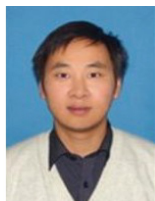


· 地基与基础 ·



## 基于VOF方法的码头群桩结构 流固耦合动力响应数值模拟

张其一<sup>1,2</sup>, 孟祥飞<sup>1</sup>, 陈凯<sup>1</sup>, 郭东起<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学工程学院, 山东青岛266100; 2. 山东省海洋工程重点实验室, 山东青岛266100)

**摘要:** 高桩结构是一种港口海岸码头广泛应用的结构形式, 其在波浪作用下的结构动力响应是保证码头稳定运行的关键因素。使用ABAQUS软件建立码头三维模型、STAR-CCM+软件建立波浪水槽, 采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型和流体体积(VOF)运动界面追踪方法模拟波浪, 实现码头群桩结构和波浪之间双向耦合的模拟。由于桩距与桩直径的比值大于4, 不需要考虑桩间相互影响, 对比模型试验误差低于5%精度可以满足要求。结果表明, 码头群桩在波高为0.3、0.4、0.5 m下的最大受力和位移均能满足规范要求, 桩顶处位移最大为0.66 mm; 最大应力产生在群桩前排桩底, 为152.4 kPa, 桩底区域混凝土易发生失稳破坏, 实际工程中应格外关注。

**关键词:** 群桩结构; VOF方法; 双向耦合; 结构动力响应

中图分类号: U655.54+4.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)02-0178-06

### Numerical simulation of fluid-solid coupling dynamic response of pile group structure of wharf based on VOF method

ZHANG Qiyi<sup>1,2</sup>, MENG Xiangfei<sup>1</sup>, CHEN Kai<sup>1</sup>, GUO Dongqi<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. The Key Laboratory of Ocean Engineering of Shandong Province, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** High pile structure is a kind of structure widely used in port and coast. Its dynamic response under wave action is the key factor to ensure the stable operation of the wharf. The software ABAQUS is used to build a three-dimensional wharf model and a wave flume with STAR-CCM+. The  $k-\varepsilon$  turbulence model and volume of fluid (VOF) motion interface tracking method are used to simulate waves, and the simulation of bidirectional coupling between wharf pile groups and waves is realized. Since the ratio of pile spacing to pile diameter is greater than 4, the interaction between piles does not need to be considered, and the error of the comparison model test is less than 5%, which can meet the requirements. The results show that the maximum force and displacement of the wharf pile groups under wave heights of 0.3 m, 0.4 m, and 0.5 m can meet the code requirements. The displacement at the top of the pile is the largest, which is 0.66 mm. The maximum stress occurs at the bottom of the front row of piles in the pile group, which is 152.4 kPa. The concrete in the pile bottom area is prone to instability and failure, and special attention should be paid in practical engineering.

**Keywords:** pile group structure; VOF method; bidirectional coupling; structural dynamic response

在海洋中, 近海及海洋工程建筑物常受到风、波浪和海流的作用, 其中波浪荷载是非常重要的控制荷载<sup>[1]</sup>, 也是本文与高桩结构进行双向耦合

的重点研究对象。桩是近海、港口工程采用较为普遍的结构形式<sup>[2]</sup>, 而桩群结构在波浪场中受到的波浪荷载对其结构本身的作用和响应一直都是

收稿日期: 2024-05-13

作者简介: 张其一(1977—), 男, 博士, 教授, 从事岩土力学基本理论与数值分析、海洋土力学工程性质与试验研究。

非常重要的问题, 尤其在波浪力作用下产生的位移对码头安全至关重要。

目前数值模拟已经成为结构研究的重要技术手段, 刘加海等<sup>[3]</sup>利用 FLUENT 边界造波实现二维规则波的数值模拟; Baudic et al.<sup>[4]</sup>通过模拟二维波浪水槽, 进行非线性波的产生和传播以及消散过程的仿真; Troch et al.<sup>[5]</sup>利用二维数值波浪水槽结合流体体积(volume of fluid, VOF)方法进行防波堤的仿真; 净晓飞等<sup>[6]</sup>基于 FLOW-3D 软件进行风机基础和波浪之间的流固耦合三维数值模拟。

上述文献侧重于波浪场的研究, 对桩群和波浪间的流固耦合尤其是双向强耦合的研究还不够深入。本文在前人研究的基础上, 以群桩在波浪力作用下的响应为研究对象, 利用 ABAQUS 和 STAR-CCM+ 软件建立三维模型进行协同仿真。ABAQUS 可以精确计算群桩结构的位移和力, 但模拟波浪效果较差; STAR-CCM+ 可以提供规则波流场但结构响应计算效果欠缺, 故采用两者进行强耦合运算, 可以极大提高计算精确度, 并采用  $k-\varepsilon$  (湍流动能-湍流耗散率) 湍流模型和 VOF 运动界面追踪方法, 较好地实现了码头结构和波浪之间的双向耦合<sup>[7]</sup>。

## 1 数值模型

### 1.1 计算模型

模型(图1)的计算区域设置为  $60\text{ m} \times 20\text{ m} \times 20\text{ m}$  (长 $\times$ 宽 $\times$ 高), 水深  $16\text{ m}$ , 波高  $0.3$ 、 $0.4$ 、 $0.5\text{ m}$ , 周期  $1.35\text{ s}$ , 波长分别为  $3.31$ 、 $3.48$ 、 $3.67\text{ m}$ 。高桩码头位于流场入口  $30\text{ m}$  处, 码头尺寸为高  $23.35\text{ m}$ 、长  $20\text{ m}$ , 预制混凝土板宽  $19.6\text{ m}$ , 桩高  $18\text{ m}$ 、直径  $1.2\text{ m}$ <sup>[8]</sup>, 网格划分见图2, 对波浪自由表面耦合区域和群桩结构进行局部加密处理, ABAQUS 其余部分近似单元尺寸为  $0.3\text{ m}$ , 群桩近似单元尺寸为  $0.1\text{ m}$ , STARCCM+波浪区域网格尺寸大小为  $0.01\text{ m}$ 。

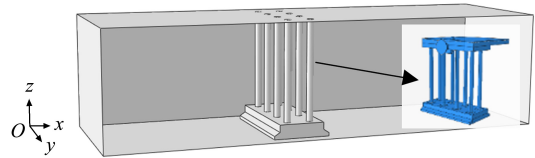


图1 模型  
Fig.1 Model

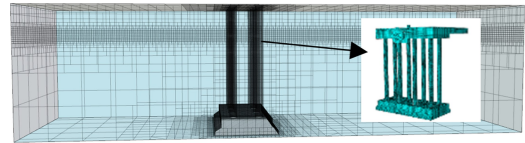


图2 模型网格划分  
Fig.2 Model grid division

### 1.2 控制方程及边界条件

#### 1.2.1 控制方程

假定水为不可压缩流体, 水质点运动遵从质量守恒和动量守恒定律, 其中控制方程中的质量方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

式中:  $t$  为时间;  $\rho$  为密度, 即单位体积的质量;  $\mathbf{v}$  为连续体速度。

线性动量的时间变化率等于作用于连续体的合力, 则有:

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) = -\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{f}_b \quad (2)$$

式中:  $\otimes$  为外积,  $\mathbf{f}_b$  为作用于连续体的单位体积的各种体积力(例如重力和离心力)的合力向量,  $\boldsymbol{\sigma}$  为应力张量。对于流体, 应力张量通常写为法向应力与剪切应力的总和, 即  $\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + \mathbf{T}$ , 得出:

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) = -\nabla \cdot (p\mathbf{I}) + \nabla \cdot \mathbf{T} + \mathbf{f}_b \quad (3)$$

式中:  $p$  为压力,  $\mathbf{T}$  为黏性应力张量,  $\mathbf{I}$  为统一张量。

根据能量守恒, 有:

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E \mathbf{v}) = \mathbf{f}_b \cdot \mathbf{v} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \boldsymbol{\sigma}) - \nabla \cdot \mathbf{q} + S_E \quad (4)$$

式中:  $E$  为单位质量的总能量,  $\mathbf{q}$  为热通量,  $S_E$  为单位体积的能量源。

连续性方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \int_V \rho dV \right) + \oint_A \rho \mathbf{v} d\mathbf{a} = \int_V S dV \quad (5)$$

式中:  $V$  为体积,  $\mathbf{a}$  为面积矢量,  $S$  为指定的源项。

动量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \int_V \rho \mathbf{v} dV \right) + \oint_A \rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v} d\mathbf{a} = - \oint_A p \mathbf{I} d\mathbf{a} + \oint_A \mathbf{T} d\mathbf{a} + \int_V \rho \mathbf{g} dV + \int_V \mathbf{f}_b dV - \sum_{i=1}^n \int_A \alpha_i \rho_i \mathbf{v}_{d,i} \otimes \mathbf{v}_{d,i} d\mathbf{a} \quad (6)$$

式中:  $p$  为压力,  $\alpha_i$  为第  $i$  项体积分,  $\rho_i$  为第  $i$  项密度,  $\mathbf{v}_{d,i}$  为第  $i$  项扩散速度。

固体部分的控制方程根据牛顿第二定律有:

$$\rho_s \bar{\mathbf{d}}_s = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_s + \mathbf{f}_s \quad (7)$$

式中:  $\rho_s$  为固体密度,  $\boldsymbol{\sigma}_s$  为柯西应力张量,  $\mathbf{f}_s$  为固体体积力矢量,  $\bar{\mathbf{d}}_s$  为固体域当地加速度矢量。

对于三维问题, 平衡方程为:

$$\boldsymbol{\sigma}_{ij,j} + \rho \mathbf{f}_i = \rho \ddot{\mathbf{u}}_i \quad (8)$$

式中:  $\boldsymbol{\sigma}_{ij,j}$  为应力张量对  $j$  方向的偏导数之和,  $\mathbf{f}_i$  为  $i$  向体积力,  $\ddot{\mathbf{u}}_i$  为  $i$  向加速度。

耦合控制方程为:

$$\begin{cases} \tau_f \mathbf{n}_f = \tau_s \mathbf{n}_s \\ d_f = d_s \\ q_f = q_s \\ T_f = T_s \end{cases} \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (11)$$

式中:  $\tau_f$ 、 $\tau_s$  分别为流体、固体应力;  $\mathbf{n}_f$ 、 $\mathbf{n}_s$  分别为流体、固体单位向量;  $d_f$ 、 $d_s$  分别为流体、固体位移;  $q_f$ 、 $q_s$  分别为流体、固体热量;  $T_f$ 、 $T_s$  分别为流体、固体温度;  $\mu$  为分子黏性系数;  $\mu_i$  为湍流黏性系数;  $u_i$  为流体速度在  $i$  方向的分量;  $x_i$  为空间坐标在  $i$  方向上的分量;  $x_j$  为空间坐标在

$j$  方向上的分量;  $G_k$  为由于平均速度梯度引起的湍流动能的产生项;  $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$  为常系数;  $\sigma_\varepsilon$ 、 $\sigma_k$  为  $k$ 、 $\varepsilon$  对应的普朗特常数。

### 1.2.2 边界条件设置

高桩码头底座接触海洋土壤, 故底部边界条件设置为固定约束, 预制混凝土板右边界约束  $x$  和  $z$  方向运动, 各部件之间设置为绑定约束。波浪槽入口边界条件设置为速度入口, 右边界设置为压力出口, 允许流体和空气流出, 出口类型为场函数并且设置阻尼削波。上边界同样为压力出口, 底部和侧面边界设置为对称界面, 无摩擦减小计算资源的浪费, 从而提高运算效率。

### 1.3 数值模型验证

为保证数值模型计算的准确性, 为实际工程提供可靠参考, 对模型进行验证, 对比王爱群等<sup>[9]</sup>物理模型试验, 因为桩距与直径的比值大于 4<sup>[10]</sup>, 可以不考虑桩与桩之间的影响, 所以用单桩验证数值模型。物理模型试验桩直径为 18 mm, 水槽尺寸 65 m×2 m×2.5 m(长×宽×高), 水深 0.5 m, 取波高  $H=0.18$  m、波周期  $T=1.35$  s, 仿真时间 6 s, 模型仿真结果见图 3。对比纵向波浪力拟合程度较好, 物理模型试验测得平均受纵向波浪力大小为 243.20 N, 数值模拟纵向力大小平均值为 248.54 N, 平均误差不超过 5%; 模型试验最大纵向波浪力为 363.6 N, 数值模拟最大纵向波浪力为 333.2 N, 最大值误差不超过 10%。以上表明该数值模型可以较好地估计实际工程中桩与波浪的流固耦合情况, 满足工程需求且能提供可靠参考。

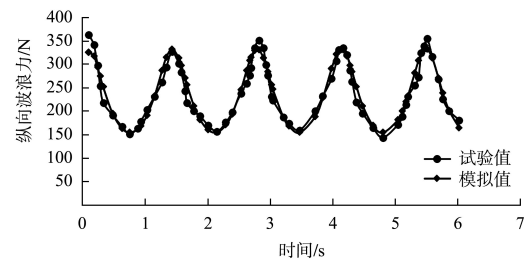


图3 试验数据与数值模拟波浪力对比

Fig. 3 Comparison of test and numerical simulation of wave force

## 2 数值计算结果及分析

### 2.1 波高与测点位移关系

ABAQUS 和 STAR-CCM+联合运算得到以下结果: 在相同水深、周期情况下, 桩水平面测点受纵向波浪力在波高  $H$  分别为 0.3、0.4、0.5 m 产生的位移见图 4。可以看出, 桩测点的位移随时间呈周期性变化, 在水深、周期等条件相同的情况下, 波高越高, 位移越大, 测点最大位移分别为 0.046、0.053、0.063 mm, 波动在逐渐减小最后趋于平衡, 桩顶端位移最大为 0.66 mm。波高 0.3 m 时测点位移在 0.02 mm 上下呈周期性波动; 波高 0.4 m 时测点位移在 0.025 mm 范围周期性波动; 波高 0.5 m 时测点位移在 0.03 mm 上下波动。根据 JTS 167-1—2010《高桩码头设计与施工规范》<sup>[11]</sup>, 可满足该码头需求, 保证高桩码头正常工作需要。

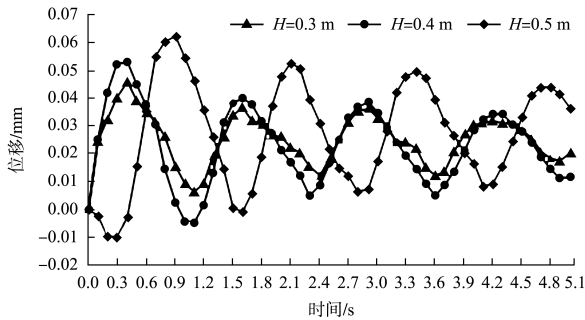


图 4 不同波高下测点位移曲线  
Fig. 4 Displacement curves of measure points with different wave height

### 2.2 水深与测点位移的关系

根据数值模拟结果可知, 在波高  $H$  为 0.3 m、周期  $T=1.35$  s 的情况下, 水下每 2 m 取 1 个点作为桩位移监测点, 由上到下标号, 水深和位移关系见图 5。

由图 5 可知, 波高  $H=0.3$  m、 $T=1.35$  s 时, 水深越大桩  $x$  轴位移越小, 从测点 1~8 随着水深增加位移呈降低趋势; 水下 0~14 m 时测点每下降 2 m, 位移相对减少 3%~6%; 水下 14 m 后位移相对减少最大, 约为 20%。

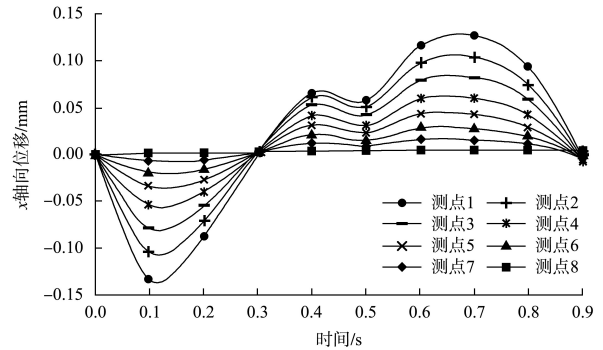
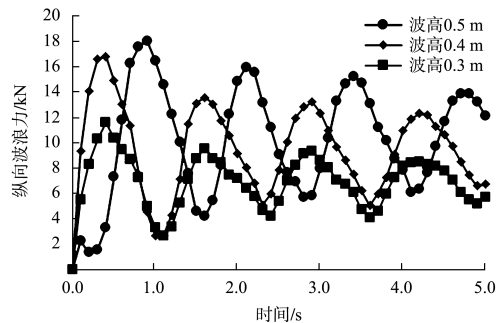


图 5 不同水深下各测点位移

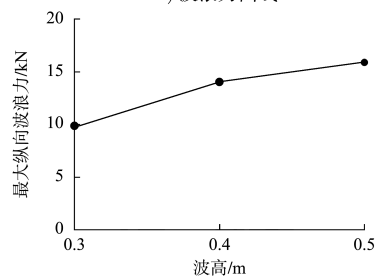
Fig. 5 Displacements of measure points at different depths

### 2.3 波高与测点、受力关系

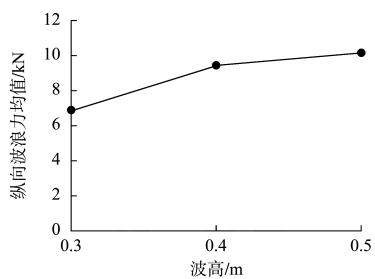
选取与水平面平齐的测点  $z=16$  m 处, 分别得到波高为 0.3、0.4、0.5 m 时测点波浪力, 见图 6。由图 6(a) 可看出, 测点受力呈现周期性变化, 波高为 0.3 m 时桩受到的纵向波浪力大小在 6.5 kN 附近呈周期性波动; 波高 0.4 m 时纵向波浪力大小在 9.0 kN 附近呈周期性波动; 波高 0.5 m 时在 11.0 kN 附近呈周期性波动。由图 6(b) 和 c) 可看出, 波高越高, 测点所受最大力越大, 且受力波动幅度越大, 不同波高下波浪力最大分别为 18.00、16.78、11.56 kN; 波高越小, 测点所受最大力便越小, 波动幅度也越小。波高  $H=0.4$  m 时不同时刻的 Mises 应力云图见图 7。可以看出, 群桩所受力随着水深增大而增加, 底部受力呈周期性波动且 Mises 应力较大易发生失稳破坏。



a) 波浪力曲线



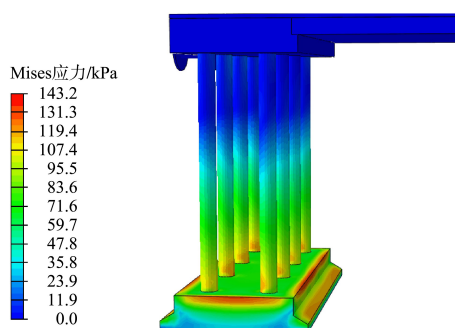
b) 最大纵向波浪力



c) 平均纵向波浪力

图 6 不同波高下波浪力

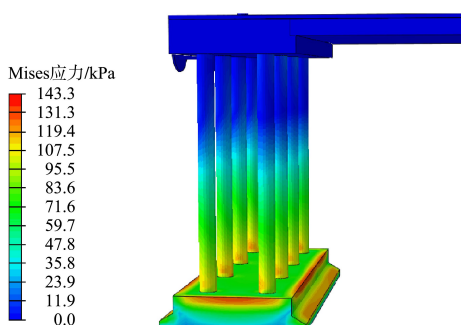
Fig. 6 Wave force of different wave heights



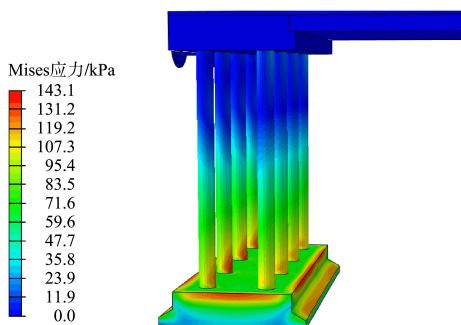
d)  $t=2.0$  s

图 7  $H=0.4$  m 时不同时刻的 Mises 应力云图

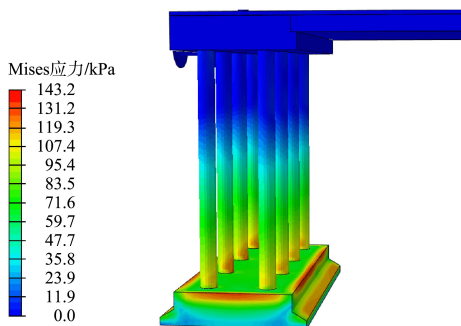
Fig. 7 Mises stress nephogram at different time when  $H$  is 0.4 m



a)  $t=0.5$  s



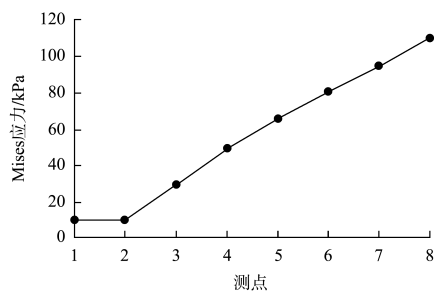
b)  $t=1.0$  s



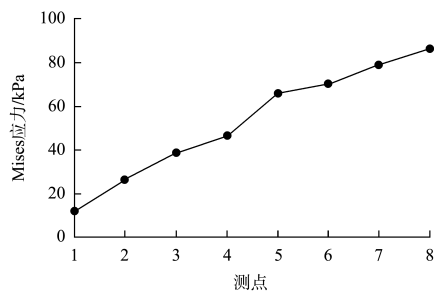
c)  $t=1.5$  s

### 2.4 水深与测点受力关系

波高  $H=0.4$  m 时不同时刻各测点的 Mises 应力见图 8。可以看出，所处水深越深的测点 Mises 应力越大，与水深呈线性增大关系，且码头的最大应力点处在前排桩  $x$  正半轴方向底部，为 152.4 kPa，见图 9，此区域混凝土相对容易发生失稳破坏；且前排桩最先接触波浪，产生的应力相比后排桩更大，后排最大 Mises 应力为 111.740 kPa 均能满足码头日常工作需要。其中群桩底部为混凝土易发生失稳破坏区域，实际工程中应格外关注。



a)  $t=0.5$  s



b)  $t=1.0$  s

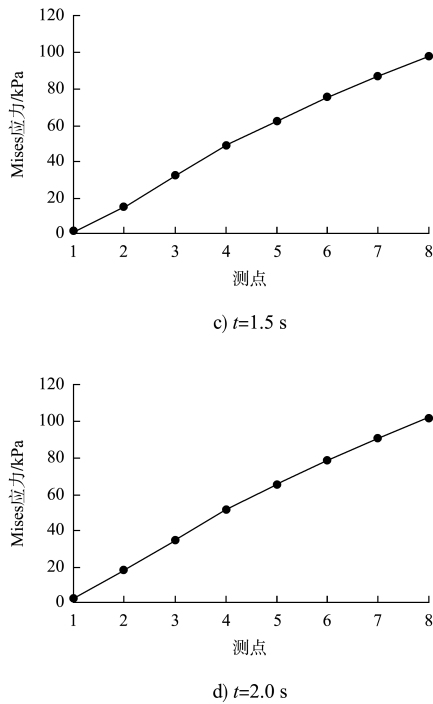


图8  $H=0.4\text{ m}$  时不同时刻各测点的 Mises 应力  
Fig. 8 Mises stress of measure points at different time when  $H$  is  $0.4\text{ m}$

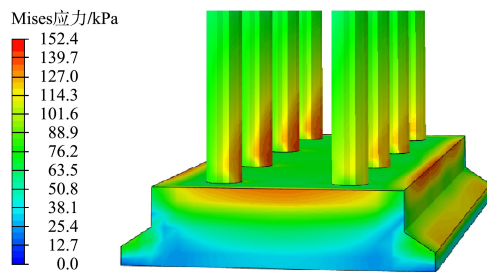


图9 码头桩底易失效区 Mises 应力云图  
Fig. 9 Mises stress nephogram in easy failure area of wharf pile bottom

### 3 结论

1) 本文通过数值模型建立单桩波浪流固耦合, 得到的单桩受力曲线与物理模型试验数值误差较小, 平均误差不超过 5%, 最大误差不超过 10%, 因此采用 ABAQUS 和 STAR-CCM+ 进行波浪和群桩的流固耦合分析是可靠的。

2) 波高越高, 桩产生的水平位移越大, 本文设定最大波高  $H=0.5\text{ m}$  桩顶端产生的位移最大为  $0.66\text{ mm}$ , 满足规范要求; 且越靠近海底的测点位移越小。

3) 随着波高的增大, 桩测点波浪力也随之增大, 在波高  $H=0.5\text{ m}$  时, 最大 Mises 应力产生于前

排桩后底部为  $152.4\text{ kPa}$ , 桩受力最大为  $18.00\text{ kN}$ 。群桩底部为易发生失稳破坏区域, 在实际工程中应该格外关注。

### 参考文献:

- [1] 刘元芳, 黄秀芬, 林家浩. 固定式导管架平台的动力安全性校核[J]. 计算结构力学及其应用, 1990(3): 73-83.  
LIU Y F, HUANG X F, LIN J H. Dynamic safety check of fixed jacket platform [J]. Computational structural mechanics and its applications, 1990(3): 73-83.
- [2] 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 S J, ZHU X L, ZHANG H, et al. Numerical simulation on bidirectional fluid-solid coupling between single pile and wave[J]. Water resources and hydropower engineering, 2014, 45(4): 63-66.
- [3] 刘加海, 杨永全, 张洪雨, 等. 二维数值水槽波浪生成过程及波浪形态分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2004(6): 28-31.  
LIU J H, YANG Y Q, ZHANG H Y, et al. Making waves in 2-D numerical flume and feature analysis of the numerical waves [J]. Journal of Sichuan University (engineering science edition), 2004(6): 28-31.
- [4] BAUDIC S F, WILLIAMS A N, KAREEM A. A two-dimensional numerical wave flume-part 1: nonlinear wave generation, propagation, and absorption [J]. Journal of offshore mechanics and arctic engineering, 2001, 123: 70-75.
- [5] TROCH P, DE ROUCK J. Development of two-dimensional numerical wave flume for wave interaction with rubble mound breakwaters[C]//American Society of Civil Engineers. Proceedings of the 1998 26th International Conference on Coastal Engineering. New York: ASCE, 1999: 1638-1649.
- [6] 净晓飞, 刘国, 柏延强, 等. 基于 FLOW-3D 的单桩海上风电基础防冲刷数值模拟研究[J]. 水道港口, 2021, 42(6): 724-730.  
JING X F, LIU G, BO Y Q, et al. Numerical simulation of scour prevention of monopile foundation of offshore wind turbines based on FLOW-3D[J]. Journal of waterway and harbor, 2021, 42(6): 724-730.

(下转第 231 页)