐减小; 当土体骨架相对刚度较大时, 地下水位变化对地面运动影响不大.

关键词 地下水位 地震地面运动 流体饱和多孔介质 成层地基
doi:10.11939/jass.2015.03.011 中图分类号: P315.3⁺1 文献标志码: A

Effects of the groundwater level variation on earthquake ground motions

Li Weihua^{*} Zhao Chenggang

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

Abstract: Based on Biot's theory of fluid-saturated porous media, this paper presents the effects of groundwater level variation on earthquake ground motions through the analyses of wave propagation in layered foundation. In this analysis, a layered foundation model is built, assuming the saturated soil layer below the groundwater level as water-saturated porous soil, and the soil layer above the groundwater level as air-saturated porous soil. Numerical results show that under the incident P wave, the groundwater level variation has larger effect on the amplitudes of ground surface displacement, especially on the amplitudes of vertical surface displacement when the relative stiffness of soil skeleton is small. With the decline of the groundwater level, the vertical surface displacements increase, and the frequencies at the resonance peaks decrease correspondingly. But when the relative stiffness of soil skeleton becomes large, the variation of groundwater level has little effect on earthquake ground motions.

Key words: groundwater level; earthquake ground motion; fluid-saturated por-

^{*} 基金项目 国家自然科学基金(51378058)和中央高校基本科研业务费专项(2013JBM060)共同资助.
收稿日期 2014-06-18 收到初稿, 2015-02-20 决定采用修改稿.
[✉] 通讯作者 e-mail: whli@bjtu.edu.cn

ous media; layered foundation

引言

场地地震反应问题, 即局部场地条件对地震波传播的影响问题, 作为地震工程学中的两大类波动问题之一, 一直备受关注. 在过去的几十年里, 国内外对局部场地条件动力反应问题进行了大量的研究, 目前对地形、地貌、覆盖层的组成、厚度、土的软硬等局部场地条件对地震地面运动的影响都进行了相关研究(Trifunac, 1972; 刘晶波, 1989; 李伟华, 2004). 但综观已有场地地震反应问题的研究中, 均未考虑地下水位变化对地震地面运动的影响. 而在实际地层中, 地下水位是存在的, 并且降水、季节变化以及地下水抽取等还将导致地下水位的变化. 以北京地区为例, 1999 年平原地区地下水埋深为 15 m 左右. 1999 年以后, 因连续遭遇枯水年, 全市地下水位埋深直线下降, 1999—2009 年 10 年间全市累计降深达 9.86 m(杨忠山等, 2010). 地下水位变化是否会对地震地面运动产生影响? 将会产生怎样的影响? 目前还没有文献分析此问题. 究其原因, 主要是由于现有场地反应问题研究中, 大多以经典弹性动力学为理论依据, 将天然土体简化为理想的各向同性单相介质进行分析, 这一简化自然忽略了地下水的影响. 众所周知, 自然界中的土一般是由土骨架和孔隙流体(水和气体)组成的三相介质. 当孔隙中完全被水填充时称为水饱和土; 当孔隙中仅被气体充满时为干土, 或称为气饱和土. 土孔隙中流体的性质不同, 会导致土层振动时刚度的变化, 从而影响土层的动力反应, 所以采用常规的单相介质模型来模拟饱和土层显然不合适, 应该利用流体饱和和多孔介质理论来研究饱和土层. 周新民等(2006)曾研究地震波在水饱和与气饱和土层界面上的反射和透射问题, 结果表明地震波在水饱和土中的传播与在气饱和土中的传播差异较大. 据此可以初步推断, 地下水变化应该会对地震地面运动产生影响, 但具体影响程度及相关因素还有待进一步研究.

本文以 Biot(1956)提出的流体饱和和多孔介质波动理论为基础, 建立了成层地基模型, 把地下水位以下的饱和土层用水饱和和多孔介质模拟, 地下水位以上土层用气饱和和多孔介质模拟. 通过研究入射平面简谐波在成层地基中的传播, 分析了地下水位变化对地震地面运动的影响.

1 分析模型

本文所用的分析模型如图 1 所示. 该模型为一基岩层上覆有限厚度的覆盖层, 覆盖层厚度为 H , 地下水埋深于地表下 h_1 处. 设地下水位上下土层为饱和度不同的同一种土. 地下水位以下为水饱和土层(水饱和度 $S_r = 100\%$), 厚度为 $h_2 = H - h_1$; 地下水位以上土层为干土层(即气饱和土层, 水饱和度 $S_r = 0$), 厚度为 h_1 . 在地表面、地下水位面及基岩表面处的坐标系分别如图 1 所示.

上覆土层(水饱和或气饱和土层)用流体饱和和多孔介质模拟, 考虑固体颗粒及孔隙的流体

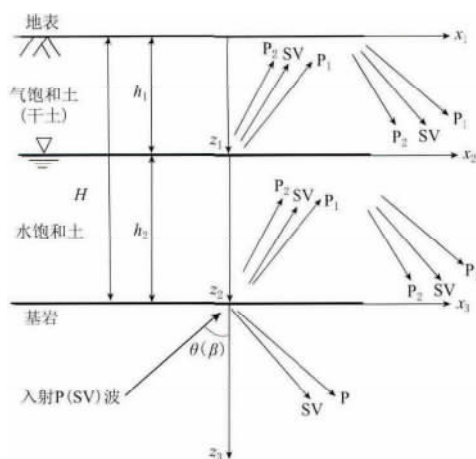


图 1 分析模型

Fig. 1 Analysis model

压缩性以及流固两相的惯性耦合和黏性耦合, Biot(1956)给出了流体饱和和多孔介质的矢量波动方程:

$$\begin{cases} N\nabla^2 \mathbf{u}^s + \nabla[(A+N)e + Q\epsilon] = (\rho_{11}\ddot{\mathbf{u}}^s + \rho_{12}\ddot{\mathbf{u}}^f) + b(\dot{\mathbf{u}}^s - \dot{\mathbf{u}}^f), \\ \nabla(Qe + R\epsilon) = (\rho_{12}\ddot{\mathbf{u}}^s + \rho_{22}\ddot{\mathbf{u}}^f) - b(\dot{\mathbf{u}}^s - \dot{\mathbf{u}}^f) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: \mathbf{u}^s 和 \mathbf{u}^f 分别为固体骨架和流体的位移矢量; $e = \nabla \cdot \mathbf{u}^s$, $\epsilon = \nabla \cdot \mathbf{u}^f$; $\rho_{11} = (1-n)\rho_s + \rho$, $\rho_{12} = -\rho$, $\rho_{22} = n\rho_f + \rho$, ρ_s 为固相的质量密度, ρ_f 为流体的质量密度, ρ 为流固两相耦合的质量密度, n 为流体饱和和多孔介质的孔隙率; b 为与渗流有关的系数, $b = n^2\eta/k$ (η 为流体黏滞系数, k 为渗透系数); A , N , R , Q 为材料常数, 其中 A 和 N 类似于一般弹性理论中的拉梅常数, R 和 Q 反映了流体的弹性及流体与固体骨架间的弹性相互作用, 它们可以分别用土骨架和孔隙流体的材料常数来表示(Biot, Willis, 1957):

$$\begin{cases} N = \mu \\ A = (K_b - \frac{2}{3}\mu) + (\frac{K_s^2}{K_d - K_b}) \left[(1 - \frac{K_b}{K_s}) - n \right]^2 \\ R = \frac{n^2 K_s^2}{K_d - K_b} \\ Q = n(1 - \frac{K_b}{K_s} - n) \frac{K_s^2}{K_d - K_b} \end{cases}, \quad (2)$$

式中, $K_d = K_s \left[1 + n(\frac{K_s}{K_f} - 1) \right]$, K_s 和 K_b 分别为土颗粒和土骨架的体积模量, λ 和 μ 为土骨架的拉梅常数, K_f 为孔隙流体的体积模量.

因为地下水位上下土层为同一种土, 所以地下水位上下土体骨架的拉梅常数相等. 土颗粒密度相等. 地下水位以下水饱和土的孔隙流体体积模量 $K_f = K_w$ (K_w 为水的体积模量), 孔隙流体密度 $\rho_f = \rho_w$ (ρ_w 为水的密度); 地下水位以上气饱和土的孔隙流体体积模量 $K_f = K_a$ (K_a 为空气的体积模量), 孔隙流体密度 $\rho_f = \rho_a$ (ρ_a 为空气的密度). 本文假定地下水位变化不引起土体孔隙率的变化.

在 Biot 模型中, 土颗粒和孔隙流体均为可压缩的, 固体骨架部分与流体部分的应力-应变关系分别为

$$\begin{cases} \sigma_{ij}^s = 2N\epsilon_{ij} + \delta_{ij}(Ae + Q\epsilon) \\ \sigma^f = Qe + R\epsilon \end{cases}, \quad (3)$$

式中, σ_{ij}^s 和 σ^f 分别为固体骨架部分和流体部分承担的应力, $\epsilon_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i})/2$ 为土骨架应变. 基岩用单相弹性介质模拟, 其波动方程为(Eringen, Suhubi, 1975)

$$(\lambda_b + \mu_b)\text{grad}\theta + \mu_b\nabla^2 \mathbf{u}^b = \rho_b \frac{\partial^2 \mathbf{u}^b}{\partial t^2}, \quad (4)$$

式中: $\theta = \text{div} \mathbf{u}^b$, \mathbf{u}^b 为基岩介质的位移向量; λ_b 和 μ_b 为基岩层的拉梅常数; ρ_b 为基岩层的质量密度.

2 波场分析

根据 Helmholtz 定理, 式(1)和式(4)中的位移矢量可写成如下形式:

$$\mathbf{u} = \text{grad}\phi + \text{curl}\boldsymbol{\varphi}, \quad (5)$$

式中, ϕ 为标量势函数, $\boldsymbol{\varphi}$ 为矢量势函数. 将式(5)分别代入式(1)和式(4)中, 并假设平面

波解形式为简谐波, 可分别得到流体饱和和多孔介质和单相弹性介质中各形态波的标量势函数 ϕ 和矢量势函数 φ 的表达式, 详见文献 (Deresiewicz, Rice, 1962; Eringen, Suhubi, 1975).

设 P(或 SV)波从基岩入射到上覆土层, 入射 P(或 SV)波频率为 ω , 入射角为 θ (或 β), 则入射波场的势函数可表示为

$$\begin{cases} \text{入射 P 波} & \phi_b^i = A_b^i \exp[i(\omega t - k_{bP}x_3 \sin\theta + k_{bP}z_3 \cos\theta)] \\ \text{入射 SV 波} & \varphi_b^i = B_b^i \exp[i(\omega t - k_{bS}x_3 \sin\beta + k_{bS}z_3 \cos\beta)] \end{cases}, \quad (6)$$

式中, A_b^i (或 B_b^i) 为入射波幅值, k_{bP} 和 k_{bS} 分别为入射 P 波和入射 SV 波的波数.

入射波将在地层内产生反射和透射, 各土层中的波场如图 1 所示, 具体分析如下:

1) 基岩中. 波从基岩层入射到上覆土层中时, 在基岩层中产生的反射波为

$$\begin{cases} \text{反射 P 波} & \phi_b^r = A_b^r \exp[i(\omega t - k_{bP}x_3 \sin\theta - k_{bP}z_3 \cos\theta)] \\ \text{反射 SV 波} & \varphi_b^r = B_b^r \exp[i(\omega t - k_{bS}x_3 \sin\beta - k_{bS}z_3 \cos\beta)] \end{cases}, \quad (7)$$

式中, A_b^r 和 B_b^r 为待求的基岩中反射波波幅系数.

2) 地下水位以下土层(水饱和和土层)中. 研究表明, 流体饱和和多孔介质中存在 3 种类型波: P_1 波、 P_2 波和 SV 波. 对于此问题, 地下水位以下水饱和土层中固体骨架部分各形态波的标量势函数和矢量势函数分别为

$$\begin{cases} \text{上行 } P_1 \text{ 波} & \phi_{s1}^{(w)u} = A_{s1}^{(w)u} \exp[i(\omega t - k_{P_1x}^{(w)}x_2 + k_{P_1z}^{(w)}z_2)] \\ \text{上行 } P_2 \text{ 波} & \phi_{s2}^{(w)u} = A_{s2}^{(w)u} \exp[i(\omega t - k_{P_2x}^{(w)}x_2 + k_{P_2z}^{(w)}z_2)] \\ \text{上行 SV 波} & \varphi_s^{(w)u} = B_s^{(w)u} \exp[i(\omega t - k_{Sx}^{(w)}x_2 + k_{Sx}^{(w)}z_2)] \\ \text{下行 } P_1 \text{ 波} & \phi_{s1}^{(w)d} = A_{s1}^{(w)d} \exp[i(\omega t - k_{P_1x}^{(w)}x_2 - k_{P_1z}^{(w)}z_2)] \\ \text{下行 } P_2 \text{ 波} & \phi_{s2}^{(w)d} = A_{s2}^{(w)d} \exp[i(\omega t - k_{P_2x}^{(w)}x_2 - k_{P_2z}^{(w)}z_2)] \\ \text{下行 SV 波} & \varphi_s^{(w)d} = B_s^{(w)d} \exp[i(\omega t - k_{Sx}^{(w)}x_2 - k_{Sx}^{(w)}z_2)] \end{cases}, \quad (8)$$

则水饱和土中的总波场为

$$\begin{cases} \text{固体骨架部分} & \begin{aligned} \phi_s^{(w)} &= \phi_{s1}^{(w)u} + \phi_{s1}^{(w)d} + \phi_{s2}^{(w)u} + \phi_{s2}^{(w)d} \\ \varphi_s^{(w)} &= \varphi_s^{(w)u} + \varphi_s^{(w)d} \end{aligned} \\ \text{孔隙流体部分} & \begin{aligned} \phi_f^{(w)} &= \xi_1^{(w)}(\phi_{s1}^{(w)u} + \phi_{s1}^{(w)d}) + \xi_2^{(w)}(\phi_{s2}^{(w)u} + \phi_{s2}^{(w)d}) \\ \varphi_f^{(w)} &= \xi_3^{(w)}\varphi_s^{(w)} \end{aligned} \end{cases}. \quad (9)$$

3) 地下水位以上土层(气饱和和土层)中. 同理, 地下水位以上气饱和土层中固体骨架部分各形态波的标量势函数和矢量势函数分别为

$$\begin{cases} \text{上行 } P_1 \text{ 波} & \phi_{s1}^{(a)u} = A_{s1}^{(a)u} \exp[i(\omega t - k_{P_1x}^{(a)}x_1 + k_{P_1z}^{(a)}z_1)] \\ \text{上行 } P_2 \text{ 波} & \phi_{s2}^{(a)u} = A_{s2}^{(a)u} \exp[i(\omega t - k_{P_2x}^{(a)}x_1 + k_{P_2z}^{(a)}z_1)] \\ \text{上行 SV 波} & \varphi_s^{(a)u} = B_s^{(a)u} \exp[i(\omega t - k_{Sx}^{(a)}x_1 + k_{Sx}^{(a)}z_1)] \\ \text{下行 } P_1 \text{ 波} & \phi_{s1}^{(a)d} = A_{s1}^{(a)d} \exp[i(\omega t - k_{P_1x}^{(a)}x_1 - k_{P_1z}^{(a)}z_1)] \\ \text{下行 } P_2 \text{ 波} & \phi_{s2}^{(a)d} = A_{s2}^{(a)d} \exp[i(\omega t - k_{P_2x}^{(a)}x_1 - k_{P_2z}^{(a)}z_1)] \\ \text{下行 SV 波} & \varphi_s^{(a)d} = B_s^{(a)d} \exp[i(\omega t - k_{Sx}^{(a)}x_1 - k_{Sx}^{(a)}z_1)] \end{cases}, \quad (10)$$

则气饱和土中的总波场为

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{固体骨架部分} \quad \phi_s^{(a)} = \phi_{s1}^{(a)u} + \phi_{s1}^{(a)d} + \phi_{s2}^{(a)u} + \phi_{s2}^{(a)d} \\ \quad \varphi_s^{(a)} = \varphi_s^{(a)u} + \varphi_s^{(a)d} \\ \text{孔隙流体部分} \quad \phi_f^{(a)} = \xi_1^{(a)} (\phi_{s1}^{(a)u} + \phi_{s1}^{(a)d}) + \xi_2^{(a)} (\phi_{s2}^{(a)u} + \phi_{s2}^{(a)d}) \\ \quad \varphi_f^{(a)} = \xi_3^{(a)} \varphi_s^{(a)} \end{array} \right. \quad (11)$$

在式(8)–(11)中: 上标“u”表示上行, “d”表示下行; 上标“a”表示气饱和土, “w”表示水饱和土; $A_{s1}^{(a)u}$, $A_{s2}^{(a)u}$, $B_s^{(a)u}$, $A_{s1}^{(a)d}$, $A_{s2}^{(a)d}$, $B_s^{(a)d}$ ($\alpha = a$ 或 w , 下同) 为待定波幅系数; $\xi_1^{(a)}$, $\xi_2^{(a)}$, $\xi_3^{(a)}$ 分别为水或气饱和土层中对应于 P_1 波、 P_2 波和 SV 波的 3 个流体相波的参与系数; $k_{P_1x}^{(a)}$, $k_{P_2x}^{(a)}$ 和 $k_{Sx}^{(a)}$ 分别为水或气饱和土层中 P_1 波、 P_2 波和 SV 波 x 方向的视波数, $k_{P_1z}^{(a)}$, $k_{P_2z}^{(a)}$ 和 $k_{Sx}^{(a)}$ 分别为 z 方向的视波数, 且

$$\left\{ \begin{array}{l} (k_{P_1x}^{(a)})^2 + (k_{P_1z}^{(a)})^2 = \left(\frac{\omega}{c_{P_1}^{(a)}} \right)^2 \\ (k_{P_2x}^{(a)})^2 + (k_{P_2z}^{(a)})^2 = \left(\frac{\omega}{c_{P_2}^{(a)}} \right)^2, \\ (k_{Sx}^{(a)})^2 + (k_{Sx}^{(a)})^2 = \left(\frac{\omega}{c_S^{(a)}} \right)^2 \end{array} \right. \quad (12)$$

式中, $c_{P_1}^{(a)}$, $c_{P_2}^{(a)}$ 和 $c_S^{(a)}$ 分别为水或气饱和土中 P_1 波、 P_2 波和 SV 波的波速. 具体计算方法参见 Deresiewicz 和 Rice(1962) 文章.

此外, 根据 Snell 定理有

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{P 波入射} \quad k_{P_1x}^{(w)} = k_{P_2x}^{(w)} = k_{Sx}^{(w)} = k_{P_1x}^{(a)} = k_{P_2x}^{(a)} = k_{Sx}^{(a)} = k_{bs} \sin \beta = k_{bp} \sin \theta \\ \text{SV 波入射} \quad k_{P_1x}^{(w)} = k_{P_2x}^{(w)} = k_{Sx}^{(w)} = k_{P_1x}^{(a)} = k_{P_2x}^{(a)} = k_{Sx}^{(a)} = k_{bp} \sin \theta = k_{bs} \sin \beta \end{array} \right. \quad (13)$$

3 边界条件及问题的解

Deresiewicz 和 Skalak(1963)给出了两种不同饱和多孔介质交界面上的边界条件, 后来其他研究人员根据不同需要进行了一系列修改 (Lovera, 1987; de la Cruz, Spanos, 1989). 本文中, 假设水气之间不存在质量交换, 即不考虑气体在水相的溶解和溢出, 则在水饱和土与气饱和土交界面上存在以下连续条件:

法向、切向总应力连续

$$(\sigma_{zz}^{s(a)} + \sigma_{zz}^{f(a)})|_{z_1=h_1} = (\sigma_{zz}^{s(w)} + \sigma_{zz}^{f(w)})|_{z_2=0} \quad \sigma_{xz}^{s(a)}|_{z_1=h_1} = \sigma_{xz}^{s(w)}|_{z_2=0}, \quad (14a)$$

孔隙流体压力连续

$$\sigma_{zz}^{f(a)}|_{z_1=h_1} = \sigma_{zz}^{f(w)}|_{z_2=0}, \quad (14b)$$

固体骨架法向、切向位移连续

$$u_z^{s(a)}|_{z_1=h_1} = u_z^{s(w)}|_{z_2=0} \quad u_x^{s(a)}|_{z_1=h_1} = u_x^{s(w)}|_{z_2=0}, \quad (14c)$$

流体法向位移连续

$$u_z^{f(a)}|_{z_1=h_1} = u_z^{f(w)}|_{z_2=0}. \quad (14d)$$

假定基岩与水饱和土层界面不透水, 则基岩与水饱和土层交界面的边界条件可以表示为:

法向、切向总应力连续

$$\sigma_{zz}^b|_{z_3=0} = \sigma_{zz}^{s(w)}|_{z_2=h_2} + \sigma_{zz}^{f(w)}|_{z_2=h_2} \quad \sigma_{xz}^b|_{z_3=0} = \sigma_{xz}^{s(w)}|_{z_2=h_2}, \quad (15a)$$

水饱和土层固体骨架与基岩层法向、切向位移连续

$$u_x^b|_{z_3=0} = u_x^{s(w)}|_{z_2=h_2} \quad u_z^b|_{z_3=0} = u_z^{s(w)}|_{z_2=h_2}, \quad (15b)$$

水饱和土层固体骨架法向位移和流体位移连续

$$u_z^{f(w)}|_{z_2=h_2} = u_z^{s(w)}|_{z_2=h_2}, \quad (15c)$$

气饱和土表面为自由边界, 其边界条件为

$$\sigma_{zz}^{s(a)}|_{z_1=0} = \sigma_{xz}^{s(a)}|_{z_1=0} = \sigma^{f(a)}|_{z_1=0} = 0, \quad (16)$$

式中, 上标“b”表示基岩, “s”表示饱和土中固相, “f”表示饱和土中流体相。

根据前面给出的各土层中的波场、单相弹性介质应力-应变关系、流体饱和和多孔介质的应力-应变关系(式(3))以及上述边界条件(式(14)~(16)), 可以得到 P 波(或 SV 波)从基岩层入射到含地下水的上覆土层时, 在各土层中产生的波场的待定波幅系数为

$$\begin{cases} \text{P 波入射} & \mathbf{A}\mathbf{X}^T = \mathbf{B}^T \\ \text{SV 波入射} & \mathbf{A}\mathbf{X}^T = \mathbf{C}^T \end{cases}, \quad (17)$$

式中,

$$\mathbf{A} = [a_{ij}](i, j = 1, 2, \dots, 14) (a_{ij} \text{ 的表达式见附录}),$$

$$\mathbf{B} = A_b^i [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -a_{10,1} \quad a_{11,1} \quad 0 \quad a_{13,1} \quad -a_{14,1}],$$

$$\mathbf{C} = B_b^i [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad a_{10,2} \quad -a_{11,2} \quad 0 \quad -a_{13,2} \quad a_{14,2}],$$

$$\mathbf{X} = [A_b^r \quad B_b^r \quad A_{s1}^{(w)u} \quad A_{s1}^{(w)d} \quad A_{s2}^{(w)u} \quad A_{s2}^{(w)d} \quad B_s^{(w)u} \quad B_s^{(w)d} \quad A_{s1}^{(a)u} \quad A_{s1}^{(a)d} \quad A_{s2}^{(a)u} \quad A_{s2}^{(a)d} \quad B_s^{(a)u} \quad B_s^{(a)d}].$$

解式(17), 可以得到待定波幅系数 $A_b^i, B_b^i, A_{s1}^{(w)u}, A_{s1}^{(w)d}, A_{s2}^{(w)u}, A_{s2}^{(w)d}, B_s^{(w)u}, B_s^{(w)d}, A_{s1}^{(a)u}, A_{s1}^{(a)d}, A_{s2}^{(a)u}, A_{s2}^{(a)d}, B_s^{(a)u}, B_s^{(a)d}$, 从而确定整个波场的波场函数。

4 地下水位变化对地面运动的影响分析

把式(10)代入式(5), 得到地表面水平位移幅值 u_x 和竖向位移幅值 u_z 为

$$\begin{cases} u_x = |-k_{P_1x} A_{s1}^{(a)u} - k_{P_1x} A_{s1}^{(a)d} - k_{P_2x} A_{s2}^{(a)u} - k_{P_2x} A_{s2}^{(a)d} + k_{S_z} B_s^{(a)u} - k_{S_z} B_s^{(a)d}| \\ u_z = |k_{P_1z} A_{s1}^{(a)u} - k_{P_1z} A_{s1}^{(a)d} + k_{P_2z} A_{s2}^{(a)u} - k_{P_2z} A_{s2}^{(a)d} + k_{S_x} B_s^{(a)u} + k_{S_x} B_s^{(a)d}| \end{cases}. \quad (18)$$

为便于分析, 引入无量纲频率 ω/ω_1 . 其中 ω_1 为地下水位在地表时的固有频率, 地表位移用位移分量的幅值与入射波位移幅值 u_0 的比值, 即放大系数来表示。

取上覆土层总厚度 $H=100$ m; 基岩层材料参数 $\rho_b=2650$ kg/m³, $\lambda_b=\mu_b=5.3 \times 10^9$ Pa; 上覆土层中土颗粒的密度 $\rho_s=2700$ kg/m³, 流固两相耦合质量密度 $\rho=0$; 其它材料参数取值见表 1. 计算中考虑两组软硬程度不同的上覆土层: 第一组上覆土层较软, 土骨架剪切模量 μ 与孔隙水体积模量 K_w 比(土骨架的相对刚度)值为 0.03; 第二组上覆土层较硬, $\mu/K_w=0.5$.

表 1 上覆土层的材料参数

Table 1 The material parameters of the overlying soil

土层		材料参数										
		ρ_f /(kg·m ⁻³)	μ /MPa	K_s /MPa	K_b /GPa	K_f /MPa	n	k /pm ²	η /(μPa·s)	c_{P_1} /(m·s ⁻¹)	c_{P_2} /(m·s ⁻¹)	c_S /(m·s ⁻¹)
第一组	水饱和层	1000	66	110	36	2200	0.47	100	1000	1558.3	48.6	187.7
	气饱和层	1.2	66	110	36	0.1	0.47	100	18.7	375.6	12.0	216.7
第二组	水饱和层	1000	1100	1630	36	2200	0.47	100	1000	1969.2	157.7	766.1
	气饱和层	1.2	1100	1630	36	0.1	0.47	100	18.7	1532.6	11.9	884.8

首先考虑 P 波入射的情况. 图 2 给出了上覆土层取表 1 中第一组参数时, ω/ω_1 分别等于 1.0, 2.0 和 5.0 时, 不同地下水位 (h_1 分别为 $0.1H$, $0.2H$, $0.3H$ 和 $0.4H$) 条件下, 地表水平位移和竖向位移放大系数随入射角变化的关系曲线. 可以看出, 当土骨架的相对刚度 μ/K_w 较小, 即土骨架相对水来说很弱时, 地下水位变化对地表位移放大系数影响较大, 且这种影响与入射波频率和入射角有关. 当相对频率 ω/ω_1 较小 ($\omega/\omega_1 = 1.0$) 时, 地下水位变化对 x 方向地表位移放大系数影响较大, 随着入射角的增加, 这种影响先增大后减小, 对 z 方向地表位移放大系数影响较小; 当相对频率 ω/ω_1 较大 ($\omega/\omega_1 = 5.0$) 时, 地下水位变化对 x 和 z 方向地表位移放大系数影响均较大. 当波垂直入射时, 随着地下水位的下降, z 方向地表位移放大系数增加, $h_1 = 0.4H$ 时, z 方向地表位移放大系数为 $h_1 = 0.1H$ 时的 4 倍.

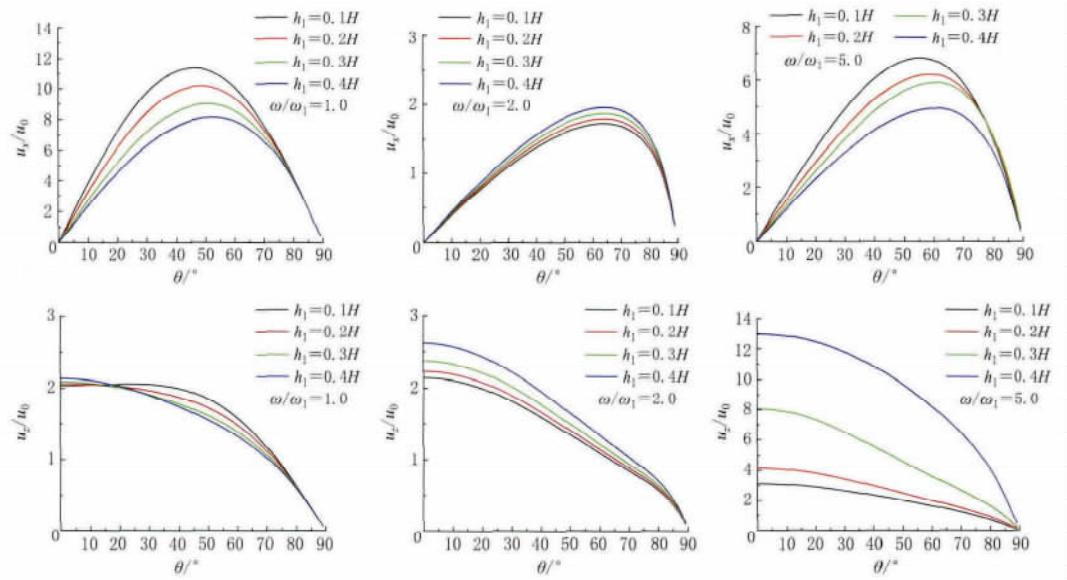


图 2 P 波入射下取第一组参数时地下水位变化对地表位移的影响

Fig. 2 Effects of groundwater level variation on ground motions for group 1 parameters (P-wave)

为了更好地说明入射波频率的影响, 图 3 给出了入射角为 0° 和 30° 时, 不同地下水位条件下地表位移放大系数随相对频率 ω/ω_1 变化的关系曲线. 可以看出, 地下水位的变化对地面运动的共振峰值和频率均有显著的影响. 当入射角为 0° (波垂直入射) 时, 随着地下水位的下降 (气饱和土层厚度的增加), 地面运动共振峰值逐渐增大, 峰值频率逐渐减小;

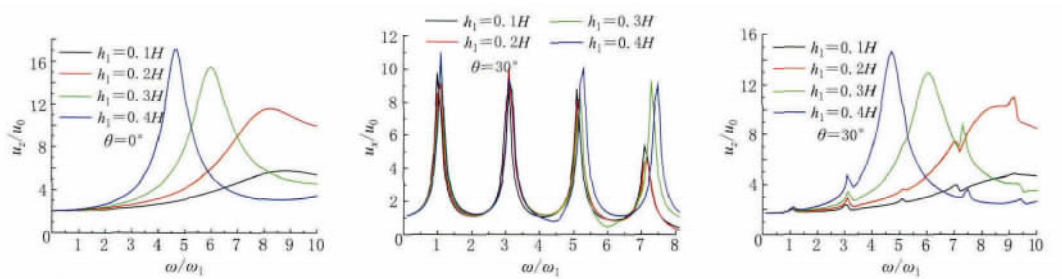


图 3 P 波入射下取第一组参数时不同地下水位下地表位移随相对频率变化的关系曲线

Fig. 3 x - and z -component of ground displacement amplitudes versus the relative frequencies under different groundwater levels for group 1 parameters (P-wave)

当入射角为 30° (波斜入射) 时, 地下水位的变化对水平位移峰值频率影响相对较小, 随着地下水位的下降, 水平位移峰值基本呈增大趋势, 但增大幅度较小. 地下水位的变化对竖向位移峰值频率则影响较大, 峰值频率随着地下水位降低逐渐减小, 竖向位移峰值逐渐增大, 但增幅逐渐减小.

产生这种现象的原因主要是随着地下水位的降低, 上覆土层逐渐由水饱和变成气饱和. 当取表 1 中第一组参数时, 在水饱和土中, 土骨架相对于水来说属于弱骨架; 而在气饱和土中, 土骨架相对于气体而言则为刚性骨架. 这一变化对 P_1 波影响很大, 主要表现在 P_1 波波速的差别上. 表 1 给出了频率为 10 Hz 时水饱和土和气饱和土中各波的波速. 可以看出, 当土层由水饱和变成气饱和时, P_1 波波速显著减小.

为了对比土骨架参数对结果的影响, 图 4 给出了上覆土层取表 1 中第二组参数时, ω/ω_1 分别等于 1.0, 2.0 和 5.0 时, 不同地下水位条件下地表水平位移和竖向位移放大系数随入射角度变化的关系曲线. 可以看出, 当土骨架的相对刚度 μ/K_w 较大, 即土骨架与水具有同等刚度时, 地下水位变化对地表位移放大系数影响不大, 且地表位移放大系数比 μ/K_w 较小时要小. 这说明当土骨架刚度增加时, 无论在水饱和还是气饱和土中土体骨架逐渐起主导作用, 这时水饱和土与气饱和土中 P_1 波波速相当, 差别不大, 具体如表 1 所示.

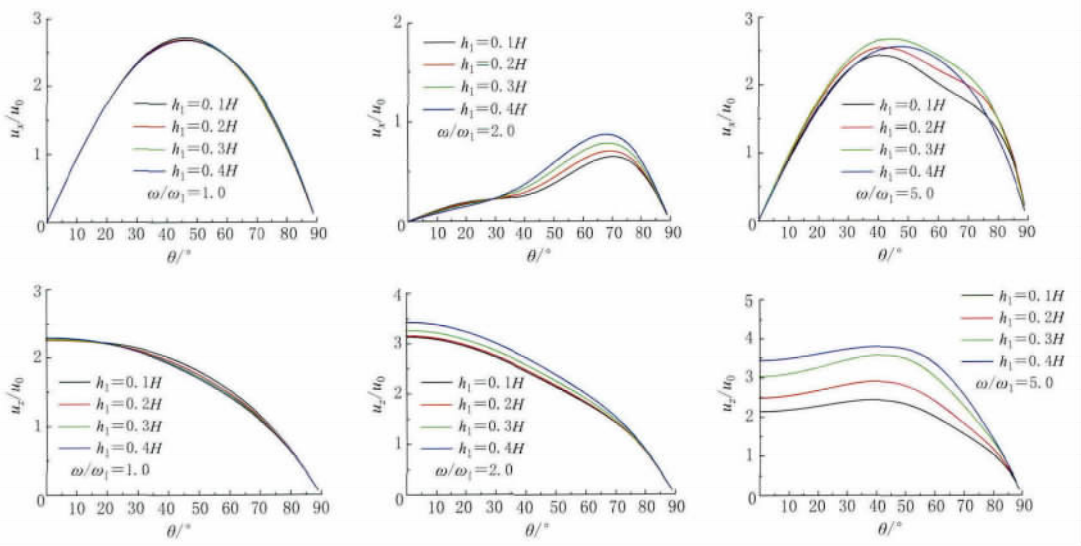


图 4 P 波入射下取第二组参数时地下水位变化对地表位移的影响

Fig. 4 Effects of groundwater level variation on ground motions for group 2 parameters (P-wave)

对于 SV 波入射的情况, 图 5 给出了取表 1 中第一组参数时, ω/ω_1 分别等于 1.0, 2.0 和 5.0 时, 地下水位变化对地表水平位移和竖向位移放大系数的影响. 可以看出, SV 波入射时地下水位变化对地表位移放大系数影响也较大, 这种影响同样与入射波频率和入射角有关. 由于篇幅有限, 详细情况不再赘述.

5 讨论与结论

波在气饱和土中的传播与水饱和土中的传播差异较大, 由此可以初步推断, 地下水变化应该会对地震地面运动产生影响. 但目前现有的场地反应问题研究中, 大多以经典弹性

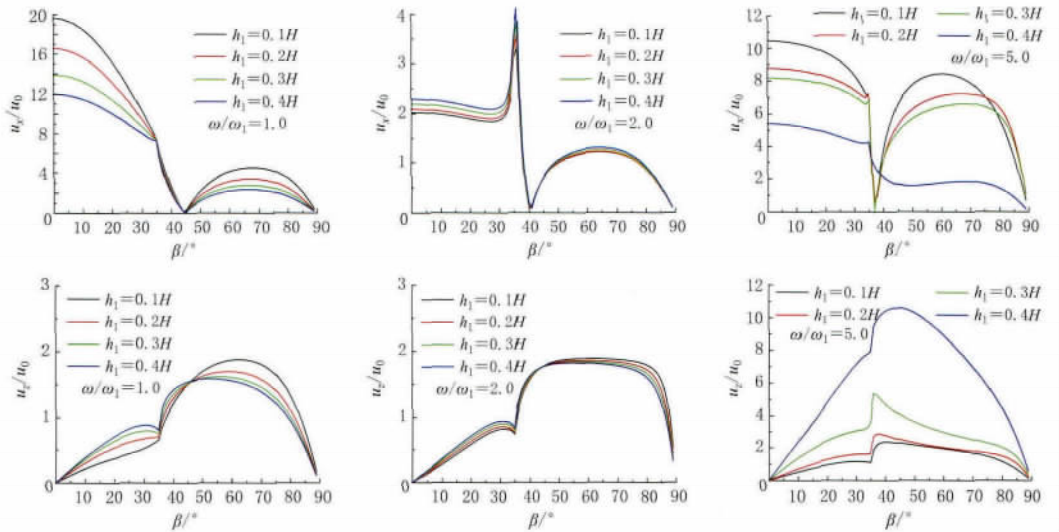


图5 SV波入射下取第一组参数时地下水位变化对地表位移的影响

Fig. 5 Effects of groundwater level variation on ground motions for group 1 parameters (SV-wave)

动力学为理论依据,将天然土体简化为理想的各向同性单相介质进行分析,这一简化使得地下水的影响被忽略。

本文以 Biot(1956)提出的流体饱和和多孔介质波动理论为基础,建立了成层地基模型,把地下水位以下的饱和土层用水饱和和多孔介质模拟,地下水位以上土层用气饱和和多孔介质模拟,得到了入射平面简谐波在成层地基中传播的解析解答。通过计算,分析了地下水位变化对地震地面运动的影响。得到如下结论:当土骨架的相对刚度较小,即土骨架相对水来说很弱时,地下水位变化对地表位移放大系数影响较大,随着地下水位的下降(气饱和和土层厚度的增加),地面运动峰值逐渐增大,峰值频率逐渐减小;当土骨架的相对刚度较大,即土骨架与水具有同等刚度时,地下水位变化对地表位移放大系数影响不大。该结论说明对于软弱土层,地下水位变化对地震地面运动的影响应该引起重视。

诚然,地下水位的变化会引起土性质多方面的改变,但由于目前关于饱和土波动理论研究的限制,本文仅在弹性范围内假定地下水位下降时土的孔隙比不变的条件下,进行了初步探索,有一定局限性。地下水位变化对地震地面运动的影响尚有待进一步深入研究。

参 考 文 献

- 李伟华. 2004. 含饱和土的复杂局部场地波动散射问题的解析解和显式有限元数值模拟[D]. 北京: 北京交通大学土木建筑工程学院: 230-233.
- Li W H. 2004. *Analytical Solutions and Numerical Simulation of the Scattering of Plane Waves by Local Sites with Saturated Soil*[D]. Beijing: School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University: 230-233 (in Chinese).
- 刘晶波. 1989. 波动的有限元模拟及复杂场地对地震动的影响[D]. 哈尔滨: 国家地震局工程力学研究所: 181-266.
- Liu J B. 1989. *Finite Element Simulation of Wave Motion and Effect of Complex Site on Seismic Wave Motion*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 181-266 (in Chinese).
- 杨忠山, 窦艳兵, 王志强. 2010. 北京市地下水水位下降严重原因分析及对策研究[J]. 中国水利, (19): 52-54.
- Yang Z S, Dou Y B, Wang Z Q. 2010. Analysis on the reasons of the decline of ground water level in the primary water

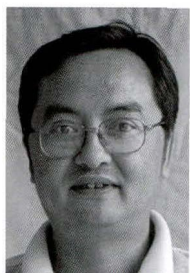
- supply source area of Beijing and the countermeasures[J]. *China Water Resources*, (19): 52–54 (in Chinese).
- 周新民, 夏唐代, 徐平, 邹振轩. 2006. 饱和土介质中地震波在水、气分界面上的反射与透射[J]. *地震学报*, **28**(4): 372–379.
- Zhou X M, Xia T D, Xu P, Zou Z X. 2006. Seismic reflection and transmission coefficients at an air-water interface of saturated porous soil[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **28**(4): 372–379 (in Chinese).
- Biot M A. 1956. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid: I. Low-frequency range[J]. *J Acoust Soc Am*, **28**(2): 168–178.
- Biot M A, Willis D G. 1957. The elastic coefficients of the theory of consolidation[J]. *J Appl Mech*, **24**: 594–601.
- de la Cruz V, Spanos T J T. 1989. Seismic boundary conditions for porous media[J]. *J Geophys Res*, **94**(B3): 3025–3029.
- Deresiewicz H, Rice J T. 1962. The effect of boundaries on wave propagation in a liquid-filled porous solid: III. Reflection of plane waves at a free plane boundary (general case)[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **52**(3): 595–625.
- Deresiewicz H, Skalak R. 1963. On uniqueness in dynamic poroelasticity[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **53**(4): 783–788.
- Eringen A C, Suhubi E S. 1975. *Elastodynamics, Vol. 2: Linear Theory*[M]. New York: Academic Press: 1–14.
- Lovera O C. 1987. Boundary conditions for a fluid-saturated porous solid[J]. *Geophysics*, **52**(2): 174–178.
- Trifunac M D. 1972. Scattering of plane SH waves by a semi-cylindrical canyon[J]. *Int J Earthq Eng Struct Dyn*, **1**(3): 267–281.

附录 本文式(17)中矩阵 A 各系数 a_{ij} 的表达式

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= a_{12} = a_{13} = a_{14} = a_{15} = a_{16} = a_{17} = a_{18} = 0 \\
 a_{19} &= a_{1,10} = (A^{(a)} + Q^{(a)} \xi_1^{(a)}) [(k_{p_1 x}^{(a)})^2 + (k_{p_1 z}^{(a)})^2] + 2N(k_{p_1 z}^{(a)})^2 \\
 a_{1,11} &= a_{1,12} = (A^{(a)} + Q^{(a)} \xi_2^{(a)}) [(k_{p_2 x}^{(a)})^2 + (k_{p_2 z}^{(a)})^2] + 2N(k_{p_2 z}^{(a)})^2 \quad a_{1,13} = -a_{1,14} = 2Nk_{p_1 x}^{(a)} k_{p_1 z}^{(a)} \\
 a_{21} &= a_{22} = a_{23} = a_{24} = a_{25} = a_{26} = a_{27} = a_{28} = 0 \quad a_{29} = -a_{2,10} = 2Nk_{p_1 x}^{(a)} k_{p_1 z}^{(a)} \\
 a_{2,11} &= -a_{2,12} = 2Nk_{p_2 x}^{(a)} k_{p_2 z}^{(a)} \quad a_{2,13} = a_{2,14} = N[(k_{s_x}^{(a)})^2 - (k_{s_z}^{(a)})^2] \\
 a_{31} &= a_{32} = a_{33} = a_{34} = a_{35} = a_{36} = a_{37} = a_{38} = 0 \\
 a_{39} &= a_{3,10} = (Q^{(a)} + R^{(a)} \xi_1^{(a)}) [(k_{p_1 x}^{(a)})^2 + (k_{p_1 z}^{(a)})^2] \\
 a_{3,11} &= a_{3,12} = (Q^{(a)} + R^{(a)} \xi_2^{(a)}) [(k_{p_2 x}^{(a)})^2 + (k_{p_2 z}^{(a)})^2] \quad a_{3,13} = a_{3,14} = 0 \\
 a_{41} &= a_{42} = 0 \quad a_{43} = a_{44} = k_{p_1 x}^{(w)} \quad a_{45} = a_{46} = k_{p_2 x}^{(w)} \quad a_{47} = -a_{48} = -k_{s_x}^{(w)} \\
 a_{49} &= -k_{p_1 x}^{(a)} \exp(ik_{p_1 z}^{(a)} h_1) \quad a_{4,10} = -k_{p_1 x}^{(a)} \exp(-ik_{p_1 z}^{(a)} h_1) \quad a_{4,11} = -k_{p_2 x}^{(a)} \exp(ik_{p_2 z}^{(a)} h_1) \\
 a_{4,12} &= -k_{p_2 x}^{(a)} \exp(-ik_{p_2 z}^{(a)} h_1) \quad a_{4,13} = k_{s_x}^{(a)} \exp(ik_{s_z}^{(a)} h_1) \quad a_{4,14} = -k_{s_x}^{(a)} \exp(-ik_{s_z}^{(a)} h_1) \\
 a_{51} &= a_{52} = 0 \quad a_{53} = -a_{54} = k_{p_1 z}^{(w)} \quad a_{55} = -a_{56} = k_{p_2 z}^{(w)} \quad a_{57} = a_{58} = k_{s_x}^{(w)} \\
 a_{59} &= -k_{p_1 z}^{(a)} \exp(ik_{p_1 z}^{(a)} h_1) \quad a_{5,10} = k_{p_1 z}^{(a)} \exp(-ik_{p_1 z}^{(a)} h_1) \quad a_{5,11} = -k_{p_2 z}^{(a)} \exp(ik_{p_2 z}^{(a)} h_1) \\
 a_{5,12} &= k_{p_2 z}^{(a)} \exp(-ik_{p_2 z}^{(a)} h_1) \quad a_{5,13} = -k_{s_x}^{(a)} \exp(ik_{s_z}^{(a)} h_1) \quad a_{5,14} = -k_{s_x}^{(a)} \exp(-ik_{s_z}^{(a)} h_1) \\
 a_{61} &= a_{62} = 0 \quad a_{63} = -a_{64} = \xi_1^{(w)} k_{p_1 z}^{(w)} \quad a_{65} = -a_{66} = \xi_2^{(w)} k_{p_2 z}^{(w)} \quad a_{67} = a_{68} = \xi_3^{(w)} k_{s_x}^{(w)} \\
 a_{69} &= -\xi_1^{(w)} k_{p_1 z}^{(a)} \exp(ik_{p_1 z}^{(a)} h_1) \quad a_{6,10} = \xi_1^{(w)} k_{p_1 z}^{(a)} \exp(-ik_{p_1 z}^{(a)} h_1) \quad a_{6,11} = -\xi_2^{(w)} k_{p_2 z}^{(a)} \exp(ik_{p_2 z}^{(a)} h_1) \\
 a_{6,12} &= \xi_2^{(w)} k_{p_2 z}^{(a)} \exp(-ik_{p_2 z}^{(a)} h_1) \quad a_{6,13} = -\xi_3^{(w)} k_{s_x}^{(a)} \exp(ik_{s_z}^{(a)} h_1) \quad a_{6,14} = -\xi_3^{(w)} k_{s_x}^{(a)} \exp(-ik_{s_z}^{(a)} h_1) \\
 a_{71} &= a_{72} = 0 \quad a_{73} = a_{74} = (Q^{(w)} + R^{(w)} \xi_1^{(w)}) [(k_{p_1 x}^{(w)})^2 + (k_{p_1 z}^{(w)})^2] \\
 a_{75} &= a_{76} = (Q^{(w)} + R^{(w)} \xi_2^{(w)}) [(k_{p_2 x}^{(w)})^2 + (k_{p_2 z}^{(w)})^2] \quad a_{77} = a_{78} = 0 \\
 a_{79} &= -(Q^{(a)} + R^{(a)} \xi_1^{(a)}) [(k_{p_1 x}^{(a)})^2 + (k_{p_1 z}^{(a)})^2] \exp(ik_{p_1 z}^{(a)} h_1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_{7,10} &= -(Q^{(a)} + R^{(a)} \xi_1^{(a)}) [(k_{p_{1x}}^{(a)})^2 + (k_{p_{1z}}^{(a)})^2] \exp(-ik_{p_{1z}}^{(a)} h_1) \\
a_{7,11} &= -(Q^{(a)} + R^{(a)} \xi_2^{(a)}) [(k_{p_{2x}}^{(a)})^2 + (k_{p_{2z}}^{(a)})^2] \exp(ik_{p_{2z}}^{(a)} h_1) \\
a_{7,12} &= -(Q^{(a)} + R^{(a)} \xi_2^{(a)}) [(k_{p_{2x}}^{(a)})^2 + (k_{p_{2z}}^{(a)})^2] \exp(-ik_{p_{2z}}^{(a)} h_1) \quad a_{7,13} = a_{7,14} = 0 \\
a_{81} &= a_{82} = 0 \quad a_{83} = a_{84} = (A^{(w)} + Q^{(w)} \xi_1^{(w)}) [(k_{p_{1x}}^{(w)})^2 + (k_{p_{1z}}^{(w)})^2] + 2N(k_{p_{1z}}^{(w)})^2 \\
a_{85} &= a_{86} = (A^{(w)} + Q^{(w)} \xi_2^{(w)}) [(k_{p_{2x}}^{(w)})^2 + (k_{p_{2z}}^{(w)})^2] + 2N(k_{p_{2z}}^{(w)})^2 \quad a_{87} = -a_{88} = 2Nk_{Sx}^{(w)} k_{Sx}^{(w)} \\
a_{89} &= -\{ (A^{(a)} + Q^{(a)} \xi_1^{(a)}) [(k_{p_{1x}}^{(a)})^2 + (k_{p_{1z}}^{(a)})^2] + 2N(k_{p_{1z}}^{(a)})^2 \} \exp(ik_{p_{1z}}^{(a)} h_1) \\
a_{8,10} &= -\{ (A^{(a)} + Q^{(a)} \xi_1^{(a)}) [(k_{p_{1x}}^{(a)})^2 + (k_{p_{1z}}^{(a)})^2] + 2N(k_{p_{1z}}^{(a)})^2 \} \exp(-ik_{p_{1z}}^{(a)} h_1) \\
a_{8,11} &= -\{ (A^{(a)} + Q^{(a)} \xi_2^{(a)}) [(k_{p_{2x}}^{(a)})^2 + (k_{p_{2z}}^{(a)})^2] + 2N(k_{p_{2z}}^{(a)})^2 \} \exp(ik_{p_{2z}}^{(a)} h_1) \\
a_{8,12} &= -\{ (A^{(a)} + Q^{(a)} \xi_2^{(a)}) [(k_{p_{2x}}^{(a)})^2 + (k_{p_{2z}}^{(a)})^2] + 2N(k_{p_{2z}}^{(a)})^2 \} \exp(-ik_{p_{2z}}^{(a)} h_1) \\
a_{8,13} &= -2Nk_{Sx}^{(a)} k_{Sx}^{(a)} \exp(ik_{Sx}^{(a)} h_1) \quad a_{8,14} = 2Nk_{Sx}^{(a)} k_{Sx}^{(a)} \exp(-ik_{Sx}^{(a)} h_1) \\
a_{91} &= a_{92} = 0 \quad a_{93} = -a_{94} = 2Nk_{p_{1x}}^{(w)} k_{p_{1z}}^{(w)} \\
a_{95} &= -a_{96} = 2Nk_{p_{2x}}^{(w)} k_{p_{2z}}^{(w)} \quad a_{97} = a_{98} = N[(k_{Sx}^{(w)})^2 - (k_{Sx}^{(w)})^2] \\
a_{99} &= -2Nk_{p_{1x}}^{(a)} k_{p_{1z}}^{(a)} \exp(ik_{p_{1z}}^{(a)} h_1) \quad a_{9,10} = 2Nk_{p_{1x}}^{(a)} k_{p_{1z}}^{(a)} \exp(-ik_{p_{1z}}^{(a)} h_1) \\
a_{9,11} &= -2Nk_{p_{2x}}^{(a)} k_{p_{2z}}^{(a)} \exp(ik_{p_{2z}}^{(a)} h_1) \quad a_{9,12} = 2Nk_{p_{2x}}^{(a)} k_{p_{2z}}^{(a)} \exp(-ik_{p_{2z}}^{(a)} h_1) \\
a_{9,13} &= -N[(k_{Sx}^{(a)})^2 - (k_{Sx}^{(a)})^2] \exp(ik_{Sx}^{(a)} h_1) \quad a_{9,14} = -N[(k_{Sx}^{(a)})^2 - (k_{Sx}^{(a)})^2] \exp(-ik_{Sx}^{(a)} h_1) \\
a_{10,1} &= -k_{bp} \sin \theta \quad a_{10,2} = -k_{bs} \cos \beta \quad a_{10,3} = k_{p_{1x}}^{(w)} \exp(ik_{p_{1z}}^{(w)} h_2) \quad a_{10,4} = k_{p_{1x}}^{(w)} \exp(-ik_{p_{1z}}^{(w)} h_2) \\
a_{10,5} &= k_{p_{2x}}^{(w)} \exp(ik_{p_{2z}}^{(w)} h_2) \quad a_{10,6} = k_{p_{2x}}^{(w)} \exp(-ik_{p_{2z}}^{(w)} h_2) \quad a_{10,7} = -k_{Sx}^{(w)} \exp(ik_{Sx}^{(w)} h_2) \\
a_{10,8} &= k_{Sx}^{(w)} \exp(-ik_{Sx}^{(w)} h_2) \quad a_{10,9} = a_{10,10} = a_{10,11} = a_{10,12} = a_{10,13} = a_{10,14} = 0 \\
a_{11,1} &= k_{bp} \cos \theta \quad a_{11,2} = -k_{bs} \sin \beta \quad a_{11,3} = k_{p_{1z}}^{(w)} \exp(ik_{p_{1z}}^{(w)} h_2) \quad a_{11,4} = -k_{p_{1z}}^{(w)} \exp(-ik_{p_{1z}}^{(w)} h_2) \\
a_{11,5} &= k_{p_{2z}}^{(w)} \exp(ik_{p_{2z}}^{(w)} h_2) \quad a_{11,6} = -k_{p_{2z}}^{(w)} \exp(-ik_{p_{2z}}^{(w)} h_2) \quad a_{11,7} = k_{Sx}^{(w)} \exp(ik_{Sx}^{(w)} h_2) \\
a_{11,8} &= k_{Sx}^{(w)} \exp(-ik_{Sx}^{(w)} h_2) \quad a_{11,9} = a_{11,10} = a_{11,11} = a_{11,12} = a_{11,13} = a_{11,14} = 0 \\
a_{12,1} &= a_{12,2} = 0 \quad a_{12,3} = (1 - \xi_1^{(w)}) k_{p_{1z}}^{(w)} \exp(ik_{p_{1z}}^{(w)} h_2) \\
a_{12,4} &= -(1 - \xi_1^{(w)}) k_{p_{1z}}^{(w)} \exp(-ik_{p_{1z}}^{(w)} h_2) \quad a_{12,5} = (1 - \xi_2^{(w)}) k_{p_{2z}}^{(w)} \exp(ik_{p_{2z}}^{(w)} h_2) \\
a_{12,6} &= -(1 - \xi_2^{(w)}) k_{p_{2z}}^{(w)} \exp(-ik_{p_{2z}}^{(w)} h_2) \quad a_{12,7} = (1 - \xi_3^{(w)}) k_{Sx}^{(w)} \exp(ik_{Sx}^{(w)} h_2) \\
a_{12,8} &= (1 - \xi_3^{(w)}) k_{Sx}^{(w)} \exp(-ik_{Sx}^{(w)} h_2) \quad a_{12,9} = a_{12,10} = a_{12,11} = a_{12,12} = a_{12,13} = a_{12,14} = 0 \\
a_{13,1} &= 2\mu_b k_{bp}^2 \sin \theta \cos \theta \quad a_{13,2} = \mu_b k_{bs}^2 (\cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \quad a_{13,3} = 2Nk_{p_{1x}}^{(w)} k_{p_{1z}}^{(w)} \exp(ik_{p_{1z}}^{(w)} h_2) \\
a_{13,4} &= -2Nk_{p_{1x}}^{(w)} k_{p_{1z}}^{(w)} \exp(-ik_{p_{1z}}^{(w)} h_2) \quad a_{13,5} = 2Nk_{p_{2x}}^{(w)} k_{p_{2z}}^{(w)} \exp(ik_{p_{2z}}^{(w)} h_2) \\
a_{13,6} &= -2Nk_{p_{2x}}^{(w)} k_{p_{2z}}^{(w)} \exp(-ik_{p_{2z}}^{(w)} h_2) \quad a_{13,7} = -N[(k_{Sx}^{(w)})^2 - (k_{Sx}^{(w)})^2] \exp(ik_{Sx}^{(w)} h_2) \\
a_{13,8} &= -N[(k_{Sx}^{(w)})^2 - (k_{Sx}^{(w)})^2] \exp(-ik_{Sx}^{(w)} h_2) \quad a_{13,9} = a_{13,10} = a_{13,11} = a_{13,12} = a_{13,13} = a_{13,14} = 0 \\
a_{14,1} &= -[\lambda_b k_{bp}^2 \sin^2 \theta + (\lambda_b + 2\mu_b) k_{bp}^2 \cos^2 \theta] \quad a_{14,2} = 2\mu_b k_{bs}^2 \sin \beta \cos \beta \\
a_{14,3} &= \{ [A^{(w)} + Q^{(w)} + (Q^{(w)} + R^{(w)}) \xi_1^{(w)}] [(k_{p_{1x}}^{(w)})^2 + (k_{p_{1z}}^{(w)})^2] + 2N(k_{p_{1z}}^{(w)})^2 \} \exp(ik_{p_{1z}}^{(w)} h_2) \\
a_{14,4} &= \{ [A^{(w)} + Q^{(w)} + (Q^{(w)} + R^{(w)}) \xi_1^{(w)}] [(k_{p_{1x}}^{(w)})^2 + (k_{p_{1z}}^{(w)})^2] + 2N(k_{p_{1z}}^{(w)})^2 \} \exp(-ik_{p_{1z}}^{(w)} h_2) \\
a_{14,5} &= \{ [A^{(w)} + Q^{(w)} + (Q^{(w)} + R^{(w)}) \xi_2^{(w)}] [(k_{p_{2x}}^{(w)})^2 + (k_{p_{2z}}^{(w)})^2] + 2N(k_{p_{2z}}^{(w)})^2 \} \exp(ik_{p_{2z}}^{(w)} h_2) \\
a_{14,6} &= \{ [A^{(w)} + Q^{(w)} + (Q^{(w)} + R^{(w)}) \xi_2^{(w)}] [(k_{p_{2x}}^{(w)})^2 + (k_{p_{2z}}^{(w)})^2] + 2N(k_{p_{2z}}^{(w)})^2 \} \exp(-ik_{p_{2z}}^{(w)} h_2) \\
a_{14,7} &= 2Nk_{Sx}^{(w)} k_{Sx}^{(w)} \exp(ik_{Sx}^{(w)} h_2) \quad a_{14,8} = -2Nk_{Sx}^{(w)} k_{Sx}^{(w)} \exp(-ik_{Sx}^{(w)} h_2) \\
a_{14,9} &= a_{14,10} = a_{14,11} = a_{14,12} = a_{14,13} = a_{14,14} = 0
\end{aligned}$$

作者简介



钱晓东 云南省地震局地震预报研究中心副研究员。1985 年云南大学地球物理学专业毕业, 获学士学位。曾从事数字地震学、地震活动性方面的研究工作, 现从事地震预测预报研究工作。中国地震学会成员。



李伟华 北京交通大学土木建筑工程学院副教授。2004 年北京交通大学岩土工程专业毕业, 获工学博士学位。现主要从事土动力学、地震波动理论及地下结构抗震方面的研究工作。中国振动工程学会土动力学分会青年工作委员会会员。



耿冠世 中国地震局第一监测中心测量工程院工程师。2009 年中国地质大学(北京)地球物理学专业毕业, 获理学学士学位; 同年进入中国地震局地球物理研究所硕博连读, 于 2015 年获固体地球物理学博士学位。现主要从事被动源面波探测及场地放大效应的研究工作。



王圣柱 中石化胜利油田西部新区研究院高级工程师。2006 年中国石油大学(华东)矿产普查与勘探专业毕业, 获工学硕士学位; 现为中国石油大学(华东)地质资源与地质工程专业在读博士生。现主要从事地球物理方法研究和油气勘探区带评价等方面的工作。



王 伟 防灾科技学院防灾工程系讲师。2005 年吉林大学建设工程学院勘查技术与工程专业毕业, 获工学学士学位; 2008 年中国地震局工程力学研究所岩土工程专业毕业, 获工学硕士学位; 2011 年中国地震局工程力学研究所防灾减灾工程及防护工程专业毕业, 获工学博士学位。现主要从事局部场地条件下强地面运动的研究工作。



肖 卓 中国地震局地震预测研究所读硕士研究生。2011 年中国地质大学(武汉)地球物理学专业毕业, 获理学学士学位。现主要从事重复地震、尾波干涉等方面的研究工作。



王 飞 北京市地震局副研究员。2003 年青岛农业大学土木工程专业毕业, 获工学学士学位; 2006 年中国地震局地震预测研究所固体地球物理学专业毕业, 获理学硕士学位。现主要从事场地地震反应分析和强震动观测等方面的研究工作。

注: 李大虎、刘泽民、郭星、陈鲲、徐龙军、王梅、杨陈、朱涛等的简介分别见本刊 Vol. 34, No. 3; Vol. 33, No. 5; Vol. 36, No. 6; Vol. 32, No. 2; Vol. 27, No. 6; Vol. 31, No. 6; Vol. 35, No. 2; Vol. 23, No. 4.