

饱和土介质中地震波在水、气分 界面上的反射与透射^{*}

周新民^{1),*} 夏唐代¹⁾ 徐 平¹⁾ 邹振轩²⁾

1) 中国杭州 310027 浙江大学岩土工程研究所

2) 中国杭州 310013 浙江省地震局

摘要 基于修改的 Biot 模型, 研究地震波在气饱和土中的传播特性以及地震波在饱和土中气、水界面上的反射和透射. 从理论上分析气饱和土与水饱和土的特性差异, 根据界面连续条件推导了反射系数与透射系数的一般计算式; 通过数值算例分析了气饱和土中波的传播特性, 并分析了饱和土中 P_1 波入射气、水界面时反射系数和透射系数与入射角及频率的关系. 结果表明, 波在气饱和土中的传播与水饱和土中有较大差异; 频率和入射角度对反射系数与透射系数均有较大影响; 并获得了波传播的某些新认识. 这对地震工程的波动勘测技术和场地反应分析具有理论及实际意义.

关键词 地震波 气饱和土 传播特性 反射与透射

中图分类号: TU435; 315.3⁺1

文献标识码: A

引言

地震波在不同介质界面上的反射与透射问题一直是地震工程、地球物理等学科的重要研究课题. 至今在理论及工程应用上已有不少成果, 这些研究主要是基于土层为各向同性弹性体这一假设(杨峻, 吴世明, 1997). 我们知道, 自然界中的土一般是由土骨架和孔隙流体(水和气体)组成的三相饱和和多孔介质. 当孔隙中完全被水充填而无气相存在时称为水饱和土; 当孔隙中仅被气体充满时则称为气饱和土(或干土), 即孔隙内仅气体连续, 没有自由运动的液体, 液体物质仅以微粒形式存在于孔隙气体中和固体颗粒之间的微孔隙内, 且不能脱离这些物质的约束. Biot 于 1956 年提出了流体饱和和多孔介质波动理论, 表明饱和土中存在两种压缩波(P_1 波和 P_2 波)和一种剪切波, 并认为 P_2 波是由固、液两相的异相运动而产生的. 由此可见, 地震波在两种饱和土层界面的反射与传播较之在两种理想的各向同性弹性固体界面的情形要复杂得多.

Stoll 和 Kan(1981)研究了关于地震波由海水入射海底沉积土时的反射与透射, 以解释海洋地震勘探资料; 乔文孝等(1992)、杨峻和吴世明(1997)研究了波以任意角度由一种水饱和土层入射于另一水饱和土层时的反射与透射结果; Lin 等(2005)研究了平面波在无粘性流体饱和和多孔弹性半空间的反射, 重点分析了孔隙率变化对固体骨架刚度的影响; Yang(2000)、李伟华(2002)考虑了水饱和土中存在少量气体时对波反射与透射的影响;

* 2005-09-19 收到初稿, 2006-04-24 决定采用修改稿.

† 通讯作者. E-mail: changanzxm@163.com

Deresiewicz 和 Levy(1967), Hajra 和 Mukhopodhyay(1982)等先后研究了地震波在弹性固体与饱和砂岩界面的反射与透射,但未考虑饱和土中的粘性耦合效应;胡亚元等(1998)、赵成刚等(1999)、叶陈江(2005)讨论了弹性波在弹性土与饱和土分界面的反射与透射问题.上述研究中均视地下水位以下土层为水饱和土,而将地下水位以上土层假设为弹性土,忽略了孔隙气体的存在. Attenborough 和 Richards(1989)、Donald(1993)的研究表明气饱和土中,尤其是散粒土中气体对波的传播亦有不可忽略的影响.杨峻和吴世明(1997)讨论了地下水位以下两层水饱和土界面上地震波的反射与透射,本文将进一步考虑流体性质变化的情况,研究地震波在地下水位附近气、水界面的传播特性.基于此本文视地下水位以上土层为气饱和土,在现有研究的基础上,采用修改的 Biot 模型(Biot, 1962; Philipacopoulos, 1987)推导了平面波解,以及地震波在饱和土层水、气界面反射与透射时各模式波反射系数与透射系数的一般计算式;通过数值算例讨论了水、气不同流体饱和土中波的传播特性,并分析了波在水、气饱和和砂土层界面的反射与透射特性.

1 波动频散方程

对各向同性饱和土,考虑土颗粒及流体压缩性,根据修改的 Biot 模型,波动方程可以用位移形式表示为(Biot, 1962; Philipacopoulos, 1987)

$$G\nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + G + \alpha^2 M) \text{grad}(\text{div} \mathbf{u}) + \alpha M (\text{div} \mathbf{w}) = \rho \ddot{\mathbf{u}} + \rho_f \ddot{\mathbf{w}} \\ \alpha M \text{grad}(\text{div} \mathbf{u}) + M \text{grad}(\text{div} \mathbf{w}) = \rho_f \ddot{\mathbf{u}} + \frac{\rho_f}{n} \ddot{\mathbf{w}} + \frac{\eta}{k_p} \dot{\mathbf{w}} \quad (1)$$

式中, \mathbf{u} 和 \mathbf{w} 分别为土骨架和流体相对土骨架的位移矢量; G 和 λ 为土骨架的拉梅常数; ρ 为土体总质量密度, $\rho = (1-n)\rho_s + n\rho_f$, ρ_s 和 ρ_f 分别表示土颗粒和流体的质量密度, n 为孔隙率; η 为流体粘滞系数; k_p 为土的渗透系数; 式中符号上的点表示该变量对时间 t 求偏导的阶数; α 和 M 分别为表征土颗粒和孔隙流体压缩性的常数, $\alpha = 1 - K_b/K_s$, $M = K_s^2/(K_d - K_b)$, $K_d = K_s[1 + n(K_s/K_f - 1)]$, K_s 和 K_b 分别为土骨架及土颗粒的体积模量, K_f 为孔隙流体的体积模量, $0 \leq \alpha \leq 1$, $0 \leq M \leq \infty$, 当 $\alpha \rightarrow 1$, $M \rightarrow \infty$ 表示土颗粒和孔隙流体均不可压缩.

引入标量势 φ_s , φ_f 和旋转势 ψ_s , ψ_f , 下标 s 和 f 分别表示固体部分和流体部分. 对于平面波问题, 借助 Helmholtz 分解可将饱和土骨架位移与流体相对位移与势函数关系写成

$$\begin{cases} u_x = \frac{\partial \varphi_s}{\partial x} - \frac{\partial \psi_s}{\partial z} & u_z = \frac{\partial \varphi_s}{\partial z} + \frac{\partial \psi_s}{\partial x} \\ w_x = \frac{\partial \varphi_f}{\partial x} - \frac{\partial \psi_f}{\partial z} & w_z = \frac{\partial \varphi_f}{\partial z} + \frac{\partial \psi_f}{\partial x} \end{cases} \quad (2)$$

并设平面波解形式为

$$\begin{Bmatrix} \varphi_s \\ \varphi_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} A_s \exp[i(\omega t - \mathbf{l}_p \cdot \mathbf{r})] \\ A_f \exp[i(\omega t - \mathbf{l}_p \cdot \mathbf{r})] \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} \psi_s \\ \psi_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} B_s \exp[i(\omega t - \mathbf{l}_s \cdot \mathbf{r})] \\ B_f \exp[i(\omega t - \mathbf{l}_s \cdot \mathbf{r})] \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中, \mathbf{l}_p 和 \mathbf{l}_s 分别为 P 波和 S 波的波矢量; \mathbf{r} 为位置矢量; A_s , A_f , B_s , B_f 为波幅值.

通过对方程组(1)进行解耦, 结合式(2)、(3)、(4), 并由非零解的条件可得 P 波和 S 波的频散方程

$$\begin{cases} A\left(\frac{l_p}{\omega}\right)^4 + B\left(\frac{l_p}{\omega}\right)^2 + C = 0 \\ D\left(\frac{l_s}{\omega}\right)^2 + C = 0 \end{cases} \tag{5}$$

式中

$$\begin{aligned} A &= (\lambda + 2G)M \\ B &= 2\alpha M\rho_f - \rho M - (\lambda + 2G + \alpha^2 M)\left(\frac{\rho_f}{n} - i\frac{\eta}{k_p\omega}\right) \\ C &= \rho\left(\frac{\rho_f}{n} - i\frac{\eta}{k_p\omega}\right) - \rho_f^2 \\ D &= -G\left(\frac{\rho_f}{n} - i\frac{\eta}{k_p\omega}\right) \end{aligned}$$

利用式(5)可得到流固体标量、矢量各自的势函数幅值之比为

$$\begin{cases} m_{P_1} = \frac{A_{f_1}}{A_{s_1}} = \frac{(\lambda + 2G + \alpha^2 M)l_1^2 - \rho\omega^2}{\rho_f\omega^2 - \alpha Ml_1^2} \\ m_{P_2} = \frac{A_{f_2}}{A_{s_2}} = \frac{(\lambda + 2G + \alpha^2 M)l_2^2 - \rho\omega^2}{\rho_f\omega^2 - \alpha Ml_2^2} \\ m_S = \frac{B_f}{B_s} = \frac{Gl_s^2 - \rho\omega^2}{\rho_f\omega^2} \end{cases} \tag{6}$$

进一步求解式(5)可得到 P_1 波、 P_2 波和 S 波的波矢量值 l_1, l_2, l_s 及 3 种波的(相)速度和波衰减(杨峻等, 1996)

$$\begin{cases} V_j = 1/\text{Re}(l_j/\omega) \\ \beta_j = \omega\text{Im}(l_j/\omega) \end{cases} \tag{7}$$

式中, Re, Im 分别表示对复数取实部和虚部, $j=1, 2, S$. 可以看出, 在饱和土中存在 3 种体波, 它们的波速均与频率及饱和土的参数有关, 且均为衰减波.

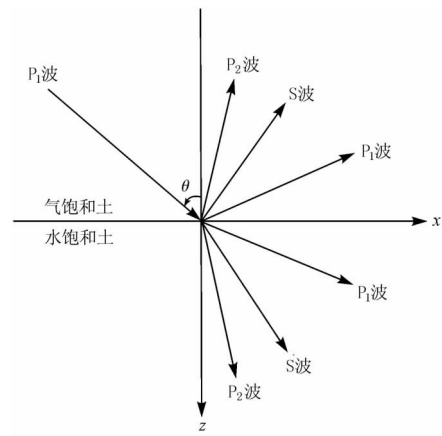


图 1 P_1 波在水气界面的反射与传播

关于饱和土体中波的传播, Biot 理论主要应用于两个方面: 第一类应用中视多孔材料为水饱和介质; 第二类则视多孔介质为气饱和介质. 水饱和土与气饱和土的主要区别在于孔隙中的流体体积模量相对于土骨架体积模量和剪切模量的差别. 在水饱和土中, 土骨架相对于水来说属于弱骨架, 而土骨架相对于气体而言则为刚性骨架. 波在饱和土中与在弹性固体中传播的主要区别在于饱和土中存在流体-固体耦合作用, 而这一耦合作用对于 P 波来说尤为重要. 为了说明气、水流体与固体耦合作用的区别, 在后面的数值算例中将进一步探讨.

2 反射与透射系数

设气饱和土中一频率为 ω 的平面 P_1 波以某一任意角度 θ 入射到饱和土体中经过气、水界面传播时, 将在气饱和土和水饱和土中分别产生反射 P_1 波、 P_2 波和 S 波及透射 P_1 波、 P_2 波和 S 波(图 1), 各形态波的势函数如下表示:

(1) $z < 0$ 部分

$$P \text{ 波系} \quad \varphi_s = \varphi_s^{(1)} + \varphi_s^{(2)} \quad \varphi_i = \varphi_i^{(1)} + \varphi_i^{(2)} \quad (8a)$$

$$\begin{aligned} \text{其中} \quad \varphi_s^{(1)} &= A_{i_1} \exp[i(\omega t - l_{i_1 x} x - l_{i_1 z} z)] \\ \varphi_i^{(1)} &= m_1 A_{i_1} \exp[i(\omega t - l_{i_1 x} x - l_{i_1 z} z)] \\ \varphi_s^{(2)} &= A_{r_1} \exp[i(\omega t - l_{r_1 x} x + l_{r_1 z} z)] + A_{r_2} \exp[i(\omega t - l_{r_2 x} x + l_{r_2 z} z)] \\ \varphi_i^{(2)} &= m_1 A_{r_1} \exp[i(\omega t - l_{r_1 x} x + l_{r_1 z} z)] + m_2 A_{r_2} \exp[i(\omega t - l_{r_2 x} x + l_{r_2 z} z)] \end{aligned}$$

$$S \text{ 波系} \quad \begin{cases} \psi_s = B_{r_s} \exp[i(\omega t - l_{r_s x} x + l_{r_s z} z)] \\ \psi_i = m_s B_{r_s} \exp[i(\omega t - l_{r_s x} x + l_{r_s z} z)] \end{cases} \quad (8b)$$

(2) $z > 0$ 部分

$$P \text{ 波系} \quad \begin{cases} \varphi_s^t = A_{t_1} \exp[i(\omega t - l_{t_1 x} x - l_{t_1 z} z)] + A_{t_2} \exp[i(\omega t - l_{t_2 x} x - l_{t_2 z} z)] \\ \varphi_i^t = m_1^t A_{t_1} \exp[i(\omega t - l_{t_1 x} x - l_{t_1 z} z)] + m_2^t A_{t_2} \exp[i(\omega t - l_{t_2 x} x - l_{t_2 z} z)] \end{cases} \quad (9a)$$

$$S \text{ 波系} \quad \begin{cases} \psi_s^t = B_{t_s} \exp[i(\omega t - l_{t_s x} x - l_{t_s z} z)] \\ \psi_i^t = m_s^t B_{t_s} \exp[i(\omega t - l_{t_s x} x - l_{t_s z} z)] \end{cases} \quad (9b)$$

式中, 下标 i, r, t 分别代表入射、反射与透射波; 下标 x, z 分别表示各波矢沿 x 方向和 z 方向的分量; m_1, m_2, m_s 和 $m_{t_1}, m_{t_2}, m_{t_s}$ 分别为气饱和土层和水饱和土层参数, 即两种不同饱和土中的流—固振幅之比例系数, 由式(6) 确定. 各波矢分量间有

$$\begin{aligned} l_{i_1 x}^2 + l_{i_1 z}^2 &= l_{i_1}^2 & l_{r_2 x}^2 + l_{r_2 z}^2 &= l_{r_2}^2 & l_{r_s x}^2 + l_{r_s z}^2 &= l_{r_s}^2 \\ l_{t_1 x}^2 + l_{t_1 z}^2 &= l_{t_1}^2 & l_{t_2 x}^2 + l_{t_2 z}^2 &= l_{t_2}^2 & l_{t_s x}^2 + l_{t_s z}^2 &= l_{t_s}^2 \end{aligned}$$

由 Snell 定理可得: 界面处各模式波 x 方向的波矢量相等, 即

$$l_{i_1 x} = l_{r_2 x} = l_{r_s x} = l_{t_1 x} = l_{t_2 x} = l_{t_s x}$$

对于该问题, 假设水气间不存在质量交换, 即不考虑气体在水相的溶解和溢出, 则在饱和土中气、水分界面存在以下连续条件.

法向总应力连续

$$\sigma_z|_{z=0^+} = \bar{\sigma}_z|_{z=0^-} \quad \tau_{xz}|_{z=0^+} = \bar{\tau}_{xz}|_{z=0^-} \quad (10a)$$

土骨架法向位移连续

$$u_z|_{z=0^+} = \bar{u}_z|_{z=0^-} \quad u_x|_{z=0^+} = \bar{u}_x|_{z=0^-} \quad (10b)$$

流体法向位移连续

$$w_z|_{z=0^+} = \bar{w}_z|_{z=0^-} \quad (10c)$$

孔隙流体压力连续

$$p_f|_{z=0^+} = \bar{p}_f|_{z=0^-} \quad (10d)$$

对各向同性饱和土体, 孔压、应力与应变之间的关系式为

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = \lambda e \delta_{ij} + 2G \epsilon_{ij} - \alpha \delta_{ij} p_f \\ p_f = -M \omega_{i,i} - \alpha M u_{i,i} \\ \epsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \end{cases} \quad (11)$$

结合式(2)和式(11)，则式(10)中的应力和流体压力也可用势函数表示为

$$\begin{cases} \sigma_z = (\lambda + \alpha^2 M) \nabla^2 \varphi_s + \alpha M \nabla^2 \varphi_f + 2G \left(\frac{\partial^2 \varphi_s}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi_s}{\partial x \partial z} \right) \\ \tau_{xz} = G \left(2 \frac{\partial^2 \varphi_s}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \psi_s}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi_s}{\partial z^2} \right) \\ p_f = -M \nabla^2 \varphi_f - \alpha M \nabla^2 \varphi_s \end{cases} \quad (12)$$

将式(8)、式(9)、式(2)和式(12)代入连续关系式(10)，即可得到3种体波土骨架部分势函数反射系数和透射系数的方程组。进一步令 $A_{i1} = 1$ 并求解，即可得到反射系数 A_{r1} 、 A_{r2} 、 A_{rs} 和透射系数 A_{t1} 、 A_{t2} 、 A_{ts} 。

3 算例分析

本节通过数值算例，分析气饱和土体中波的传播特性，讨论第一P波由气饱和土中入射到气、水界面时的反射与透射。算例中所用的土性参数见表1。

表 1 计算中所用饱和砂土特性参数

土层	ρ_s /kg·m ⁻³	ρ_f /kg·m ⁻³	n	k_p /10 ⁻¹⁰ ·m ²	λ /MPa	G /MPa	K_b /MPa	K_s /GPa	K_f /MPa	η /Pa·s ⁻¹
气饱和	2650	1.2	0.3	1	57.6	57.5	36.9	36	0.13	1.8×10 ⁻⁵
水饱和	2650	1000	0.27	1	26.2	26.1	43.6	36	2000	1.0×10 ⁻³

3.1 气饱和土中波的传播特性

第二部分从理论上简要分析了波在气饱和土与水饱和土中传播的差异，这里将进一步通过数值算例对比说明波在气饱和土体中的传播特性。气饱和土与水饱和土中波传播和衰减与频率的关系曲线见图2和图3。由图2可知，与图3中水饱和土中结果相比，气饱和土中P₁波速度显著降低，主要是因为气体压缩性强，在土体压缩时对土骨架没有推动作用；P₁波和S波频散现象消失，说明气饱和情况下流体与固体基本达到完全解耦；P₂波依然

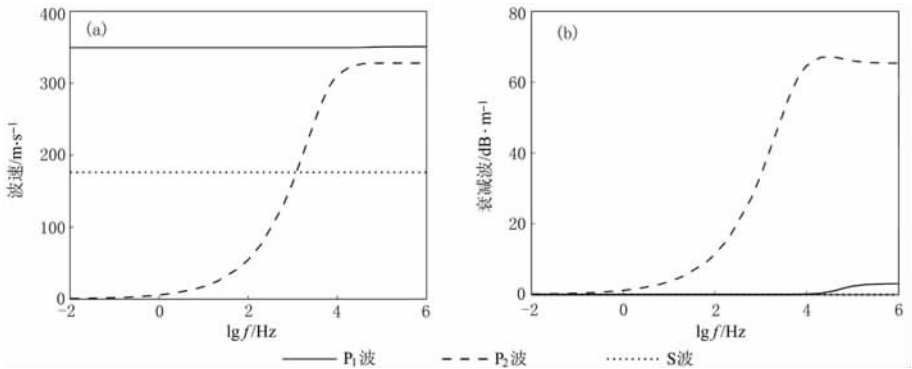


图 2 气饱和土中波的传播(a)与衰减(b)曲线

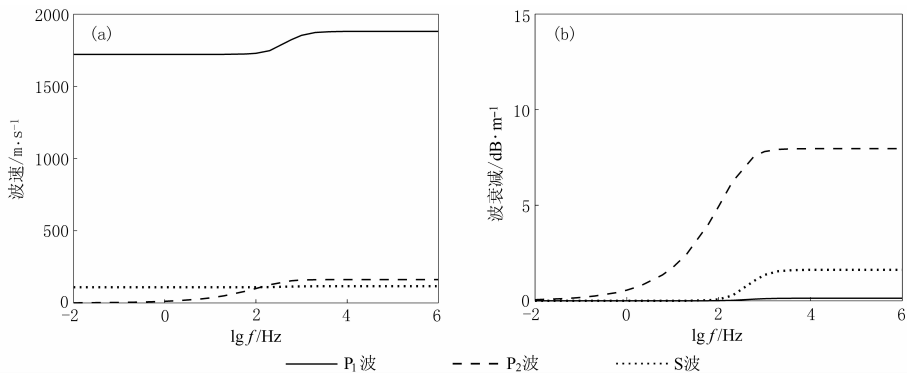


图 3 水饱和土中波的传播(a)与衰减(b)曲线

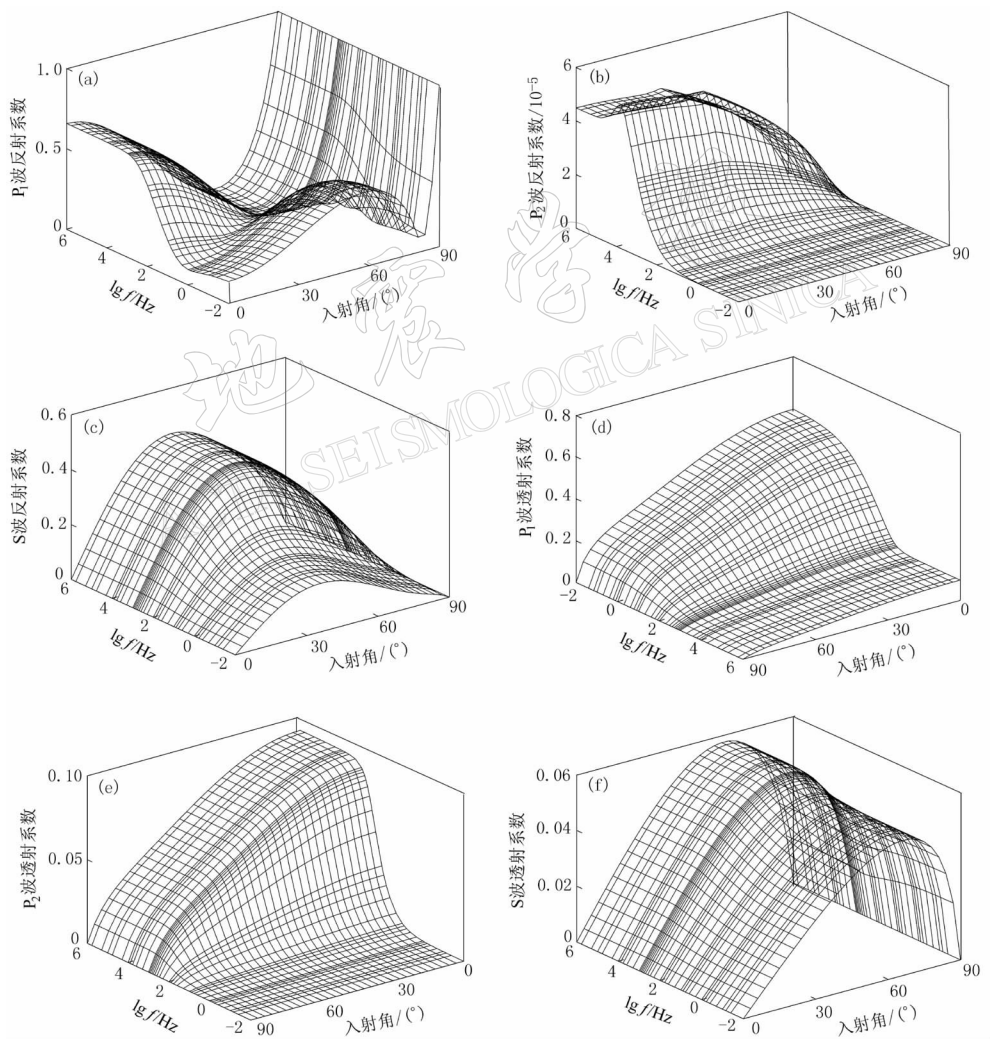


图 4 反射系数、透射系数与入射角和频率的关系曲线

(a) P_1 波反射系数；(b) P_2 波反射系数；(c) S 波反射系数；(d) P_1 波透射系数；(e) P_2 波透射系数；(f) S 波透射系数

为高频散波,但其传播速度有所增长,高频时超过了 S 波速度接近 P_1 波速度,而水饱和土中 P_2 波速度与剪切波速度相当.气饱和土中由于气体粘滞性比水要小得多,与土体的粘性耦合作用减弱, P_1 波和 S 波基本无衰减; P_2 波衰减则比水饱和土中有所增加,且主要为高频波,体现出气体与土骨架的惯性耦合作用,此时 P_2 波的传播不能忽略.

3.2 入射 P_1 波在饱和土气、水界面的反射与透射

本节给出了反射及透射系数与频率($10^{-2} \sim 10^6$ Hz)和入射角($0^\circ \sim 90^\circ$)的三维数值结果.频率和入射角对反射系数和透射系数的影响曲线见图 4a~f.图中表明,入射角的变化对各模式波的反射系数与透射系数均有较大影响.高频时反射 P_1 波幅值随着入射角的增大而减小,尔后增大;低频时则在入射角约 55° 时会出现一个峰值.透射 P_1 波及反射与透射 P_2 波幅值则均随入射角增大而减小. S 波的反射系数和透射系数在入射角约 60° 时达到最大.当入射角为 0° 时,则无反射和透射 S 波;当入射角为 90° 时,只存在反射 P_1 波,这与弹性固体情况相同.除 P_2 波外,各模式波的反射系数均大于透射系数.

由图 4 可见,频率对压缩波的反射和透射系数影响显著,剪切波透射系数基本不随频率变化,这与剪切波低频散的特性相吻合.当频率很低时,反射与透射 P_2 波幅值均很小,这与 P_2 波的传播特征相符.值得提出的是高频时透射 P_2 波幅值超过了透射 S 波幅值,这与气饱和土中高频时 P_2 波速度高于 S 波速度相吻合,主要是由于气饱和土中气固耦合作用减弱而 P_2 波分量增加所致,这一结果是与前人研究结果所不相同的.

4 结论

本文采用修改的 Biot 模型数值分析了地震波在气饱和土中的传播特性,进而研究了气饱和土中 P_1 波以某一任意角度 θ 入射到气、水界面时反射系数和透射系数与入射角及频率的关系.结果表明,气饱和土中 P_1 波速度比在水饱和土中显著降低; P_2 波速度在高频时超过 S 波速度接近 P_1 波速度;且 P_1 波和 S 波频散现象消失,说明气饱和情况下流体与固体颗粒基本达到完全解耦.入射角对反射系数与透射系数均有较大影响;低频时反射与透射 P_2 波幅值均很小,高频时 P_2 波透射系数超过了 S 波透射系数.

参 考 文 献

- 胡亚元,王立忠,陈云敏,等. 1998. 弹性波在横向各向同性弹性土和饱和土界面上的反射与透射[J]. 地震学报, **20**(6): 598~606
- 李伟华. 2002. 饱和度对波在土层交界面的反射、透射系数的影响[J]. 西北地震学报, **24**(4): 303~309
- 乔文孝,王宁,严炽培. 1992. 声波在两种多孔介质界面上的反射和透射[J]. 地球物理学报, **35**(2): 242~248
- 杨峻,吴世明,蔡袁强. 1996. 饱和土中弹性波的传播特性[J]. 振动工程学报, **9**(2): 128~137
- 杨峻,吴世明. 1997. 地震波在饱和土层界面的反射与透射[J]. 地震学报, **19**(1): 29~35
- 叶陈江,史焱永,蔡袁强. 2005. S 波由饱和土入射于弹性土时在界面上的反射与透射[J]. 振动与冲击, **24**(2): 42~45
- 赵成刚,高福平,崔杰. 1999. 波在饱和多孔介质与弹性固体介质交界面上的界面效应[J]. 地震工程与工程振动, **19**(1): 2~6
- Attenborough K, Richards T L. 1989. Solid particle motion induced by a point source above a poroelastic half-space[J]. *J Acoust Soc Amer*, **86**(3): 1 085~1 092
- Biot M A. 1962. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media[J]. *J Appl Phys*, **33**(4): 1 482~1 498
- Deresiewicz H, Levy A. 1967. The effect of boundaries on wave propagation in a liquid-filled porous solid: χ . *Transmis-*

- sion through a stratified media[J]. *Bull Seismol Soc Amer*, **57**(3): 381~392
- Donald G A. 1993. A comparison between wave propagation in water-saturated and air-saturated porous materials[J]. *J Appl Phys*, **73**(1): 28~36
- Hajra S, Mukhopodhyay A. 1982. Reflection and refraction of seismic waves incident obliquely at the boundary of a liquid-saturated porous solid[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **72**(5): 1 509~1 533
- Lin Chi-Hsin, Lee V W, Trifunac M D. 2005. The reflection of plane waves in a poroelastic half-space saturated with inviscid fluid[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **25**: 205~223
- Philippacopoulos A J. 1987. Waves in a partially saturated layered half-space, analytical formulation[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **77**(5): 908~923
- Yang Jun. 2000. Influence of water saturation on horizontal and vertical motion at a porous soil interface induced by incident P wave[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **19**: 575~581
- Stoll R D, Kan T K. 1991. Reflection of acoustic wave at a water-sediment interface[J]. *J Acoust Soc Am*, **70**(1): 149~156

SEISMIC REFLECTION AND TRANSMISSION COEFFICIENTS AT AN AIR-WATER INTERFACE OF SATURATED POROUS SOIL

Zhou Xinmin¹⁾ Xia Tangdai¹⁾ Xu Ping¹⁾ Zou Zhenxuan²⁾

1) Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

2) Earthquake Administration of Zhejiang Province, Hangzhou 310013, China

Abstract: Based on the modified Biot's theory of two-phase porous media, a study was presented on seismic reflection and transmission coefficients at an air-water interface of saturated porous soil media. The major differences between air-saturated soils and water-saturated soils were theoretically discussed, the theoretical formulas of reflection and transmission coefficients at an air-water interface were derived. The characteristics of propagation and attenuation of elastic waves in air-saturated soils were given and the relations among the frequency, the angle of incidence and the reflection, transmission coefficients were analyzed by using numerical methods. Numerical results show that the propagation characteristic of the wave in air-saturated soils is great different from that of wave in water-saturated soils. The frequency and the angle of incidence can have great influences on the reflection and transmission coefficients at interface. Some new cognition about the wave propagation is obtained and the study suggests that we may carefully pay attention to the influence of air on the dynamic analysis of seismic wave.

Key words: seismic wave; air-saturated soils; propagation characteristics; reflection and transmission