

文章编号:1006-2467(2016)11-1694-06

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2016.11.006

波浪荷载引起海床土体与桩动态响应

郭俊杰^{a,b}, 周香莲^{a,b}, 徐 风^{a,b}, 王建华^b

(上海交通大学 a. 海洋岩土工程研究中心; b. 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240)

摘 要: 以 Navier-Stokes 方程作为波浪控制方程, 并采用 VOF (Volume of Fluid) 法进行自由表面追踪来准确模拟海洋表面波浪运动, 建立了波浪-海床-桩基动力问题的数值模型来模拟波浪对桩基和海床的作用. 把海床视为多孔介质, 以 Biot 动力理论为基础, 考虑土体骨架的加速度, 并用孔隙水位移的速度场 (位移-孔隙水压力动态模型) 来模拟海床土体动态响应的过程. 在模型验证的基础上, 分析了水深对桩身弯矩、水平位移的影响, 以及波高和海床渗透系数对桩周孔隙水压力的影响, 并且对不同渗透系数时桩周土体的液化特性进行了讨论.

关键词: 波浪; 海床; 桩基; Biot 动力理论

中图分类号: P 75 **文献标志码:** A

Wave-Induced Dynamic Response of Seabed and Pile

GUO Junjie^{a,b}, ZHOU Xianglian^{a,b}, XU Feng^{a,b}, WANG Jianhua^b

(a. Centre for Marine Geotechnical Engineering; b. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A coupled model was proposed to study the dynamic response of seabed and the mechanical response of pile under wave. The volume of fluid (VOF) method was used to track the free surface of water while the Navier-Stokes equations are regarded as governing equations of wave to investigate the dynamic interaction between the wave and the pile. Then, based on the CFD numerical model, a three-dimensional numerical coupled model of wave-seabed-pile was built to simulate the response of seabed and pile under wave. The seabed was treated as porous medium and characterized by Biot's consolidation theory and partly dynamic formulations. After the models were validated, parametric studies such as wave height, water depth and permeability were conducted and liquefaction potential was investigated.

Key words: water wave; seabed; pile foundation; Biot dynamic theory

近几十年,随着陆地资源的匮乏,海洋风机和海洋石油平台成为我国重点发展的项目,同时跨海大桥也在紧张的建设中.研究波浪-海床-桩基的相互作用对海洋结构物的设计以及建设有重要意义.此外,对桩的最大弯矩和最大水平位移的研究有助于

提高海洋平台稳定性.当波浪在海床表面传递并与桩基发生相互作用时,海床的超静孔隙水压力、桩的弯矩和水平位移会随着波浪的波动而发生变化.这样的变化将进一步引起海床动力响应,并且部分海床可能变得不稳定,甚至发生液化.

收稿日期:2016-09-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41372286, 41572243)

作者简介:郭俊杰(1990-),男,河南新乡市人,硕士生,研究方向为海洋岩土工程.

周香莲(联系人),女,副教授,电话(Tel.):021-34204833; E-mail: zhouxl@sjtu.edu.cn.

最近几十年,波浪与海床的研究已经取得巨大成就.随着 Biot^[1-2] 提出 Biot 动力理论,人们关于土体的研究趋于完善. Jeng 等^[3] 根据多孔弹性理论提出了一个半解析解的方法来研究波浪对土体的动态响应.王立忠等^[4] 采用波浪水槽模型试验的方法,研究波浪荷载作用下砂质和粉质海床的孔压响应问题.虽然针对波浪-海床-结构物的研究已有较多成果,但大部分研究是关于防水堤^[5-6] 和管线^[7] 的,对桩的研究成果有限.例如, Wang 等^[8] 建立了一个物理实验模型测量了作用于桩上的波浪力,并建立了数值模型以分析桩身变形以及弯矩的分布.赵晖等^[9] 采用动力 Winkler 弹性地基梁模型模拟桩土动力的相互作用,通过求解满足柱面非齐次边界条件的 Laplace 方程,直接构造波浪对柔性桩的散射速度势,考虑了流体和桩体的相互作用,由解析法给出了埋置圆桩在波浪荷载下的动力响应.通过研究网格单元中流体和网格体积比函数来确定自由面,并追踪流体的变化,可以节约计算时间,减小存储量,从而更准确模拟流体的运动.其中,张少济等^[10] 以单桩支撑结构为对象,建立模拟波浪和单桩柱结构的三维模型,采用 $k-\epsilon$ 湍流模型和 VOF (Volume of Fluid) 运动界面追踪方法,实现了桩柱和波浪之间的双向流固耦合模拟. Li 等^[11] 应用比例边界有限元法建立了三维模型来研究波浪与桩的相互作用机制.华蕾娜^[12] 建立了一个能应用于复杂波浪荷载形态和复杂结构物形式的波浪-结构物-海床耦合数值模型,以讨论波浪、海床和结构物之间复杂的相互作用机制.

本文以 Navier-Stokes 方程作为波浪控制方程,由造波边界进行造波,通过 VOF 法对自由液面进行了更准确的追踪,并选择有 2 个方程的 $k-\epsilon$ 紊流模型模拟波浪在桩周的扰流.对于土体部分,以 Biot 动力理论为基础,用孔隙水位移的速度场(位移-孔隙水压力动态模型)来模拟海床土体动态响应的过程.通过 MATLAB 将波浪模型与土体模型进行结合,可以实现波浪-海床-桩基的动态响应分析.

1 数值模型

要准确模拟波浪与海床的相互作用,首先要精确模拟波浪的运动,然后再进行波浪、桩基和海床的动力响应计算.本文用数值的方法进行波浪模拟,之后再对波浪对海床和桩基的波压力作为外部边界条件加载到海床和桩基表面,进行海床-桩基的动态响应分析,计算模型如图 1 所示.

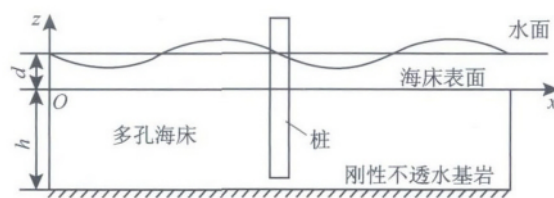


图 1 波浪-海床-桩基计算模型

Fig. 1 Calculation model of wave-seabed-pile

1.1 控制方程

1.1.1 波浪控制方程 假设波浪为不可压缩黏性流体的运动,以 Navier-Stokes 方程作为流体运动的控制方程,将流体认为是牛顿流.由于用到 FAVOR (Fractional Area Volume Obstacle Representation) 网格技术,其连续性方程和动量方程中含有体积和面积分数参数,具体表达式如下:

$$(v_{f,i}A_i)_{,i} = 0 \quad (1)$$

$$\dot{v}_{f,j} + \frac{v_{f,i}A_i v_{f,j,i}}{V_f} = -\frac{p_{,j}}{\rho_f} + g + a_{F,j} \quad (2)$$

式中: $i, j = x, y, z$; $v_{f,i}$ 为 i 方向的流体速度分量; A_i 为 i 方向流体的面积分数; $\dot{v}_{f,j}$ 为 j 方向流体的加速度分量; V_f 为流体的体积分数; $p_{,j}$ 为孔隙水压力在 j 方向上的偏导; ρ_f 为流体密度; g 为重力加速度; $a_{F,j}$ 为 j 方向的黏滞力加速度,即

$$\rho_f V_f a_{F,j} = - (A_i \tau_{ij})_{,i} \quad (3)$$

τ_{ij} 为流体剪应力.

本文采用 $k-\epsilon$ 紊流模型来研究波浪与桩的相互碰撞.类似连续性方程和动量方程, $k-\epsilon$ 模型控制方程中也加入了体积分数 V_f 和面积分数 A_x, A_y, A_z , k 方程和 ϵ 方程表达式如下:

$$\frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ v_{f,x} A_x \frac{\partial k_T}{\partial x} + v_{f,y} A_y \frac{\partial k_T}{\partial y} + v_{f,z} A_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right\} = P_T + G_T + D_{k_T} - \epsilon_T \quad (4)$$

$$\frac{\partial \epsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ v_{f,x} A_x \frac{\partial \epsilon_T}{\partial x} + v_{f,y} A_y \frac{\partial \epsilon_T}{\partial y} + v_{f,z} A_z \frac{\partial \epsilon_T}{\partial z} \right\} = \frac{C_1 \epsilon_T}{k_T} (P_T + C_3 G_T) + D_{\epsilon_T} - C_2 \frac{\epsilon_T^2}{k_T} \quad (5)$$

式中: P_T 为由于速度梯度引起的紊动能 k_T 的产生项; C_1, C_2 和 C_3 根据经验可以得到,一般取 $C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_3 = 0.2$; G_T 为由于浮力引起的紊动能产生项,对于不可压缩流体取为 0; D_{k_T} 和 D_{ϵ_T} 分别为紊动能 k_T 和紊动能耗散率 ϵ_T 的扩散项.

1.1.2 海床控制方程 为了建立海床动力响应的计算方法,基于 Biot 动力方程,考虑土体与流体惯性项,利用 COSMOL 多物理场耦合有限元软件,来研究海床土体有效应力和孔隙水压力.假定波浪载

荷引起的砂质海床孔隙水渗流为层流运动,满足达西定律.波浪引起的多孔弹性海床内孔隙水压力和土骨架变形,用 Biot 方程可表示为

$$k\nabla^2 p - \gamma_w n_{\text{soil}} \beta \frac{\partial p}{\partial t} + \rho_t \frac{\partial^2 \epsilon_v}{\partial t^2} = \frac{\gamma_w}{k} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \quad (6)$$

式中: p 为孔隙水压力; γ_w 为孔隙流体的重度; n_{soil} 为海床土体孔隙率; k 为土体渗透系数; β 为空隙流体的压缩性系数; ϵ_v 为土体体积应变.

忽略流体位移加速度,但考虑土体骨架位移的加速度,可以将控制方程写为:

$$\sigma_{ij,j} + \rho g = \rho \ddot{u}_i \quad (7)$$

$$-p_{,i} + \rho_t g = \rho_t \ddot{u}_i + \frac{\rho_t g}{k_i} \dot{\bar{w}}_i \quad (8)$$

$$\dot{u}_{i,i} + \dot{\bar{w}}_{i,i} = -\frac{n_{\text{soil}}}{K_f} \dot{p} \quad (9)$$

式中: $\sigma_{ij,j}$ 为总应力在 j 方向的偏导; ρ 为土体密度; \ddot{u}_i 为 i 方向的土体位移加速度; $\dot{\bar{w}}_i$ 为 i 方向孔隙流体相对于土体的平均速度; k_i 为 i 方向土体渗透系数; $\ddot{u}_{i,i}$ 为 i 方向的土体位移加速度在 i 方向的偏导; $\dot{\bar{w}}_{i,i}$ 为 i 方向孔隙流体相对于土体的平均速度在 i 方向的偏导; \dot{p} 为孔隙水压力对时间的导数; K_f 为孔隙流体的体积弹性模量.

1.2 边界条件

1.2.1 波浪边界条件 模型基于线性波理论的速度入口法进行造波,在网格边界定义了波浪生成的边界条件.波浪表达式如下:

$$\eta = B \sin(\omega t + \varphi) \quad (10)$$

式中: B 为振幅; ω 为角频率; φ 为初始相位.

设定出口边界为 outflow 边界条件,其实质为 Sommerfeld 辐射边界条件,即认为在边界上

$$\dot{Q} + cQ_{,n} = 0 \quad (11)$$

式中: \dot{Q} 为所要辐射的变量,在此即为速度; c 为波浪的传播速度; n 为辐射边界的法向向量.

波浪运动的自由表面是空气和水的交界面,可将模型上表面设为指定压力 $p = p_a$ (p_a 为大气压力),且在自由表面上的所有速度分量沿法向的梯度为 0,即自由表面上切应力为 0.运动边界条件为:

$$p = p_a \quad (12)$$

$$\eta + v_i \eta_{,i} = 0, \quad i = x, y, z \quad (13)$$

式中, η 为波表面相对于静水面的高度.

由于数值模型的底部为流体与固体的接触面,并且在边界上流体法向速度为 0,所以数值水槽的底部可采用壁面边界条件.

为了避免波浪反射,通常采用对称边界条件,在

边界上流量通量为 0,流体剪切应力为 0,并且边界两侧存在流体.本文为了避免流体碰撞到两侧边界而发生反射,认为模型两侧边壁为对称边界条件.

1.2.2 海床边界条件 在海床表面 ($z=0$ 处),当忽略水的黏性和摩擦力时,垂直方向的应力和剪力可忽略不计,海床表面的超静孔隙水压力等于波压力,即有

$$\sigma'_{zz} = \tau_{zx} = 0 \quad (14)$$

$$p = p_b \quad (15)$$

式中: σ'_{zz} 为 z 方向的有效应力; τ_{zx} 为 z 和 x 方向的剪应力; p_b 为数值模拟波浪计算出来的海床表面上的波压力.

海床底部的边界条件:该处视为不透水刚性基岩,即海床土体不存在竖向位移,且孔隙水流量竖向偏导为 0,即有

$$u_z = 0, \quad \frac{\partial q}{\partial z} = 0 \quad (16)$$

式中, q 为孔隙水流量.

海床土体四周的边界条件:假设前后左右四侧边界处土体法向位移和孔隙水流量法向偏导均为 0,即有

$$u_n = 0, \quad \frac{\partial q}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (17)$$

式中, u_n 为土体法向位移.

1.3 验证模型

本文研究线性波对海床和桩基的动力响应,为验证波浪模型的正确性,将数值结果与理论波形进行对比,如图 2 所示.计算参数如下:波高 $H=2$ m,周期 $T=15$ s,水深 $d=70$ m,波长 $\lambda=311.59$ m.由图可见,数值模拟出的波形与理论波形十分吻合,故本模型合理.

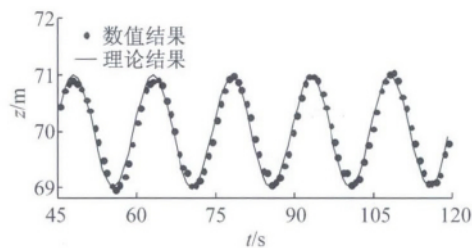


图2 数值计算结果与理论值对比

Fig. 2 Comparison of present result and theoretical result

为验证海床模型的正确性,本文建立了波浪-海床-桩三维数值模型,计算参数为:波高 $H=5$ m,周期 $T=6$ s,水深 $d=15$ m,波长 $\lambda=53$ m,海床泊松比 $\nu_{\text{soil}}=0.35$,饱和度 $S_r=1$,渗透系数 $K_z=0.001$ m/s,孔隙率 $n_{\text{soil}}=0.46$,桩径 $D_{\text{pile}}=6$ m,桩泊松比 $\nu_{\text{pile}}=0.25$.将计算出的桩周孔隙水压力与文献[13]

的结果进行对比来验证数值模型的有效性, 计算结果如图 3 所示. 图中: L 为桩基插入海床深度; p_0 为海床表面波压力. 由图 3 可见, 两者孔隙水压力的变化趋势基本相同. 因此可以确定本文数值模型是正确的.

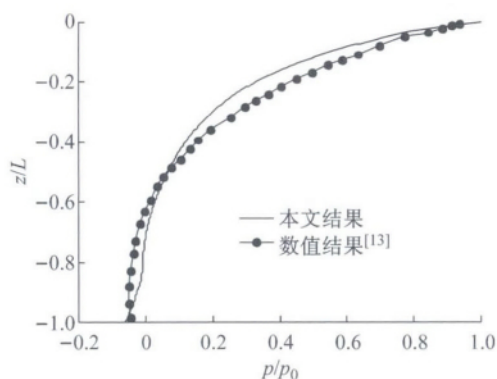
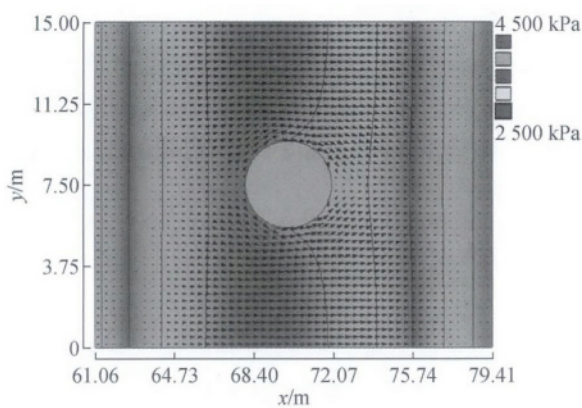
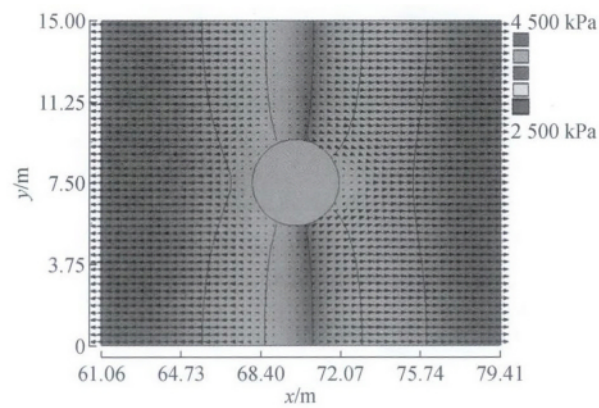


图 3 数值计算结果与文献[13]结果对比

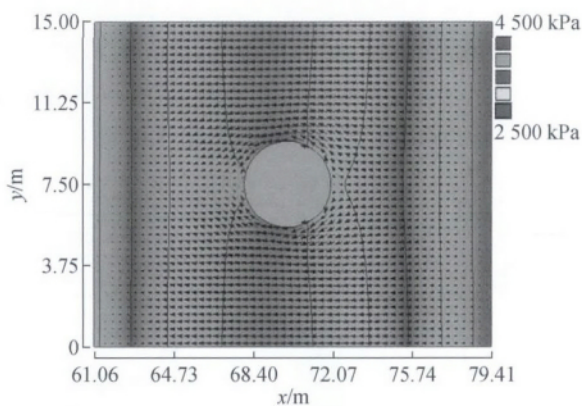
Fig. 3 Comparison of numerical result and result of Ref. [13]



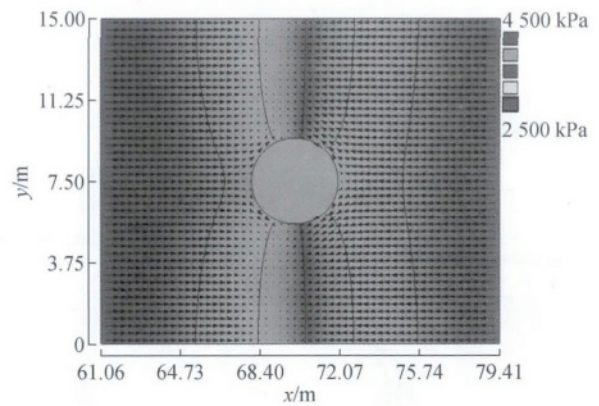
(1) $t = 40.50$ s (波峰)



(2) $t = 41.75$ s



(3) $t = 43.00$ s (波谷)



(4) $t = 44.25$ s

图 4 波浪通过桩基时的流场变化

Fig. 4 Change of flow field while wave passes through pile

2.1 水深对桩基的影响

图 5 所示为不同水深时, 波浪引起的桩身弯矩

2 参数分析

通过选取不同的波高、水深、渗透系数, 可以分析不同参数对桩周孔隙水压力、桩身弯矩和位移的影响. 本文选取的标准计算参数为: $d = 10$ m; $\lambda = 36.6$ m; $T = 5$ s; $S_r = 0.99$; $H = 1.5$ m; $D_{\text{pile}} = 2$ m; 其他参数同 1.3 节中验证海床模型时所取的值.

在分析波浪通过桩基的流场变化时, 本文给出了水槽 $z = 6$ m 处桩周波压力的速度矢量随着时间的变化示意图如图 4 所示. 其中: 波压力变化用云图表示; 速度矢量用箭头表示. 由图可见, 波浪从左向右传播过程中, 水质点做往复运动, 即当波峰到达桩基时水质点向右运动, 而当波谷到达桩基时水质点向左运动, 在 1 个周期内完成 1 次往复运动. 此外, 水质点在桩周产生绕流, 波峰经过桩基时向右绕流; 波谷经过桩基时向左绕流; 波峰离开桩基, 而波谷即将到达时水质点向左右分开; 波谷离开桩基, 波峰即将到达时水质点都向桩基靠拢, 相互抵消.

和水平位移的变化. 图中, u_2 为桩身水平位移. 由图可见, 随着水深的增高弯矩和位移不断增大, 但总体

趋势是相同的,即桩身弯矩在海床与海水接触面最大,而在桩顶和桩底会减小到零;桩身水平位移在海水部分减小迅速,在海床部分变化缓慢,到桩底部几乎不变。

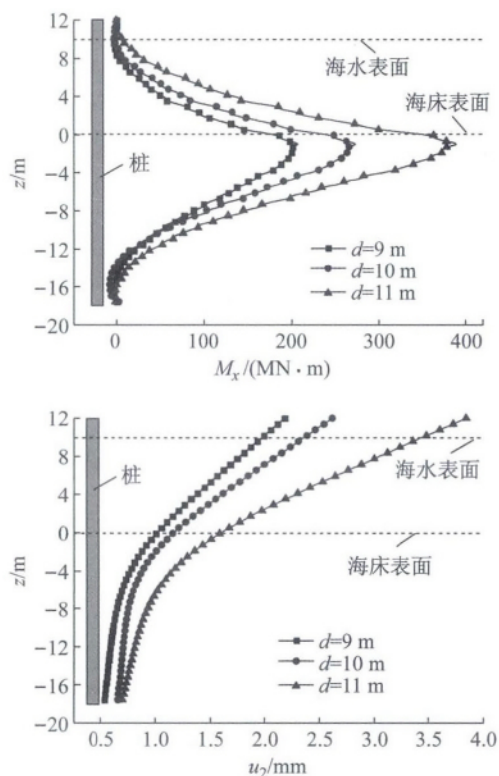


图5 不同水深 d 下桩身弯矩及水平位移沿深度的变化

Fig. 5 Distribution of bending moment and horizontal displacement of pile at different water depths

2.2 波高对孔压的影响

图6所示为不同波高时,波浪引起海床孔隙水压力的变化.由图可见,随着波高的增大海床表面的孔隙水压力不断增大.然而随着波高的增大孔隙水压力减小的速率也增大,导致在桩底部波高较小时孔隙水压力反而较大.对于总体趋势,孔隙水压力在海床上部减小迅速,在中下部减小缓慢。

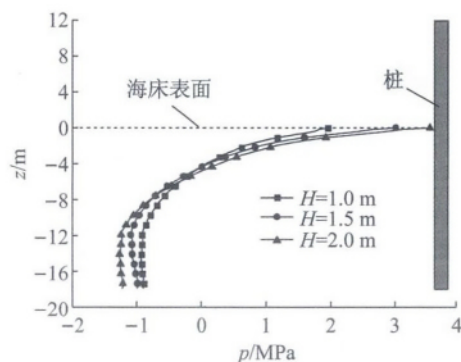


图6 不同波高 H 下桩前孔压沿深度变化

Fig. 6 Distribution of pore pressure before pile at different wave heights

2.3 渗透系数对孔压的影响

图7所示为不同渗透系数时,波浪引起海床孔隙水压力的变化.由图7可见,在海床顶部孔隙水压力随渗透系数的变化不太显著;而在海床中下部,由于桩基的影响,低渗透性的海床里孔隙水压力将明显减小。

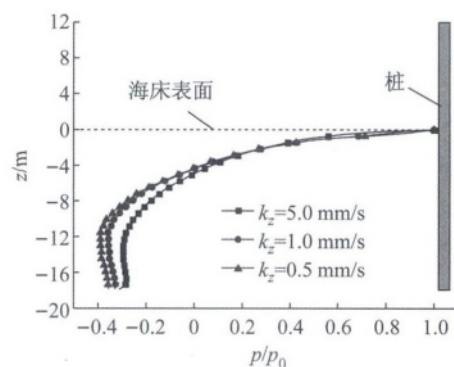


图7 不同渗透系数 k_z 下桩周孔压沿深度的变化

Fig. 7 Distribution of pore pressure before pile at different permeabilities

3 液化分析

在波浪荷载持续作用下孔隙水压力上升,有效应力下降,海床的一部分可能变得不稳定而发生液化,本文采用 Jeng^[14] 提出的液化判断准则来分析桩周液化情况。

$$-\frac{1}{3}(\gamma_s - \gamma_w)(1 + 2K_0)z +$$

$$[p_b - p(z)] \leq 0 \quad (18)$$

式中: γ_s 为土体重度; $p(z)$ 为海床某深度孔隙水压力; K_0 为静止土压力系数,表达式为

$$K_0 = \frac{\nu_{\text{soil}}}{1 - \nu_{\text{soil}}} \quad (19)$$

对渗透系数进行参数分析时,取 $k_z=5.0, 1.0, 0.5, 0.1$ mm/s. 由图8可见,液化区域随着渗透系数的减小而增大;在桩周,最大液化深度随着渗透系

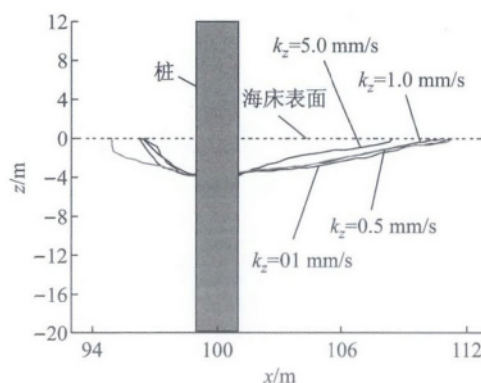


图8 渗透系数 k_z 对液化区域的影响

Fig. 8 Liquefaction zone affected by permeability

数的减小而增大,但是紧邻桩基位置的最大液化深度几乎保持不变;较大的渗透系数可以阻止累计孔隙水压力的进一步发展,进而降低液化的可能。

4 结 语

本文以 Navier-Stokes 方程作为波浪控制方程,用 FAVOR 网格技术进行网格划分,再利用 VOF 法进行自由表面追踪以对波浪进行模拟。之后将得出的海底波压力作用于海床模型上,以 Biot 动力方程为控制方程研究波浪-海床-桩的动态响应。

从数值分析的结果可以得出如下主要结论:

(1) 海床上部孔隙水压力沿深度迅速减小,在海床中下部减小缓慢甚至有所增加;

(2) 桩身最大弯矩发生在海床与海水接触面,桩身最大水平位移在桩身顶部;

(3) 桩周液化区域随渗透系数的增加逐渐缩小。

参考文献:

- [1] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low frequency rang [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, 28(2): 168-178.
- [2] BIOT M A. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media [J]. *Journal of Applied Physics*, 1962, 33(4): 1482-1498.
- [3] JENG D S, LEE T L. Dynamic response of porous seabed to ocean waves [J]. *Computers and Geotechnics*, 2001, 28(2): 99-128.
- [4] 王立忠,潘冬子,潘存鸿,等. 波浪对海床作用的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2007, 40(9): 101-109.
WANG Lizhong, PAN Dongzi, PAN Cunhong, *et al.* Experimental investigation on wave-induced response of seabed [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(9): 101-109.
- [5] ULKER M B C, RAHMAN M S, GUDDATI M N. Wave-induced dynamic response and instability of seabed around caisson breakwater [J]. *Ocean Engineering*, 2010, 37(17): 1522-1545.
- [6] ZHANG J S, JENG D S, LIU P L F, *et al.* Response of a porous seabed to water waves over permeable submerged breakwaters with Bragg reflection [J]. *Ocean Engineering*, 2012, 43(2): 1-12.
- [7] GAO F P, JENG D S, WU Y X. Improved analysis method for wave-induced pipeline stability on sandy seabed [J]. *Journal of Transportation Engineering-ASCE*, 2006, 132(7): 590-596.
- [8] WANG H L, XU W Y, ZHU F. The mechanical response of piles with consideration of pile-soil interactions under a periodic wave pressure [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2014, 26(6): 921-929.
- [9] 赵晖,蔡袁强,徐长节. 桩土系统在波浪荷载下的动力响应分析[J]. *浙江大学学报*, 2007, 41(7): 1143-1208.
ZHAO Hui, CAI Yuanqiang, XU Changjie. Dynamic response of pile soil system due to wave force [J]. *Journal of Zhejiang University*, 2007, 41(7): 1143-1208.
- [10] 张少济,朱晓玲,张华,等. 单桩柱和波浪双向流固耦合的数值模拟[J]. *水利水电技术*, 2014, 45(4): 63-66.
ZHANG Shaoji, ZHU Xiaoling, ZHANG Hua, *et al.* Numerical simulation on bidirectional fluid-soil coupling between single pile and wave [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2014, 45(4): 63-66.
- [11] LI M, ZHANG H, GUAN H, *et al.* Three-dimensional investigation of wave - pile group interaction using the scaled boundary finite element method. Part I Theoretical developments [J]. *Ocean Engineering*, 2013, 64: 174-184.
- [12] 华蕾娜. 波浪-结构物-海床耦合系统动力学研究[D]. 北京: 清华大学水利水电工程系, 2009.
- [13] LI X J, YANG B, GAO F, *et al.* A FEM model for wave-induced pore pressure response around a pile foundation [C] // ISOPE. Beijing: ISOPE, 2010: 674-679.
- [14] JENG D S. Wave-induced seabed instability in front of a breakwater [D]. Australia: The University of Western Australia, 1997.