

# 动力荷载作用下水-桩-土相互作用简化分析研究

黄义铭<sup>1</sup>, 赵 密<sup>1</sup>, 王丕光<sup>1</sup>, 曹艳辉<sup>2</sup>, 杜修力<sup>1</sup>

(1.北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室,北京 100124;

2.北京市政路桥股份有限公司,北京 100045)

**摘要:**针对近海结构单桩基础在动力荷载作用下发生复杂的水-桩-土相互作用问题,建立了三维水-桩-土全耦合动力有限元分析模型。土体、桩和水体分别采用实体单元和声学单元模拟,土体截断边界采用滚轴边界条件、水体截断边界采用无反射吸收边界条件,并确定了合理的截断边界位置;以全耦合分析模型计算结果为参考解,系统研究了四种动荷载作用下水-桩不耦合(两者界面自由)和水-土不耦合(两者界面自由)对桩体和海床表面位移和动水压力响应的影响,揭示了不同水深和桩体半径变化下不考虑两种相互作用的影响规律。

**关键词:**动力荷载;圆形桩体;数值模拟;水-土相互作用;水-桩相互作用

**中图分类号:** TU311.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)06-1511-10

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.06.023

## 引 言

中国东部沿海地区处于两大地震带之间,带有桩基础支护的海上结构物如跨海桥梁、海上风电、海上石油平台等经常会受到地震、波浪和风等动荷载的威胁,且桩基础大多处于深水环境中<sup>[1-3]</sup>。这些海上结构物的建设成本较大,一旦破坏将会带来不可估量的损失<sup>[4]</sup>。研究表明,动力荷载作用下水-桩-土会发生复杂的相互作用,为了保证海上结构物的安全,有必要对处于深水环境中的桩基础在动力荷载作用下的动力响应进行研究。

当结构在水中振动时往往会发生变形,而结构形状的改变反过来又会影响水体的动力响应,也就是说动力荷载作用下水体的存在不仅会改变结构的动力特性,对结构的动力响应也会有一定的影响。国内外学者针对动力荷载作用下引起的水-结构动力相互作用已经进行了一系列的研究。Liaw等<sup>[5]</sup>使用解析方法研究了可压缩水体中弹性圆柱体受到的地震动水压力;Williams<sup>[6]</sup>采用边界积分方法研究了圆柱体在高频水平地面激励下的动力响应,圆柱体可以齐水面,也可以出水面;另外,Han等<sup>[7]</sup>建立了一种弹性圆柱体在水中振动的附加质量理论模型,并提出了可以利用附加质量来计算结构固有频率的简化公式,这个简化的计算公式对水下柔性结构的动力学研究具有重要的指导意义;杜修力等<sup>[8-9]</sup>提出

了圆柱体地震动水压力的时域算法和时域简化公式,低频振动时动水压力可以用附加质量的形式表示,高频振动时动水压力可以用附加质量和附加阻尼的形式表示;Jiang等<sup>[10]</sup>提出了圆柱体动水压力的简化公式,其主要参数是圆柱体半径和水体深度;Wang等<sup>[11]</sup>提出了一种精确的时域模型来代替三维无限域水体中的水-柱体相互作用模型。

近些年来,针对动力荷载作用下无上部结构的桩基础结构的动力响应研究越来越多。研究动力荷载作用下桩-土相互作用的方法多种多样,如:Winkler模型<sup>[12-14]</sup>、平面应变模型<sup>[15-16]</sup>、积分方程方法<sup>[17-18]</sup>和三维连续模型<sup>[19]</sup>等。Nikolaou等<sup>[20]</sup>提出了一种近似梁动力Winkler地基模型,用于评价成层地基中桩的动力响应;Mylonakis等<sup>[21]</sup>针对纵波垂直入射下桩体的运动响应进行了研究;但是,Winkler模型没有考虑桩和土之间的耦合振动,且大多数参数是基于经验而非理论推导得到的。平面应变模型在Winkler模型上进一步优化,假设竖直方向为零应变,波只在水平方向传播,忽略了周围土体的全三维波效应。积分方程方法考虑了纵波垂直入射条件下桩和土之间的散射。但上述方法都只考虑了桩和土之间的竖向位移而没有考虑桩和土之间的径向位移,而三维连续模型(土体和桩体都用三维控制方程)考虑了土体或桩体的竖向位移和径向位移。Zheng等<sup>[22]</sup>针对黏弹性土中管桩的竖向振动问题,提出了一种考虑桩和土之间耦合振动的竖向位移和

收稿日期:2021-04-28;修订日期:2021-06-29

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52078010);教育部创新团队(IRT\_17R03)。

径向位移的解析解。Dai等<sup>[23]</sup>提出了一种考虑波在三维桩和土之间的传播并且桩体和土体在竖向位移和径向位移连续的解析解。

然而,针对动力荷载作用下水-桩-土相互作用的动力响应研究还很少。He等<sup>[24]</sup>基于半解析方法研究了水-桩-土之间的耦合振动问题,研究结果表明相比于无水情况,水体的存在会降低海底的竖向响应,但是对结构共振频率附近的位移有一定的放大作用;杨勋等<sup>[25]</sup>建立了海水-防波堤-地基系统的有限元模型,对地震过程中的防波堤系统动力响应进行了仿真;Zhao等<sup>[26]</sup>提出了一种考虑防波堤-海水-海床-基岩系统相互作用的频域有限元模型,用于评价防波堤-海水-海床-基岩系统的地震响应。

上述情况表明,针对动力荷载作用下水-结构-土相互作用体系的动力响应问题,桩-土相互作用研究已经较为成熟,而水-土和水-桩相互作用对结构和场地动力响应的研究还不够深入。因此,本文提出了一种竖向和水平地震以及桩顶竖向和水平动荷载4种工况下三维水-桩-土全耦合动力有限元分析模型,系统讨论了水-土相互作用和水-桩相互作用对桩体和海床表面的土体位移响应、动水压力的影响。

## 1 动力方程及边界条件

水-桩-土相互作用及边界条件示意图如图1所示, $r_0$ 表示桩体半径, $h$ 为土体厚度, $d$ 为水体深度。直角坐标系下, $z$ 轴沿桩体轴线向上,坐标原点位于桩体底部。

### 1.1 水体控制方程

假定流体为无旋、无黏性、可压缩的小扰动流体,直角坐标下,以水体速度势 $\phi$ 表示的水体控制方程为:

$$\frac{\partial \phi^2}{\partial x^2} + \frac{\partial \phi^2}{\partial y^2} + \frac{\partial \phi^2}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \phi^2}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中  $c = \sqrt{K/\rho_w}$  表示水中声速,当忽略水体的可压缩性时  $c \rightarrow \infty$ ;  $K$  表示体积模量; $\rho_w$  表示水体质量密度; $t$  为时间;水体密度和波速分别取为  $1000 \text{ kg/m}^3$  和  $1438 \text{ m/s}$ 。

### 1.2 土体和桩体控制方程

根据弹性动力学基本方程可以建立直角坐标中土体和桩体的三维波动控制方程为:

$$(\lambda + G) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} + G \nabla^2 \mathbf{u} = \rho \ddot{\mathbf{u}} \quad (2)$$

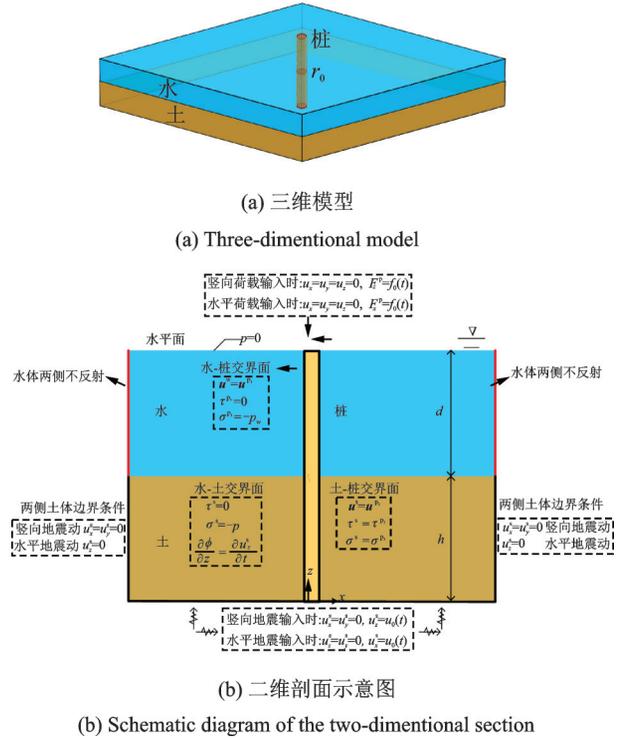


图1 水-桩-土相互作用模型及剖面图

Fig. 1 Water-pile-soil interaction model and profile

$$\nabla \nabla \cdot \mathbf{u} = \begin{cases} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y \partial z} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\nabla^2 \mathbf{u} = \begin{cases} \nabla^2 u_x \\ \nabla^2 u_y \\ \nabla^2 u_z \end{cases} \quad (4)$$

式中  $\nabla = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{\partial}{\partial z} \right\}^T$  为直角坐标的矢量微

分算子,与标量或者矢量相乘表示该量的梯度,与矢量点乘表示该量的散度,与矢量叉乘表示该量的旋度; $\lambda$ 和 $G$ 为拉梅常数; $u_x, u_y, u_z$ 分别表示土体或者桩体的水平和竖向位移; $\rho$ 表示土体或者桩体密度。

直角坐标的拉普拉斯算子为:

$$\nabla^2 = \nabla \cdot \nabla = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (5)$$

### 1.3 边界及连续条件

(1) 水体表面边界条件:

$$p_{z=0} = 0 \quad (6)$$

式中  $p = -\rho_w \frac{\partial \phi}{\partial t}$  表示水体动水压力。

(2) 桩表面边界条件:

$$F_z^p = f_0(t) \quad (\text{桩顶竖向荷载作用}) \quad (7)$$

$$F_x^p = f_0(t) \quad (\text{桩顶水平荷载作用}) \quad (8)$$

式中  $F_z^p$  和  $F_x^p$  分别表示桩体顶部作用的竖向力和水平力;  $f_0(t)$  表示桩体顶部作用的动力荷载, 定义为  $10^6 u_0(t)$ ,  $u_0(t)$  表示土体和桩体底部作用的脉冲位移时程, 如图2所示。

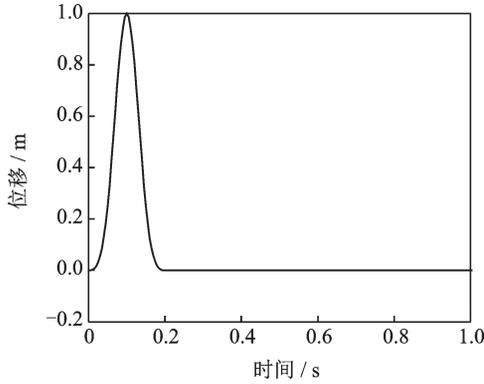


图2 脉冲位移时程

Fig. 2 Time history of impulse

(3) 土体和桩底面边界条件:

$$\begin{cases} u_x = u_y = 0 \\ u_z = 0 \end{cases} \quad (\text{桩顶竖向和水平荷载作用}) \quad (9)$$

$$\begin{cases} u_x = u_y = 0 \\ u_z = u_0(t) \end{cases} \quad (\text{竖向地震作用}) \quad (10)$$

$$\begin{cases} u_z = u_y = 0 \\ u_x = u_0(t) \end{cases} \quad (\text{水平地震作用}) \quad (11)$$

式中  $u_x$  和  $u_y$  表示土体或桩体底部水平位移;  $u_z$  表示土体或桩体底部竖向位移。

(4) 水-土交界面边界条件:

$$\tau_{z=h}^s = 0 \quad (12)$$

$$\sigma_{z=h}^s = -p_{z=h} \quad (13)$$

$$\frac{\partial \phi_{z=h}}{\partial z} = \frac{\partial u_{z=h}^s}{\partial t} \quad (14)$$

式中  $\tau_{z=h}^s$  和  $\sigma_{z=h}^s$  分别表示海床表面的土体剪应力和土体正应力。

(5) 水-桩交界面边界条件:

$$\mathbf{u}_{r=r_0}^w = \mathbf{u}_{r=r_0}^{p1} \quad (15)$$

$$\tau_{r=r_0}^{p1} = 0 \quad (16)$$

$$\sigma_{r=r_0}^{p1} = -p_{r=r_0} \quad (17)$$

式中  $\mathbf{u}_{r=r_0}^w$ ,  $\mathbf{u}_{r=r_0}^{p1}$  分别表示水体与桩体交界面的水体和桩体位移矢量;  $\tau_{r=r_0}^{p1}$  和  $\sigma_{r=r_0}^{p1}$  分别表示水体与桩体交界面的桩体剪应力和桩体正应力。

(6) 土-桩交界面边界条件:

$$\mathbf{u}_{r=r_0}^s = \mathbf{u}_{r=r_0}^{p2} \quad (18)$$

$$\tau_{r=r_0}^s = \tau_{r=r_0}^{p2} \quad (19)$$

$$\sigma_{r=r_0}^s = \sigma_{r=r_0}^{p2} \quad (20)$$

式中  $\mathbf{u}_{r=r_0}^s$ ,  $\mathbf{u}_{r=r_0}^{p2}$  分别表示土体与桩体交界面的土

体和桩体位移矢量;  $\tau_{r=r_0}^s$ ,  $\tau_{r=r_0}^{p2}$ ,  $\sigma_{r=r_0}^s$  和  $\sigma_{r=r_0}^{p2}$  分别表示土体与桩体交界面的土体和桩体剪应力、土体和桩体正应力。

水体四个截断边界采用无反射边界来吸收散射波, 用以模拟无限域, 边界的辐射条件<sup>[27]</sup>可表示为:

$$\nabla p \cdot \mathbf{n} = -\frac{1}{c} \dot{p} \quad (21)$$

式中  $\mathbf{n}$  为截断水体边界的法向方向。

土体四个截断边界采用滚轴边界<sup>[28]</sup>  $u_z^s = 0$  (水平地震动) 或  $u_x^s = u_y^s = 0$  (竖向地震动) 来模拟无限土体区域。

## 2 有限元模型验证

第1节中水体、土体和桩体控制方程分别是基于线性声学介质和线弹性介质建立的, 且各自对应于通过有限元软件ABAQUS建立的水体声学单元和土体、桩体的实体单元。

理论公式的边界条件分为两部分, 一是水-桩-土交界面边界条件(式(12)~(20))。其中水-土交界面、水-桩交界面和土-桩交界面的边界条件可以通过有限元软件ABAQUS里的绑定条件来实现; 二是水体和土体截断边界处的人工边界条件。其中水体截断边界处的人工边界条件通过ABAQUS自带的无反射吸收边界实现(式(21)), 土体截断边界处的人工边界条件通过滚轴边界<sup>[28]</sup>实现。

三维水-桩-土相互作用有限元模型的土体和桩体参数如表1所示。土体和桩体阻尼都采用瑞利阻尼<sup>[29]</sup>, 利用土体和桩体的基频和2阶频率来确定阻尼系数, 其中土体和桩体的阻尼比分别取为0.1和0.05; 水体采用声学单元模拟<sup>[30-32]</sup>, 体积模量取为2.0678 GPa。

表1 桩体和土体参数

Tab. 1 The pile and soil parameters

	高度/ m	半径/ m	泊松比	质量密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/ MPa
桩体	50	1	0.2	2500	30000
土体	30	-	0.4	1800	100

### 2.1 边界验证

采用图2所示的脉冲位移时程, 作用在土体和桩体底部, 土体四个截断边界采用滚轴边界条件, 水体四个截断边界采用无反射吸收边界条件。比较了几种不同模型的桩体顶部相对位移时程, 从而来选取合理的截断边界位置, 结果如图3和4所示。

图3和4表示水平和竖向地震作用下几种不同

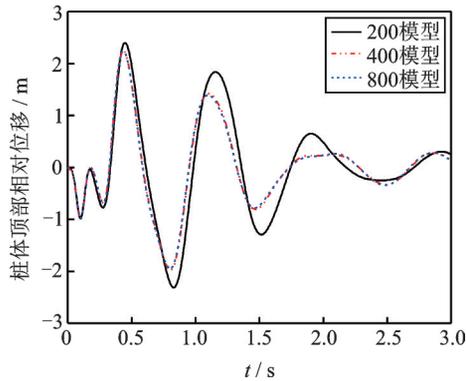


图3 水平地震作用下桩体顶部相对位移时程

Fig. 3 Relative displacement time history at the pile top under horizontal earthquake

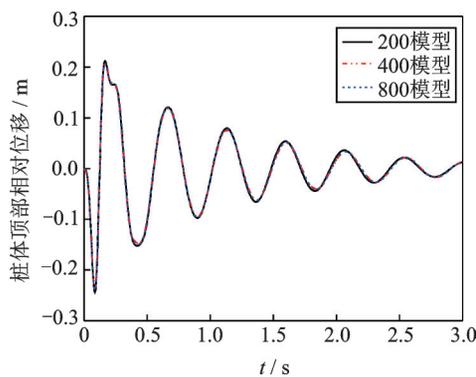


图4 竖向地震作用下桩体顶部相对位移时程

Fig. 4 Relative displacement time history at the pile top under vertical earthquake

模型的桩体顶部相对位移时程图,其中200,400和800模型表示土体和水体的长宽分别都取为200,400和800 m的3种模型。

从图中可以看出当土体和水体的长、宽都取为400 m时与土体和水体的长、宽都取为800 m的桩体顶部相对位移时程吻合较好,从而证明土体和水体滚轴边界选取在400 m位置处是合适的。

## 2.2 模型验证

为了验证本文有限元模型的正确性,与Wang等<sup>[33]</sup>提出的子结构法进行了在桩体顶部水平动荷载作用下桩体顶部位移的对比分析,结果如图5所示。从图中可以看出,两者吻合较好。

## 3 数值算例

在水-桩-土相互作用的计算模型中,水体和土体的长度和宽度都采用第2节中验证得到的合理的土体和水体截断边界位置,即400 m。研究了竖向和水平地震、桩顶竖向和水平动荷载4种工况下水-土和水-桩相互作用对桩体和海床表面土体位移响应、动水压力的影响,其中水-桩-土相互作用情况是

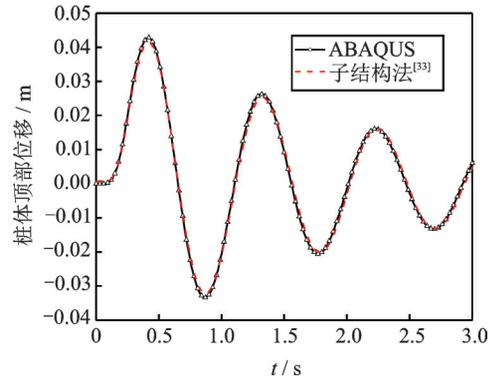


图5 桩顶水平动荷载作用下桩体顶部位移时程

Fig. 5 Displacement time history at the pile top under horizontal dynamic loads

考虑三者之间的耦合作用,与水-桩不耦合情况的差值为水-桩相互作用的影响,与水-土不耦合情况的差值为水-土相互作用的影响。

### 3.1 竖向地震作用

图6表示在竖向地震作用时和不同水体深度下,水-桩-土相互作用、水-桩不耦合和水-土不耦合三种情况的沿桩体高度分布和沿海床表面与桩体距离分布的竖向最大相对位移。从图中可以看出,水-桩-土相互作用和水-桩不耦合两种情况下沿桩体高度分布和沿水-土交界面与桩体距离分布的土体竖向最大相对位移随着水深的增加而减小。水-土不耦合情况下沿桩体高度分布的土体竖向最大相对位移也随着水深的增加而减小,但沿水-土交界面与桩体距离分布的土体竖向最大相对位移随着水深的增加变化不大;还可以看出相比于水-桩相互作用,水-土相互作用对桩体和土体位移响应的影响不可忽略。

图7表示在竖向地震作用时和不同水体深度下,水-桩-土相互作用、水-桩不耦合和水-土不耦合三种情况的沿桩体高度分布和沿海床表面与桩体距离分布的最大动水压力。从图中可以看出,水-桩-土相互作用和水-桩不耦合情况下沿桩体高度和沿水-土交界面与桩体距离分布的最大动水压力随着水深的增加而增大,且相比于水-桩相互作用,水-土相互作用对桩体和土体动水压力的影响较大。

图8表示在竖向地震时和不同桩体半径下,水-桩-土相互作用、水-桩不耦合和水-土不耦合三种情况的沿高度分布和沿海床表面与桩体距离分布的最大动水压力。从图中可以看出,水-土不耦合情况下沿桩体高度和沿水-土交界面与桩体距离分布的最大动水压力随着桩体半径的增加而增大,而其他两种情况下变化不大;还可以看出水-土不耦合情况下的最大动水压力幅值与其他两种情况下的最大动水

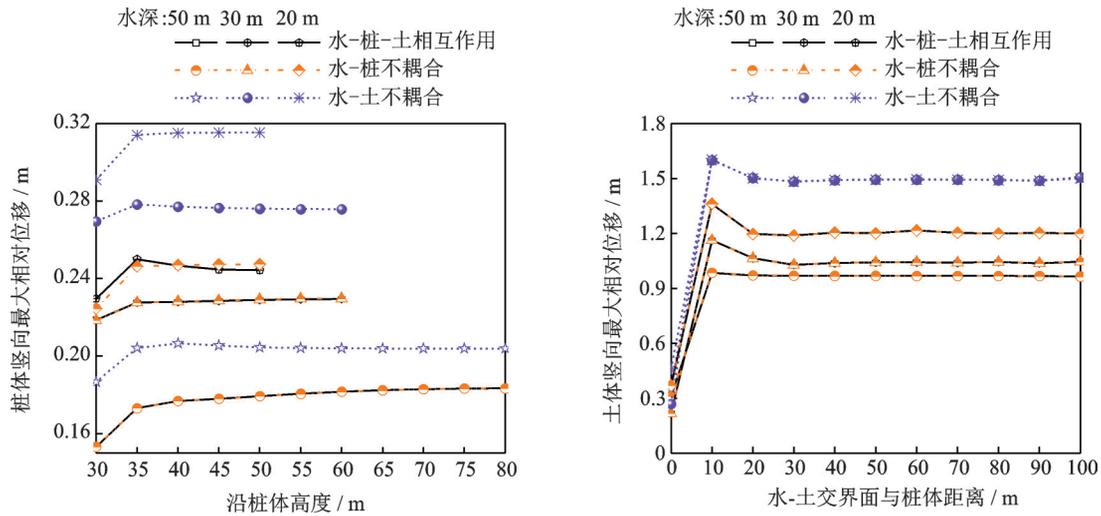


图 6 竖向地震作用时和不同水深情况下沿桩体高度和沿水-土交界面与桩体距离分布的竖向最大相对位移  
 Fig. 6 Maximum vertical relative displacement distribution along pile height and the distance between the water-soil interface while the pile under vertical seismic action and different water depths

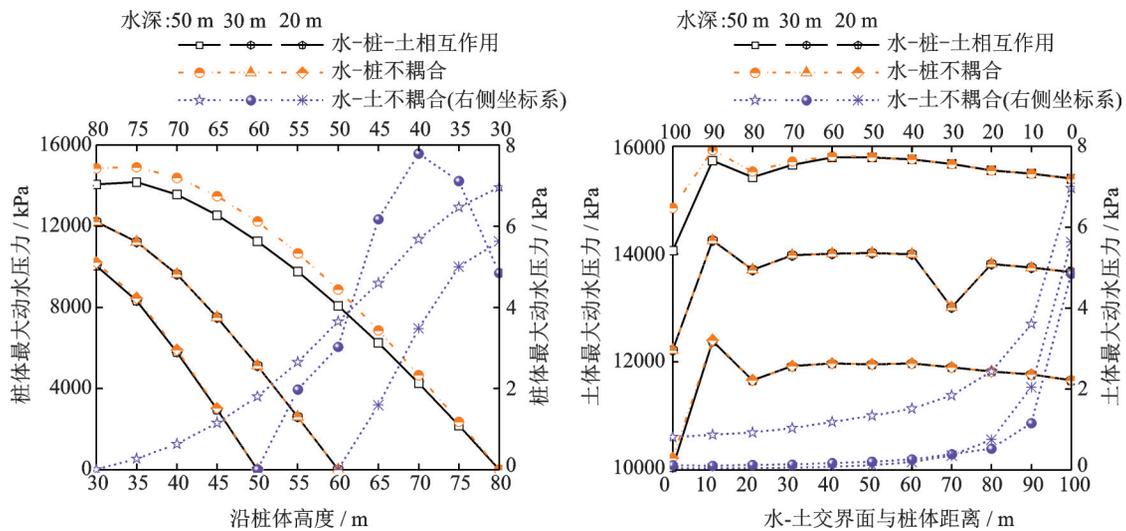


图 7 竖向地震作用时和不同水深情况下沿桩体高度和沿水-土交界面与桩体距离分布的最大动水压力  
 Fig. 7 Maximum hydrodynamic pressure distribution along pile height and the distance between the water-soil interface while the pile under vertical seismic action and different water depths

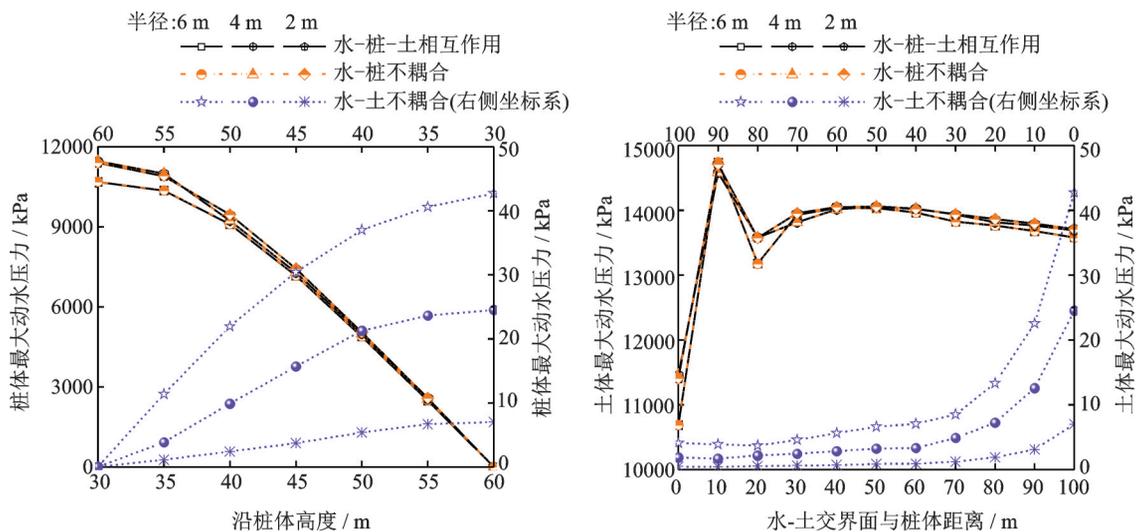


图 8 竖向地震作用时和不同桩体半径情况下沿桩体高度和沿水-土交界面与桩体距离分布的最大动水压力  
 Fig. 8 Maximum hydrodynamic pressure distribution along pile height and the distance between the water-soil interface while the pile under vertical seismic action and different pile radius

压力幅值不在同一个量级,进一步说明竖向地震作用时水-土相互作用的影响不可忽略。

### 3.2 桩顶竖向动荷载作用

图9表示在桩顶竖向动荷载作用时和不同水体深度下,水-桩-土相互作用、水-桩不耦合和水-土不耦合三种情况的沿桩体高度分布和沿海床表面与桩体距离分布的竖向最大位移。从图中可以看出,三种情况下沿桩体高度和沿水-土交界面与桩体距离分布的竖向最大位移随着水深的增加而减小;且相比于水-桩相互作用,水-土相互作用对土体位移响应有一定的影响,而对桩体位移响应的影响不大。

图10表示在桩顶竖向动荷载作用时和不同水体深度下,水-桩-土相互作用、水-桩不耦合和水-土不耦合三种情况的沿桩体高度分布和沿海床表面与

桩体距离分布的最大动水压力。从图中可以看出,水-土相互作用对桩体和土体动水压力的影响不可忽略,而水-桩相互作用对桩体和土体动水压力的影响很小,几乎可以忽略。

### 3.3 水平地震作用

图11表示在水平地震作用时和不同水体深度下,水-桩-土相互作用、水-桩不耦合和水-土不耦合三种情况的沿桩体高度分布和沿海床表面与桩体距离分布的水平最大相对位移。从图中可以看出,水-桩相互作用对桩体位移响应有一定的影响,而水-土相互作用对桩体位移响应的影响很小,对土体位移响应来说,两种情况下则相反。

图12表示在水平地震作用时和不同水体深度下,水-桩-土相互作用、水-桩不耦合和水-土不耦合

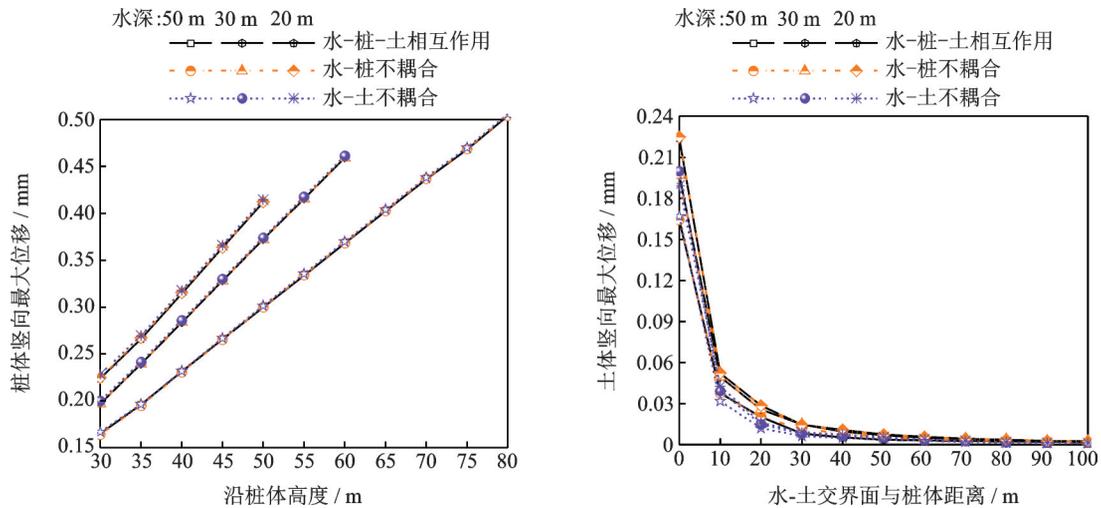


图9 竖向动荷载作用时和不同水深情况下沿桩体高度和沿水-土交界面与桩体距离分布的竖向最大位移

Fig. 9 Maximum vertical displacement distribution along pile height and the distance between the water-soil interface while the pile under vertical dynamic action and different water depths

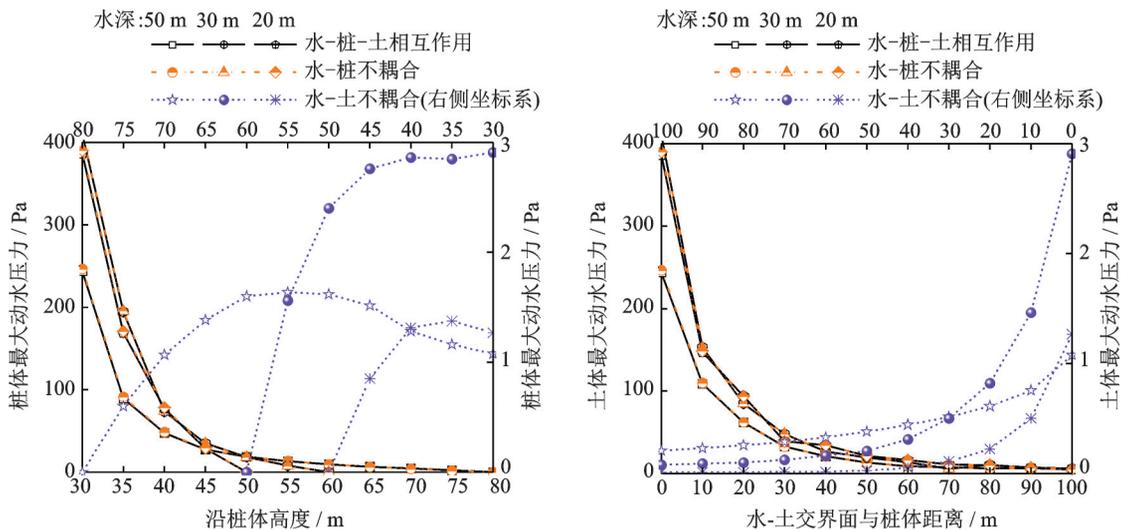


图10 竖向动荷载作用时和不同水深情况下沿桩体高度和沿水-土交界面与桩体距离分布的最大动水压力

Fig. 10 Maximum hydrodynamic pressure distribution along pile height and the distance between the water-soil interface while the pile under vertical dynamic action and different water depths

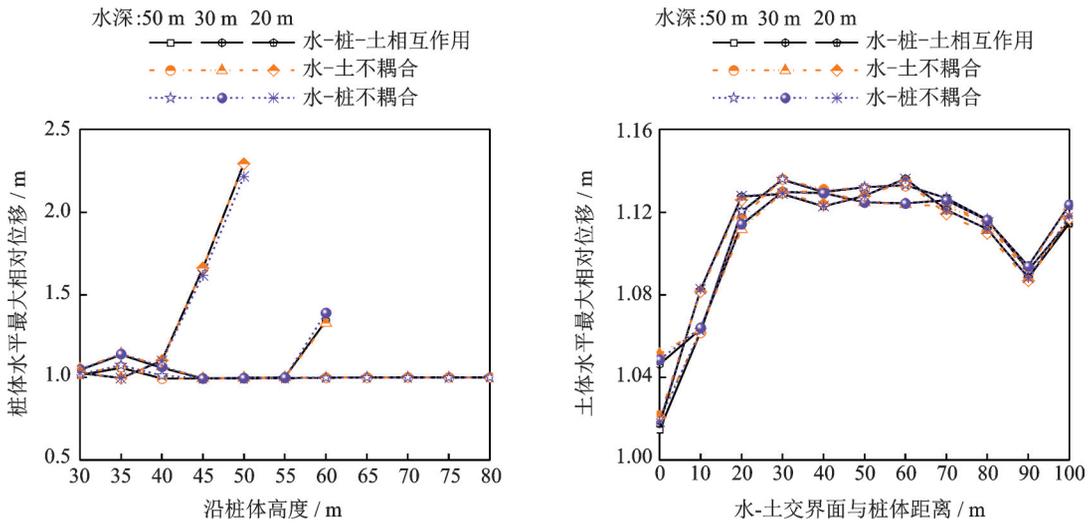


图 11 水平地震作用时和不同水深情况下沿桩体高度和沿水-土交界面与桩体距离分布的水平最大相对位移

Fig. 11 Maximum horizontal relative displacement distribution along pile height and the distance between the water-soil interface while the pile under horizontal seismic action and different water depths

三种情况的沿桩体高度分布和沿海床表面与桩体距离分布的最大动水压力。从图中可以看出,水平地震情况下相比于水-土相互作用对桩体动水压力的影响,水-桩相互作用的影响更大,而对土体动水压力来说情况则相反。

图 13 表示在水平地震作用时和不同桩体半径

下,水-桩-土相互作用、水-桩不耦合和水-土不耦合三种情况的沿桩体高度分布和沿海床表面与桩体距离分布的最大动水压力。从图中可以看出,水-土相互作用对桩体和土体的动水压力响应有一定的影响,对桩体来说水-桩相互作用的影响更大,而对土体来说水-土相互作用的影响更加显著。

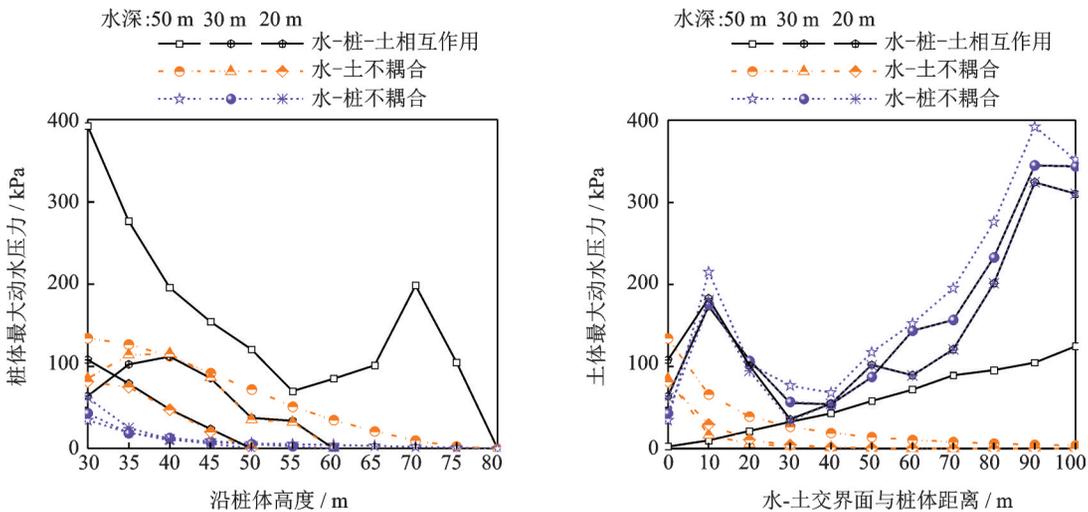


图 12 水平地震作用时和不同水深情况下沿桩体高度和沿水-土交界面与桩体距离分布的最大动水压力

Fig. 12 Maximum hydrodynamic pressure distribution along pile height and the distance between the water-soil interface while the pile under horizontal seismic action and different water depths

### 3.4 桩顶水平动荷载作用

图 14 表示在桩顶水平动荷载作用时和不同水体深度下,水-桩-土相互作用、水-桩不耦合和水-土不耦合三种情况的沿桩体高度分布和沿海床表面与桩体距离分布的水平最大位移。从图中可以看出,三种情况下沿桩体高度和沿水-土交界面与桩体距离分布的水平最大位移随着水深的增加而减小;且相比于水-土相互作用,水-桩相互作用对桩体位移

响应有一定的影响,而对土体位移响应的影

响不大。图 15 表示在桩顶水平动荷载作用时和不同水体深度下,水-桩-土相互作用、水-桩不耦合和水-土不耦合三种情况的沿桩体高度分布和沿海床表面与桩体距离分布的最大动水压力。从图中可以看出,相比于水-土相互作用,水-桩相互作用对桩体动水压力的影响不可忽略,且水-桩和水-土相互作用对土体动水压力响应都有一定的影响。

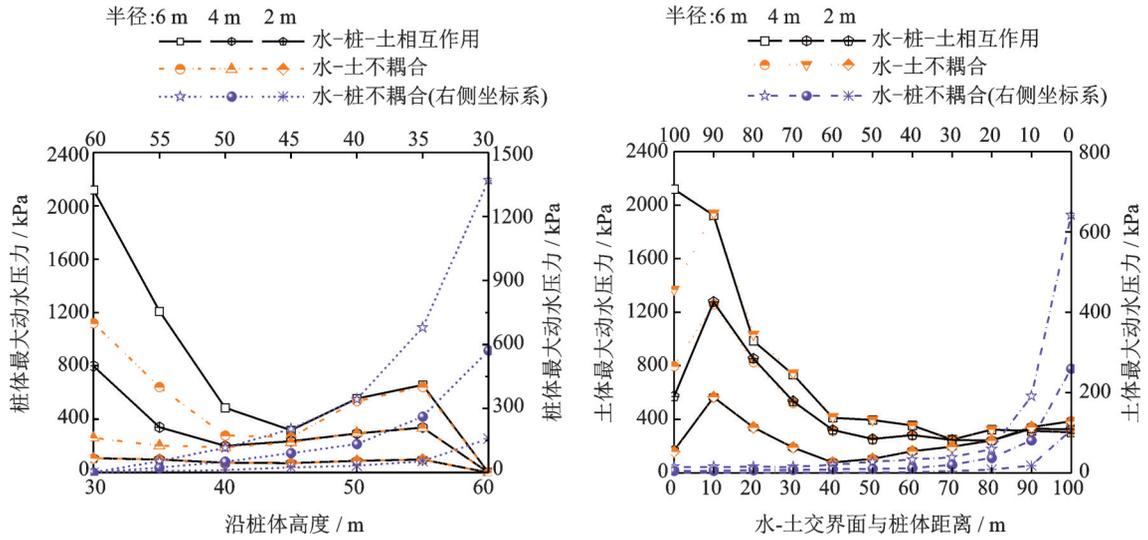


图 13 水平地震作用时和不同半径情况下沿桩体高度和沿水-土界面与桩体距离分布的最大动水压力  
 Fig. 13 Maximum hydrodynamic pressure distribution along pile height and the distance between the water-soil interface while the pile under horizontal seismic action and different pile radius

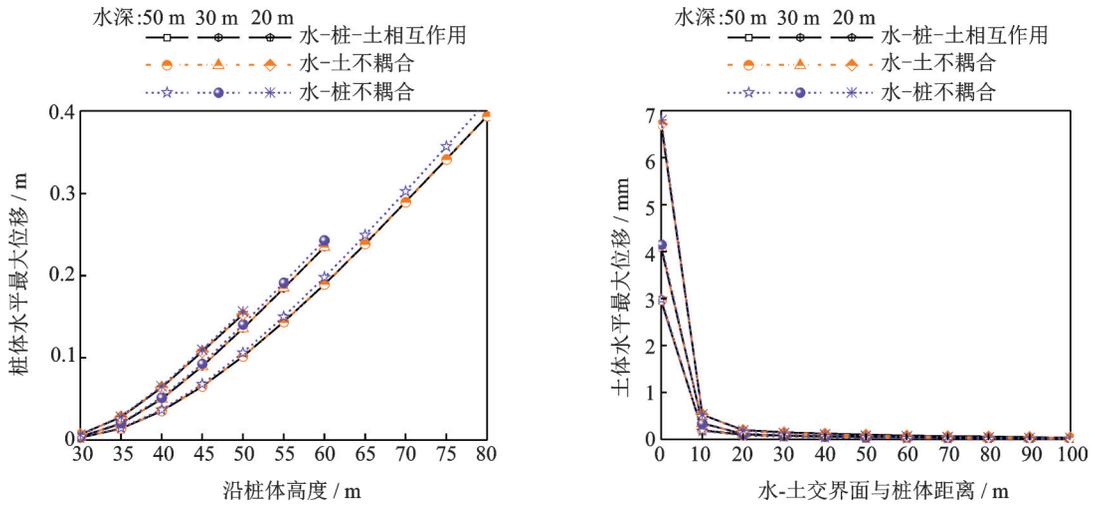


图 14 水平动荷载作用时和不同水深情况下沿桩体高度和沿水-土界面与桩体距离分布的水平最大位移  
 Fig. 14 Maximum horizontal displacement distribution along pile height and the distance between the water-soil interface while the pile under horizontal dynamic action and different water depths

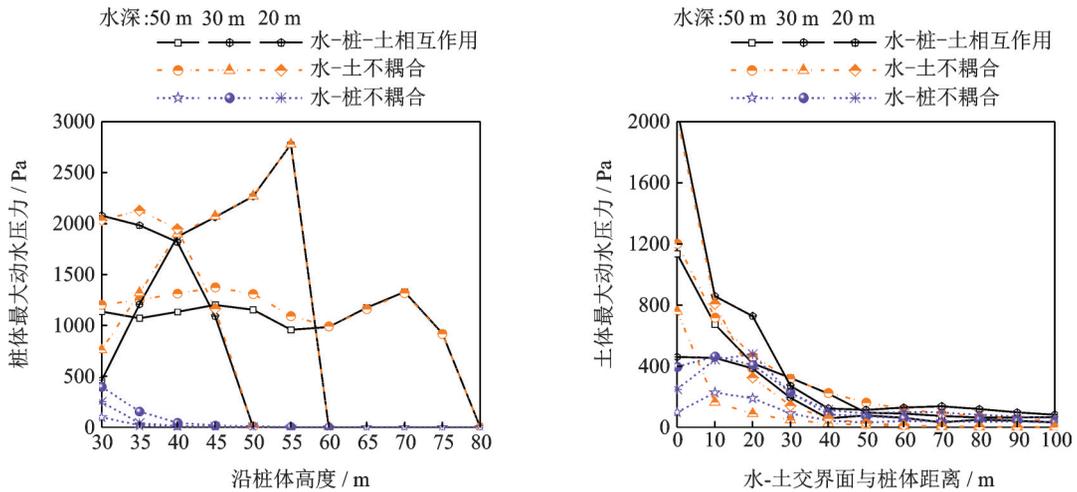


图 15 水平动荷载作用时和不同水深情况下沿桩体高度和沿水-土界面与桩体距离分布的最大动水压力  
 Fig. 15 Maximum hydrodynamic pressure distribution along pile height and the distance between the water-soil interface while the pile under horizontal dynamic action and different water depths

## 4 结 论

本文通过理论分析和数值模拟研究了竖向和水平地震、桩顶竖向和水平动荷载4种工况动荷载作用下水-土相互作用和水-桩相互作用对桩体和海床表面的土体位移、动水压力的影响。研究结果表明:

1) 竖向地震作用下,水-土和水-桩相互作用对桩体和海床表面的土体位移响应和动水压力都有一定的影响,但是水-土相互作用的影响程度更加显著,且随着半径的增大三种情况下都对桩体和海床表面的土体动水压力有一定的影响。

2) 桩顶竖向动荷载作用下,水-土和水-桩相互作用对桩体位移的影响很小,但不同水深情况下水-土相互作用对海床表面的土体位移响应的影响更加显著;且相比于水-桩相互作用,水-土相互作用对桩体和土体动水压力的影响较大。

3) 水平地震作用下,水-桩和水-土相互作用对桩体和土体位移响应和动水压力都有一定的影响,但是水-桩相互作用的影响更加显著,不可忽略;随着半径的增大三种情况下都对桩体和海床表面的土体动水压力有一定的影响。

4) 桩顶水平动荷载作用下,水-土相互作用对桩体和土体位移响应的影响很小,一定程度可以忽略水-土相互作用;水-桩相互作用比水-土相互作用对桩体和海床表面的土体动水压力的影响更加显著。

从上述总结中可以看出,对桩体结构在竖向地震和桩顶竖向动荷载作用下的位移响应来说,可以忽略散射场下水-土相互作用,但自由场下水-土相互作用影响较大,不可忽略;而对桩体结构在水平地震和桩顶水平动荷载作用下的位移响应来说,散射场和自由场下水-土相互作用都可以忽略。基于此结论在后续工作中可以从工程应用的角度对水-桩-土相互作用模型进行进一步的简化分析。

### 参考文献:

[1] 项海帆. 21世纪世界桥梁工程的展望[J]. 土木工程学报, 2000, 33(3): 1-6.  
Xiang Haifan. Prospect of world's bridge projects in 21st century [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(3): 1-6.

[2] Zhang D, Zhang X, He J, et al. Offshore wind energy development in China: current status and future perspective [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15: 4673-4684.

[3] 闫静茹, 路德春, 杜修力, 等. 港珠澳大桥工程人工岛三维非线性地震反应分析[J]. 世界地震工程, 2016, 32(1): 161-168.

Yan Jingru, Lu Dechun, Du Xiuli, et al. Three-dimensional nonlinear seismic response analysis of artificial island of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge Project [J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32(1): 161-168.

[4] 丘大洪, 王永学. 21世纪海岸和近海工程的发展趋势[J]. 自然科学进展, 2000, 10(11): 982-986.  
Qiu Dahong, Wang Yongxue. Development trend of coastal and offshore engineering in the 21st century [J]. Advances in Natural Science, 2000, 10(11): 982-986.

[5] Liaw C Y, Chopra A K. Dynamics of towers surrounded by water [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1974, 3(1): 33-49.

[6] Williams L N. Earthquake response of submerged circular cylinder [J]. Ocean Engineering, 1986, 13 (6) : 569-585.

[7] Han R P S, Xu H. A simple and accurate added mass model for hydrodynamic fluid-structure interaction analysis [J]. Journal of the Franklin Institute, 1996, 333(6): 929-945.

[8] 杜修力, 赵娟, 赵密. 大直径深水圆柱结构动水压力的时域算法[J]. 土木工程学报, 2012, 45: 316-320.  
Du Xiuli, Zhao Juan, Zhao Mi. A time-domain method for the hydrodynamic pressure on deep-water cylindrical structure with large diameter [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45: 316-320.

[9] Du X L, Wang P G, Zhao M. Simplified formula of hydrodynamic pressure on circular bridge piers in the time domain [J]. Ocean Engineering, 2014, 85: 44-53.

[10] Jiang H, Wang B, Bai X, et al. Simplified expression of hydrodynamic pressure on deep water cylindrical bridge piers during earthquakes [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(6): 04017014.

[11] Wang P G, Zhao M, Li H, et al. An accurate and efficient time-domain model for simulating water-cylinder dynamic interaction during earthquakes [J]. Engineering Structures, 2018, 166: 263-273.

[12] Gazetas G, Dobry R. Horizontal response of piles in layered soils [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1984, 110: 20-40.

[13] Dezi F, Carbonari S, Leoni G. A model for the 3D kinematic interaction analysis of pile groups in layered soils [J]. Earthquake Engineering Structure Dynamic, 2009, 38: 1281-1305.

[14] Anoyatis G, Di L R, Mandolini A, et al. Kinematic response of single piles for different boundary conditions: analytical solutions and normalization schemes [J]. Soil Dynamic Earthquake Engineering, 2013, 44: 183-195.

[15] Liu Q J, Deng F J, He Y B. Transverse seismic kinematics of single piles by a modified Vlasov model [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2014, 38(18): 1953-1968.

[16] Zhang C, Deng P, Ke W H. Kinematic response of rectangular piles under S waves [J]. Computer and Geotechnics, 2018, 102: 229-237.

[17] Shahmohamadi M, Khojasteh A, Rahimian M, et al. Dynamics of a cylindrical pile in a transversely isotropic half-space under axial excitations [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2012, 139(5): 568-579.

- [18] Gharahi A, Rahimian M, Eskandari G M, et al. Dynamic interaction of a pile with a transversely isotropic elastic half-space under transverse excitations[J]. International Journal of Solids and Structures, 2014, 51(23-24): 4082-4093.
- [19] Zheng X Y, Li H B, Rong W D, et al. Joint earthquake and wave action on the monopile wind turbine foundation: an experimental study [J]. Marine Structures, 2015, 44: 125-141.
- [20] Nikolaou A S, Mylonakis G, Gazetas G, et al. Kinematic pile bending during earthquakes analysis and field measurements [J]. Géotechnique, 2001, 51 (5) : 425-440.
- [21] Mylonakis G, Gazetas G. Kinematic pile response to vertical P-wave seismic excitation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(10): 860-867.
- [22] Zheng C J, Ding X M, Sun Y F. Vertical vibration of a pipe pile in viscoelastic soil considering the three-dimensional wave effect of soil [J]. International Journal of Geomechanics, 2016, 16(1): 04015037.
- [23] Dai D H, El Naggar M H, Zhang N, et al. Kinematic response of an end-bearing pile subjected to vertical P-wave considering the three-dimensional wave scattering [J]. Computer and Geotechnics, 2020, 120: 103368.
- [24] He R, Kaynia A M, Zhang J, et al. Seismic response of monopoles to vertical excitation in offshore engineering [J]. Ocean Engineering, 2020, 2020(216): 107596.
- [25] 杨勋, 王欢欢, 余克勤, 等. 流-固耦合作用下斜坡式防波堤地震动力响应分析[J]. 工程力学, 2016, 33(10): 248-256.  
Yang Xun, Wang Huanhuan, Yu Keqin, et al. Seismic dynamic response analysis of sloping breakwater under fluid solid coupling[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(10): 248-256.
- [26] Zhao M, Zhang G L, Wang P G, et al. An accurate frequency-domain model for seismic responses of breakwater-seawater-seabed-bedrock system [J]. Ocean Engineering, 2020, 197: 106843.
- [27] Wu W B, Liu Y L, Zhang A M, et al. Numerical investigation on underwater explosion cavitation characteristics near water wave [J]. Ocean Engineering, 2020, 205: 107321.
- [28] 李旭东. 地下结构横断面抗震分析方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2019.  
Li Xudong. Study on seismic analysis methods for cross-section of underground structures[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019.
- [29] 刘晶波, 杜修力. 结构动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.  
Liu Jingbo, Du Xiuli. Dynamics of Structures[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [30] 缪旭弘, 钱德进, 姚熊亮, 等. 基于 ABAQUS 声固耦合的水下结构声辐射研究[J]. 船舶力学, 2009, 13(2): 319-324.  
Miao Xuhong, Qian Dejin, Yao Xiongliang, et al. Sound radiation of underwater structure based on coupled acoustic-structural analysis with ABAQUS [J]. Journal of Ship Mechanics, 2009, 13(2): 319-324.
- [31] 李艳朋, 李建波, 林皋. 库底吸收对重力坝动力响应的分析[J]. 水力发电学报, 2020, 40(3): 145-154.  
Li Yanpeng, Li Jianbo, Lin Gao. Effects of reservoir bottom wave absorption on dynamic response of gravity dams [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 40(3): 145-154.
- [32] 邱奕翔, 魏楚函, 武志刚, 等. 库水模拟对拱坝动力特性的影响分析[J]. 水力发电学报, 2020, 39(6): 109-120.  
Qiu Yixiang, Wei Chuhan, Wu Zhigang, et al. Effects of reservoir water on simulations of arch dam dynamic characteristics [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(6): 109-120.
- [33] Wang P G, Xu Y D, Zhang X L, et al. A substructure method for seismic responses of offshore wind turbine considering nonlinear pile-soil dynamic interaction [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 144: 106684.

## Simplified analysis of water-pile-soil interaction under dynamic loads

HUANG Yi-ming<sup>1</sup>, ZHAO Mi<sup>1</sup>, WANG Pi-guang<sup>1</sup>, CAO Yan-hui<sup>2</sup>, DU Xiu-li<sup>1</sup>

(1.Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2.Beijing Municipal Road & Bridge Group Co. LTD., Beijing 100045, China)

**Abstract:** Aiming at the complex water-pile-soil interaction problem of the single-pile foundation of offshore structures under dynamic loads, this paper establishes a three-dimensional water-pile-soil fully coupled dynamic finite element analysis model. The soil, pile and water are simulated by the solid elements and acoustic media, respectively. The truncation boundary of soil is simulated by roller boundary condition and the truncation boundary of water is adopted by non-reflective absorption boundary condition, and the reasonable truncation boundary position is determined. Then the calculation results of the full coupling analysis model are taken as the reference solution, the effects of four kinds of dynamic load on the displacement and hydrodynamic pressure response of the pile and seabed surface with the water-pile decoupling and water-soil decoupling are systematically studied, and the influence of soil thickness, water depth and pile radius is also discussed.

**Key words:** dynamic loads; circular pile structure; numerical simulation; water-soil interaction; water-pile interaction

作者简介: 黄义铭(1991—),男,博士研究生。电话:18810680832;E-mail: 632815832@qq.com。

通讯作者: 王丕光(1985—),男,博士,教授,博士生导师。E-mail: wangpiguang1985@126.com。