

波浪作用下筏式养殖结构的动力分析*

崔 勇 关长涛 黄 滨 李 娇 蒋增杰

(农业部海洋渔业可持续发展重点实验室 青岛市海水鱼类种子工程与生物技术重点实验室
中国水产科学研究院黄海水产研究所 青岛 266071)

摘要 针对筏式养殖设施结构的特点,基于有限元商业软件 ANSYS 对其进行数学建模,通过数值计算,对不同位置浮标与吊笼的位移和最大锚绳力进行分析。数值模拟研究表明,筏式养殖设施整体结构在波浪作用下呈现周期性的运动趋势,但并未发生浮标或吊笼相互缠绕的现象,说明此筏式结构在波浪作用下能够安全使用。不同位置的浮标与吊笼,由于受到锚绳与筏绳相互牵引的作用,其位移随时间变化的趋势有所不同。两侧锚绳受力变化周期与波浪周期基本一致,迎浪侧锚绳受力明显大于背浪侧,锚绳力最大值约为 1000 N。研究表明,通过对比不同的波浪工况条件,发现各个浮标和吊笼在水平与垂直方向的位移幅度均随着波高的增加而增大,且垂直方向位移幅度大于水平方向。

关键词 筏式养殖;有限元;波浪;数值模拟

中图分类号 S969 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2014)04-0125-07

筏式养殖属于天然水域增养殖工程的一种,是在自然海区利用具有特定功能的设施或装备制成各种类型的筏架,进行大型藻类、贝类及其他海产生物的养殖,从而实现海洋经济作物的人工养殖、自然增殖以及海洋生态环境和生物资源的修复与保护(张立斌 2010)¹⁾。目前,我国的筏式养殖系统基本建立在水流清澈、盐度较高、无工业污染、淡水径流较少、浮泥较少和冬季无冰冻水层的浅海海区,随着近海海域盲目的扩大人工养殖规模,现今近海区养殖已趋近饱和,将筏式养殖向深水海域延伸已成为必然(邓推 2010)²⁾。因此,根据深水海域的特点,研究筏式养殖结构的抗风浪性能,就成为构建适合高海况作业的筏式养殖工程设施系统亟需解决的关键问题。

目前国内外有关筏式养殖的研究多集中于养殖容量、养殖模式和生态机制方面,对筏式养殖结构的水动力性能、设计计算理论方面的基础研究相对较

少,对设计方面的理论和技术研究积累也比较欠缺。国内学者王经坤等(2008)利用三维模型对筏架结构进行了动力学建模和分析,计算结构表明,PVC 材料的缆索可以抵抗深水风浪流的影响。台湾学者李冠颖等(2009)运用集中质量法对外海浮筏式舢架的水动力特性进行了仿真计算,并通过水槽模型试验对计算结果进行对比验证。邓推等(2010)针对目前我国常用的延绳式筏式养殖结构,计算了波浪作用下浮标的运动特性,分析了梗绳材料和配重对锚绳力的影响。崔勇等(2012)通过建立浮标与绳索整体结构的有限元数学模型,对筏式养殖系统在流场中的运动受力进行分析。国外学者 Stevens 等(2008)介绍了一种在开阔水域的贝类养殖模式,并且通过海上实测与数值模拟对养殖结构与波流间作用机制进行了研究。本研究基于 ANSYS 提供的参数化建模技术,对波浪作用下筏式养殖结构的动态响应进行数值模拟,以期对深水筏式

* 国家自然科学基金(30972256, 51239002)、国家科技支撑计划(2011BAD13B05)和国家海洋局专项[DOME(P(MEA)-02]共同资助。崔 勇, E-mail: cuiyong@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2013-09-27; 收修改稿日期: 2013-11-21

1) 张立斌. 几种典型海域生境增养殖设施研制与应用. 见: 中国科学院研究生院博士研究生学位论文, 2010

2) 邓推. 筏式养殖系统在波浪作用下的数值模拟. 见: 大连理工大学硕士研究生学位论文, 2010

结构工程设计提供理论参考。

1 计算方法

1.1 有限元分析方法

筏式养殖整体结构在波浪作用下的有限元离散方程可由下式来表示(Tsukrov *et al*, 2003) :

$$M\ddot{a}(t) + Ka(t) = F(t) + R(t) \quad (1)$$

式中, $a(t)$ 是节点位移向量, M 是与时间无关的质量矩阵, K 是系统总体刚度矩阵, $F(t)$ 和 $R(t)$ 分别是流体静载荷和动载荷效应引起的等效节点力矢量, $\ddot{a}(t)$ 是节点加速度矢量。由上述的有限元动力分析方程可以看出, 筏式养殖结构离散后每个单元的质量矩阵、刚度矩阵和节点力矢量是求解方程的关键。筏式养殖结构主要由浮标、吊笼、筏绳、锚绳和养殖吊绳组成, 其离散后以柔性的绳索单元为主体, 在波浪作用下绳索形状和张力的变化与受到的水动力相互影响, 所以要对其整体结构运动和受力进行精确分析存在较大难度。本研究借助于有限元建模商业软件 ANSYS, 利用其内置的 PIPE59 管单元来模拟筏式养殖结构单元。ANSYS 中的管单元是一种可承受拉、压、弯作用, 并且能够模拟海洋波浪的单轴单元, 可以用来计算位于水中的圆管形构件的浮力和波浪力的静载荷与动载荷(图 1)。PIPE59 单元的每个结点有 3 或 6 个自由度, 即沿 x, y, z 方向的线位移及绕 X, Y, Z 轴的角位移。当消除抗弯刚度时可以将管单元转换为缆索单元, 因此可用于模拟柔性结构。

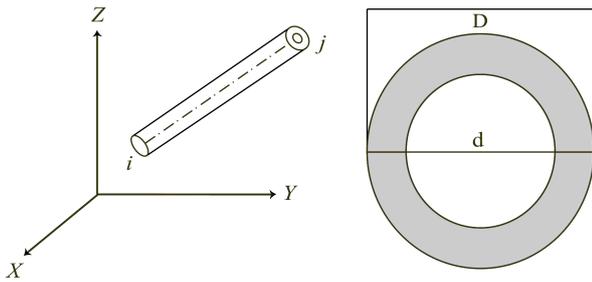


图 1 管单元模型

Fig.1 The scheme of the pipe

1.2 管单元特性

浮标和吊笼结构用管单元来模拟, 其单元质量矩阵采用与三维梁单元相同的形式, 其中,

$$A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \quad (2)$$

$$I = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4) \quad (3)$$

式中, A 和 I 分别为单元的横截面积和惯性矩, D 和 d 分别为单元的外径和内径; 其单元刚度矩阵采用与三维梁单元相同的形式, 其中,

$$T_T = \frac{G_T(D^3 - d^3)}{L} \quad (4)$$

式中, T_T 为与扭转自由度相关的单元刚度系数, G_T 为扭转刚度常数, L 为单元长度。

管单元模拟筏绳、吊绳和锚绳结构时, 均作为缆索单元来计算, 仅考虑轴向拉伸效应, 其单元质量矩阵和刚度矩阵均采用与三维杆单元相同的形式。

1.3 管单元载荷向量

管单元载荷向量包括静载荷和动载荷, 对于完全浸没于水下的单元沿 z 轴方向浮力为:

$$\{R/L\} = C_b \rho_w \frac{\pi}{4} D^2 \{g\} \quad (5)$$

式中, $\{R/L\}$ 为浮力引起的单位长度载荷向量, C_b 为浮力系数, $\{g\}$ 为重力加速度向量, ρ_w 为水的密度。单元动载荷是由于筏式结构在波浪中运动产生。计算程序在施加波浪载荷时, 对于第一载荷步后的加速度进行纠错来确保其值保持不变。计算采用 Airy 波理论, 积分点的水质点速度是水深的函数, 按下式计算:

$$\vec{v}_X = \sum_{i=1}^{N_w} \frac{\cos h(k_i \bar{Z} f)}{\sin h(k_i h)} \frac{2\pi}{\tau_i} \eta_i \quad (6)$$

$$\vec{v}_Z = \sum_{i=1}^{N_w} \frac{\sin h(k_i \bar{Z} f)}{\sin h(k_i h)} \frac{2\pi}{\tau_i} \dot{\eta}_i \quad (7)$$

式中, \vec{v}_X 为 X 向质点速度, \vec{v}_Z 为 Z 向质点速度, $k_i = 2\pi/\lambda_i$, \bar{Z} 为海底以上积分点的高度, $\bar{Z} = Z + h$, h 为水深, $\dot{\eta}_i$ 为 η_i 对时间的导数, $f = h/(h + \eta_s)$, η_s 和 λ_i 分别为总波高和波长。水质点的加速度通过对 \vec{v}_X 和 \vec{v}_Z 的时间求微分获得。通过 Morison 方程来计算波浪作用下单元上的分布载荷:

$$\begin{aligned} \{F/L\} = & C_d \rho_w \frac{D}{2} \{ \dot{u}_n \} \{ \dot{u}_n \} + C_m \rho_w \frac{\pi}{4} D^2 \{ \dot{v}_n \} \\ & + C_t \rho_w \frac{D}{2} \{ \dot{u}_t \} \{ \dot{u}_t \} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $\{F/L\}$ 为水动力效应产生的单位长度上的载荷向量, C_d 和 C_t 为法向和切向拖曳力系数, C_m 为惯性力系数, $\{ \dot{u}_n \}$ 、 $\{ \dot{v}_n \}$ 、 $\{ \dot{u}_t \}$ 分别为质点法向相对速度、法向加速度和切向相对速度向量。流体质点的速度通过式(6)和(7)得到, 单元结点的速度通过 Newmark 时间积分得到, 两者相减计算得到相对速度

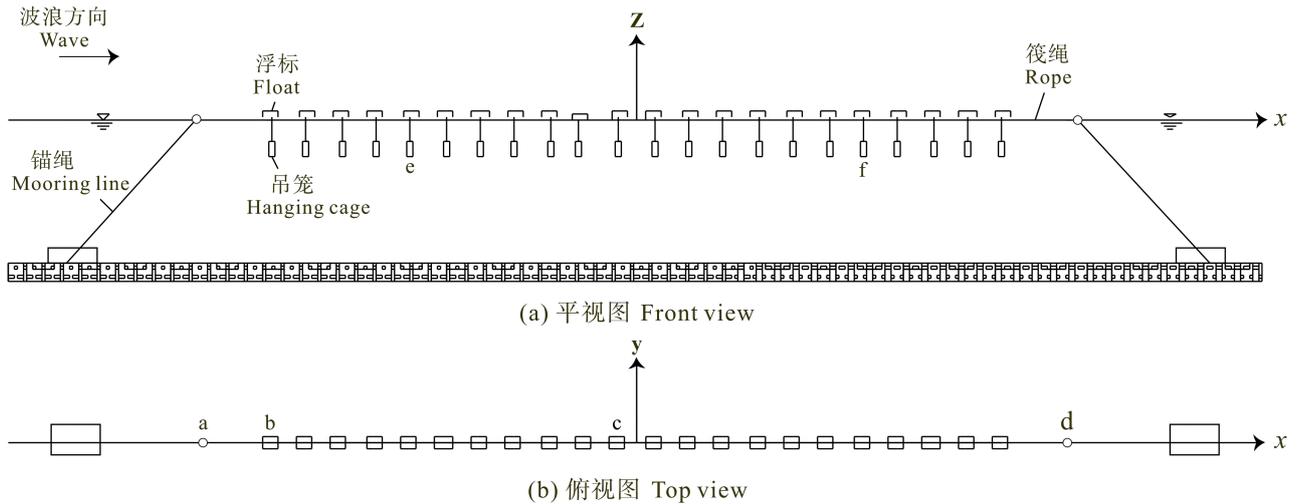


图 2 计算模型结构

Fig.2 Structure diagram of the model

$\{u_n\}$ 和 $\{u_t\}$ 。

2 算例

本研究算例如图 2 所示。该筏式结构由 22 个柱形浮标、2 个球形浮标、吊笼、锚绳和筏绳组成。其中,左右两端的球形浮标与相邻的柱形浮标之间距离为 3.5 m,各柱形浮标间距为 1.3 m,所有的浮标通过筏绳互相连接。各柱形浮标直径 0.2 m,长度为 0.3 m。吊笼直径 0.3 m,高度为 1.2 m。各吊笼通过养殖吊绳悬挂于柱形浮标下方,吊绳长度为 1 m。水深为 10 m,锚绳长度 15 m,材料为尼龙(崔勇等,2012)。

3 计算结果与讨论

3.1 波浪周期内筏式结构形态变化

图 3 为筏式养殖结构在一个波浪周期内形态变化的数值模拟结果,由上往下每幅图片时间间隔为 1/4 周期。波浪要素以我国北方海区为例,根据桑沟湾波浪统计资料,波高设为 1.5 m,周期为 5 s,其中波浪入射方向为 x 正向。从图 3 中可以看出,筏式养殖设施整体结构在波浪作用下呈现周期性的运动趋势,每个浮标与吊笼在水平方向与垂直方向均产生较为明显的位移。本研究算例中,由于对浮标和吊笼结构加载了一定的刚度,其自身的形状并没有发生改变,而筏绳和吊绳则由于波浪力的作用而产生了明显的弯曲,但并未发生浮标或吊笼相互缠绕的现象,说明此筏式结构在波浪作用下能够保持一定形态从而达到安全使用的目的。本研究采

用的有限元模型将筏式养殖结构分成不同的管单元来计算单元载荷,在计算浮于水面上的结构单元的水动力时,程序对每一载荷步的各个单元位置进行校验。如果单元位于水中,其静载荷和动载荷自动施加;如果单元位于水面以上,则只有重力载荷和惯性载荷。因此,数值模型可针对结构单元的位置对其载荷进行自动调节。

3.2 位移与受力分析

图 4 为浮标位移历时曲线,图 4a-图 4d 分别代表不同位置的浮标(图 2b)。通过这 4 个浮标的位移变化可大致反应筏式结构浮标系统的运动情况。由图 4 中可以看出,各个浮标的位移呈现周期性变化,且与波浪周期基本一致。由于不同浮标所处位置不同,受到锚绳及筏绳相互牵引的作用,其位移变化的趋势有所不同。图 4a-图 4c 这 3 个浮标同处迎波侧,其水平位移始终为正值,最大不超过 0.6 m,而相邻柱形浮标的间距为 1 m,因此可有效避免相互缠绕的情况。同时,这 3 个浮标的垂直位移基本为负值,这是由于受到左侧锚绳的限制以及浮标下挂有吊笼所致。d 浮标位于背浪侧,其两个方向的位移与波高变化趋势相接近。

图 5 为吊笼位移历时曲线,图 5e、图 5f 分别为迎波侧和背波侧的吊笼(图 2a)。两个位置的吊笼水平与垂直方向的位移随着时间的变化均呈现较为规律的波形,这是由于吊笼通过吊绳悬挂于浮标之下,相互间影响比浮标要小。其中,迎波侧吊笼

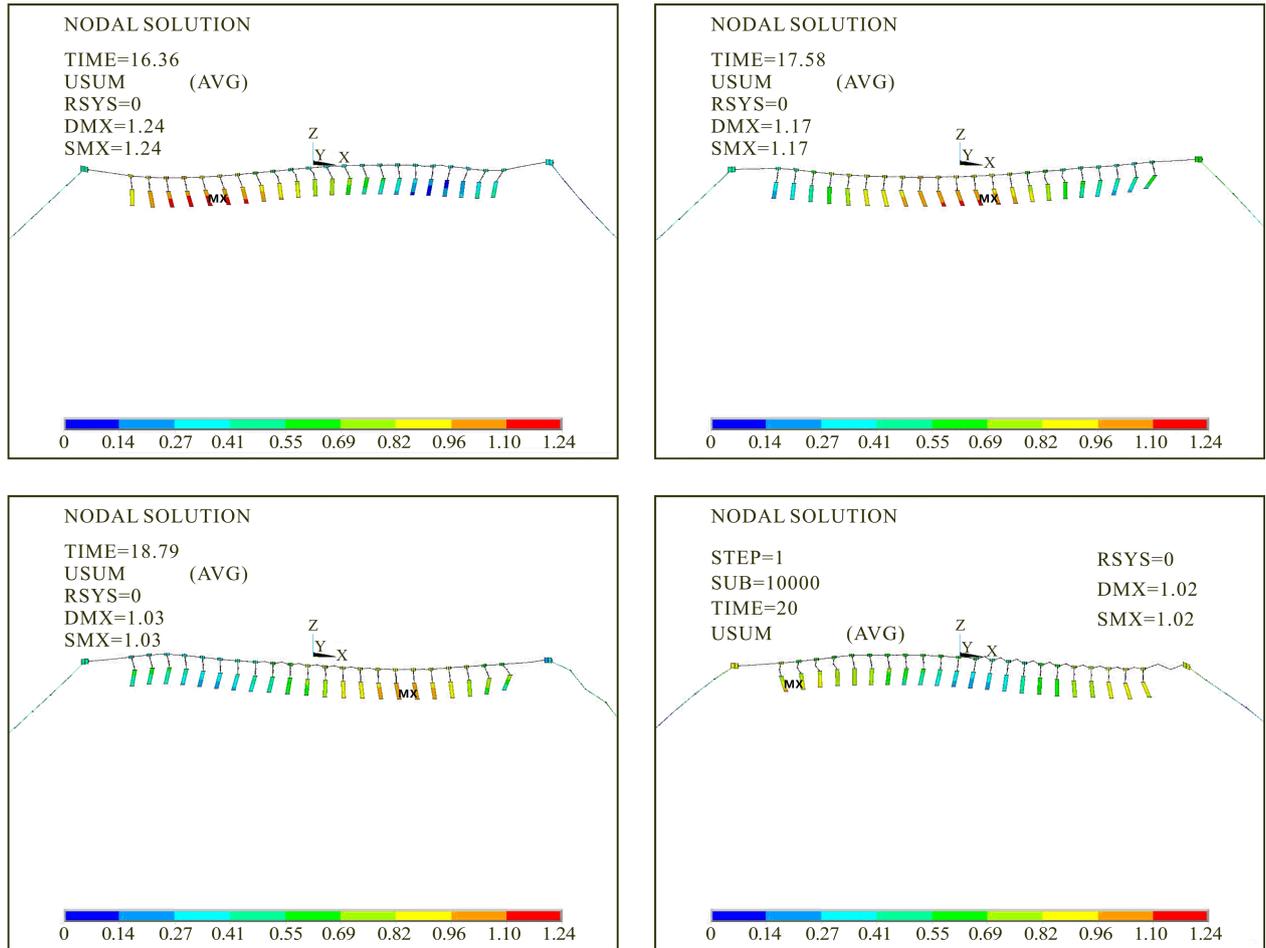


图 3 筏式结构在一个波浪周期内形态变化

Fig.3 Simulation of the dynamic motion of the long-line culture facility during one wave period

的水平位移基本为正值，最大位移接近 1 m，而背波侧吊笼水平位移出现负值，其最大位移为 0.5 m 左右；两个位置吊笼的垂直位移大部分为负值，这与其自身的重力载荷有关。

图 6 为锚绳受力历时曲线。图 6a、图 6b 分别为迎波侧和背波侧锚绳，两侧锚绳受力变化周期与波浪周期基本一致。其中，迎浪侧锚绳受力明显大于背浪侧，锚绳力最大值约为 1000 N。邓推等(2010)的模拟结果显示，背浪侧锚绳受力曲线中有双峰出现，这与本研究模拟结果有所不同，究其原因可能与计算的筏式养殖结构不同有关。

3.3 波高对浮标吊笼位移的影响

本节算例选取 3 组波浪来分析波高对浮标与吊笼位移幅度及锚绳受力的影响，波高 H 分别为 0.5、1、2 m，对应波浪周期 T 分别为 4、5、6 s，波浪入射方向为沿 x 轴正向。图 7a—图 7f 代表不同位置

的浮标与吊笼。由图 7 可以看出，各个浮标以及吊笼在水平与垂直方向的位移幅度均随着波高的增加而增大，且垂直位移幅度大于水平方向。其中，a、b、c 三个浮标的水平位移幅度均小于 1 m，可能是受到迎浪侧锚绳牵引所致。两个吊笼的水平位移幅度较大，这是由于其通过吊绳自由悬挂于浮标之下，水平移动不受浮标限制的原因。各个位置浮标与吊笼的垂直位移幅度和对应的波幅相差不大。

4 结语

本研究基于有限元商业软件 ANSYS，通过建立数值模型分析了筏式养殖结构在波浪作用下运动及受力情况，计算求解过程稳定，数值解法收敛性良好。借助于计算机 3D 可视化技术，可对波浪中筏式养殖结构的运动过程进行虚拟呈现。模拟结果显示，浮标及吊笼的位移大小与其所处位置密切相关；迎浪侧锚

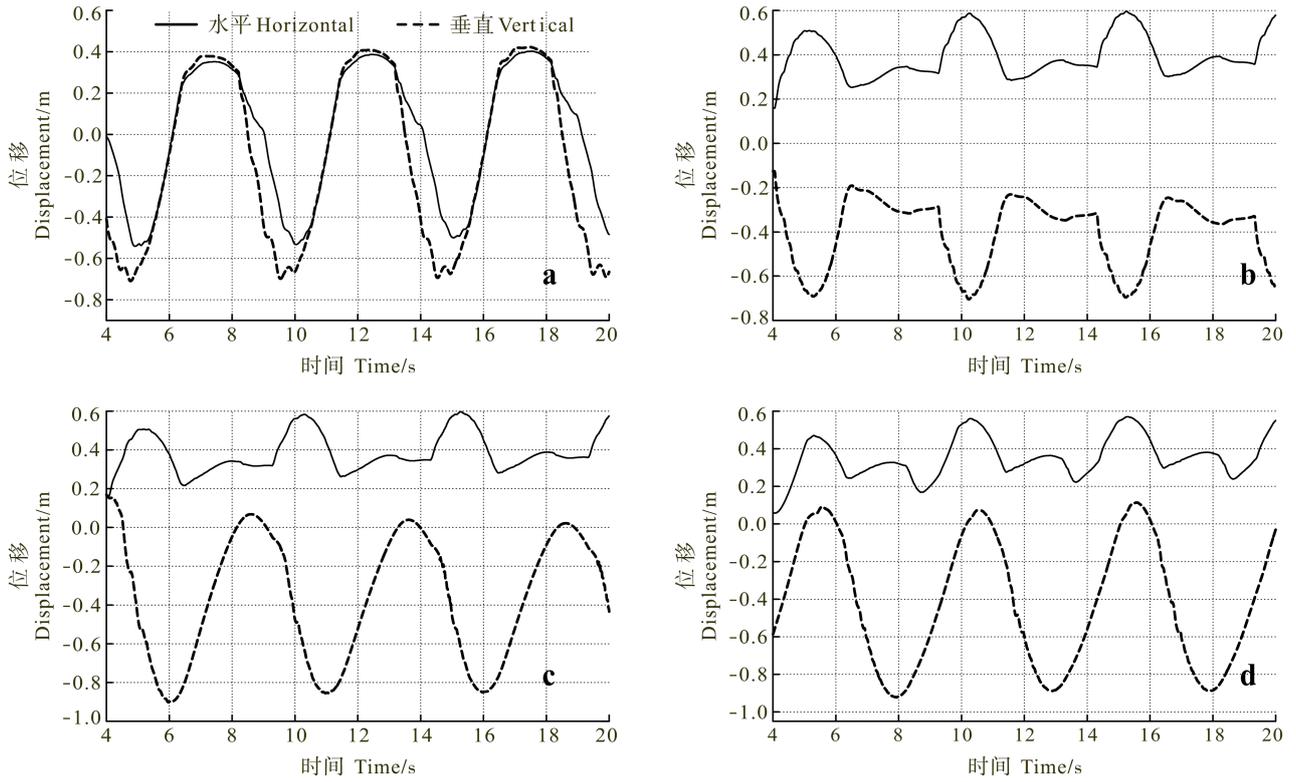


图 4 浮标位移历时曲线

Fig.4 Duration curve of displacement of the floats

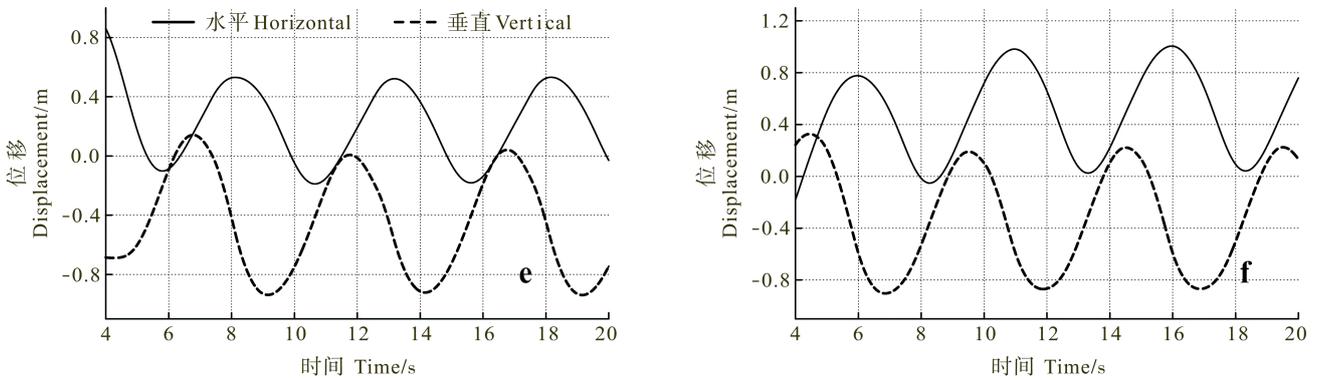


图 5 吊笼位移历时曲线

Fig.5 Duration curve of displacement of the hanging cages

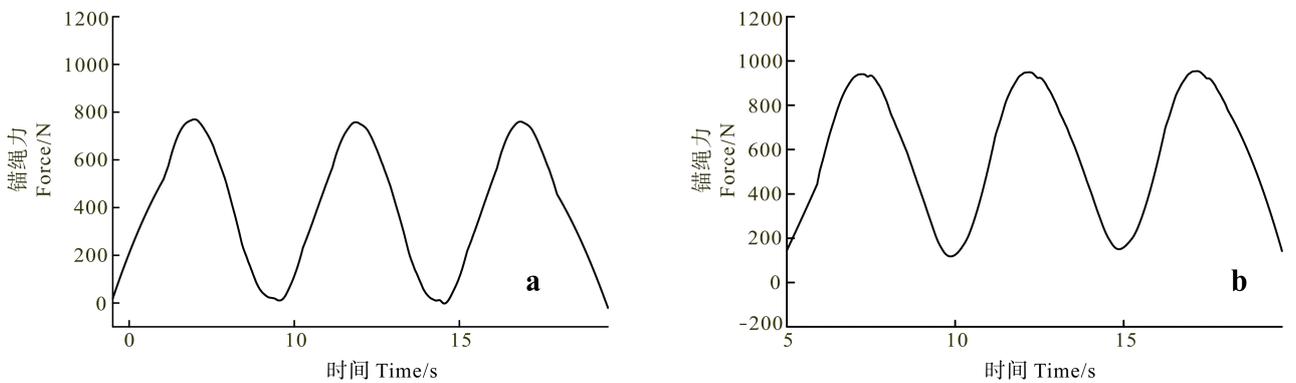


图 6 锚绳受力历时曲线

Fig.6 Duration curve of mooring line force

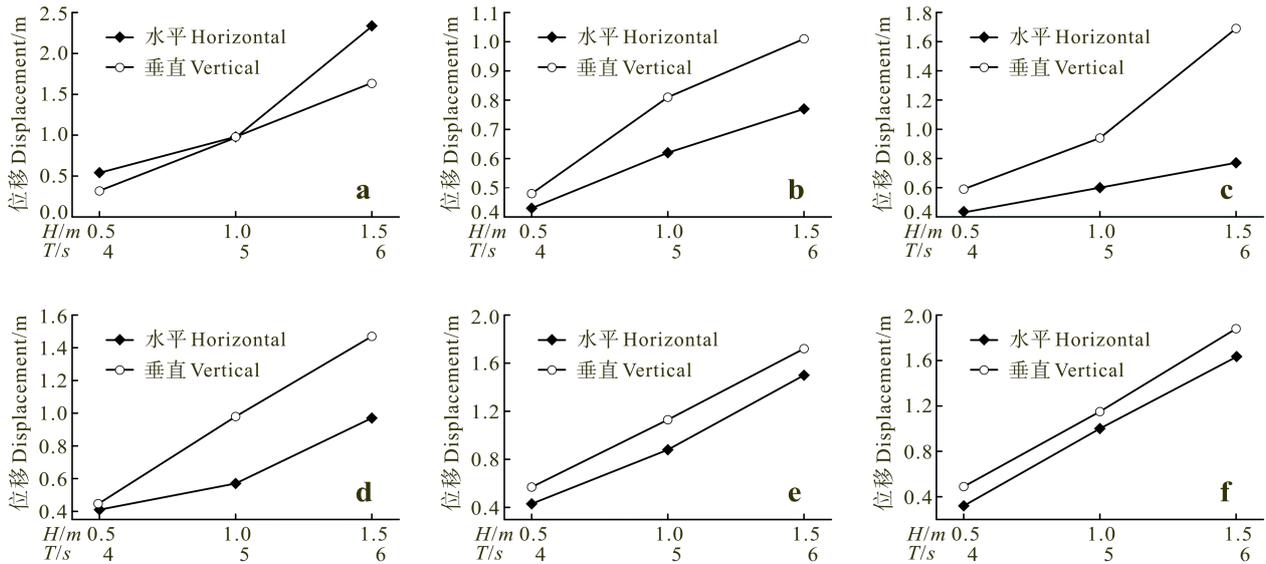


图 7 波高对位移幅度的影响

Fig.7 Effect of wave height on displacement amplitude

绳受力高于背波侧。此外，浮标与吊笼的位移幅度与波高基本成正比关系。本研究有待于进一步的海上实测验证，以期为实际工程设计提供理论依据。在实际海域中筏式养殖结构通常受到波浪与水流的作用，因此，今后在数值模拟中将加入水流与波浪的联合作用来分析，从而进一步完善数值模型，使模拟结果能够更加精确。

参 考 文 献

王经坤, 刘镇昌, 杨红生. 筏式养殖设施虚拟设计及仿真研

究. 渔业现代化, 2008, 35(1): 32-35
 邓推, 董国海, 赵云鹏, 等. 波浪作用下筏式养殖设施的数值模拟. 渔业现代化, 2010, 37(2): 26-30
 李冠颖, 黄材成. 外海浮筏式蚵架动力分析. 见: 第 31 届海洋工程研讨会论文集. 台湾, 中山大学, 2009, 553-560
 崔勇, 蒋增杰, 关长涛, 等. 水流作用下筏式养殖设施动力响应的数值模拟. 渔业科学进展, 2012, 33(3): 102-107
 Stevens C, Plew D, Hartstein N, *et al.* The physics of open-water shellfish aquaculture. *Aquacultural Engineering*, 2008, 38(3): 145-160
 Tsukrov I, Eroshkin O, Fredriksson D, *et al.* Finite element modeling of net panels using a consistent net element. *Ocean Engineering*, 2003, 30(2): 251-270

(编辑 陈严)

Dynamic Analysis of the Long-line Culture Facility Under Waves

CUI Yong, GUAN Changtao, HUANG Bin, LI Jiao, JIANG Zengjie

(Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Qingdao Key Laboratory for Marine Fish Breeding and Biotechnology, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071)

Abstract The long-line culture has been playing a more and more important role in fish industry in both China and the whole world due to the increase in seafood market demands. The long-line culture facility should sustain a high-energy environment with a full range of loading conditions because high speed ocean currents and strong sea storms are frequent events in the open ocean area. Therefore studies on hydrodynamic characteristics of the facility in the waves are necessary. ANSYS is a commercial program for finite element modeling and simulation. Here we used this program to establish a mathematical model for the long-line culture facility, and analyzed the displacements of the buoy and hanging cage and the maximum mooring line forces at different positions. The simulation results showed that the buoys and hanging cages at different positions displayed different patterns of displacements because of the pulling forces of the float ropes and the mooring line. The three buoys had positive horizontal displacements with the maximum value less than 0.6 m. The periodic changes of the mooring line force were consistent with the period of the waves. The mooring line force on the front side was larger than that on the back side, with the maximum value of ~1000 N. We also compared the displacement amplitudes of the buoys and hanging cages under different wave conditions. We found that the displacement amplitudes of the buoys and hanging cages increased along with the wave height in both horizontal and vertical directions; the amplitudes in the vertical direction were larger than that in the horizontal direction. These results suggested that the long-line culture facility in the waves had periodic motion; the buoys and hanging cages did not intertwine with each other, hence the long-line culture facility could be operated safely in the waves.

Key words Lone-line culture; Finite element method; Wave; Numerical simulation