

文章编号:1006-2467(2019)01-0093-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.01.013

波浪作用下渗透率各向异性的海床液化分析

荣 富, 廖晨聪, 童大贵, 周香莲

(上海交通大学 土木工程系, 上海 200240)

摘 要: 为探究波浪荷载作用下渗透率各向异性的海床的瞬态液化问题, 分别以雷诺平均 Navier-Stokes(RANS)方程和 Biot 多孔弹性方程作为波浪运动和海床响应的控制方程, 采用 LSM (Level Set Method)法对自由表面进行追踪, 以保证波浪运动模拟的准确性, 并建立了波浪-海床相互作用的二维耦合数值模型. 在验证数值模型合理性的基础上, 进一步分析了波浪参数、海床土体的饱和度和渗透性对海床瞬态液化的影响. 结果表明: 波浪参数和海床土体饱和度对海床瞬态液化的影响显著; 海床的瞬态最大液化深度随着波浪的高度、周期的增大而增加, 随着海床土体饱和度的增大而减小; 相比于海床土体的水平方向渗透系数, 海床的瞬态最大液化深度对垂直方向渗透系数的变化更加敏感.

关键词: 海床; 波浪; RANS 方程; Biot 固结理论; 渗透率各向异性; 瞬态液化

中图分类号: P 751

文献标志码: A

Analysis of Wave-Induced Liquefaction of Seabed with Variation in Permeability Anisotropy

RONG Fu, LIAO Chencong, TONG Dagui, ZHOU Xianglian

(Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to investigate the wave-induced seabed liquefaction with variation in permeability anisotropy, a two-dimensional integrated model for wave-seabed interactions was proposed in this paper. In the model the Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations and the Biot's poro-elastic equations were taken as the governing equations for the wave model and seabed model respectively. The level set method (LSM) was used to track the free surface of water for modeling wave motion accurately. After the feasible of the present models were validated, the effects of wave parameters, soil saturation and permeability on the seabed liquefaction with variation in permeability anisotropy were further discussed. The analysis results indicated that both the wave parameters and soil saturation of seabed can significantly affect the wave-induced seabed liquefaction and the depth of maximum transient liquefaction of seabed increases with the increment of wave height, wave period and the decrement of degree of soil saturation. Maximum transient liquefaction of seabed depth is more sensitive to the variations of the permeability in vertical direction than the horizontal permeability.

Key words: seabed; water wave; RANS equations; Biot's theory; variable permeability; transient liquefaction

收稿日期: 2017-07-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41330633), 国家自然科学基金青年科学基金(41602282)资助项目

作者简介: 荣 富(1994-), 男, 安徽省铜陵市人, 硕士生, 研究方向为海洋岩土工程. E-mail: rongful6@sjtu.edu.cn.

通信作者: 廖晨聪, 男, 助理研究员, 电话(Tel.): 021-34204883; E-mail: billaday@sjtu.edu.cn.

波浪荷载会在海床表面产生周期性波浪压力,这种循环的波浪压力作用会引起海床土体内的孔隙水压力和有效应力随时间和空间而发生变化,进而导致海床土体液化失稳,对海洋建筑物的地基稳定性构成极大威胁.因此,研究波浪荷载作用下渗透率各向异性的海床液化问题,对于近海和离岸结构物的建设与设计具有重要意义.

关于波浪与海床之间相互作用的问题,自 1941 年 Biot^[1] 提出 Biot 固结理论以来,国内外学者已开展了大量研究^[2-8]. Madsen^[9] 根据 Biot 固结理论,应用复变量表达式推导了线性波作用下海床土体为多孔弹性介质时位移-孔隙水压力的解析解; Yamamoto 等^[10] 利用半解析的方法求解线性推进波作用下有限或无限深度多孔弹性介质海床的动力响应; Mei 等^[11] 采用边界层近似法进一步研究了此类问题并提出边界层理论; 王栋等^[12] 根据二维 Biot 固结理论,采用有限元数值模拟的方法研究了饱和多孔弹性介质海床在线性波作用下的动力响应. 从 20 世纪 90 年代开始,国内外学者对波浪导致海床液化失稳的现象进行了深入研究. Zen 等^[13] 通过对海床动力响应的分析,探讨了波浪作用下海床的致密化机制,并对振荡孔隙水压力引起的海床瞬时液化进行分析; Sakai 等^[14] 在分析波浪作用下海床瞬时液化时发现,利用边界层孔隙水压力的近似解能够估计波谷区海床的瞬时液化深度. 20 世纪初期, Lin 等^[15] 提出三维短峰波作用下各向异性的海床动力响应模型,并用于估计波浪导致的海床液化; Suzuki 等^[16] 采用室内试验的方法研究了波浪作用下细砂海床的液化,并结合有限元模拟方法计算土体的最大液化深度. 黄光爵等^[17] 在考虑振荡孔隙水压力和残余孔隙水压力的条件下推导出波浪作用下海床的最大液化深度的解析表达式.

但是,以上研究大多针对渗透率各向同性的海床的动力响应,对波浪荷载作用下渗透率各向异性的海床的动力响应及液化分析较少. Jeng 等^[18] 考虑海床土体的各向异性,推导了波浪作用下有限深度海床动力响应的解析解; 张金凤等^[19] 采用数值计算方法分析了在非均质各向异性海床中,土体的渗透系数对海床孔隙水压力和有效应力的影响; Wen 等^[20] 采用有限单元法研究了不同渗透系数的 2 层土体在波浪荷载作用下的动力响应.

为了研究渗透率各向异性的海床的瞬态液化特性,本文采用雷诺平均 Navier-Stokes(RANS)方程作为波浪的控制方程,采用动量源函数进行造波,通过 LSM(Level Set Method)法对波浪的自由表面进

行精确跟踪. 海床响应以 Biot 多孔弹性方程为控制方程,并且考虑海床土体的渗透率各向异性. 通过 COMSOL Multiphysics 软件来实现波浪模型和海床土体模型在接触面上信息(位移、压力)的交互耦合. 同时,在验证数值模型合理性的基础上,分析了波浪参数、海床的土体饱和度和渗透系数对海床瞬态最大液化深度的影响.

1 数值模型

波浪-海床相互作用的几何模型如图 1 所示. 其中: L_s 为模型的长度; d 为水深; h 为海床土体的厚度; F 为海床表面一点. 本文的数值模型包含 2 个模块,即波浪模型和海床模型,以准确模拟波浪与渗透率各向异性的海床的相互作用. 采用 RANS 方程描述黏性流体流动中波浪的产生和运动,采用 Biot 固结理论分析海床的动力响应. 波浪模型和海床模型之间采用单向耦合,即在模型计算的同一个时间步内,先以波浪模型计算所得海床表面的波浪压力作为海床模型的边界条件,以此计算海床的位移及孔隙水压力.

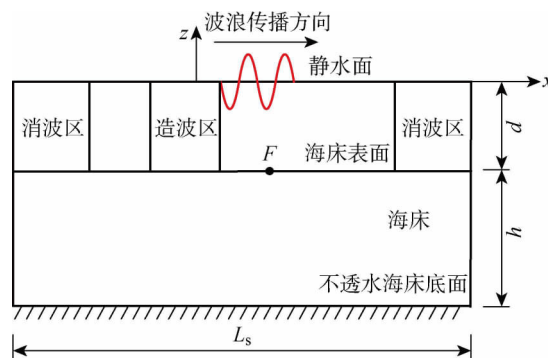


图 1 波浪-海床相互作用几何模型

Fig. 1 Geometrical model of wave-seabed interactions

1.1 波浪模型

如图 1 所示,在水槽的中间部分进行数值造波,并采用 LSM 法追踪波浪自由液面,而在水槽的两端添加消波区. 以 RANS 方程作为二维不可压缩流体运动的控制方程,即

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p_f}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + S_i \quad (2)$$

式中: x_i 为笛卡儿坐标; $i, j = x, z$; \bar{u}_i 、 \bar{u}_j 均为流场的时均速度; p_f 为波浪压力; ρ_f 为流体密度; t 为时间; g_i 为重力加速度; S_i 为任意动量的源函数,由波浪特性确定,本模型研究的是二维问题,故取 $S_y = 0$; τ_{ij} 为剪应力,其中包括 Reynolds 应力项和黏结剪

应力,即

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \langle \bar{u}'_i \bar{u}'_j \rangle$$

$$- \rho \langle \bar{u}'_i \bar{u}'_j \rangle = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho_t \delta_{ij} k$$

μ_t 为流体动力黏度, k 为湍流动能, δ_{ij} 为 Kronecker Delta 记号, $\mu_t = \rho_t C_u k^2 / \epsilon$, 为湍动流体黏度, $C_u = 0.09$, ϵ 为湍流动能耗散率。

本文的流体力学性能模拟采用 $k-\epsilon$ 湍流模型, 标准湍流模型的 k 方程和 ϵ 方程分别为

$$\frac{\partial(\rho_t k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_t \bar{u}_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho_t \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho_t \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_t \bar{u}_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} G_k - C_{\epsilon 2} \rho_t \epsilon) \quad (4)$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$$

式中:参数 σ_k 、 σ_ϵ 、 $C_{\epsilon 1}$ 和 $C_{\epsilon 2}$ 均为相关经验系数,一般取 $\sigma_k = 1.00$, $\sigma_\epsilon = 1.30$, $C_{\epsilon 1} = 1.44$, $C_{\epsilon 2} = 1.92$ 。

1.2 海床模型

在建立海床模型的过程中,假设波浪荷载引起的砂质海床孔隙水渗流为层流运动,且满足达西定律,则波浪荷载将引起多孔弹性海床土体内产生超孔隙水压力,使土骨架发生变形,并服从虎克定律。本文研究渗透率各向异性的海床土体,其连续性方程为

$$\frac{K_x}{K_z} \frac{\partial^2 p_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p_s}{\partial z^2} - \frac{\gamma_w n_s \beta}{K_z} \frac{\partial p_s}{\partial t} = - \frac{\gamma_w}{K_z} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_s}{\partial x} + \frac{\partial w_s}{\partial z} \right) \quad (5)$$

式中: K_x 与 K_z 分别为海床土体在 x 和 z 轴方向的渗透率; p_s 为波浪作用下的孔隙水压力; γ_w 为孔隙水容重; n_s 为海床土体的孔隙率; u_s 为海床土体的水平位移; w_s 为海床土体的竖向位移; β 为孔隙水的压缩性系数,其表达式为

$$\beta = \frac{1}{E_w} + \frac{1 - S_r}{p_{w0}}$$

S_r 为土体的饱和度; E_w 为土体孔隙的流体体积压缩模量,其取值为 $E_w = 2.24$ GPa; p_{w0} 为绝对水压力。

根据虎克定律,土体在 x 、 z 轴方向的有效正应力 σ'_{sx} 、 σ'_{sz} 和剪应力 τ_{sxz} 可用土体的位移来描述,即

$$\sigma'_{sx} = 2G \left[\frac{\partial u_s}{\partial x} + \frac{\nu_s}{1 - 2\nu_s} \left(\frac{\partial u_s}{\partial x} + \frac{\partial w_s}{\partial z} \right) \right] \quad (6)$$

$$\sigma'_{sz} = 2G \left[\frac{\partial w_s}{\partial z} + \frac{\nu_s}{1 - 2\nu_s} \left(\frac{\partial u_s}{\partial x} + \frac{\partial w_s}{\partial z} \right) \right] \quad (7)$$

$$\tau_{sxz} = G \left(\frac{\partial u_s}{\partial z} + \frac{\partial w_s}{\partial x} \right) \quad (8)$$

海床中超孔隙水压力与有效应力的关系为

$$\frac{\partial \sigma'_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{sxz}}{\partial z} = - \frac{\partial p_s}{\partial x} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \tau_{sxz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma'_{sz}}{\partial z} = - \frac{\partial p_s}{\partial z} \quad (10)$$

忽略惯性力,将式(6)~(8)代入(9)和(10),得以超孔隙水压力和位移表示的平衡微分方程为

$$G \nabla^2 u_s + \frac{G}{(1 - 2\nu_s)} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u_s}{\partial x} + \frac{\partial w_s}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p_s}{\partial x} \quad (11)$$

$$G \nabla^2 w_s + \frac{G}{(1 - 2\nu_s)} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u_s}{\partial x} + \frac{\partial w_s}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p_s}{\partial z} \quad (12)$$

式中: ∇^2 为 Laplace 算子; G 为海床土体的剪切模量; ν_s 为土体泊松比。

1.3 边界条件

1.3.1 海床表面 在海床表面 $z = -d$ 处,土体应力相比于波浪压力可忽略不计,故设土体垂直方向的正应力和剪应力等于 0,并且海床表面的波浪压力与孔隙水压力相等,即有

$$\sigma'_{sz} = \tau_{sxz} = 0 \quad (13)$$

$$p_s = p_0 \quad (14)$$

式中: p_0 为作用于海床表面的波浪压力。

1.3.2 海床底面 在海床底面 $z = -(d+h)$ 处,土体可视为不透水的刚性基岩,即海床土体的水平方向位移和竖直方向位移为 0,故有

$$u_s = w_s = \frac{\partial p_s}{\partial z} = 0 \quad (15)$$

1.3.3 海床侧边 假设在海床左右两侧边界处,土体的水平方向位移为 0 且为不透水边界,则有

$$w_s = \frac{\partial p_s}{\partial x} = 0 \quad (16)$$

2 模型验证

由于渗透率各向异性的海床瞬态响应的实测数据较少,所以本文选用波浪作用下渗透率各向同性的海床动态响应的试验数据和解析结果来验证模型。首先,验证波浪模型的网格收敛性。所用波浪的相关参数分别为波浪高度 $H = 2$ m,水深 $d = 10$ m,波浪周期 $T = 12$ s;海床的相关参数分别为海床厚度 $h = 20$ m, $n_s = 0.4$,渗透系数 $K = 1.0 \times 10^{-7}$ m/s, $S_r = 0.97$, $\nu_s = 0.333$, $G = 0.10$ MPa。图 2 所示为在不同网格密度下图 1 中模型表面点 F 的孔隙水压力 p_s 的时程曲线。其中, N 表示波浪模型的网格数目。由图 2 可见,海床表面点 F 的孔隙水压力不随

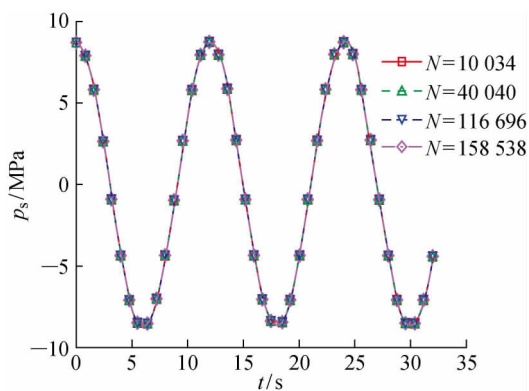


图 2 不同网格数目时点 F 的孔隙水压力时程曲线
Fig. 2 Variations of pore pressure with time at point F for various mesh systems

网格数目的变化而变化,经过网格收敛性检验,确定波浪模型网格数目取 $N=10\,034$ 。

为验证所建立的海床模型的合理性,本文将 Liu 等^[21]的室内模型试验值和 Hsu 等^[22]的解析解与本文模型的数值计算结果进行比较。根据 Liu 等的试验设置,计算所用参数分别为 $H=1.23\text{ m}$, $T=9\text{ s}$, $h=1.8\text{ m}$, $d=5\text{ m}$, $G=0.127\text{ MPa}$, $\nu_s=0.3$, $K=1.8\times 10^{-4}\text{ m/s}$, $n_s=0.425$, $S_r=0.975$, 计算所得沿不同海床深度(z/h)分布的归一化孔隙水压力($|p_s|/p_0$)如图 3 所示。由图 3 可见,3 种方法所得孔隙水压力的变化趋势基本一致,且吻合较好,说明本文模型可以有效模拟波浪作用下的海床响应。

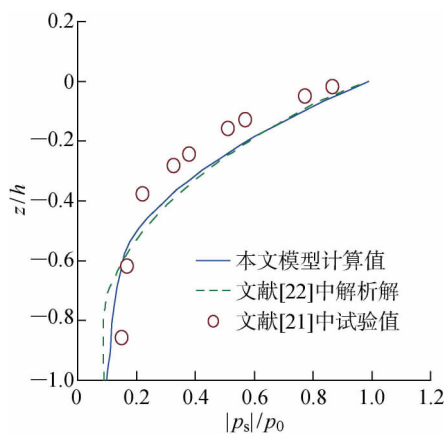


图 3 沿不同海床深度分布的归一化孔隙水压力
Fig. 3 Vertical distributions of unified pore pressure versus seabed depth

3 海床瞬态液化分析

波浪荷载对海床作用时,波谷区水质点的向上运动会对海床产生向上的吸力。本文采用 Zen 等^[13]提出的海床瞬态液化判别标准进行海床液化情况分析(见图 4),即

$$\sigma'_v \leq p_\epsilon \quad (17)$$

式中: σ'_v 为海床在自身重力固结及静水压力下的初始有效应力;

$$p_\epsilon = |p_0| - |p_w|$$

p_w 为波浪作用下海床中某点的孔隙水压力。

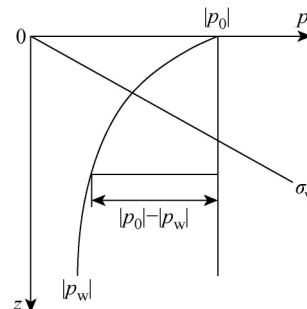


图 4 海床瞬态液化判别示意图

Fig. 4 Schematic graph of criteria for transient seabed liquefaction

3.1 波浪参数和海床土体饱和度的影响

波浪高度直接影响波浪作用在海床表面的波浪压力,波浪周期通过影响波长而影响海床表面的波浪压力,海床土体饱和度通过影响土体的垂直孔压梯度进而影响液化深度。对于渗透率各向同性的海床,Chowdhury 等^[23]通过试验研究了波浪与海床相互作用下波浪周期和土体饱和度对海床液化的影响;Liu 等^[21]采用一维圆筒试验分析了波浪高度、波浪周期和土体饱和度对海床最大液化深度的影响。本文进一步探讨波浪高度、波浪周期以及海床土体饱和度对渗透率各向异性的海床液化情况。在研究过程中,分别选取 $H=2.0, 3.0, 4.0, 5.0\text{ m}$, $T=10, 12, 14, 16\text{ s}$ 及 $S_r=0.95, 0.96, 0.97, 0.98$, 渗透系数取 $K_x=1.0\times 10^{-7}\text{ m/s}$, $K_z=1.0\times 10^{-6}\text{ m/s}$, 其他参数与验证波浪模型网格收敛性时的相同。

海床瞬态最大液化深度 d_m 随波浪高度和波浪周期的变化规律如图 5(a)和(b)所示。由图可见,波浪高度和波浪周期对 d_m 都具有显著影响。随着波浪高度、波浪周期增大,作用在海床表面的波浪压力不断增大,从而导致海床较大深度范围内的土体有效应力小于 p_ϵ , 渗透各向异性的海床的 d_m 增加。结合图 4 可知,有效应力随海床深度增加而呈现出线性增长,而 p_ϵ 随海床深度的增加有限,从而使得 d_m 的增幅逐渐减缓。图 5(c)所示为不同海床土体饱和度时海床瞬态最大液化深度的变化规律。由图可见,随着海床土体饱和度增大,海床土体的垂直孔压梯度减小,从而使得 d_m 随着土体饱和度的增加而减小,并且最大液化深度的减小速率基本保持不变。

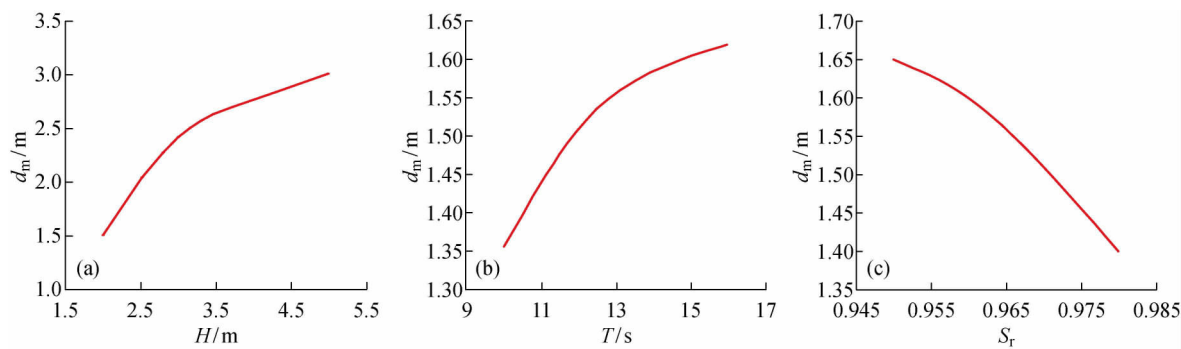


图5 海床瞬态最大液化深度随波浪高度、波浪周期和海床土体饱和度变化的规律

Fig. 5 Curves of maximum liquefaction depth with wave height, wave period and saturation of soil

3.2 海床土体渗透性的影响

对于渗透率各向异性的海床,在研究海床不同方向的渗透性对瞬态液化的影响时,分别选取 $K_x = 1.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 与 $K_z = 1.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 作为基准进行数值模拟,并且在分析一个方向的渗透系数对海床瞬态液化影响的过程中,固定另一个方向的渗透系数。

3.2.1 垂直方向渗透系数的影响 本文在 $K_x = 1.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$, K_z 处于 $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 的范围进行分析.数值计算结果显示,在 K_z 处于 $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 时,海床土体的 d_m 的变化剧烈,因此,在该范围内应尽可能得多选取一些控制点。

图6(a)~(c)分别给出了在4组不同的 H 、 T 和 S_r 情况下,渗透率各向异性的海床瞬态最大液化深度随着垂直方向渗透系数的变化规律.由图可见,当 $K_z < 1.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 时,不同波浪条件下, d_m 随着 K_z 的变化不明显,较小的 K_z 使得海床中波浪所引起的浅层孔压梯度较大,导致一定厚度的海床土

体发生液化.当 $K_z > 1.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 时,对于 $H = 2, 3 \text{ m}$ 的海床,其波浪引起的海床土体的孔压梯度迅速减小,液化难以向海床深处发展, d_m 随着 K_z 的增大而急剧衰减;对于 $H = 5 \text{ m}$ 的海床(如图6(a)中点A、B和C所示),随着 K_z 不断增大,所对应的点A、B和C的垂直孔压梯度先增后减(见图7),因此, d_m 先增后减;在不同的波浪周期和海床土体饱和度条件下,随着 K_z 增大, d_m 急剧衰减,直至为0。

3.2.2 水平方向渗透系数的影响 本文在 $K_z = 1.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$, K_x 处于 $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 的条件下进行分析.图8示出了在不同的 H 、 T 和 S_r 情况下,渗透率各向异性的海床瞬态最大液化深度随着 K_x 变化的规律.由图8(a)可见,对于不同的 H ,随着 K_x 增大, d_m 基本不变化.由图8(b)可见:当 $T = 12, 14, 16 \text{ s}$ 时, d_m 随 K_x 的变化不显著;当 $T = 10 \text{ s}$, $K_x > 1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 时, d_m 随 K_x 增大而呈现出缓慢减小.由图8(c)可见:当 $S_r = 0.95, 0.96, 0.97$ 时, K_x 对 d_m 的影响不大;当 $S_r = 0.98$,

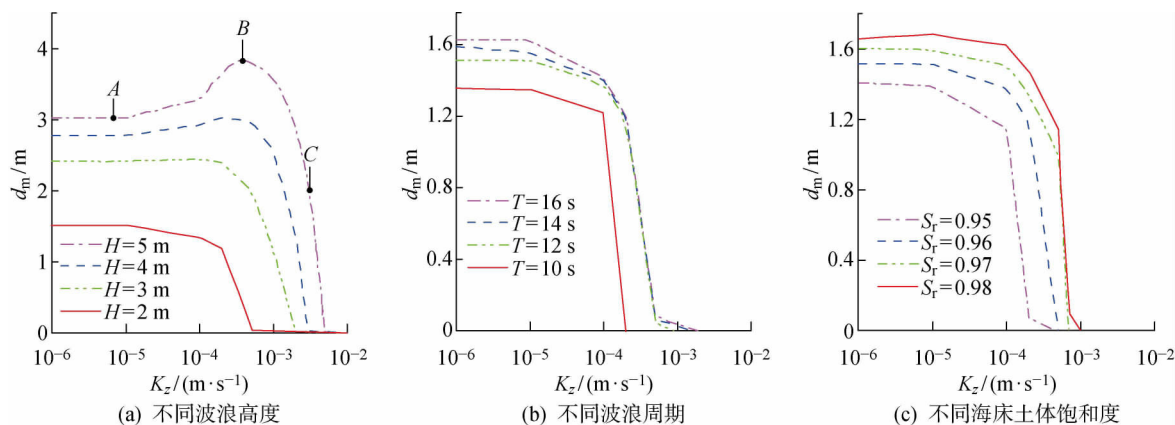


图6 海床瞬态最大液化深度随着垂直方向渗透系数的变化规律

Fig. 6 Curves of maximum transient liquefaction depth with vertical permeability coefficient

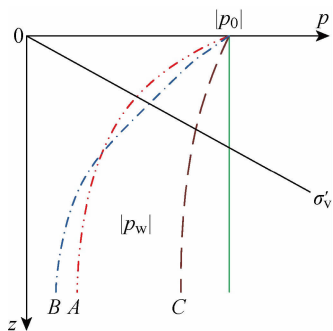


图 7 不同垂直方向渗透系数下海床的孔隙水压力示意图
Fig. 7 Schematic graph of pore water pressure under different vertical permeabilities

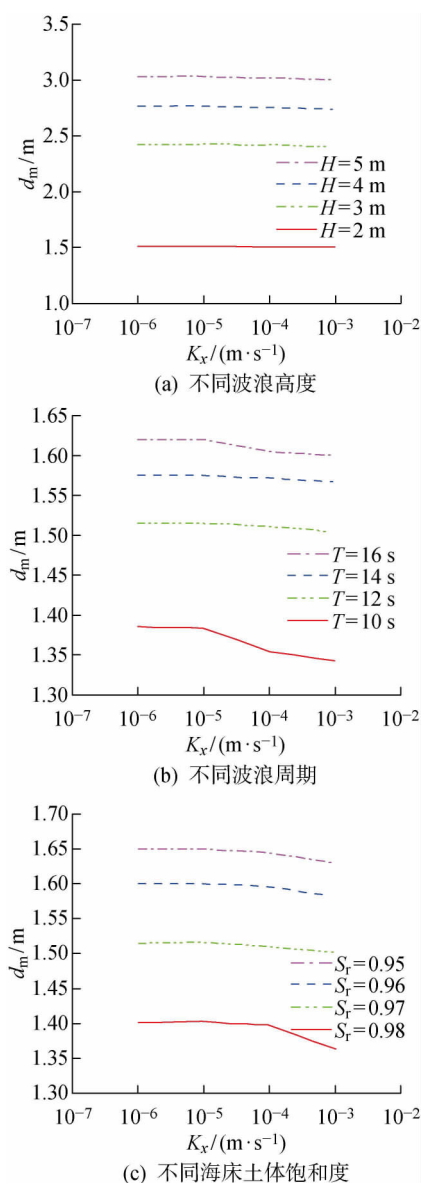


图 8 海床瞬态最大液化深度随着水平方向渗透系数的变化规律

Fig. 8 Curves of maximum transient liquefaction depth with horizontal permeability coefficient

$K_x > 1.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 时, d_m 随 K_x 的增大而略有减小。

4 结语

(1) 所建立的波浪-海床相互作用的数值模型与以往提出的解析解和相应的室内试验结果吻合较好,从而验证了其合理性,并可以有效模拟波浪荷载作用的海床动力效应。

(2) 波浪高度、波浪周期及海床土体饱和度对渗透率各向异性的海床瞬态液化影响显著,海床的瞬态最大液化深度随着波浪高度和波浪周期的增大而增大,且其最大液化深度的增长速度都逐渐减缓;海床瞬态最大液化深度随海床土体饱和度的增大而减小,但其减小速率基本保持不变。

(3) 渗透率各向异性的海床垂直方向的渗透性对其瞬态液化影响显著。当海床土体垂直方向的渗透系数较小时,海床瞬态最大液化深度随着垂直方向的渗透系数的变化不明显;而当渗透系数增大到一定数值时,海床瞬态最大液化深度随着垂直方向的渗透系数的增大而急剧衰减。

(4) 海床水平方向的渗透系数对海床瞬态最大液化深度影响较小。

参考文献:

- [1] BIOT M A. General theory of three-dimensional consolidation[J]. *Journal of Applied Physics*, 1941, 12 (2): 155-164.
- [2] JENG D S. Porous models for wave-seabed interactions[M]. Heideberg: Springer, 2013.
- [3] JENG D S, LIN Y S. Finite element modeling for water waves-soil interaction[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1996, 15(5): 283-300.
- [4] JENG D S, YE J H, ZHANG J S, et al. An integrated model for the wave-induced seabed response around marine structures: Model verifications and applications[J]. *Coastal Engineering*, 2013, 72(2): 1-19.
- [5] YE J H, JENG D S, WANG R, et al. A 3-D semi-coupled numerical model for fluid-structures-seabed-interaction (FSSI-CAS 3D): Model and verification [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2013, 40(7): 148-162.
- [6] 陈海峰. 波浪作用下的三维海床响应及液化分析[D]. 天津: 天津大学, 2009.
CHEN Haifeng. Study on wave-induced response of progressive pore pressure and liquefaction in seabed [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.

- [7] LIAO C C, TONG D G, CHEN L H. Pore pressure distribution and momentary liquefaction in vicinity of impermeable slope-type breakwater head[J]. **Applied Ocean Research**, 2018, 78: 290-306.
- [8] LIAO C C, TONG D G, JENG D S, *et al.* Numerical study for wave-induced oscillatory pore pressures and liquefaction around impermeable slope breakwater heads[J]. **Ocean Engineering**, 2018, 157: 364-375.
- [9] MADSEN O S. Wave-induced pore pressures and effective stress in a porous bed[J]. **Geotechnique**, 1978, 28(4): 377-393.
- [10] YAMAMOTO T, SELLMEIHER H L, HIJUM E V. On the response of a porous-elastic bed to water waves[J]. **Journal of Fluid Mechanics**, 1978, 87(1): 193-206.
- [11] MEI C C, FODA M A. Wave-induced responses in a fluid-filled poro-elastic solid with a free surface—A boundary layer theory[J]. **Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society**, 1981, 66(3): 597-631.
- [12] 王栋, 栾茂田, 郭莹. 波浪作用下海床动力反应有限元数值模拟与液化分析[J]. 大连理工大学学报, 2001, 41(2): 216-222.
- WANG Dong, LUAN Maotian, GUO Ying. FEM-based numerical simulation of dynamic response and liquefaction analysis of seabed under wave-induced loading[J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2001, 41(2): 216-222.
- [13] ZEN K, YAMAZAKI H. Mechanism of wave-induced liquefaction and densification in seabed[J]. **Soils and Foundations**, 1990, 30(4): 90-104.
- [14] SAKAI T, HANTAAKA K, MASE H. Wave-induced effective stress in seabed and its momentary liquefaction[J]. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, 1992, 118(2): 202-206.
- [15] LIN Y S, JENG D S. Short-crested wave-induced liquefaction in porous seabed[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2000, 126(5): 481-494.
- [16] SUZUKI K, TAKAHASHI S. Liquefaction of loosely deposited sandbed behind a breakwater due to wave overtopping[C]// **Coastal Structures 2003**. Portland, USA: ASCE, 2003: 656-662.
- [17] 黄光爵, 郑永来, 武伯弢. 波浪作用下可液化海床最大液化深度[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(5): 146-151.
- HUANG Guangjue, ZHENG Yonglai, WU Botao. The maximum liquefaction depth of liquefiable seabed under loading[J]. **Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2012, 32(5): 146-151.
- [18] JENG D S, SEYMOUR B R. Response in seabed of finite depth with variable permeability[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering**, 1997, 123(10): 902-911.
- [19] 张金凤, 张庆河, 秦崇仁. 波浪作用下非均质各向异性海床响应的数值模拟[J]. 天津大学学报, 2006, 39(2): 159-164.
- ZHANG Jinfeng, ZHANG Qinghe, QIN Chongren. Numerical simulation of wave-induced response of inhomogeneous and anisotropic seabed[J]. **Journal of Tianjin University**, 2006, 39(2): 159-164.
- [20] WEN F, WANG J H. Response of layered seabed under wave and current loading[J]. **Journal of Coastal Research**, 2015, 31(4): 907-919.
- [21] LIU B, JENG D S, YE G L, *et al.* Laboratory study for pore pressures in sandy deposit under wave loading[J]. **Ocean Engineering**, 2015, 106: 207-219.
- [22] HSU J R C, JENG D S. Wave-induced soil response in an unsaturated anisotropic seabed of finite thickness[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1994, 18(11): 785-807.
- [23] CHOWDHURY B, DASARI G R, NOGAMI T. Laboratory study of liquefaction due to wave-seabed interaction[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2006, 132(7): 842-851.