

文章编号: 1000-4750(2006)Sup.I-0222-07

圆形重力式网箱浮架结构在波浪作用下的运动响应

郑艳娜¹, *董国海¹, 桂福坤¹, 李玉成¹, 关长涛², 林德芳²

(1. 大连理工大学, 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023; 2. 中国水产科学研究院, 黄海水产研究所, 山东 青岛 266071)

摘 要: 依据 Stokes 二阶波浪理论和莫里森(Morison)方法, 对圆形重力式网箱的浮架结构在两种锚碇系统(折线形和直线形)的作用下, 浮架上特定点的运动轨迹进行了数值计算与水槽试验, 比较结果发现在研究的波况下浮架的运动位移受波长影响较小, 而与波高关系密切, 在锚碇系统的约束下水平位移远小于垂向位移。数值计算与试验数据吻合较好, 表明了此计算方法的可行性, 为进一步模拟浮架结构的受力与变形打下基础。

关键词: 海岸和近海工程; 重力式网箱; 试验研究; 数值计算; 浮架结构; 莫里森 Morison 方法

中图分类号: O353.2 文献标识码: A

MOVEMENT RESPONSE OF FLOATING CIRCLE COLLARS OF GRAVITY CAGES SUBJECTED TO WAVES

ZHENG Yan-na¹, *DONG Guo-hai¹, GUI Fu-kun¹, LI Yu-cheng¹, GUAN Chang-tao², LIN De-fang²

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China;

2. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract: The movement of a floating circle collar of a gravity fish-farming cage with two types of mooring system commonly used in practice was studied. The wave forces acting on the collar and the cable are derived by Morison method using the second order Stokes wave theory. The trajectories of the tracing points on the collar were numerically computed and physically measured, respectively. The results showed that in the investigated conditions the wave height had significant effect on the displacement of the collar while the wave period turned out to be of little influence. The vertical displacements were much larger than the horizontal ones. Numerical results agreed well with experimental data, which verified the accuracy of the numerical method.

Key words: coastal and offshore engineering; gravity fish-farming cage; experimental study; numerical calculation; floating system; Morison equation

海水网箱养殖是人工海洋牧场建设的手段之一, 其目的是通过网箱为水产养殖动物建造一个良好的生活和繁衍场所。目前国内较为常用的深水抗风浪网箱是重力式网箱, 又称为圆柱形网箱。重力

式网箱主要由网衣系统、沉子系统、浮架系统和锚碇系统等构成。浮架系统由双排或三排圆环形高密度聚乙烯空心圆管及附属结构组成, 提供整个网箱大部分的浮力, 并支撑网衣维持一定的网箱容积,

收稿日期: 2005-09-02; 修改日期: 2006-01-04

基金项目: 海洋“863”计划(2001AA623010, 2003AA623010); 国家自然科学基金(50279002)

作者简介: 郑艳娜(1978), 女, 辽宁人, 博士生, 从事波浪与浮式结构物作用研究;

*董国海(1965), 男, 辽宁人, 教授, 博士, 博导, 从事海岸和近海工程研究(E-mail: ghdong@dlut.edu.cn);

桂福坤(1976), 男, 江苏人, 博士生, 从事深水网箱的水动力特性研究;

李玉成(1932), 男, 浙江人, 教授, 博导, 从事海岸和近海工程研究;

关长涛(1962), 男, 辽宁人, 副研究员, 硕士, 从事设施渔业工程技术方面的研究;

林德芳(1945), 男, 辽宁人, 研究员, 从事渔业工程技术方面的研究。

由于其漂浮于水面上,所承受的波浪力较大,其安全性及可靠性将直接决定整个网箱系统的安全。锚碇系统与浮架相连,限制浮架在一定的范围内运动,锚碇系统的布置方式是设计者关注的焦点问题之一,因此研究在深水波况不同锚碇方式下网箱浮架的运动响应具有十分重要的意义。

近些年来,人们越来越认识到深水网箱的巨大应用潜力,国内外学者对网箱进行了广泛的试验和数值计算研究。在数值计算方面, Lee^[1]研究了二维的系有网箱的张力腿平台系统在波浪作用下的动力响应。Fredriksson^[2]对碟形网箱在弱非线性波浪作用下的运动和锚碇系统受力进行了模型试验和有限元数值模拟,并与原型试验进行了比较。宋伟华^[3]对方形网箱在线性波作用下进行了水平方向水动力的近似计算,其中对浮架部分受力采用不考虑浮架与水质点相对运动的 Morison 方程进行计算。传统的圆形重力式网箱,由于其结构简单,应用范围最广,目前对其进行的研究有:唐宏结^[4]对波流同向作用下具有底圈式配重系统的重力式网箱的锚碇点张力容积损失进行了数值与试验研究;张耀民^[5]建立了数值模型计算波流共同作用下可沉式网箱的锚碇点张力和容积率大小,并与试验结果进行了比较。

在对整体网箱的数值研究中,浮架结构常被假定为刚性体,因此研究独立的刚性浮架结构将为进一步柔性变形的研究做基础。浮架的柔性变形与浮架结构的运动响应密切相关,目前对锚固端受力的研究较多,而没有侧重于研究浮架本身的运动响应。本文针对工程上应用较多的双排浮管组成的浮架结构,在折线形和直线形锚碇系统情况下,对浮架上特定点的运动轨迹进行数值计算及物理模型试验,进而分析浮架的运动特性,最后将计算结果和模型试验结果进行比较检验数值计算的正确性。

1 研究对象及其简化

本文对水深 20m,波高为 4m~7m,周期为 5.4s~8.9s 的波浪作用下,浮架运动特性进行数值分析。这一范围的波浪具有非线性,因此可以采用 Stokes 二阶波浪理论进行计算^[6]。

广义的浮架系统包括空心浮管、扶手、立柱及三通连接件等,由于扶手等水上附属结构形状比较复杂,并且对整体浮架系统的受力影响很小,因此除将其质量计入浮管的质量外,其它影响忽略不

计,本文研究的即为具有浮架和附属结构总质量的概化浮架结构。实际工程中浮架一般是由两排或三排浮管并排组成,本文对双排浮管进行研究,三排浮管的情况可以在此基础上更改相关参数。

网箱的锚碇系统主要包括锚绳、分力浮球、水下网格、悬挂重物(或锚链)和锚。在模型试验中不设置锚,直接将锚绳固定在锚点位置,受试验条件的限制也未设置水下网格。本文分别研究了以下两种形式的锚碇系统:一种是折线形锚碇系统,水下网格节点对应位置系分力浮球,接近海底处系重锤,由于深水波况下接近海底处流速很小,可以将重锤及其相连的部分锚绳简化为竖直向下的重力,不考虑重锤的运动;另一种是直线形锚碇系统,没有分力浮球和重锤,接近锚碇点处采用锚链代替锚绳,从而提高耐磨力并可以减小锚链倾角,增加水平分力。由于锚链自重较大,长度较短,其运动幅度很小,可认为锚绳与锚链的连接点位置不随时间改变。

2 数值模拟

2.1 浮架结构

浮架结构在波浪作用下大部分情况处于漂浮状态,浮架受到垂直方向的重力 G 和水体的浮力 $\bar{F}_f$ 。将圆环形浮管结构视为细长体,其波浪的作用力可以应用 Morison 公式进行计算^[7]。波浪力主要由两部分组成:一是水质点运动速度引起的拖曳力 $\bar{F}_D$,另一个是水质点加速度引起的惯性力 $\bar{F}_I$ 。当浮架构件与流体质点同时有运动时,依据 Brebbia 及 Walker^[8]的建议,将 Morison 公式改写为

$$\bar{F}_D = \rho C_D A \frac{\bar{V}_R |\bar{V}_R|}{2} \quad (1)$$

$$\bar{F}_I = \rho K_m V_f \frac{\partial(V - \xi)}{\partial t} + \rho V_f \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2)$$

其中, $\bar{F}_D$ 为拖曳力, ρ 为流体密度, C_D 为阻力系数, A 为构件在流速方向的投影面积, $\bar{V}_R = \bar{V} - \xi$, $\bar{V}$ 为波流场速度, ξ 为构件的运动速度, $\bar{V}_R$ 为构件与水质点的相对速度。 $\bar{F}_I$ 为惯性力, K_m 为浮架质量系数(对于圆形截面的物体取 1.0), V_f 为浸水体积。

Morison 方程是针对垂直桩柱受水平波浪力,即水质点和桩柱相对速度方向与桩柱的轴向垂直情况提出的,一些学者通过试验获得了水平桩柱所受的水平波浪力^[9],即水质点与桩柱相对速度方向

与桩柱轴向平行的情况下的受力。为了将两者统一计算,本文将浮架划分为若干构件单元,对各单元进行坐标转换,将 xyz 整体坐标转换成以瞬时浮架单元的轴向、切向和垂向为坐标轴方向的 $ns\tau$ 单元坐标系。将各时刻相对速度转换成单元坐标系下的分量后,计算相应方向的波浪力,然后转换为整体坐标下的分量,求得整个浮架的合力及合力矩。

构件在流速方向的投影面积 A 及浸水体积 V_f 是随时间改变的,需在各个时刻进行更新。图 1 为浮架构件截面图,其中 X_p 为浮架构件中点的 x 坐标, Z_p 为构件中点的 z 坐标, η 为水面高度, D 为浮架构件的直径, Δh 为入水深度

$$\Delta h = \eta(x, z, t) - (Z_p(t) - D/2) \quad (3)$$

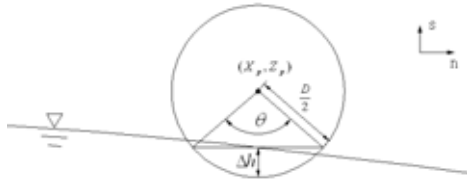


图 1 浮架构件截面图

Fig.1 Section view of the floating collar element

θ 为浮架质心 z 轴的轴线至水面夹角的二倍

$$\theta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{|D/2 - \Delta h|}{D/2} \right) \quad (4)$$

单位长度构件在各流速方向投影面积分别为

$$A_n = A_\tau = \begin{cases} \pi D^2 / 4 & \Delta h \geq D \\ \pi D^2 / 4 - D^2 (\theta - \sin \theta) / 8 & D/2 \leq \Delta h \leq D \\ D^2 (\theta - \sin \theta) / 8 & 0 < \Delta h \leq D/2 \\ 0 & \Delta h \leq 0 \end{cases}$$

$$A_s = \begin{cases} D & \Delta h \geq D/2 \\ D \sin(\theta/2) & 0 < \Delta h \leq D/2 \\ 0 & \Delta h \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

从而,浮架构件浸水体积 $V_f(t) = A_\tau(t) \cdot dl$, dl 为构件长度。

锚碇系统约束作用体现为锚绳的张力,锚绳张力是由于锚绳的伸长产生的,并和锚绳固有参数有关:

$$T = AC_1 \left(\frac{l - l_0}{l_0} \right)^{C_2} \quad (6)$$

其中, l_0 为原始长度, l 为变形后长度, A 为锚绳截面积, T 为张力, C_1 、 C_2 为锚绳构件弹性系数。

由于浮架的刚性假定,浮架结构的运动由刚体

运动方程控制。三维刚体关于质心的运动可以通过六个运动分量来描述 $\xi = (\xi_x, \xi_y, \xi_z, \alpha_x, \alpha_y, \alpha_z)$, 前三个分量分别表示纵荡、横荡和垂荡的平动位移,后三个分量分别表示横摇、纵摇和首摇的角位移。浮架的运动由刚体运动方程控制:

$$M \ddot{\xi} = F^* \quad (7)$$

式中, M 为广义质量矩阵, $F^* = (\vec{F}, \vec{M}) = (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z)$ 为合外力分量和力矩分量。

由受力分析可知

$$\vec{F} = \vec{F}_D(\dot{\xi}) + \vec{F}_I(\ddot{\xi}) + \vec{T}(\xi) + \vec{F}_f(\xi) - G\vec{k} \quad (8)$$

其中, 惯性力项中含有未知的加速度 $\ddot{\xi}$

$$\vec{F}_I = \rho V_f K_m \frac{\partial(\vec{V} - \dot{\xi})}{\partial t} + \rho V_f \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = \rho V_f K_m \ddot{\vec{V}} + \rho V_f \ddot{\vec{V}} - \rho V_f K_m \ddot{\xi} \quad (9)$$

将上式中的最后一项移到运动方程的等号左侧, 便可以通过解方程组, 求得浮架整体运动的加速度。

浮架的动态分析需求解质点运动微分方程, 在数值计算中, 这类方程可采用四阶龙格-库塔(Runge-Kutta)方法进行数值求解, 从而保证较好的准确性, 并缩短计算时间间隔, 加快计算进程。

2.2 锚碇系统

目前工程上对于单个网箱的锚碇系统采用较多的是折线形和直线形两种, 如图 2 和图 3 所示, 折线形的锚绳由分力浮球和重锤分成了三个折线段, 直线形底部用锚链代替重锤。

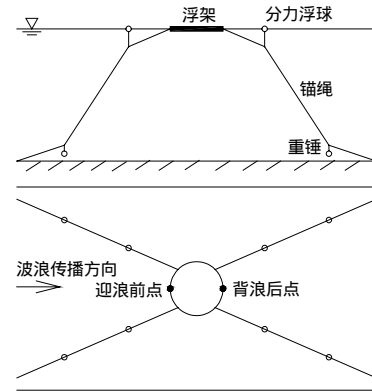


图 2 折线形锚碇系统示意图

Fig.2 Sketch of the fold line mooring system

锚绳动力分析采用三维集中质量模型, 将缆索离散为许多段, 每一段用一质点表示, 质点相互间简化为类似弹簧连接, 所有外力认为作用在质点上, 分力浮球视为一个质点, 每一质点的运动方程为^[10]

$$\left. \begin{aligned} (M + A_{11})x + A_{12}y + A_{13}z &= F_x \\ A_{21}x + (M + A_{22})y + A_{23}z &= F_y \\ A_{31}x + A_{32}y + (M + A_{33})z &= F_z \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中, M 是质点质量; A_{ij} 是附加质量; x, y, z 分别为质点在三个方向的加速度; $F = (F_x, F_y, F_z)$ 是微段所受外力, 包括重力, 浮力, 波浪力和弹性张力。分力浮球的受力与浮架单元相似, 弹性张力为与浮球相连锚绳的张力。锚绳构件变形后长度的计算需要考虑锚绳端点的位置变化, 与浮架相连处由浮架的瞬时位置确定。

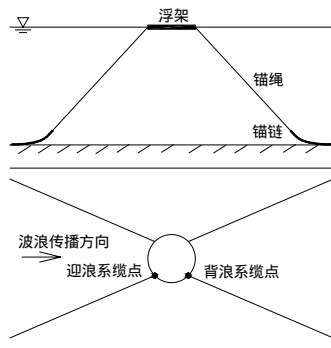


图3 直线形锚碇系统示意图

Fig.3 Sketch of the straight line mooring system

3 模型试验

在大连理工大学海岸及近海工程国家重点实验室的大波流水槽内分别对两种锚碇系统的刚性浮架结构进行了模型试验, 水槽长 69m, 宽 2.0m, 高 1.8m, 水槽的一端安装推板式造波机, 另一端设有消浪装置。综合考虑模型制作的要求和试验条件, 设定模型(浮架系统和锚碇系统)的几何比尺 $\lambda = 20$ 。圆环形浮架结构的质心位置在圆心, 不在浮架上, 因此不能直接量测质心的运动位移, 试验中通过浮架上几个特定点来代替, 用其轨迹来对浮架运动进行说明。

3.1 折线形锚碇系统

模型试验中浮架由 PVC 管制成, 浮球采用乒乓球粘一有机玻璃小块模拟, 重锤用橡皮泥内包铅块模拟, 原型和模型缆绳均为聚乙烯材料。原型锚绳弹性系数 $C_1 = 3.025 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$, $C_2 = 1.037$ 。在迎浪侧最先遇到波浪的前点和相应背浪侧的后点系有小灯泡, 如图 2 所示, 通过试验过程中的图象采集系统, 测得两个亮点的运动轨迹。试验的波况见表 1, 浮架及锚碇系统尺寸见表 2, 锚碇系统的详细尺寸如图 4。

试验过程中重锤有一定幅度的运动, 但就重锤对锚绳的作用力而言, 该运动本身应该不会对锚绳的受力有较大影响, 因此为了简化计算而没有考虑重锤的运动所造成的影响。

表 1 试验波况

Table 1 Wave conditions

原型			模型		
水深/m	20.0		1.0		
波高/m	4.0		0.20		
周期/s	5.37	6.26	7.16	1.2	1.4
波高/m	5.5		0.275		
周期/s	6.26	7.16	8.05	1.4	1.6
波高/m	7.0		0.35		
周期/s	7.16	8.05	8.94	1.6	1.8

表 2 浮架及锚碇系统尺寸

Table 2 Size of the collar and the mooring system

原型	模型
管轴线直径/m	13.25
浮管外径/m	0.32
浮架单重/(kg/m)	22.171
浮球直径/m	0.70
浮球质量/kg	32.0
重锤质量/kg	100.0
锚绳直径/m	0.038

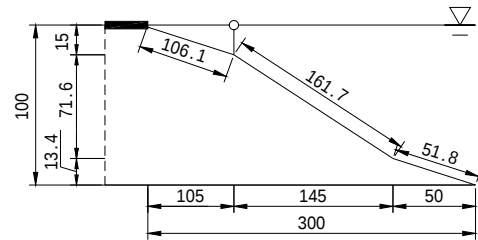


图4 折线锚碇系统尺寸示意图(单位: cm)

Fig.4 Size of the fold line mooring system(Unit: cm)

3.2 直线形锚碇系统

浮架由高密度聚乙烯(HDPE)制成, 原型锚绳为聚丙烯材料, 模型中用聚乙烯绳模拟。原型锚绳弹性系数 $C_1 = 5.397 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$, $C_2 = 1.132$ 。这组试验将轨迹的量测点设在系缆点, 迎浪侧和背浪侧各布置一个测点, 如图 3 所示, 质心轨迹通过对两测点位置取平均计算得到。试验的波况见表 3, 浮架和锚碇系统尺寸见表 4, 锚碇系统的详细尺寸如图 5。

模型锚绳及锚链在海底的总投影长度与折线形相同。试验发现锚链的运动幅度比较小, 主要在于锚链自重较大, 因此在数值模拟时可以忽略锚链的运动。

表 3 试验波况

Table 3 Wave conditions

原型				模型		
水深/m	20.0			1.0		
波高/m	4.0			0.20		
周期/s	5.37	6.26	7.16	1.2	1.4	1.6
波高/m	5.0			0.25		
周期/s	6.26	7.16	8.05	1.4	1.6	1.8
波高/m	6.0			0.3		
周期/s	6.26	7.16	8.05	1.4	1.6	1.8
波高/m	7.0			0.35		
周期/s	7.16	8.05	8.94	1.6	1.8	2.0

表 4 浮架及锚碇系统尺寸

Table 4 Size of the collar and mooring system

	原型	模型
管轴线直径/m	16.92	0.846
浮管外径/m	0.3064	0.01532
浮架单重/(kg/m)	22.283	0.05571
锚链水平投影/m	2.16	0.108
锚链垂直抬高/m	0.37	0.019
锚绳直径/m	0.04	0.018

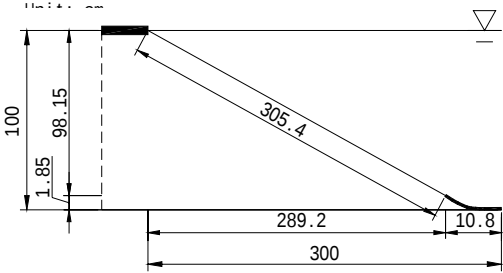


图 5 直线锚碇系统尺寸示意图(单位：cm)

Fig.5 Size of the straight line mooring system (Unit: cm)

4 结果分析与比较

x, z 分别为水平和垂向位置, R 为浮架的浮管轴线半径, A 为波幅, H 为波高, T 为波浪周期, 实线代表计算值, 点代表试验测得数据。图 6, 图 7 为测点的轨迹曲线, 其中图 6 为折线形, 测点为浮架的前点和后点, 静止时两个测点的纵坐标为零, 横坐标分别为-1 和 1; 图 7 为直线形, 测点为迎浪侧和背浪侧系缆点, 质心点轨迹通过数据处理得到, 浮架静止时系缆点横坐标分别为-0.707 和 0.707, 纵坐标都为零, 质心点位于原点。

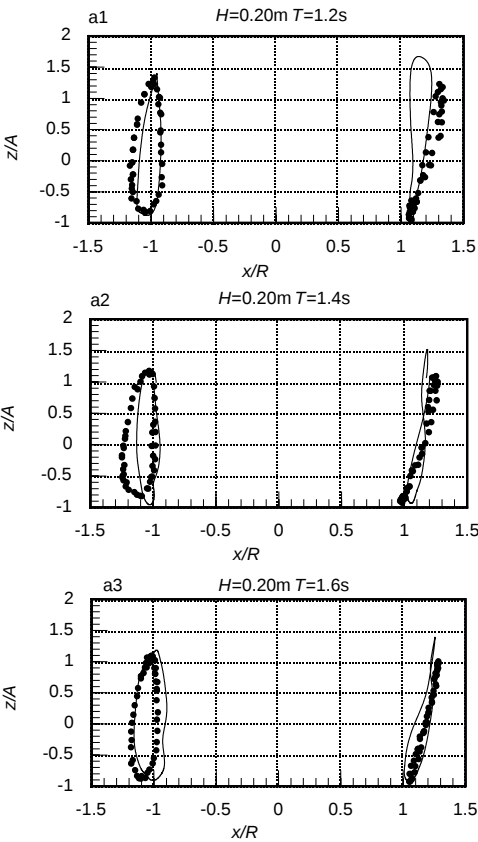
由以上轨迹图可得如下一些结论：

(1) 由图 6 和图 7 可以看出, 对于不同波况不同锚碇形式, 浮架上测点的轨迹有一个共同的特点就是迎浪一端测点的轨迹呈细长的椭圆形, 并且上

端比下端略尖, 垂向位移达到最小值时, 水平位移接近零, 即与静止时水平位置相同。背浪侧的测点轨迹形状与迎浪测的差别较大, 更为细长, 垂向位移和水平位移几乎同时达到最大和最小值。

(2) 比较同种锚碇系统, 不同波高下迎浪侧测点的轨迹, 如图 6 的 a1, a2 和 a3, 可以看出在相同波高下, 周期的变化对水平位移幅值的改变不明显; 而从图 7 的 a3, b2, c2, d1 可以看出, 相同周期下, 波高越大, 水平位移的幅值越大。垂向位移与周期关系不大, 与相应的波高保持一致。从轨迹图可以看出, 浮架运动并不关于原点对称, 水平位移幅度明显小于垂向位移幅度, 这与理论上水质点的运动轨迹不同, 主要是因为浮架受到锚绳的约束, 由于锚绳的倾斜角度, 使其对浮架的水平位移较为敏感, 约束力较强, 而对垂直方向的位移约束较弱。

(3) 从数值计算曲线和试验测得数据点的拟合方面看, 本文应用的数学模型和计算方法及波浪理论较为合理, 数值结果与试验吻合较好, 基本能够模拟出相应点运动的水平和垂向的位移幅值, 并且轨迹形状也比较相近。



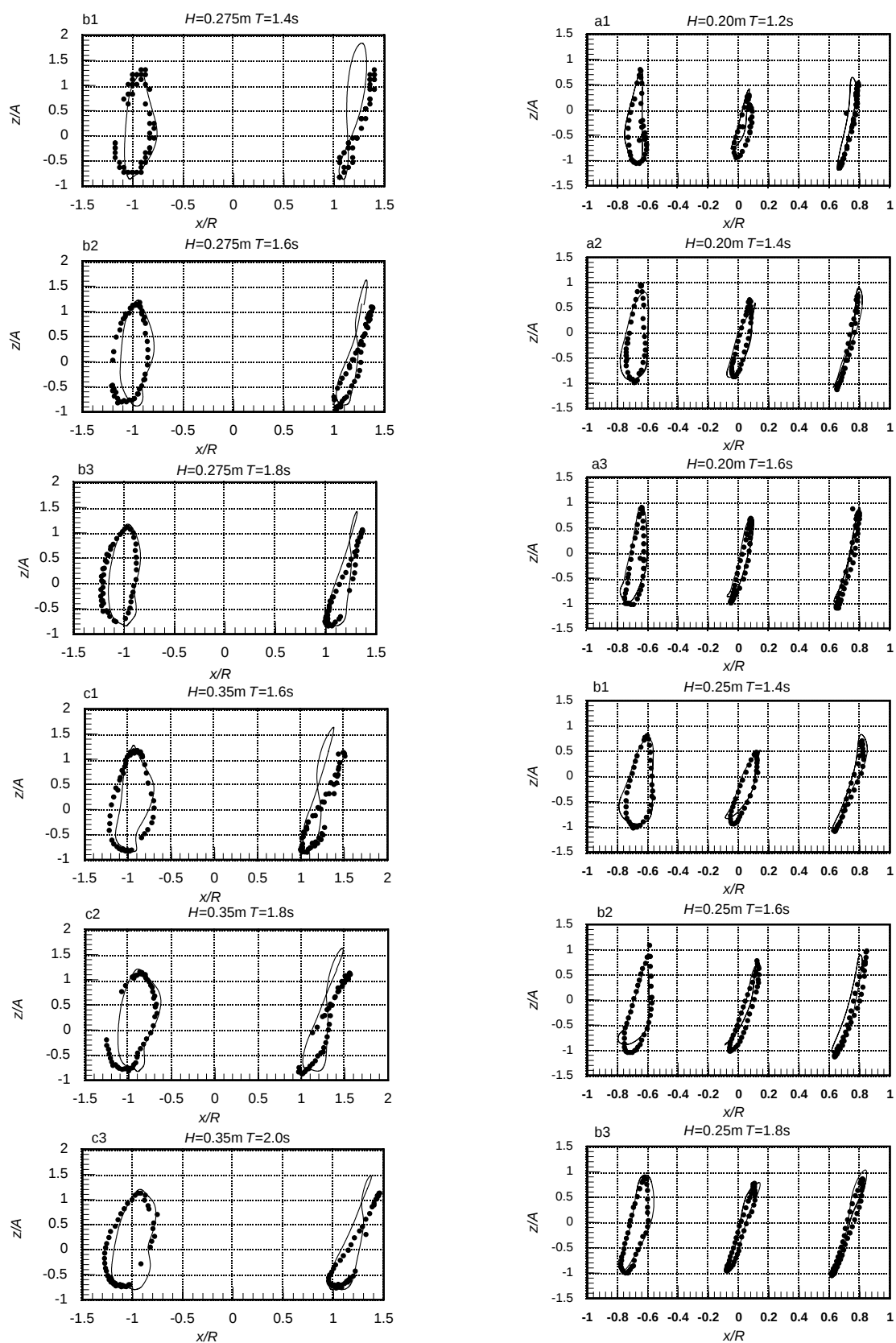


图 6 折线形式下浮架前、后点轨迹

Fig.6 Traces of the front and hind points on the fold-line collar

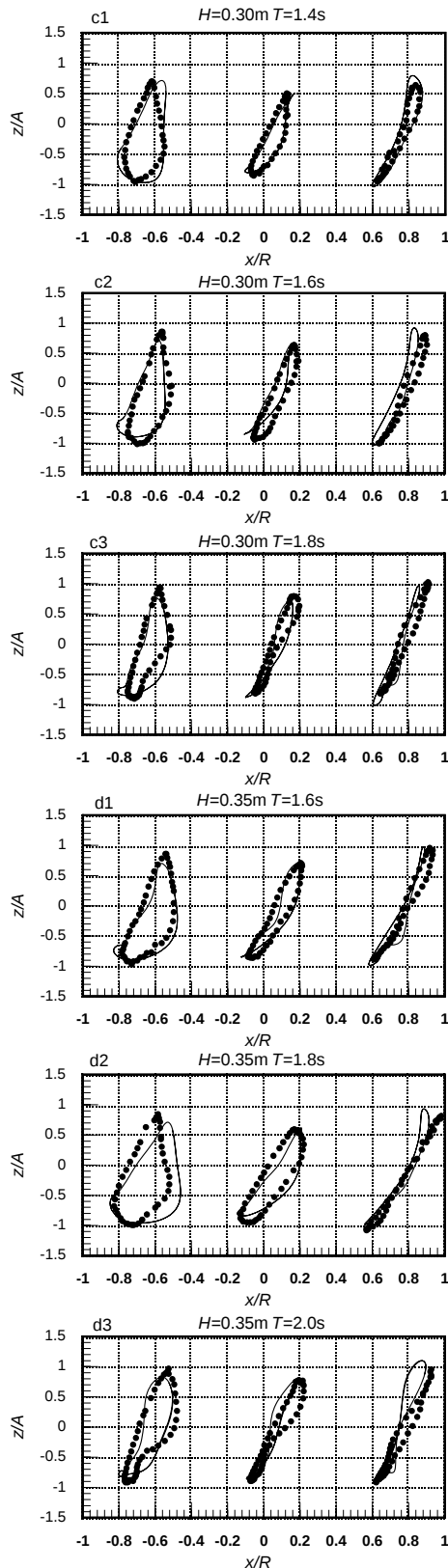


图7 直线形式下浮架系统点及质心点轨迹

Fig.7 Traces of the fixed and mass-centre points on the straight-line collar

5 结论

通过对与折线形和直线形锚碇系统相连的浮架结构的运动进行数值模拟和模型试验,发现在本文研究的波况下浮架的运动位移受波长影响较小,而与波高关系密切,在锚碇系统的约束下水平位移显著小于垂向位移。通过轨迹曲线的数值模拟与试验结果比较,说明本文方法可以计算浮架结构的运动幅度,模拟浮架结构的运动过程,为进一步模拟浮架结构的受力与变形打下基础。

参考文献:

- [1] Lee Hsien Hua, Wang Pei-Wen. Dynamic behavior of tension-leg platform with net-cage system subjected to wave forces [J]. Ocean Engineering, 2000, 28(2): 179~200.
- [2] Fredriksson David Wayne. Open ocean fish cage and mooring system dynamics [D]. USA: University of New Hampshire, 2001.
- [3] 宋伟华, 梁振林, 赵芬芳, 黄六一, 朱立新. 方形网箱波浪水动力学的近似计算[J]. 浙江海洋学院学报, 2003, 22(2): 95~103.
Song Weihua, Liang Zhenlin, Zhao Fenfang, Huang Liuyi, Zhu Lixin. Approximate calculation on wave dynamics of square fish cage [J]. Journal of Zhejiang Ocean University, 2003, 22(2): 95~103. (in Chinese)
- [4] 唐宏结. 网箱容积变形改善[D]. 中国台湾: 国立中山大学, 2002.
Tang Hongjie. Improvement on aquaculture cage net volume deformation [D]. Taiwan China: National Sun Yat-sen University, 2002. (in Chinese)
- [5] 张耀民. 可沉式网箱养殖工程之研究[D]. 中国台湾: 国立中山大学, 2001.
Zhang Yaomin. Study on submergence aquaculture cage net engineering [D]. Taiwan China: National Sun Yat-sen University, 2001. (in Chinese)
- [6] 邹志利. 水波理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
Zou Zhili. Water wave theories and their applications [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [7] Morison J R, O'Brien M P, Johnson J W, Schaaf S A. The force exerted by surface wave on piles [J]. Petrol, Trans., AIME, 1950, 189: 149~154.
- [8] Brebbia C A, Walker S. Dynamic analysis of offshore structures [M]. London: Newnes-Butterworths, 1979.
- [9] Blevins R D. Applied fluid dynamics handbook [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1984.
- [10] 刘应中, 缪国平, 李谊乐, 刘滋源, 刘和东. 锚泊系统动力分析的时域方法[J]. 上海交通大学学报, 1997, 31(11): 7~12.
Liu Yingzhong, Miao Guoping, Li Yile, Liu Ziyuan, Liu Hedong. Time domain method on dynamic analysis of mooring system [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1997, 31(11): 7~12. (in Chinese)