

宋星, 兰景岩. 2020. 基于动力有限差分法的典型海域自由场二维地震反应分析. 地震学报, 42(6): 769-780. doi: 10.11939/jass.20190191.

Song X, Lan J Y. 2020. Two dimensional seismic responses of free field in typical seafloor site based on finite difference method. *Acta Seismologica Sinica*, 42(6): 769-780. doi: 10.11939/jass.20190191.

基于动力有限差分法的典型海域自由场 二维地震反应分析^{*}

宋 星^{1,2)} 兰景岩^{1,2), †}

1) 中国广西桂林 541004 桂林理工大学土木与建筑工程学院

2) 中国广西桂林 541004 桂林理工大学广西岩土力学与工程重点实验室

摘要 以我国近海海域工程场地为研究对象, 充分考虑上覆海水的自重影响, 构建典型的饱和海底自由场计算模型, 运用动力有限差分法开展二维地震反应分析, 探讨以不同幅值的 SV 波、P 波作为基底输入条件下上覆海水厚度对海底地震动峰值和反应谱的影响, 总结上覆有水和无水场地的地震动结果差异, 并分析差异产生的原因. 结果表明: 当基底输入 SV 波时, 上覆有水场地海床表面峰值加速度小于上覆无水场地地表峰值加速度, 海水层厚度对峰值加速度的影响可以忽略; 当基底输入 P 波时, 上覆有水场地海床表面峰值加速度大于上覆无水场地地表峰值加速度, 且随着海水层厚度的增大, 海床表面峰值加速度逐渐减小.

关键词 海域饱和场地 上覆海水 地震反应分析 地震动参数

doi: 10.11939/jass.20190191 中图分类号: P315.9 文献标识码: A

Two dimensional seismic responses of free field in typical seafloor site based on dynamic finite difference method

Song Xing^{1,2)} Lan Jingyan^{1,2), †}

1) College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guangxi Guilin 541004, China

2) Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology,
Guangxi Guilin 541004, China

Abstract: Taking the engineering site in the offshore area of China as the research object, the typical calculation model of saturated submarine free field is constructed after fully considered the influence of self-weight stress of overlying sea water, and the dynamic finite difference method is implemented to carry out two-dimensional seismic response analysis. In this paper, we discussed the influence of the thickness of overlying sea water on the peak ground motion value and response spectrum of seafloor under the condition that SV and P waves of different amplitudes are used as the input of the basement, and systematically analyzed the causes of the differences. The results show that when SV wave is input into the sea floor, the peak acceleration of the sea floor surface is smaller than that of the overlying anhydrous site surface, and the

* 基金项目 国家自然科学基金(51408559)、广西自然科学基金(2018GXNSFAA281183)和广西岩土力学与工程重点实验室开放基金(桂科能 19-Y-21-4)共同资助.

收稿日期 2019-12-31 收到初稿, 2020-03-29 决定采用修改稿.

† 通信作者 e-mail: lanjy1999@163.com



effect of the thickness of the sea water layer on the peak acceleration can be ignored; when P wave is input into the sea floor, the peak acceleration of the sea floor surface is larger than that of the overlying anhydrous site surface, and the peak acceleration of the sea floor surface gradually decreases with the thickness of the sea water layer increase.

Key words: sea saturated site; overlying sea water; seismic response analysis; ground motion parameters

引言

当前我国海洋工程正处于蓬勃发展时期,现已建成一大批跨海大桥、海底隧道、人工岛礁、海上平台等重大建设工程,我国近海海域地震活动强度大、频度高,发生过多次 $M \geq 6.0$ 强震,因此海域工程地震动及其灾害风险等研究受到科研人员的广泛关注(胡进军等, 2013)。

科研人员曾通过少量的海域地震观测记录开展了地震动特征的研究工作,认为海域地震动与陆域地震动存在显著差异(Boore, Smith, 1999; Diao *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2015, 2017; 周越等, 2016)。然而限于海上观测技术的落后以及实测记录数量的匮乏,利用少数样本进行的特征统计分析尚不成熟也不具备代表性。而后发展了一系列以数值模拟为代表的研究成果,朱镜清(1988)及朱镜清和周建(1991)认为在海域介质体系中海水可以看作理想流体,分析表明上覆海水对海床地基地震反应无实际影响。Hatayama (2003)进行了有海水和无海水地震动模拟,认为海水对地震动的影响不可忽略且瑞雷波受海水的作用非常强烈,海水层厚度越大瑞雷波受影响的周期越长。Petukhin 等(2010)分析了有海水层和无海水层两种真实的海底模型,得出当海水厚度在 5 km 以内时,海水层对瑞雷波的影响显著;当海水厚度大于 10 km 时,海水对地震动的影响可以忽略。另有研究得出海底地形和有无海水层对 S 波和瑞雷波的尾波部分影响显著,认为海域地震动模拟需要一个具有海底地形和海水层的真实模型(Nakamura *et al.*, 2012)。Li 等(2015, 2017)通过水平成层海水-孔隙土-基岩模型模拟海域地震动传播,得出陆地运动与海底运动的水平分量相似,且海底运动的竖向分量比陆上运动小很多。胡进军等(2017)认为海水对水平地震动的影响可以忽略,但竖向地震动会随着海水厚度的增加而减小。李飒等(2018)通过 ABAQUS 建立一维模型对海域两个油田场地开展了地震反应分析,得出海底地震动反应谱特征明显区别于陆地,且海底场地软弱土层对地震动的放大效应十分显著。张奎等(2018, 2019)推导出平面 P 波或 SV 波入射时海底地基场地波动的解析表达式,认为海水深度对水平位移峰值的影响较小,但共振频率会随着水层厚度的增加而增加。

当前在实际海域工程场地地震反应分析中普遍忽略上覆海水自重应力影响以及水土耦合作用(李小军, 2006),仍沿用与陆域工程一致的一维频域等效线性化方法,这与实际海域饱和二维复杂介质体系不符,有可能会降低海域工程抗震设防精度和抵抗地震风险的等级,进而影响海域工程的地震安全,造成不可逆转的经济损失和人员伤亡。鉴于此,为了研究上覆海水自重应力的影响,本文拟基于有限差分软件 FLAC3D 进行二次开发,构建典型的海水-饱和海床-基底二维有限差分数值模型,开展海域饱和土层场地二维地震反应分析,系统分析上覆海水自重应力对地震动峰值和频谱特性的影响,探讨并分析海域与陆域场地的地震反应结果之间的差异。研究成果有助于揭示海域饱和土层场地对地震动的影响机制,进一步深化和丰富这一领域的研究进展和科研成果。

1 计算模型及动力有限差分法简述

为简化计算模型, 提高模拟精度和效率, 本文将海水视为理想流体并忽略其黏性, 通过设置动水压力来实现上覆海水自重应力的影响, 建立海水-饱和海床-基底的水平成层自由场, 采用四边形单元划分动力计算区域, 土体的非线性本构模型采用摩尔-库仑屈服准则, 人工边界采用自由边界, 阻尼选取瑞雷阻尼。根据节点平衡条件建立动力方程 [式(1)], 输入地震荷载后, 采用快速拉格朗日有限差分法求解, 得到节点速度 [式(2)] 和节点位移 [式(3)] 进而计算下一节点, 重复上述过程直至计算结束。

$$\begin{aligned} M_i \ddot{u}_i^t(t) + C_i \dot{u}_i^t(t) + K_i u_i^t(t) &= F_{ix}(t), \\ M_i \ddot{v}_i^t(t) + C_i \dot{v}_i^t(t) + K_i v_i^t(t) &= F_{iy}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

式中, M 为质量矩阵, C 为阻尼矩阵, K 为刚度矩阵, u_i^t , v_i^t 为节点位移, \dot{u}_i^t , \dot{v}_i^t 为节点速度, \ddot{u}_i^t , \ddot{v}_i^t 为节点加速度, $F_i(t)$ 为节点所受外力。

$$\begin{aligned} \dot{u}_i^t\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) &= \dot{u}_i^t\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right) + \frac{\Delta t}{M} F_{ix}, \\ \dot{v}_i^t\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) &= \dot{v}_i^t\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right) + \frac{\Delta t}{M} F_{iy}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} u_i(t + \Delta t) &= u_i(t) + \Delta t \dot{u}_i\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right), \\ v_i(t + \Delta t) &= v_i(t) + \Delta t \dot{v}_i\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right). \end{aligned} \quad (3)$$

为了充分考虑上覆海水自重对地震反应分析结果的影响, 结合我国海域场地的工程地质特征, 设计并构造了四组自由场计算模型, 分别表示海域自由场上覆 0, 30, 60 和 100 m 的计算模型, 示意图如图 1 所示。参照陈宝魁(2016)的方法, 将海底第四系覆盖层设置为三层, 总厚度为 60 m, 成层土的物理力学性质参数通过渤海海域相关文献(兰景岩等, 2012)以

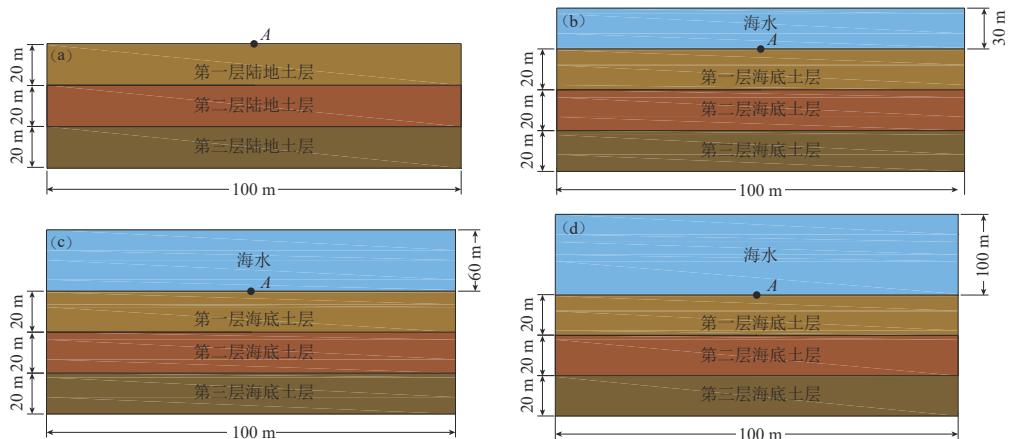


图 1 水平成层自由场模型(A 为海床表面观测点)

(a) 模型一; (b) 模型二; (c) 模型三; (d) 模型四

Fig. 1 Free-field model of horizontal soil layers (A is the measuring point on ocean surface)

(a) Model 1; (b) Model 2; (c) Model 3; (d) Model 4

及式(4)–(6)进一步计算得到, 具体参数列于表1.

$$G = v_s^2 \rho, \quad (4)$$

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G + \alpha^2 M}{\rho}} = \sqrt{\frac{\frac{G(2-2\mu')}{(1-2\mu')} + \alpha^2 Z}{\rho}}, \quad (5)$$

$$U = v_p^2 \rho + \frac{4}{3} G, \quad (6)$$

式中, G 为剪切模量, v_p 为压缩波速, U 为体积模量, μ' 为土骨架泊松比, α 为土的压缩参数, Z 为水的压缩参数.

地震动输入选取两种不同频谱特性的 Kobe 波和 El-Centro 波, 经滤波和基线调整后截取其前 20 s 的加速度时程作为基底输入, 图2 给出了输入地震波的时程曲线和频谱图. 通过调

表 1 水平成层场地土层参数

Table 1 Soil layer parameters of horizontal layered site

计算参数	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	G / MPa	K / MPa	$v_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_p / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	C / kPa	$\Phi / ^\circ$
第一层	1 700	97	478	240	1 700	10	30
第二层	2 000	226	6 130	360	1 800	10	30
第三层	2 250	951	9 330	650	2 170	6 500	45

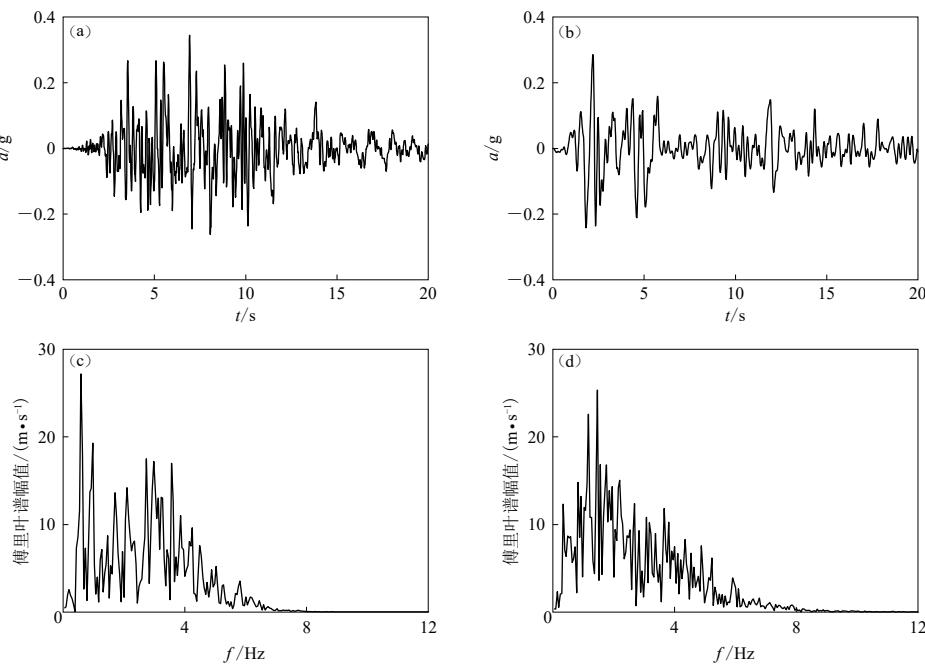


图 2 基底输入地震动加速度时程及傅里叶谱

(a) Kobe 波加速度时程; (b) El-Centro 波加速度时程; (c) Kobe 波傅里叶幅值谱; (d) El-Centro 波傅里叶幅值谱

Fig. 2 Acceleration time history and Fourier spectra of ground motion input

(a) Acceleration time history of Kobe wave; (b) Acceleration time history of El-Centro wave;

(c) Fourier amplitude spectrum of Kobe wave; (d) Fourier amplitude spectrum of El-Centro wave

整地震波峰值, 观察不同地震动强度对地震反应结果的影响, 实际计算中选取了6组强弱不同的峰值作为输入, 分别为0.05 g, 0.10 g, 0.15 g, 0.20 g, 0.25 g和0.30 g.

2 地震反应数值模拟结果分析

根据上一节构建的四组自由场模型, 运用FLAC3D二维动力有限差分法开展二维地震反应分析, 以不同幅值的Kobe波和El-Centro波作为基底输入, 分别考虑在P波、SV波输入形式下探讨海床表面观测点A(图1)的地表峰值加速度、反应谱、放大系数以及时程曲线的地震动响应结果。模拟分为静力分析和动力分析两部分, 首先对计算模型进行网格划分, 其中P波输入时划分的网格单元为5 m×5 m, SV波输入时划分的网格单元为2 m×2 m, 之后设置岩土本构模型及参数、静水条件以及静力边界条件等, 并进行静力和流体平衡计算, 最后设置动力边界条件以及阻尼等参数, 并进行动力分析计算。

2.1 基底输入SV波

通过计算得到了海床中心观测点A在Kobe波和El-Centro波两种不同地震波作为基底输入时, 输入不同强度SV波后的峰值加速度(表2)、加速度时程曲线(图3)以及放大系数(图4)。

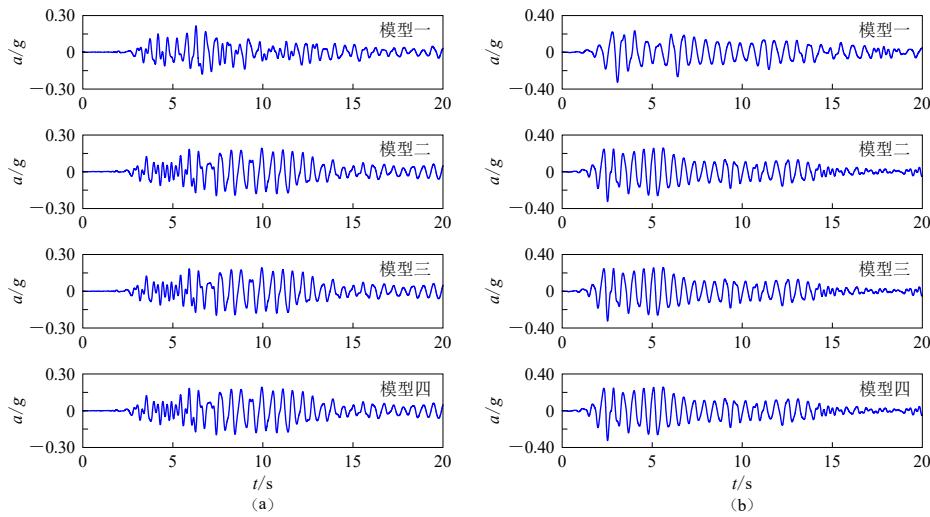
表2 以SV波作为输入形式下观测点A的峰值加速度

Table 2 PGA of point A in the stratified model under SV wave seismic inputs

输入幅值/g	峰值加速度/g							
	Kobe波				El-Centro波			
	模型一	模型二	模型三	模型四	模型一	模型二	模型三	模型四
0.05	0.1068	0.0983	0.0983	0.0983	0.1650	0.1632	0.1632	0.1632
0.10	0.2135	0.1966	0.1966	0.1966	0.3293	0.3257	0.3257	0.3257
0.15	0.3209	0.2954	0.2954	0.2954	0.4949	0.4895	0.4895	0.4895
0.20	0.4208	0.3932	0.3932	0.3932	0.6586	0.6514	0.6514	0.6514
0.25	0.5344	0.4920	0.4920	0.4920	0.8253	0.8163	0.8163	0.8163
0.30	0.6462	0.5971	0.5971	0.5971	0.9897	0.9790	0.9790	0.9790

限于篇幅, 仅以Kobe波和El-Centro波以幅值0.10 g作为基底输入时计算得到的地震动时程为例, 四组自由场计算模型无论是上覆无水还是上覆不同海水厚度的海域场地, 观测点A处的地震动加速度时程从波形上看, 均基本保留了基底处输入波的初始波形(图3)。同时, 还能够看出A点的地震记录呈现出较明显的波形稀疏现象, 且上覆无水场地相比于上覆有水场地表现地更为显著, 这主要是由于土层的滤波效应, 使得地震动的低频显著, 导致地震波形稀疏。而上覆有水场地, 由于上覆水自重应力的影响, 提高了近地表处的场地刚度, 因此地震波形比上覆无水场地的较密。

由图4可看出, 随着基底输入地震动强度增加, 上覆不同海水厚度的海域场地与上覆无水场地的放大系数均无太大变化。对于不同峰值加速度的Kobe输入, A点峰值加速度的放大系数在上覆无水场地和上覆有水场地分别约为2.13和1.97。对于不同峰值加速度的El-Centro波输入, A点峰值加速度的放大系数在上覆无水场地和上覆有水场地分别约为3.29和3.26。由表2和图4可以看出, 以SV波作为基底输入形式下, 上覆有水场地的放大系数普遍小于上覆无水场地, 峰值加速度亦如此。故认为在SV波输入情况下, 海水会在一定程度上抑制土层的过滤放大作用。但观测点A的峰值加速度及放大系数随着海水厚度的增大几乎

图 3 SV 波输入峰值 0.10 g 条件下的加速度时程反应

(a) Kobe 波; (b) El-Centro 波

Fig. 3 Acceleration time history response under SV-wave input with peak value of 0.10 g

(a) Kobe wave; (b) El-Centro wave

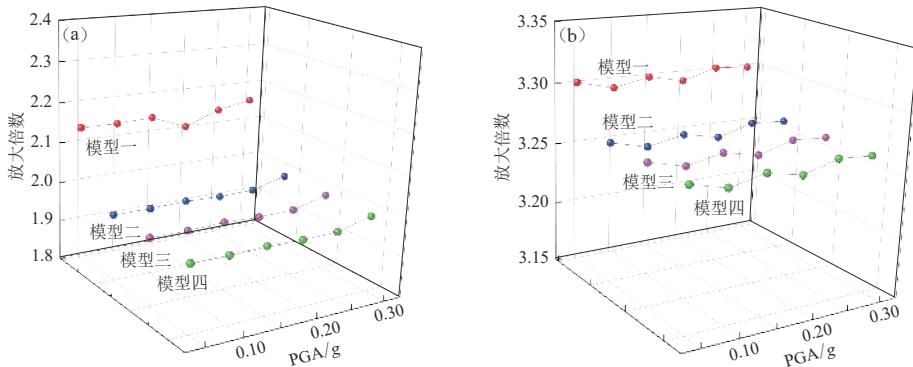


图 4 场地放大系数变化图

(a) Kobe 波; (b) El-Centro 波

Fig. 4 Variation of soil amplification factor

(a) Kobe wave; (b) El-Centro wave

无变化, 说明海水厚度的改变对 SV 波的影响可以忽略。

通过计算得到了观测点 A 在不同幅值 SV 波输入下的加速度反应谱(图 5, 6)。由图可知加速度反应谱随着输入峰值的增加而逐渐增大。对于 Kobe 波输入的情况, 上覆有水海域场地的加速度反应谱峰值大于上覆无水场地, 当周期小于 0.2 s 时, 上覆有水海域场地加速度反应谱略低于上覆无水场地加速度反应谱, 当周期在 0.8 — 2 s 之间时, 上覆有水海域场地加速度反应谱高于上覆无水场地加速度反应谱, 并且长周期成分也较上覆无水场地模型的丰富。对于 El-Centro 波输入的情况, 上覆有水海域场地的加速度反应谱峰值同样高于上覆无水场地, 当周期小于 0.15 s 时, 上覆有水海域场地加速度反应谱幅值略低于上覆无水场地, 当

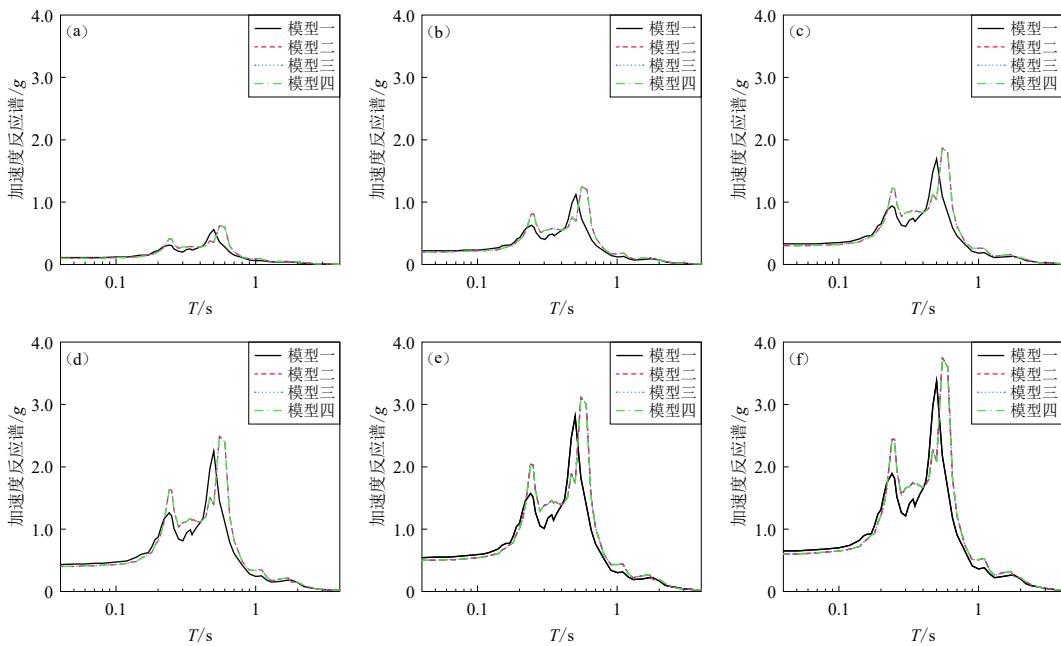


图 5 Kobe 波作为基底 SV 波时的地表加速度反应谱

Fig. 5 Acceleration response spectrum under SV-wave input of Kobe wave

(a) 0.05 g; (b) 0.10 g; (c) 0.15 g; (d) 0.20 g; (e) 0.25 g; (f) 0.30 g

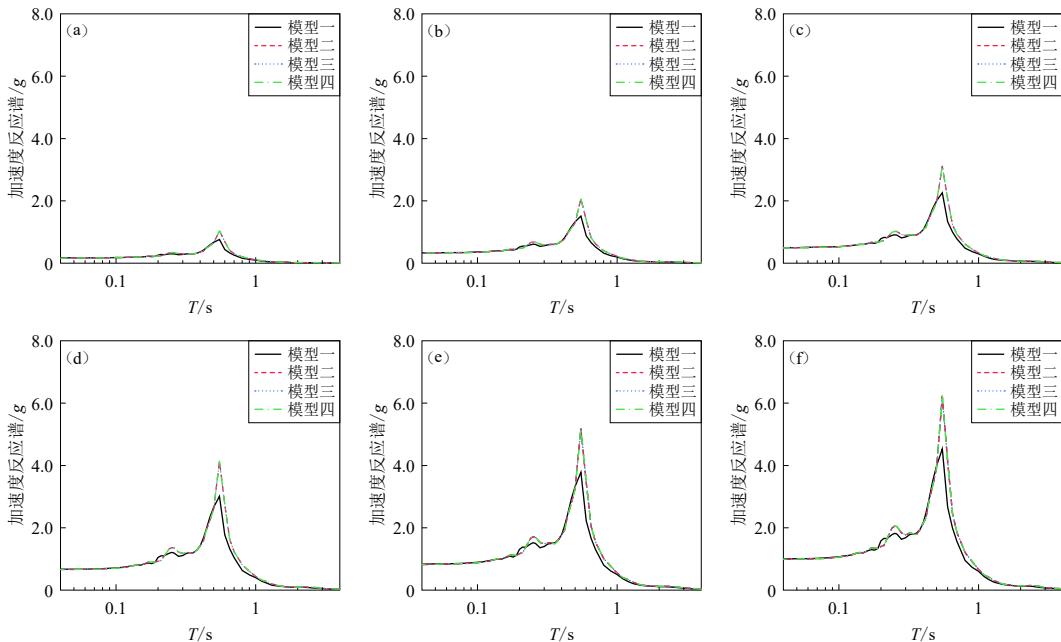


图 6 El-Centro 波作为基底 SV 波时的地表加速度反应谱

Fig. 6 Acceleration response spectrum under SV-wave input of El-Centro wave

(a) 0.05 g; (b) 0.10 g; (c) 0.15 g; (d) 0.20 g; (e) 0.25 g; (f) 0.30 g

周期在 0.55—1.5 s 之间时, 上覆有水海域场地加速度反应谱高于上覆无水场地加速度反应谱。同时无论是 Kobe 波还是 El-Centro 波作为基底输入, 上覆海水的厚度对海床表面加速度反应谱的影响均很小。

2.2 基底输入 P 波

通过计算得到了海床中心观测点 A 在 Kobe 波和 El-Centro 波两种不同地震波输入时不同强度 P 波输入情况下的峰值加速度(表 3)、加速度时程曲线(图 7)以及放大系数(图 8)。

表 3 以 P 波作为输入形式下各工况下观测点 A 的峰值加速度

Table 3 PGA of point A in the stratified model under P wave seismic inputs

输入幅值/g	峰值加速度/g							
	Kobe 波				El-Centro 波			
	模型一	模型二	模型三	模型四	模型一	模型二	模型三	模型四
0.05	0.0298	0.0307	0.0306	0.0306	0.0298	0.0321	0.0320	0.0319
0.10	0.0596	0.0613	0.0613	0.0611	0.0594	0.0640	0.0639	0.0636
0.15	0.0895	0.0921	0.0921	0.0919	0.0893	0.0962	0.0960	0.0956
0.20	0.1191	0.1226	0.1225	0.1223	0.1188	0.1281	0.1277	0.1277
0.25	0.1490	0.1534	0.1533	0.1530	0.1489	0.1605	0.1601	0.1601
0.30	0.1790	0.1842	0.1842	0.1842	0.1785	0.1924	0.1920	0.1911

由图 7 可以看出, 无论是上覆无水场地还是上覆不同海水厚度海域场地, 观测点 A 处的地震动加速度时程在波形上基本保留了基底处输入波的初始波形。相较于 SV 波输入时, 土层的滤波效应不明显, 上覆有水场地与上覆无水场地差别不大。

由图 8 可以看出, 随着基底输入地震动强度的增加, 上覆有水场地与上覆无水场地的放大系数无显著区别。在 Kobe 波输入下, 上覆无水场地 A 点峰值放大系数在 0.596 附近, 上覆

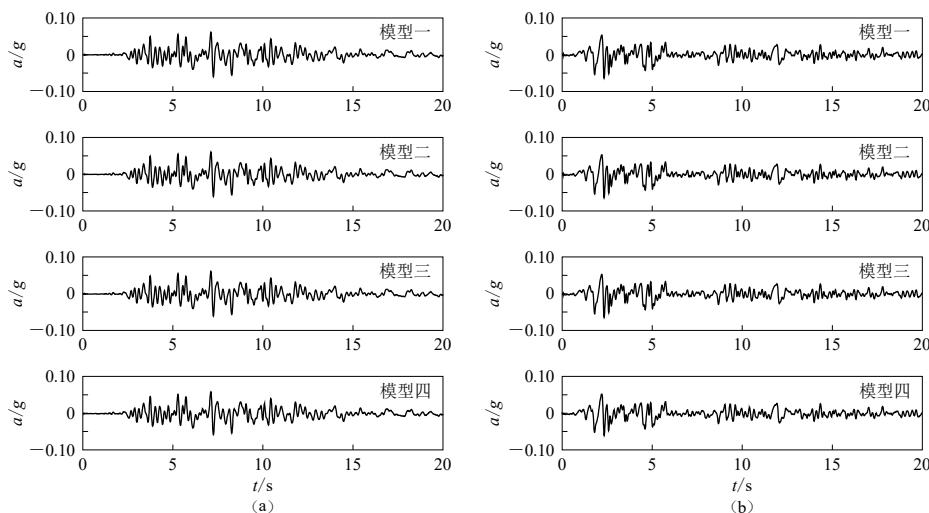


图 7 P 波输入峰值 0.10 g 条件下的加速度时程反应

(a) Kobe 波; (b) El-Centro 波

Fig. 7 Acceleration time history response under P-wave input with peak value of 0.10 g

(a) Kobe wave; (b) El-Centro wave

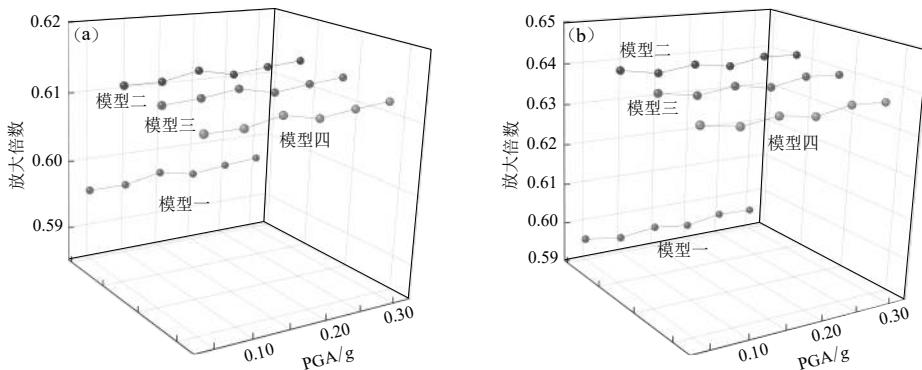


图 8 场地放大系数变化图

(a) Kobe 波; (b) El-Centro 波

Fig. 8 Variation of soil amplification factor

(a) Kobe wave; (b) El-Centro wave

30, 60, 100 m 海水场地 A 点峰值放大系数分别在 0.614, 0.613 和 0.612 附近. 在 El-Centro 波输入下, 上覆无水场地 A 点峰值放大系数在 0.595 附近, 上覆 30, 60, 100 m 海水场地 A 点的峰值放大系数分别在 0.641, 0.640 和 0.637 附近.

由表 3 和图 8 可以看出, 对于以 Kobe 波、El-Centro 波作为 P 波输入时, 上覆有水场地的峰值加速度要高于上覆无水场地, 上覆有水场地的峰值放大系数也普遍大于上覆无水场地. 当以 P 波作为基底输入条件时, 上覆海水对土层的滤波和放大作用具有增大作用. 由上覆不同厚度海水的海域模型可知, 无论是 Kobe 波输入还是 El-Centro 波输入, 且无论输入的地震波强度如何, 随着海水厚度的增加, 观测点 A 的峰值加速度均逐渐减小, 放大系数也逐渐减小, 其原因可能是由于上覆海水自重的增加抑制了土层的地震动反应.

通过计算得到了观测点 A 在不同幅值 P 波输入下的加速度反应谱(图 9, 图 10). 由图可知加速度反应谱随着输入峰值的增加而逐渐增大. 当输入 Kobe 波时, 上覆有水场地的加速度反应谱峰值大于上覆无水场地, 当周期小于 0.55 s 时, 上覆有水场地加速度反应谱略大于上覆无水场地加速度反应谱, 当周期大于 0.55 s 时, 上覆有水场地与上覆无水场地的加速度反应谱幅值基本相同. 不同上覆海水厚度海域场地的加速度反应谱幅值有细微波动但总体影响不大. 对于 El-Centro 波输入情况下, 上覆有水场地的加速度反应谱峰值同样大于上覆无水场地, 当周期小于 0.7 s 时, 上覆有水场地加速度反应谱幅值略大于上覆无水场地加速度反应谱, 当周期大于 0.7 s 时, 上覆有水场地与上覆无水场地的加速度反应谱幅值几乎没有差别. 不论是 Kobe 波还是 El-Centro 波作为基底输入, 上覆海水厚度对海床表面加速度反应谱的影响均很小.

3 讨论与结论

本文利用 FLAC3D 构建了上覆无水场地和上覆不同厚度海水自由场模型, 以不同幅值的两种地震波作为基底输入, 采用动力有限差分法开展二维地震反应分析, 获取典型场地地表(海床表面)加速度峰值、加速度反应谱等计算结果, 得到了以下几点初步结论:

- 1) 在两种不同的地震波输入下, 无论输入 P 波还是 SV 波, 上覆无水场地与上覆有水场

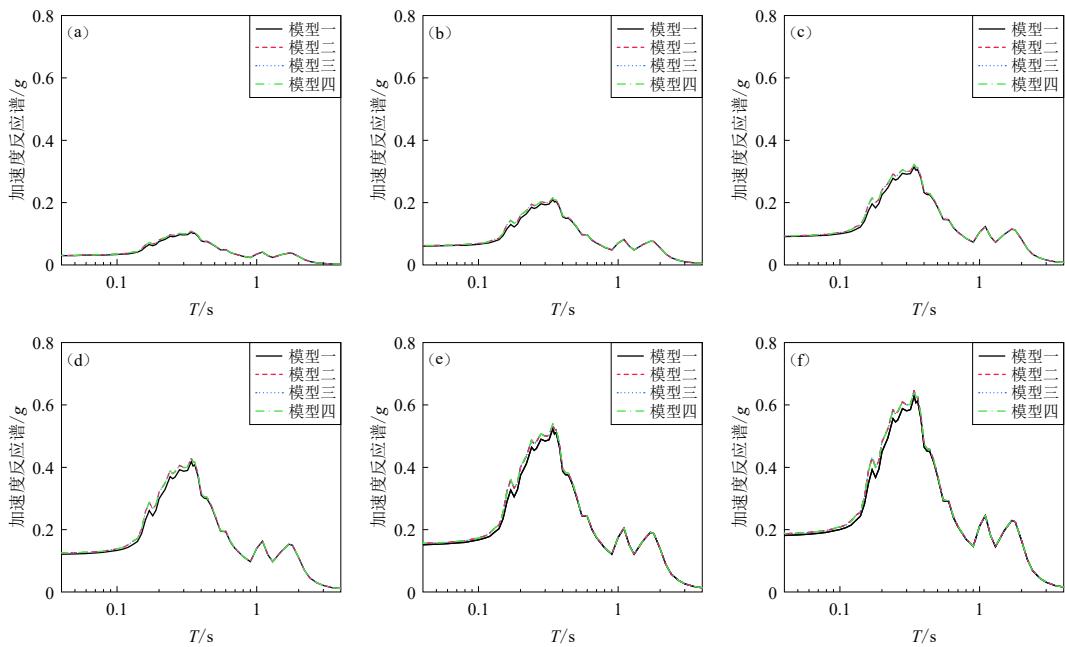


图 9 Kobe 波作为基底 P 波时的地表处加速度反应谱

Fig. 9 Acceleration response spectrum under P-wave input of Kobe wave

(a) 0.05 g; (b) 0.10 g; (c) 0.15 g; (d) 0.20 g; (e) 0.25 g; (f) 0.30 g

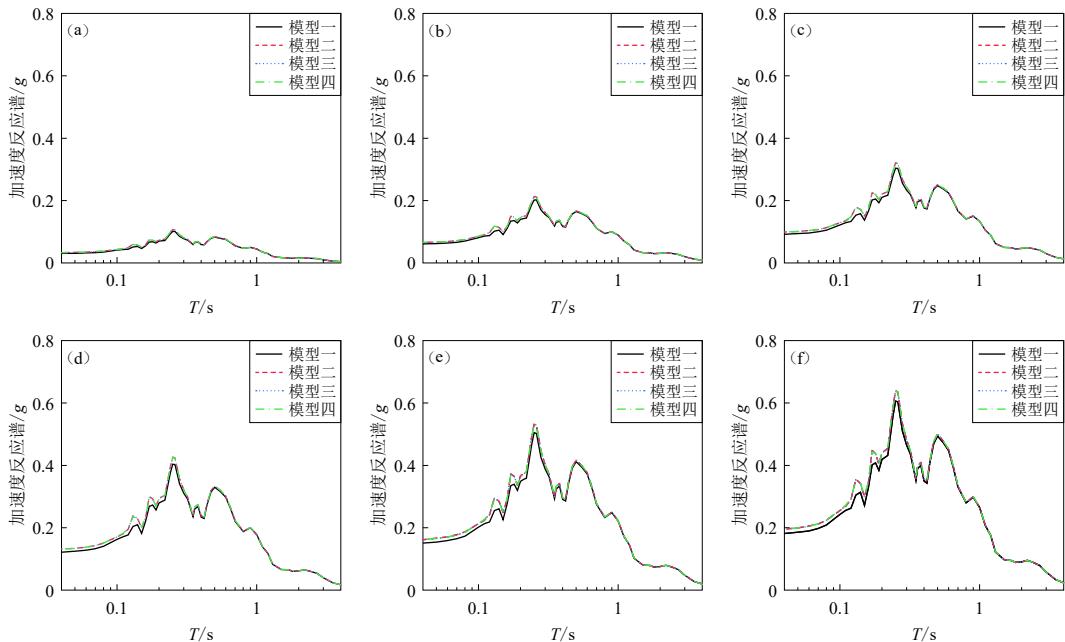


图 10 El-Centro 波作为基底 P 波时的地表处加速度反应谱

Fig. 10 Acceleration response spectrum under P-wave input of El-Centro wave

(a) 0.05 g; (b) 0.10 g; (c) 0.15 g; (d) 0.20 g; (e) 0.25 g; (f) 0.30 g

地地表(海床表)峰值加速度、加速度反应谱均有一定区别。输入 Kobe 波和 El-Centro 波, 其放大系数及加速度反应谱差别较大, 说明输入地震波的频率成分是影响放大系数以及加速度反应谱的主要因素;

2) 以 SV 波作为基底输入时, 上覆有水场地海床表面峰值加速度小于上覆无水场地峰值加速度, 上覆有水场地的加速度反应谱在短周期范围内低于上覆无水场地的加速度反应谱, 而上覆有水场地的反应谱长周期成分则显著高于上覆无水场地;

3) 以 P 波作为基底输入时, 上覆有水场地海床表面峰值加速度大于上覆无水场地, 上覆有水场地的加速度反应谱在短周期范围内高于上覆无水场地的加速度反应谱;

4) 对于上覆海水厚度对地震动反应的影响, 由计算结果可知, 当以 SV 波作为基底输入时可以忽略, 而当 P 波作为基底输入时海床表面地震动峰值则随着海水厚度的增加逐渐减少, 但是关于上覆海水对地震动影响的定量分析尚有待进一步分析讨论。

需要说明的是, 根据数值模拟结果, 可以看出以 P 波和 SV 波作为基底输入得到的海床表面地震动反应差异较明显, 造成这一现象的主要原因可能是上覆海水及土层自重作用抑制了 P 波作为竖向输入的地震反应及其放大效应, 同时由于 P 波本身的疏密波属性和振动传播方向, 导致 P 波竖向地震动作用较弱。而 SV 波为水平输入, 与地震波传播方向垂直, 可以引起土体剪切变形。进而也可以说明, 在实际工程的抗震设计和时程分析中, 对水平向地震动的剪切作用仍是需要首要考虑和重视的问题。

总的来说, 通过分析上覆有水场地与上覆无水场地加速度反应谱以及峰值放大系数等结果, 表明上覆海水及其自重应力的影响在自由场地震动力分析中是不可忽视的。这一研究成果有助于提高对海域饱和土动力学和场地效应的认识, 对于指导海上工程抗震设计具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- 陈宝魁. 2016. 海底地震动特性及跨海桥梁地震反应分析[D]. 大连: 大连理工大学: 54-129.
- Chen B K. 2016. *Characteristics of Offshore Ground Motions and Seismic Response Analysis of Sea-crossing Bridges*[D]. Dalian: Dalian University of Technology: 54-129 (in Chinese).
- 胡进军, 刁红旗, 谢礼立. 2013. 海底强地震动观测及其特征的研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 33(6): 1-8.
- Hu J J, Diao H Q, Xie L L. 2013. Review of observation and characteristics of seafloor strong motion[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 33(6): 1-8 (in Chinese).
- 胡进军, 郑旭, 郝彦春, 谢礼立. 2017. 俯冲带地震动特征及其衰减规律探讨[J]. 地球物理学报, 60(5): 1773-1787.
- Hu J J, Zheng X, Hao Y C, Xie L L. 2017. Characterization of strong motion of subduction earthquakes and its attenuation relationship[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(5): 1773-1787 (in Chinese).
- 兰景岩, 刘化涤, 吕悦军, 谢卓娟. 2012. 渤海海域典型场地土的动剪切模量比和阻尼比的统计值[J]. 地震研究, 35(2): 260-267.
- Lan J Y, Liu H D, Lü Y J, Xie Z J. 2012. Statistical value of dynamic shear modulus ratio and damping ratio of the soils in Bohai sea[J]. *Journal of Seismological Research*, 35(2): 260-267 (in Chinese).
- 李飒, 刘鑫, 余建星, 段高松, 樊志远. 2018. 地震作用下海底场地地震动效应研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 51(11): 1171-1180.
- Li S, Liu X, Yu J X, Duan G S, Fan Z Y. 2018. Seismic responses of seafloor site under earthquake[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 51(11): 1171-1180 (in Chinese).
- 李小军. 2006. 海域工程场地地震安全性评价的特殊问题[J]. 震灾防御技术, 1(2): 97-104.
- Li X J. 2006. Special problems on evaluation of seismic safety for offshore engineering site[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 1(2): 97-104 (in Chinese).

- aster Prevention, **1**(2): 97–104 (in Chinese).
- 朱镜清. 1988. 地震作用下海水与海床土的耦合运动 [J]. 地震工程与工程振动, **8**(2): 37–43.
- Zhu J Q. 1988. Coupled motion between sea water and sea bed-soil under earthquake action[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, **8**(2): 37–43 (in Chinese).
- 朱镜清, 周建. 1991. 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, **11**(3): 87–93.
- Zhu J Q, Zhou J. 1991. A fluid mechanics basis for estimating undersea ground motion[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, **11**(3): 87–93 (in Chinese).
- 张奎, 李伟华, 赵成刚. 2018. 平面波入射下深水地基场地动力响应分析 [J]. 岩土工程报, **40**(6): 1066–1074.
- Zhang K, Li W H, Zhao C G. 2018. Dynamic responses of an underwater site subjected to plane P- or SV-wave incidence[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, **40**(6): 1066–1074 (in Chinese).
- 张奎, 赵成刚, 李伟华. 2019. 海底软土层对海洋地基场地动力响应的影响 [J]. 岩土力学, **40**(6): 1–13.
- Zhang K, Zhao C G, Li W H. 2019. Study on the seismic response of the seafloor ground with seafloor soft soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, **40**(6): 1–13 (in Chinese).
- 周越, 陈苏, 李小军. 2016. 基于小波方法的近海域地震动时频特性分析 [J]. 土木工程学报, **49**(增刊1): 7–12.
- Zhou Y, Chen S, Li X J. 2016. Wavelet-based time-frequency characteristic analysis on offshore ground motion[J]. *China Civil Engineering Journal*, **49**(S1): 7–12 (in Chinese).
- Boore D M, Smith C E. 1999. Analysis of earthquake recordings obtained from the Seafloor Earthquake Measurement System (SEMS) instruments deployed off the coast of southern California[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **89**(1): 260–274.
- Chen B, Wang D, Li H. 2015. Characteristics of earthquake ground motion on the seafloor[J]. *J Earthq Eng*, **19**(6): 874–904.
- Chen B, Wang D, Li H. 2017. Vertical-to-horizontal response spectral ratio for offshore ground motions: Analysis and simplified design equation[J]. *J Cent South Univ*, **24**(1): 203–216.
- Diao Hongqi, Hu Jinjun, Xie Lili. 2014. Effect of seawater on incident plane P and SV waves at ocean bottom and engineering characteristics of offshore ground motion records off the coast of southern California, USA[J]. *Earthq Eng Eng Vib*, **13**(2): 181–194.
- Hatayama K. 2003. Should we consider sea in simulating strong ground motion[C]//*Numerical Examination of Effects of Sea in the 2-D P-SV Wave Field*. San Francisco: AGU Fall Meeting Abstracts. 2003.
- Li C, Hao H, Li H, Bi K. 2015. Theoretical modeling and numerical simulation of seismic motions at seafloor[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **77**: 220–225.
- Li C, Hao H, Li H, Bi K, Chen B. 2017. Modeling and simulation of spatially correlated ground motions at multiple onshore and offshore sites[J]. *J Earthq Eng*, **21**(3): 359–383.
- Nakamura T, Takenaka H, Okamoto T, Kaneda Y. 2012. FDM simulation of seismic-wave propagation for an aftershock of the 2009 Suruga Bay earthquake: Effects of ocean-bottom topography and seawater layer[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **102**(6): 2420–2435.
- Petukhin A, Iwata T, Kagawa T. 2010. Study on the effect of the oceanic water layer on strong ground motion simulations[J]. *Earth Planets Space*, **62**(8): 621–630.