

文章编号: 1000-7598-(2008)09-2359-06

淤砂层模型对上层理想流体动力反应的影响——平面 SV 波入射

王进廷, 张楚汉, 金 峰

(1. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 采用解析方法, 分析了平面 SV 波斜入射时弹性半空间-淤砂层-理想流体层系统的动力反应, 其中将淤砂层分别模拟为线弹性固体、黏弹性固体、理想流体和黏性流体等不同特性的介质, 并与将淤砂层模拟为两相多孔介质的计算结果进行了比较。研究表明在平面 SV 波斜入射的情况下, 当渗透系数很小时, 多孔介质可以近似简化为黏弹性固体。

关 键 词: 弹性半空间; 淤砂层; 理想流体; 平面 SV 波; 动力反应

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Effect of sediment model on dynamic pressures of overlying ideal fluid due to SV wave incidence

WANG Jin-ting, ZHANG Chu-han, JIN Feng

(State Key Laboratory of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Through the analytical solutions, the dynamic responses of elastic half-space-sediment-ideal fluid system due to SV wave incidence are investigated. The sediment is modelled respectively as the elastic solid, viscoelastic solid, ideal fluid and viscous fluid. The results obtained are compared with the case in which sediment is viewed as a two-phase poroelastic medium. It is found that the two-phase poroelastic medium can be simplified approximately as a viscoelastic solid when its permeability is relatively small ($k \leq 10^{-3}$ m/s).

Key words: elastic half-space, sediment layer, ideal fluid, SV wave, dynamic response

1 引 言

高坝地震反应特性会受到多种因素的影响, 因素之一就是水库运行一段时间以后在坝前形成的淤砂层。一般认为, 淤砂层是一种两相多孔介质, 应采用多孔介质模型进行模拟^[1-4]。但由于两相多孔介质模型, 不仅含有固相未知量, 而且含有液相未知量, 明显要比固体介质模型复杂, 因此, 能否将多孔介质模型简化为固体介质, 甚至流体介质, 成为一些研究者关注的问题。Maeso 等人^[5]比较了在拱坝-库水-淤砂-地基系统地震反应分析中将两相多孔介质简化为黏弹性介质和流体介质时坝体动力反应的差异。

在文献[6]中, 笔者以弹性半空间—淤砂层—理

想流体层为对象, 采用解析方法, 分别将淤砂层模拟固体介质和流体介质, 分析了平面 P 波入射时上层理想流体的动力反应特性, 与将淤砂层模拟为两相多孔介质的情况进行了比较。为了全面分析高坝-库水-淤砂-地基系统地震反应分析中将两相多孔介质简化为固体介质的合理性及其适用范围, 本文按照相似的思路, 继续对平面 SV 斜入射时的情况进行分析, 研究将淤砂层模拟为弹性固体介质、黏弹性固体介质、理想流体和黏性流体, 与将淤砂层模拟为两相多孔介质时^[7]上层理想流体动力反应的差异。

2 基本理论

为了方便比较, 考虑与文献[6, 7]相同的平面

收稿日期: 2006-12-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50309005)。

作者简介: 王进廷, 男, 1973 年生, 博士, 副教授, 主要从事水利水电工程结构抗震研究。E-mail: wangjt@mail.tsinghua.edu.cn

应变问题,如图1所示。淤砂层厚度为 h , 淤砂层与理想流体的总厚度为 H 。取 x 轴平行于弹性半空间-淤砂层交界面, 而 y 轴为交界面的法线方向。

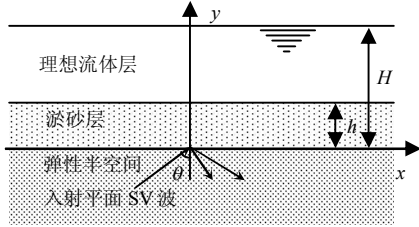


图1 弹性半空间-淤砂层-理想流体层模型

Fig.1 Elastic half-space-sediment-ideal fluid system

2.1 波动方程

2.2.1 固体介质模型

固体介质采用Kelvin模型, 波动方程为

$$(\lambda_e + \mu_e) \nabla \nabla \mathbf{u}_s + (\lambda_v + \mu_v) \nabla \nabla \dot{\mathbf{u}}_s + \mu_e \nabla^2 \mathbf{u}_s + \mu_v \nabla^2 \dot{\mathbf{u}}_s = \rho_s \ddot{\mathbf{u}}_s \quad (1)$$

式中: $\mathbf{u}_s$, $\dot{\mathbf{u}}_s$, $\ddot{\mathbf{u}}_s$ 分别为固体介质的位移、速度和加速度向量; ρ_s 为固体介质密度; λ_e , μ_e 均为拉梅弹性模量; λ_v , μ_v 均为黏性模量。对于线弹性固体材

料取 $\lambda_v = \mu_v = 0$, 若 λ_v , μ_v 不为 0, 则为黏弹性固体。

2.2.2 流体介质模型

流体波动方程可以表示为

$$K_e \nabla \nabla \mathbf{U}_f + K_v \nabla \nabla \dot{\mathbf{U}}_f = \rho_f \ddot{\mathbf{U}}_f \quad (2)$$

式中: $\mathbf{U}_f$, $\dot{\mathbf{U}}_f$, $\ddot{\mathbf{U}}_f$ 分别为流体介质的位移、速度和加速度向量; ρ_f 为流体密度; K_e , K_v 分别为弹性体积模量和黏弹性体积模量, 对于理想流体取 $K_v = 0$ 。

2.2 边界条件

(1) 固体与固体交界面位移连续; (2) 固体与固体交界面应力平衡; (3) 固体与流体交界面法向位移连续; (4) 固体与流体交界面法向力平衡; (5) 固体与流体交界面切向力为 0; (6) 流体与流体交界面法向位移连续; (7) 流体与流体交界面压强相等; (8) 流体自由表面压力为 0。

2.3 交界面透射与反射系数

按照文献[6, 7]的方法, 基于固体介质的势函数和流体介质的势函数, 并结合各交界面的边界条件, 可以建立 SV 波从弹性半空间斜入射时, 求解波在弹性半空间-淤砂层-理想流体层系统中透射与反射系数的理论公式。将淤砂层模拟为固体介质和流体介质时, 这一公式分别为

$$\begin{bmatrix} l_{1py} & l_x & l_{2py} & -l_x & -l_{2py} & -l_x & 0 & 0 \\ -l_x & l_{1sy} & l_x & l_{1sy} & l_x & -l_{1sy} & 0 & 0 \\ -a_1 & -b_1 & a_2 & -b_2 & a_2 & b_2 & 0 & 0 \\ d_1 & e_1 & d_2 & -e_2 & d_2 & e_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -l_{2py}f_2(-h) & l_xg_2(-h) & l_{2py}f_2(h) & l_xg_2(-h) & l_{3py}f_3(-h) & -l_{3py}f_3(h) \\ 0 & 0 & -a_2f_2(-h) & b_2g_2(-h) & -a_2f_2(h) & -b_2g_2(h) & \rho_f\omega^2f_3(-h) & \rho_f\omega^2f_3(h) \\ 0 & 0 & -d_2f_2(-h) & e_2g_2(-h) & d_2f_2(h) & e_2g_2(h) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_3(-H) & f_3(H) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_{1sr} \\ B_{1sr} \\ A_{2si} \\ B_{2si} \\ A_{2sr} \\ B_{2sr} \\ A_{3fi} \\ A_{3fr} \end{Bmatrix} = B_{1si} \begin{Bmatrix} -l_{1x} \\ l_{1sy} \\ -b_1 \\ -e_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} l_{1py} & l_x & l_{2py} & -l_{2py} & 0 & 0 \\ a_1 & b_1 & \rho_{2f}\omega^2 & \rho_{2f}\omega^2 & 0 & 0 \\ d_1 & e_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -l_{2y}f_2(-h) & l_{2y}f_2(h) & l_{3y}f_3(-h) & -l_{3y}f_3(h) \\ 0 & 0 & \rho_{2f}f_2(-h) & \rho_{2f}f_2(h) & -\rho_{2f}f_3(-h) & -\rho_{2f}f_3(h) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & f_3(-H) & f_3(H) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_{1sr} \\ B_{1sr} \\ A_{2fi} \\ A_{2fr} \\ A_{3fr} \\ A_{3fr} \end{Bmatrix} = B_{1si} \begin{Bmatrix} -l_x \\ -b_1 \\ -e_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中: 下标 1 表示弹性半空间参数, 下标 2 表示淤砂层(固体或流体)参数, 下标 3 表示上层理想流体参数; $a_n = \lambda_n l_x^2 + (\lambda_n + 2\mu_n) l_{npy}^2$, $b_n = 2\mu_n l_x l_{npy}$, $d_n = 2\mu_n l_x l_{npy}$, $e_n = \mu_n (l_x^2 - l_{npy}^2)$, $f_n(y) = \exp(il_{npy}y)$, $g_n(y) = \exp(il_{nsy}y)$, $\lambda_n = \lambda_{ne} + i\omega\lambda_{nv}$, $\mu_n = \mu_{ne} + i\omega\mu_{nv}$, 其中下标 $n=1, 2$ 或 3; $i=\sqrt{-1}$, t 为时间变量; l_x 为 x 方向波数; l_{py} 和 l_{sy} 表示介质中 P 波和 S 波在 y 方向的波数。 A_{si} , A_{sr} , B_{si} , B_{sr} 分别为介质中沿 y

轴正向和负向传播 P 波和 SV 波的波幅值。

通过求解关于交界面透射与反射系数的方程式 (3) 和式 (4), 就可以得到平面 SV 波从弹性半空间斜入射时, 淤砂层和上层理想流体的动力反应。

3 算例分析

考虑图 1 所示的计算模型, 其中 $H=120$ m, $h=0.3H$ 。取弹性半空间质密度 $\rho_s = 2483$ g/cm³, 拉

梅常数 $\lambda = 15.3 \text{ GPa}$, $\mu = 7.65 \text{ GPa}$ 。上层理想流体密度为 $\rho_f = 1.0 \text{ g/cm}^3$, 体积模量 $K = 2.0 \text{ GPa}$ 。淤砂层参数取值与文献[6]相同, 与两相多孔介质材料参数相对应的黏弹性固体密度 $\rho_{2s} = 1.656 \text{ g/cm}^3$ 、弹性和黏性模量如表 1 所示, 当模拟为弹性固体时, 取其中的黏性模量为 0。当将淤砂层模拟为黏性流体时, 选取其密度与黏弹性固体相同, 而弹性和黏性模量, 根据黏弹性固体介质的黏性和弹性模量按 $K_e = \lambda_e + 2\mu_e$, $K_v = \lambda_v + 2\mu_v$ 选取, 以保证其波速与黏弹性介质中的 P 波波速相同, 对于理想流体, 则取 $K_v = 0$ 。取入射 SV 波位移势函数幅值 $B_{si} = g/(\omega^2 l_{is})$ (l_{is} 为弹性半空间 SV 波波数), 分析不同淤砂层模型时上层理想流体反应的差异, 其中作为比较对象的两相多孔介质计算结果均引自文献[7]。

表 1 淤砂层材料参数
Table 1 Parameters of sediment layer

两相多孔介质		黏弹性固体介质			
饱和度	渗透系数 k / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	λ_{2e} / GPa	μ_{2e} / MPa	λ_{2v} / Pa · s	μ_{2v} / Pa · s
1.000	0.001	3.351 3	7.703 6	$8.382 6 \times 10^4$	$4.742 0 \times 10^2$
1.000	0.010	3.351 3	7.703 6	$8.382 6 \times 10^5$	$4.742 0 \times 10^3$
1.000	0.100	3.351 3	7.703 6	$8.382 6 \times 10^6$	$4.742 0 \times 10^4$
0.995	0.001	0.369 0	7.703 6	$5.258 6 \times 10^3$	$4.742 0 \times 10^2$
0.995	0.010	0.369 0	7.703 6	$5.258 6 \times 10^4$	$4.742 0 \times 10^3$
0.995	0.100	0.369 0	7.703 6	$5.258 6 \times 10^5$	$4.742 0 \times 10^4$

3.1 饱和淤砂层

图 2、图 3 为将渗透系数 $k = 10^{-3} \text{ m/s}$ 的饱和淤砂层分别模拟为弹性固体和黏弹性固体、理想流体和黏性流体介质与模拟为两相多孔介质时, 在上层理想流体中 $y/H = 0.5$ 处动压力的对比, 图中纵坐标轴表示无量纲压力 $p/(\rho_f gH)$, 横坐标轴表示无量纲频率 ω/ω_1 , 其中上层理想流体层第一阶自振频率 $\omega_1 = \pi c_f/(2H)$, c_f 为波速。从图中可以看出, 当 $k = 10^{-3} \text{ m/s}$ 时, 淤砂层为黏弹性固体时, 上层理想流体的动力反应与模拟为两相多孔介质时的计算结果重合, 而将淤砂层模拟为黏性流体时, 由于流体只能传播 P 波, 只体现了两相多孔介质中 P 波的传播特性, 所以其计算结果与模拟为两相多孔介质的计算结果有明显的差异。进一步对比将淤砂层模拟为黏弹性固体和线弹性介质的计算结果, 以及模拟为黏性流体和理想流体的计算结果, 可以发现黏性流体与理想流体的计算结果完全重合, 而模拟为线弹性与黏弹性的计算结果却有一定差异, 说明这时两相多孔介质中的 P 波衰减很小, 而 SV 波有较明显的衰减。

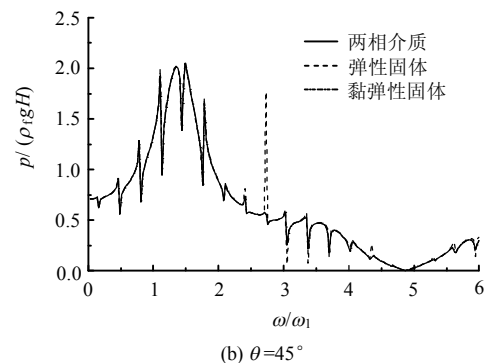
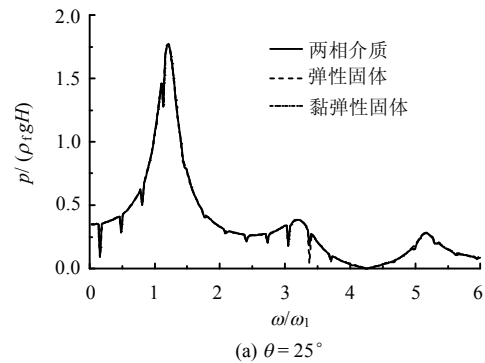


图 2 饱和淤砂层模拟为固体介质时上层流体动压力
Fig.2 Dynamic pressures when saturated sediment is modelled as solid ($k=10^{-3} \text{ m/s}$, $y/H=0.5$)

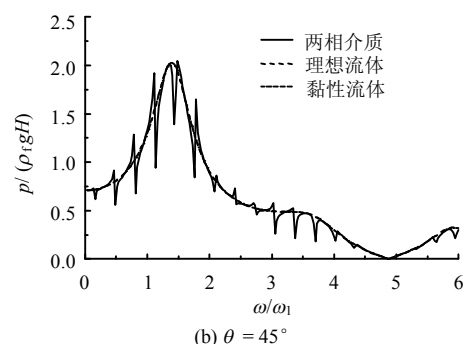
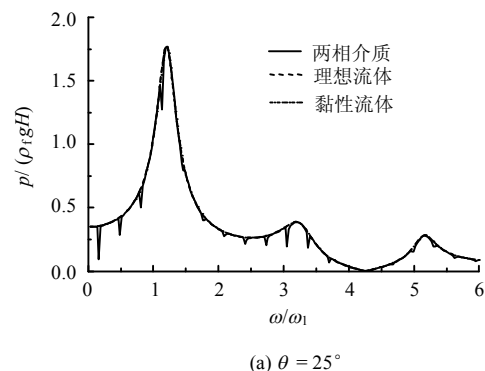


图 3 饱和淤砂层模拟为流体介质时上层流体动压力
Fig.3 Dynamic pressures when saturated sediment is modelled as fluid ($k=10^{-3} \text{ m/s}$, $y/H=0.5$)

图 4 和图 5 为将渗透系数 $k = 10^{-2} \text{ m/s}$, $k = 10^{-1} \text{ m/s}$ 的饱和淤砂层模拟为线弹性固体和黏弹性固体与模拟为两相多孔介质时, 在上层理想流体中 $y/H=0.5$ 处动压力的对比。从图 4 可以看出, 当 $k=10^{-2}$

m/s, 与 $k=10^{-3}$ m/s 时相比, 由于两相多孔介质渗透系数的增加, 其中的 P 波和 SV 波的衰减都有所增加, 将淤砂层模拟为线弹性固体介质时与模拟为两相多孔介质时的计算结果差异更大, 而模拟为黏弹

性固体时的计算结果与模拟为两相多孔介质的计算结果基本重合, 说明这时黏弹性介质仍可以较好地模拟两相多孔介质的特性。但从图 5 可以看出, 当 $k=10^{-1}$ m/s 时, 即使是模拟为黏弹性介质时与模拟为两相多孔介质的计算结果也有了很大差异, 说明这时黏弹性介质也已经不能表征两相多孔介质的特性, 不宜再将两相多孔介质简化为黏弹性固体进行分析计算, 否则计算结果会有很大的误差。

3.1 非饱和和淤砂层

图 6 和图 7 为将渗透系数 $k=10^{-3}$ m/s 的非饱和淤砂层分别模拟为弹性固体和黏弹性固体、理想流体和黏性流体介质与模拟为两相多孔介质时, 在上层理想流体中 $y/H=0.5$ 处动压力的对比。从图中可以看出, 非饱和和两相多孔介质中 P 波波速明显减小, 使得上层流体反应的峰值频率前移, 明显小于饱和淤砂层情况 (图 2)。与饱和淤砂层时相类似, 将非淤砂层模拟为黏弹性固体时的计算结果与模拟为两相多孔介质的计算结果重合, 而将非饱和淤砂层模拟为只能传播 P 波的黏性流体介质时, 由于淤砂层中少了 SV 波的作用, 得到的结果明显不同。通过对比黏性固体、线弹性固体的计算结果以及黏性流体、理想流体的计算结果, 同样可以看出: 对于非饱和淤砂层仍然是 P 波的衰减减小, 而 SV 波的衰减较大, 所以黏性流体与理想流体的计算结果重合, 而模拟为线弹性固体时, 上层理想流体由于 SV 波作用引起的反应要比模拟为黏弹性固体时大。

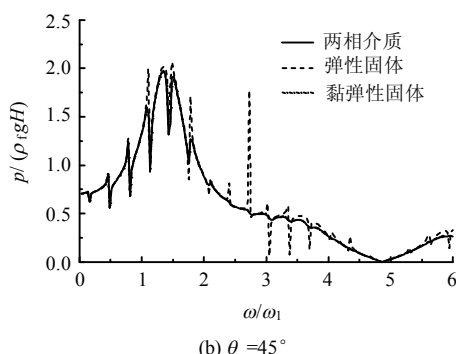
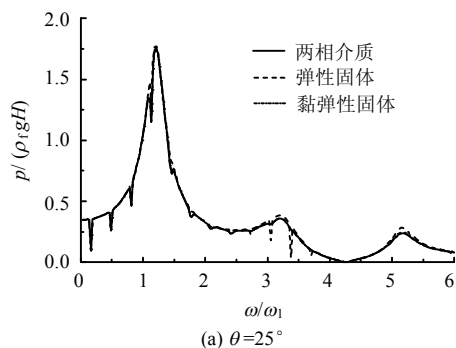


图 4 $k=10^{-2}$ m/s 饱和淤砂层时上层流体动压力($y/H=0.5$)
Fig.4 Dynamic pressures when saturated sediment with a permeability $k=10^{-2}$ m/s is modelled as solid

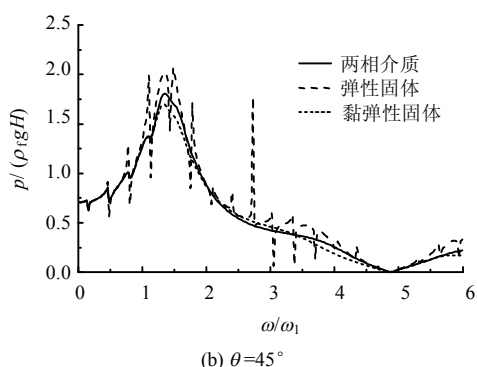
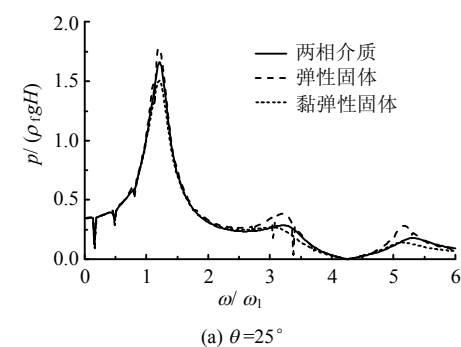


图 5 $k=10^{-1}$ m/s 饱和淤砂层时上层流体动压力($y/H=0.5$)
Fig.5 Dynamic pressures when saturated sediment with a permeability $k=10^{-1}$ m/s is modelled as solid($y/H=0.5$)

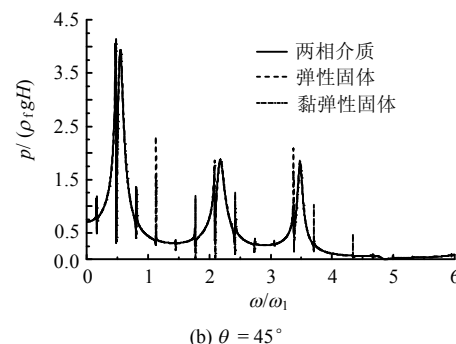
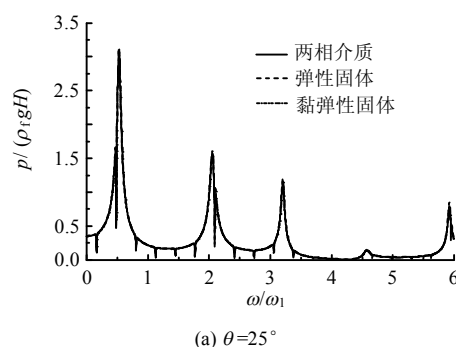


图 6 非饱和淤砂层模拟为固体介质时上层流体动压力
Fig.6 Dynamic pressures when unsaturated sediment is modelled as solid ($k=10^{-3}$ m/s, $y/H=0.5$)

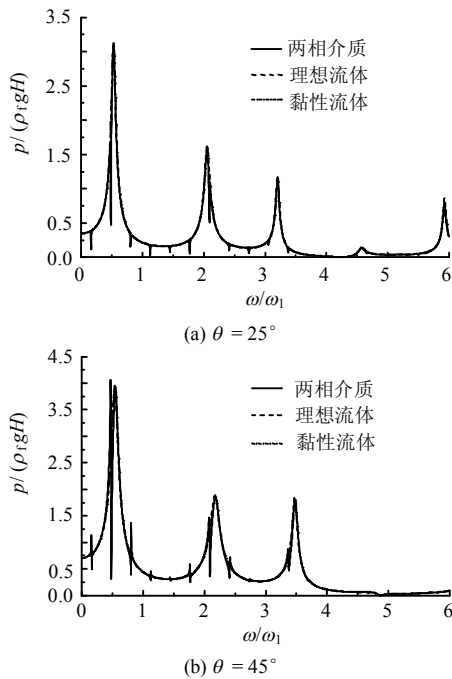


图7 非饱和淤砂层模拟为流体介质时上层流体动压力
Fig.7 Dynamic pressures when unsaturated sediment is modelled as fluid ($k=10^{-3}$ m/s, $y/H=0.5$)

图8和图9为分别将渗透系数 $k=10^{-2}$ m/s, $k=10^{-1}$ m/s 的非饱和淤砂层模拟为线弹性固体和黏弹性固体与模拟为两相多孔介质时, 在上层理想流体中 $y/H=0.5$ 处动压力的对比。

随着渗透系数的增加, 淤砂层中 P 波的衰减也增强, 所以从渗透系数 $k=10^{-2}$ m/s 时 (图7) 可以看出, 黏弹性固体仍能较好地模拟两相多孔介质的特

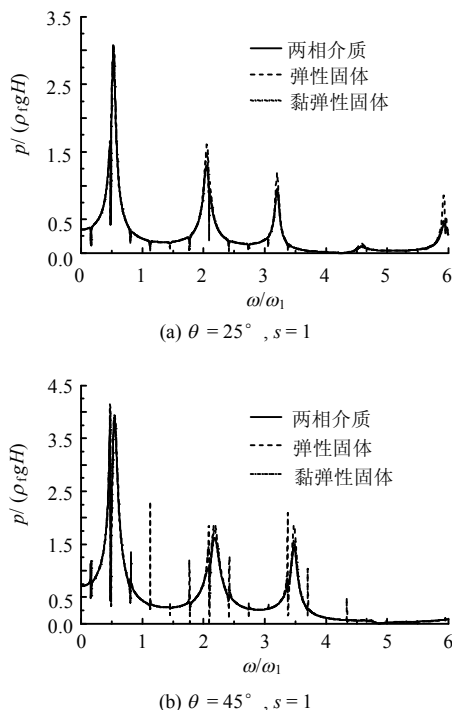


图8 $k=10^{-2}$ m/s 非饱和淤砂层时上层流体动压力 ($y/H=0.5$)
Fig.8 Dynamic pressures when unsaturated sediment with a permeability $k=10^{-2}$ m/s is modelled as solid

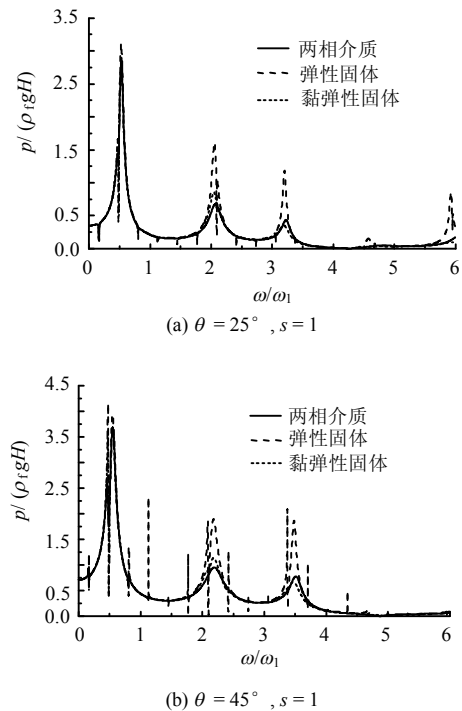


图9 $k=10^{-1}$ m/s 非饱和淤砂层时上层流体动压力 ($y/H=0.5$)
Fig.9 Dynamic pressures when unsaturated sediment with a permeability $k=10^{-1}$ m/s is modelled as solid

性, 上层流体计算结果与模拟为两相多孔介质的结果基本重合, 而将淤砂层模拟为线弹性介质时, 计算结果的差异已经不仅仅是对于由 SV 波作用引起的反应要比模拟为黏弹性固体时大, 而且对于由于 P 波引起的反应也明显要大。当渗透系数 $k=10^{-1}$ m/s 时, 弹性固体计算结果要比两相多孔介质的计算结果更大, 这时黏弹性模型高估了两相多孔介质的能量衰减的作用, 计算结果偏小, 说明这时将淤砂层模拟为黏弹性介质也已经不再合适, 计算分析宜采用两相多孔介质模型。

4 结 论

采用解析方法, 本文分析了平面 SV 波斜入射时弹性半空间-淤砂层-理想流体层系统的动力反应, 其中将淤砂层分别模拟为线弹性固体、黏弹性固体、理想流体和黏性流体等不同特性的介质, 并与将淤砂层模拟为两相多孔介质的计算结果进行了比较, 可得以下一些结论:

(1) 当多孔介质淤砂层的渗透系数较小 ($k \leq 10^{-2}$ m/s) 时, 黏弹固体介质可以很好地模拟多孔介质的特性, 而线弹性固体介质则存在一定差异, 主要是由于没有考虑两相多孔介质 SV 波的衰减特性。当多孔介质淤砂层的渗透系数较大时 (如 $k=10^{-1}$ m/s) 时, 即使是黏弹性固体介质也不能够反映两相多孔介质的主要特性, 计算结果与多孔介质的

计算结果有一定差异,这时不宜再将多孔介质简化为固体介质进行处理。

(2) 由于 SV 波斜入射时,两相多孔介质中 SV 波对上层理想流体的作用非常明显,而流体介质不能够模拟两相多孔介质的这种作用,所以不论是模拟为理想流体还是黏性流体,计算结果与模拟多孔介质的计算结果差异都比较大。

(3) 根据以上结论,建议在高坝-库水-淤砂层-地基系统地震反应分析时,可以根据淤砂层的渗透系数与饱和度,选择采用两相多孔介质模型和简化的黏弹性固体介质模型,以提高计算分析效率。

参考文献

- [1] CHENG A H D. Effect of sediment on earthquake-induced reservoir hydrodynamic response [J]. **Journal of Engineering Mechanics, ASCE**, 1986, 112(7):654—665.
- [2] DOMINGUEZ J, GALLEGO R, JAPON B R. Effects of porous sediments on seismic response of concrete gravity dams [J]. **Journal of Engineering Mechanics, ASCE**, 1997, 123(4): 302—311.
- [3] 王进廷, 杜修力, 张楚汉. 重力坝-库水-淤砂-地基系统动力分析的时域显式有限元模型[J]. 清华大学学报, 2003, 43(8): 1 112—1 115.
- [4] ZHANG CHUHAN, YAN CHENGDA, WANG GUANGLUN. Numerical simulation of reservoir sediment and effects on hydro-dynamic response of arch dams [J]. **Earthquake Engineering and Structure Dynamics**, 2001, (30): 1 817—1 837.
- [5] MAESO O, AZMAREZ J J, DOMINNGUEZ J. Three-dimensional models of reservoir sediment and effects on the seismic response of arch dams [J]. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 2004, (33): 1 103—1 123.
- [6] 王进廷, 张楚汉, 金峰. 淤砂层模拟方法对上层理想流体动力反应的影响—平面 P 波入射 [J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2 065—2 070.
- [7] 王进廷. 多层多相介质动力分析研究[R]. 北京: 清华大学博士后研究报告, 2003.
- [8] WANG Jin-ting, ZHANG Chu-han, JIN Feng. Effect of sediment model on dynamic pressure in overlying ideal fluid due to p wave incidence[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(10): 2 065—2 070.
- [9] 王进廷. 多层多相介质动力分析研究[R]. 北京: 清华大学博士后研究报告, 2003.
- [10] LI Chuan-liang, KONG Xiang-yan, DU Zhi-min, et al. A study on the rheological model of porous media[J]. **Acta Mechanica Sinica**, 2003, 35(2): 230—234.
- [11] 李培超, 孔祥言, 卢德唐. 饱和多孔介质流固耦合渗流的数学模型[J]. 水动力学研究与进展, 2003, 18(4): 419—426.
- [12] LI Pei-chao, KONG Xiang-yan, LU De-tang. Mathematical modeling of flow in saturated porous media on account of fluid-structure coupling effect[J]. **Journal of Hydrodynamics**, 2003, 18(4): 419—426.
- [13] 李传亮, 孔祥言, 徐献芝, 等. 多孔介质的双重有效应力 [J]. 自然杂志, 1999, 21(5): 288—292.
- [14] LI Chuan-liang, KONG Xiang-yan, XU Xian-zhi, et al. Double effective stresses of porous media[J]. **Nature Magazine**, 1999, 21(5): 288—292.
- [15] 李传亮, 孔祥言, 杜志敏, 等. 多孔介质的流变模型研究 [J]. 力学学报, 2003, 35(2): 230—234.
- [16] 王永岩, 魏佳, 齐珺, 等. 深部岩体非线性蠕变变形预测的研究[J]. 煤炭学报, 2005, 30(4): 409—413.
- [17] WANG Yong-yan, WEI Jia, QI Jun, et al. Study on prediction for nonlinear creep deformation of deep rocks[J]. **Journal of China Coal Society**, 2005, 30(4): 409—413.

上接第 2358 页