

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2011.00636

## 波流作用下网格锚泊的单个重力式网箱缆绳张力

黄六一<sup>1</sup>, 梁振林<sup>1,2</sup>, 万荣<sup>1</sup>, 木下健<sup>4</sup>, 赵芬芳<sup>1,4</sup>, 宋伟华<sup>3</sup>,  
王欣欣<sup>1</sup>, 石建高<sup>5</sup>

1. 中国海洋大学 水产学院, 山东 青岛 266003;
2. 山东大学 威海分校, 山东 威海 266071;
3. 浙江海洋学院, 浙江 舟山 316004;
4. 东京大学, 日本 东京 1538505;
5. 中国水产科学研究院 东海水产研究所, 上海 200090

**摘要:** 以中国沿海常用的周长 40 m×10 m 的HDPE重力式网箱作为研究对象, 采用渔具模型试验狄克生准则, 选用大比例尺( $\lambda = 1/10$ )和小比例尺( $\lambda' = 1/2$ )设计制作模型网箱。网箱锚泊系统采用的网格形式与实际使用的一致。模型试验于日本东京大学生产技术研究所海洋环境工程实验室风浪流水槽[50 m(L)×10 m(W)×5 m(D)]进行。实验时前端缆绳水平方向与波流夹角为 0°, 波浪周期 1~2.2 s, 波高 10~30 cm, 对流速 0 cm、10 cm 和 15 cm 作用下主缆绳、系框绳以及浮框绳的张力特性进行了研究。结果表明: (1)在纯流作用下, 前端缆绳张力最大; (2)在纯波作用下, 后侧缆绳张力最大, 最大张力( $T_{\max}$ )与波高( $H$ )的关系为:  $T_{\max} = C_1 H + C_2$  ( $C_1$ 、 $C_2$  为常数); (3)在波流联合作用下, 前端缆绳张力最大, 缆绳最大张力( $T_{\max}$ )与波高( $H$ )的关系为:  $T_{\max} = C_3 e^{C_4 H}$  ( $C_3$ 、 $C_4$  为常数); (4)在波流作用时, 左右前端缆绳一般会产生差异, 最大差值约 30%。

**关键词:** 重力式圆形网箱; 最大缆绳张力; 波浪; 水流

中图分类号: S953

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2011)03-0636-10

自 1998 年海南临高引进挪威大型抗风浪网箱以来, 中国深水养殖网箱到目前已经发展到 4 000 余只, 取得了显著的经济和社会效益, 已成为海洋渔业投资的新热点<sup>[1-2]</sup>。重力式深水抗风浪网箱是由刚性的浮框系统、柔性的网衣和锚泊系统组成的刚柔结合体。网箱系统布设在离岸海区, 因此保证网箱系统在恶劣海况环境中的安全性, 是网箱工程技术的关键。国内外学者通过计算机模拟和水槽模型试验等手段, 对网箱缆绳的水动力特性进行了较多研究<sup>[3-10]</sup>, 但其实验中所用网箱结构形式和锚泊方式与中国沿海经常采用的网格锚泊形式有一定的差异, 实验结果的

准确性与适用性仍有待实践检验, 对模拟计算结果的对比也需进一步探讨。本研究主要通过物理模型试验研究波流作用下网格锚泊形式的单个重力式网箱缆绳受力特性, 以期更深入地了解这一结构形式的重力式网箱的水动力特性, 为圆形重力式抗风浪网箱及其锚泊系统设计提供参考数据, 以及为模拟实验提供实证数据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 实验设备

实验于 2008 年 8 月在日本东京大学生产技术研究所千叶试验场海洋工学水槽(风浪流水槽)中

收稿日期: 2010-01-25; 修订日期: 2010-04-13.

基金项目: 国家自然科学基金项目(40776052); 国家高新技术研究发展计划项目(2006AA623030); 铜网箱海水养殖项目(TEK1060090626).

作者简介: 黄六一(1970-), 男, 副教授, 从事增殖养殖工程研究. E-mail: huangly@ouc.edu.cn

通信作者: 万荣, 教授. E-mail: rongwan@ouc.edu.cn

进行。水槽本体参数为  $50\text{ m}(L)\times 10\text{ m}(W)\times 5\text{ m}(D)$ , 在水槽中部设置有一个升降床, 其尺寸为  $20\text{ m}(L)\times 10\text{ m}(W)$ , 可以从槽底上升至水面, 这种设置能够有效地控制所需要的实验水深。实验水槽的波浪周期为  $0.5\sim 5\text{ s}$ , 最大波高  $30\text{ cm}$ , 流速在  $0\sim 20\text{ cm/s}$  范围。波高仪为 KENEK WAVE HEIGHT METER CHT6-40, 最大测量波高  $40\text{ cm}$ , 测量频率  $10\text{ Hz}$ , 误差  $\pm 0.3\%$ 。流速仪 ACM100-D, 流速测量范围  $0\sim 200\text{ cm/s}$ , 精度  $\pm 2\%$ 。拉力计自制, 测量范围  $0\sim 5\text{ kg}$ 、 $0\sim 10\text{ kg}$ , 测量频率  $10\text{ Hz}$ , 精度均为  $0.5\%$ 。

## 1.2 实验模型

本实验实物网箱为目前中国常用的HPDE圆形重力式抗风浪网箱。网箱周长  $40\text{ m}$ , 直径为  $12.7\text{ m}$  网深  $10\text{ m}$ , 实际网箱布设见图1。由于实验中有波流共同作用, 选用狄克逊准则<sup>[11]</sup>相对较为吻合。根据水槽实验段尺寸, 模型大尺度比取  $1/10$ , 小尺度比为  $1/2$ 。在实际制作中由于部分材料无法获得完全按尺度换算的规格, 故尺度比主要应用于浮框、网片、绳索以及沉子, 而模型网箱的立柱和扶手管的粗度厚度与实物网箱的立柱和扶手管比例与大比例尺有一定差异, 这在换算中会带来一定的误差。实物网箱与模型网箱参数见表1。

## 1.3 实验布置图

由于实验设计中的锚泊结构方式与波流来向呈左右对称, 故拉力计主要采用一侧布设, 如图2所示。前端缆绳设置2个拉力计(1和2), 考察左右缆绳张力分布的差异。拉力计编号对应缆绳

位置如表2所示。

## 1.4 实验工况

根据实验设备的性能和技术参数, 实验时波浪周期采用  $1.0\sim 2.2\text{ s}$ , 波高  $10\sim 30\text{ cm}$ , 流速  $10\sim 15\text{ cm/s}$ 。实验工况见表3。

## 1.5 数据测量和数据处理

波高由布设距离造波机  $5\text{ m}$  的波高仪测量得到, 数据分析中的波高采用初始波高后的10个周期的平均值, 流速采用流速仪测量值的平均值, 缆绳张力由连接在网箱系统各绳索上的12个拉力计测得。

# 2 结果与分析

## 2.1 纯流作用下缆绳张力分布

图3为右缆绳1和左缆绳2在流速  $10\text{ cm/s}$  和  $15\text{ cm/s}$  时的受力状态。可以看出缆绳1和缆绳2受力波动不大, 故在数据处理时采用平均值。

由图4可以看出, 正面来流时, 网箱前端缆绳1和2受力最大, 其次为前端系框绳9。前端系框绳受力约为主缆绳的  $1/2$ 。除了前端缆绳1和2, 侧面缆绳3和4以及前后系框绳9和10受力外, 在水流作用下, 其他缆绳基本处于松弛状态。

## 2.2 纯波和波流作用下主缆绳的几种典型受力曲线

通过对实验数据的整理分析, 主要受力的主缆绳为前端主缆绳1、2和后侧主缆绳4, 故以上述主缆绳作为分析对象, 选取周期  $1.6\text{ s}$ , 波高  $15\text{ cm}$  工况下, 进行分析。图5为该工况下的波高-时间曲线。图6为纯波时缆绳1和缆绳4的受力

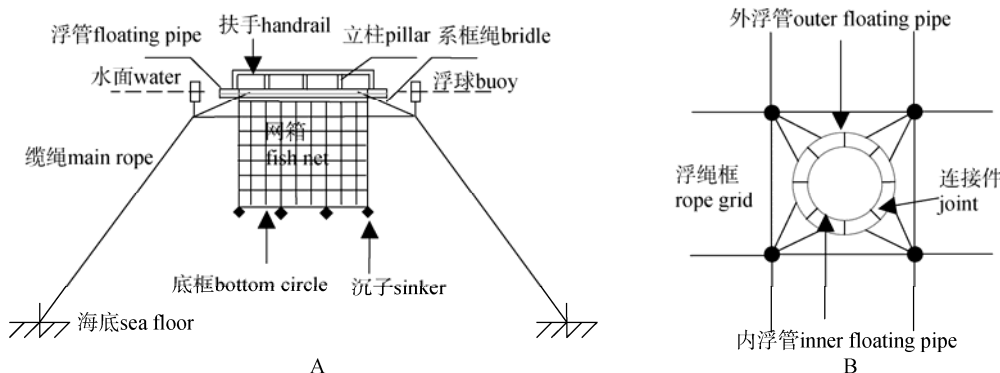


图1 圆形网箱侧视(A)和俯视(B)示意图

Fig.1 Side (A) and top (B) views of circular cage

表 1 实物网箱与模型网箱参数表  
Tab. 1 Parameters of prototype and model of the cage

| 名称<br>item                 | 实物网箱 prototype of cage |                 |                           | 模型网箱 model of cage    |                                     |                           |
|----------------------------|------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------|
|                            | 网箱规格<br>specs of cage  | 材料<br>material  | 材料规格<br>specs of material | 网箱规格<br>specs of cage | 材料<br>material                      | 材料规格<br>specs of material |
| 浮框系统 floating frame system |                        |                 |                           |                       |                                     |                           |
| 内浮管<br>inner floating pipe | 40 m(P)                | HDPE            | Φ250 mm×<br>14.8–22.7 mm  | 4 m                   | PPR                                 | Φ25 mm×2.27<br>mm         |
| 外浮管<br>outer floating pipe | 42.8 m(P)              | HDPE            | Φ250 mm×<br>14.8–22.7 mm  | 4.28 m                | PPR                                 | Φ25 mm×2.27<br>mm         |
| 连接件 joint                  | 0.45 m(L)              | HDPE            | Φ320 mm                   | 0.045 m               | PPR                                 | Φ32 mm                    |
| 立柱 pillar                  | 1 m(L)                 | HDPE            | Φ125 mm×11.4<br>mm        | 0.1 m                 | PPR                                 | Φ20–1.8 mm                |
| 扶手 handrail                | 40 m(P)                | HDPE            | Φ110–6.7 mm               | 4 m                   | 铝塑管<br>aluminum<br>plastics<br>pipe | Φ20–1.8 mm                |
| 网衣系统 netting system        |                        |                 |                           |                       |                                     |                           |
| 网袋 net                     | 40 m(P)×11 m<br>(H)    | PA              | 23tex×48–40<br>mm         | 4 m×1.1 m             | PA                                  | 23etex×18–20<br>mm        |
| 底圈<br>bottom circle        | 40 m (P)               | 钢 steel         | Φ40 mm                    | 4 m                   | 钢 steel                             | Φ4 mm                     |
| 沉子 sinker                  | 8 pieces               | 混凝土<br>concrete | 50 kg                     | 8 pieces              | 钢 steel                             | 50 g                      |
| 锚泊系统 mooring system        |                        |                 |                           |                       |                                     |                           |
| 浮子 buoy                    | 4 pieces               | PE              | 700 kg                    | 4 pieces              | PE                                  | 0.7 kg                    |
| 缆绳 main rope               | 35 m(L)                | PP              | Φ38–42 mm                 | 3.5 m                 | PE                                  | 4 mm                      |
| 浮框绳<br>rope frame          | 25 m(L)×25<br>m(L)     | PP              | 28–30 mm                  | 2.5 m×2.5 m           | PE                                  | 3 mm                      |
| 系框绳 bridle                 | 11 m(L)                | PP              | 28–30 mm                  | 1.1 m                 | PE                                  | 3 mm                      |
| 铁链 chain                   | 2 m(L)                 | 铁 Fe            | 25–30 mm                  | 0.2 m                 | 铁 Fe                                | 3 mm                      |

注: HDPE–高密度聚乙烯管; PA–尼龙; PE–聚乙烯; PP–聚丙烯。P–周长; L–长度; H–高度。  
Note: HDPE–高密度聚乙烯管; PA–nylon; PE–polyethylene; PP–polypropylene。P–perimeter; L–length; H–height.

表 2 拉力计编号  
Tab. 2 Load cell number

| 拉力计编号<br>load cell number | 缆绳位置<br>position of cable        | 拉力计量程/kg<br>range of load cell |
|---------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| 1                         | 右前缆绳 left front anchor line      | 10                             |
| 2                         | 左前缆绳 right front anchor line     | 10                             |
| 3                         | 前侧缆绳 front side anchor line      | 10                             |
| 4                         | 后侧缆绳 rear side anchor line       | 10                             |
| 5                         | 后缆绳 rear anchor line             | 10                             |
| 6                         | 浮绳框前缆绳 front cable of rope frame | 5                              |
| 7                         | 浮绳框侧缆绳 side cable of rope frame  | 10                             |
| 8                         | 浮绳框后缆绳 rear cable of rope frame  | 5                              |
| 9                         | 前系框绳 front bridle                | 10                             |
| 10                        | 后系框绳 rear bridle                 | 5                              |
| 11                        | 前浮子绳 front buoy cable            | 5                              |
| 12                        | 后浮子绳 rear buoy cable             | 5                              |

曲线。在纯波作用下, 后侧主缆绳 4 的受力大于前端主缆绳 1。缆绳 1 的张力逐渐增加, 在 7~9 个震荡周期时达到最大值, 然后衰减呈周期性震荡; 缆绳 4 的张力峰值逐渐增加, 在 7~8 个震荡周期时出现最大值, 然后衰减周期性震荡。

图 7 为流速 10 cm/s 波流作用下, 缆绳 1 和缆绳 4 的受力曲线。在波流作用下, 前端主缆绳 1 的张力大于后测主缆绳 4 的张力。缆绳 1 的张力峰值在开始时逐渐增加, 在 6~7 个震荡周期时出现最大值, 然后衰减呈周期性震荡; 缆绳 4 的张力峰值逐渐增加, 在 5~6 个震荡周期时出现最大值, 然后衰减呈周期性震荡。

值, 然后衰减呈周期性震荡。

图 8 为流速 15 cm/s 波浪作用下, 缆绳 1 和缆绳 4 的受力曲线。在波流作用下, 前端主缆绳 1 的张力大于后测主缆绳 4 的张力。缆绳 1 的张力峰值在开始时逐渐增加, 在 4~5 个震荡周期时出现最大值, 然后衰减呈周期性震荡; 缆绳 4 的张力峰值逐渐增加, 在 5~6 个震荡周期时出现最大值, 然后衰减呈周期性震荡。

对于网箱主缆绳的受力主要考虑最大张力不超过其破断强度, 故本研究波浪作用力分析采用最大张力值作为研究对象。

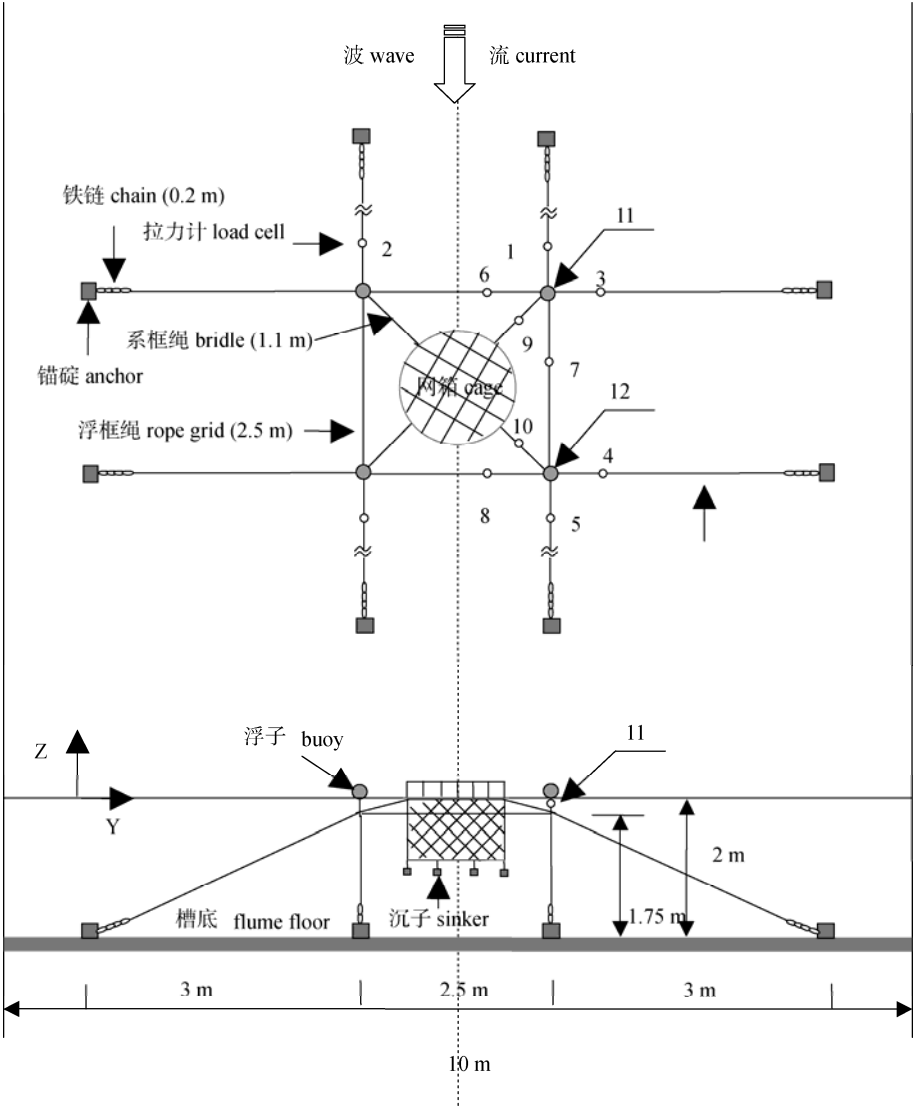


图 2 网箱模型及拉力计布置图  
Fig.2 Disposal of model cage and load cells

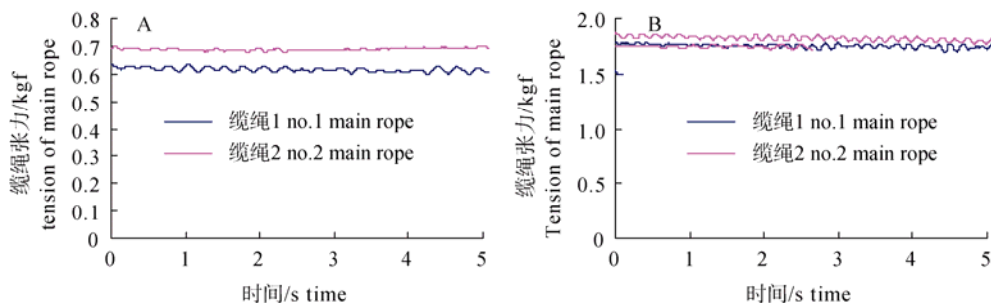


图 3 10 cm/s (A)和 15cm/s (B)纯流作用下缆绳 1、2 的张力

Fig.3 Tension of no.1 and no.2 main ropes to wave of 10 cm/s (A) and 15 cm/s (B)

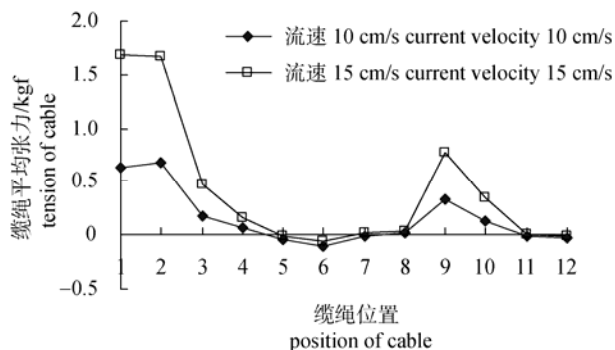


图 4 纯流作用下各位置缆绳张力

Fig.4 Tension of different cables to current

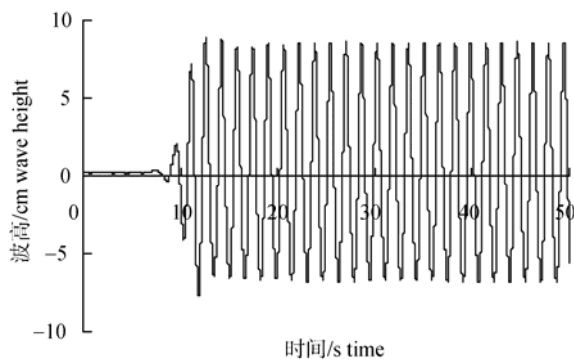


图 5 周期 1.6 s, 波高 15 cm 工况下的波浪曲线

Fig.5 Diagram of wave process under 1.6 s and 15 cm wave

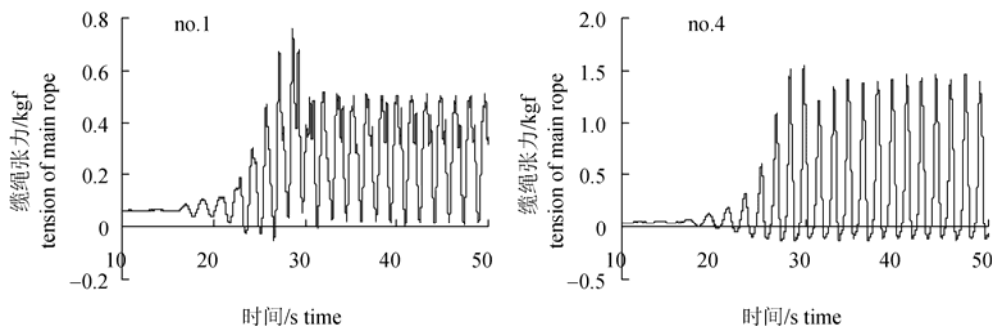


图 6 周期 1.6 s, 波高 15 cm 时 1 号和 4 号缆绳张力与波浪的响应过程

Fig.6 Response of tension of no.1 and no.4 main ropes to 1.6 s and 15 cm wave

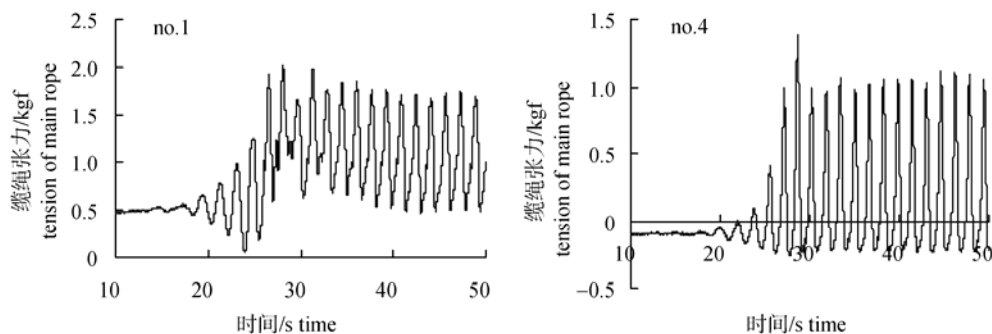


图 7 流速 10 cm/s, 周期 1.6 s, 波高 15 cm 时, 1 号和 4 号缆绳张力与波浪的响应过程

Fig.7 Response of tension of no.1 and no.4 main ropes to 1.6 s and 15 cm wave with 10 cm/s current

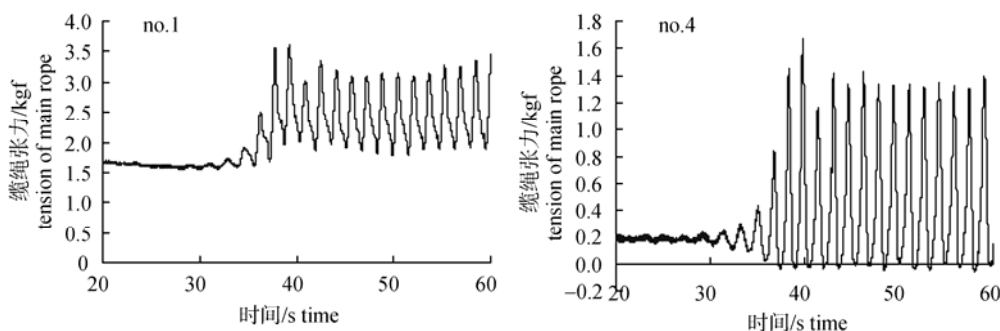


图 8 流速 15 cm/s, 周期 1.6 s, 波高 15 cm 时, 1 号和 4 号缆绳张力与波浪的响应过程

Fig.8 Response of tension of no.1 and no.4 main ropes to 1.6 s and 15 cm wave with 15 cm/s current

### 2.3 纯波作用下缆绳最大张力分布

图 9 选用波高 15 cm, 在各实验周期下, 对各位位置缆绳最大张力进行分析。由图 9 可以看出, 缆绳较大张力出现在 1 号缆绳(右前缆绳)、2 号缆绳(左前缆绳)和 4 号缆绳(后侧缆绳), 其中 1、2 号缆绳最大张力出现在周期 1.3 s, 而 4 号缆绳的最大张力出现在周期 1.6 s。其中 4 号缆绳在所有工况下除 1.3 s 外所受最大张力均最大。2 号缆绳除周期 1.0 s 时最大张力大于 1 号缆绳外, 其他工况均小于 1 号缆绳。

### 2.4 波流作用下缆绳最大张力分布

如图 10 所示, 在流速 10 cm/s, 波高 15 cm 时, 各实验周期下, 较大张力出现在 1 号缆绳(左前缆绳)和 2 号缆绳(右后缆绳), 且最大张力出现在 1.0 s 周期时。缆绳的最大张力随着周期的增加而减小。但 1 号缆绳和 2 号缆绳的张力明显产生

差异, 即 2 号缆绳大于 1 号缆绳张力, 前者比后者高 3%~30%。

如图 11 所示, 在流速 15 cm/s, 波高 15 cm 时, 各实验周期下, 缆绳较大张力出现在 1 号缆绳(右前缆绳)和 2 号缆绳(右后缆绳), 最大张力周期出现在 1.0 s 周期时。缆绳的最大张力随着周期的增加而减小。但 1 号缆绳和 2 号系框绳的最大张力未出现某一根缆绳一直偏大的情况。

从图 10、图 11 中可知, 在正面波流作用下, 网箱前端缆绳的受力最大, 其次为前端 9 号系框绳, 再次为 4 号缆绳。

### 2.5 缆绳最大张力与波浪因子之间的关系

**2.5.1 纯波作用下缆绳最大张力与波浪因子之间的关系** 所有缆绳当中出现最大张力的为 4 号缆绳(后侧缆绳)。不同周期条件下, 缆绳最大张力与波高的关系见表 4。

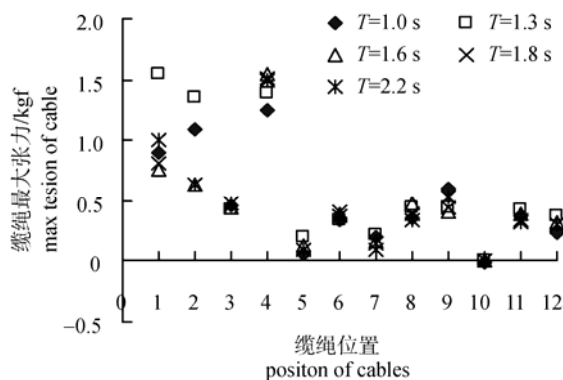


图 9 流速 0 cm/s, 波高 15 cm 时, 不同周期各位位置缆绳最大张力分布

Fig. 9 Maximal tension of different main ropes to 15 cm and different period waves without current

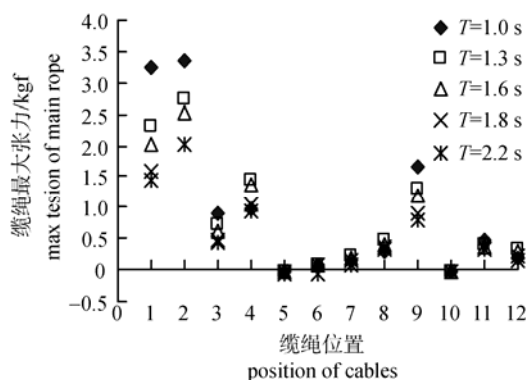


图 10 流速 10 cm/s, 波高 15 cm 时, 不同周期各位位置缆绳最大张力分布

Fig.10 Maximal tension of different main ropes to 15 cm and different period wave with 10 cm/s current

表 3 实验工况参数表  
Tab.3 Parameters of experimental condition

| 流速/(cm·s <sup>-1</sup> )<br>current velocity | 波高/cm<br>wave height | 周期/s period             |
|----------------------------------------------|----------------------|-------------------------|
| 0, 10, 15                                    | 0                    |                         |
|                                              | 15                   | 1.0, 1.3, 1.6, 1.8, 2.2 |
|                                              | 20                   | 1.0, 1.3, 1.6, 1.8, 2.2 |
|                                              | 25                   | 1.3, 1.6, 1.8, 2.2      |
|                                              | 30                   | 1.3, 1.6, 1.8, 2.2      |

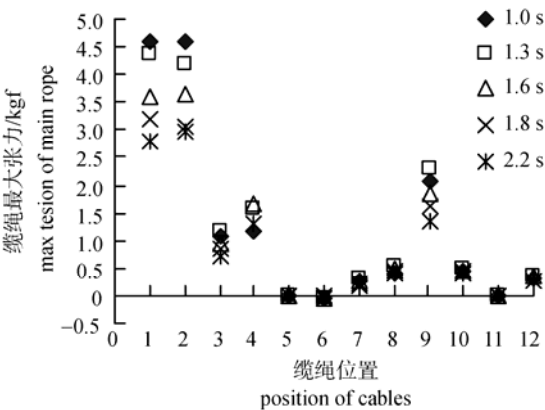


图 11 流速 15 cm/s, 波高 15 cm 时, 不同周期各位置缆绳最大张力分布

Fig.11 Maximal tension of different main ropes to 15 cm wave height and different period wave with 15 cm/s current

由表 4 可以看出, 在纯波作用下, 同一周期条件下, 缆绳最大张力 $T_{\max}$ 与波高 $H$ 间的关系式为 $T_{\max}=C_1H+C_2$  ( $C_1$ 和 $C_2$ 为常数), 将 $C_1$ 和 $C_2$ 分

别与周期 $t$ 回归, 可得出 $C_1=-1.428\ 5t^2+5.819\ 4t-5.375\ 8(R^2=0.974\ 3)$ ,  $C_2=-0.044t+0.155(R^2=0.997\ 2)$ 。

在纯波作用下, 在所有的周期条件下, 缆绳的张力随着波高的增加而增加, 但在同波高条件下, 缆绳最大张力产生的周期为 1.6 s。

**2.5.2 波流作用下缆绳最大张力与波浪因子之间的关系** 所有缆绳当中受最大张力的为 1 号缆绳(前缆绳)。在不同周期条件下, 1 号缆绳最大张力与波高的关系见表 5。由表 5 可以看出, 在波流作用下, 同一周期, 缆绳最大张力为 $T_{\max}=C_3e^{C_4H}$ ,  $C_3$ 和 $C_4$ 为常数。将 $C_3$ 和 $C_4$ 分别与周期 $t$ 回归, 可得出,  $C_3=0.986\ 1$ (由于各周期数值相近采用各周期下的平均数),  $C_4=-0.016\ 3t+0.082\ 8(R^2=0.998\ 8)$ 。使用最大张力、波高和周期回归公式的计算值与实际测量值的误差范围介于-13.2%~6.67%之间, 与各周期的单一回归公式的计算值误差范围介于-3.31%~1.12%之间。

在不同周期条件下, 1 号缆绳最大张力与波高的关系见表 6。由表 6 可以看出, 在流速 15 cm/s 波流作用下, 在同一周期条件下, 缆绳最大张力 $T_{\max}=C_5e^{C_6H}$ ,  $C_5$ 和 $C_6$ 为常数。将 $C_5$ 和 $C_6$ 分别与周期 $t$ 回归, 可得出,  $C_5=-0.371\ 8t+2.285\ 2(R^2=0.917\ 6)$ ,  $C_6=-0.014\ 1t^2+0.044\ 2t+0.014\ 7(R^2=0.774\ 7)$ 。

表 4 4 号缆绳最大张力与波高的关系  
Tab.4 Relationship between maximal tension of no.4 main rope and wave height

| 周期/s<br>period | 最大张力与波高的关系<br>relationship between max tension and wave height | 相关系数<br>correlation coefficient |
|----------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| $t=1.3$        | $T_{\max}=0.0969H-0.243$                                       | $R^2=0.9821$                    |
| $t=1.6$        | $T_{\max}=0.0856H+0.3473$                                      | $R^2=0.9556$                    |
| $t=1.8$        | $T_{\max}=0.0762H+0.409$                                       | $R^2=0.9827$                    |
| $t=2.2$        | $T_{\max}=0.0576H+0.5247$                                      | $R^2=0.9812$                    |

表 5 流速 10 cm/s 时 1 号缆绳最大张力与波高关系  
Tab. 5 Relationship between maximal tension of no.1 main rope and wave height with 10 cm/s current

| 周期/s<br>period | 最大张力与波高的关系<br>relationship between maximal tension and wave height | 相关系数<br>correlation coefficient |
|----------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| $t=1.3$        | $T_{\max}=e^{0.0614H}$                                             | $R^2=0.9954$                    |
| $t=1.6$        | $T_{\max}=0.9564e^{0.0570H}$                                       | $R^2=0.9743$                    |
| $t=1.8$        | $T_{\max}=0.9963e^{0.0534H}$                                       | $R^2=0.9941$                    |
| $t=2.2$        | $T_{\max}=0.9916e^{0.0468H}$                                       | $R^2=0.9680$                    |

注:  $T_{\max}$ 表示最大张力,  $H$ 表示波高。  
Note:  $T_{\max}$  is maximal tension.  $H$  is wave height.

表 6 流速 15 cm/s 时 1 号缆绳最大张力与波高关系

Tab.6 Relationship between maximal tension of no.1 main rope and wave height with 15 cm/s current

| 周期/s<br>period | 最大张力与波高的关系<br>relationship between maximal tension and wave height | 相关系数<br>correlation coefficient |
|----------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| $t=1.3$        | $T_{\max}=1.7775e^{0.0489H}$                                       | $R^2=0.9032$                    |
| $t=1.6$        | $T_{\max}=1.7498e^{0.0478H}$                                       | $R^2=0.9455$                    |
| $t=1.8$        | $T_{\max}=1.5817e^{0.0503H}$                                       | $R^2=0.981$                     |
| $t=2.2$        | $T_{\max}=1.4665e^{0.0437H}$                                       | $R^2=0.9176$                    |

注:  $T_{\max}$ 表示最大张力,  $H$ 表示波高.  
Note:  $T_{\max}$  is maximal tension.  $H$  is wave height.

波流作用下, 在各周期中, 缆绳的张力随着波高的增加而增加; 在同一流速时, 在相同波高条件下, 缆绳最大张力随波浪周期增加而减小。

3 讨论

(1)由主要受力的主缆绳在纯波和波流作用下的张力-时间曲线来看, 网箱在波浪开始作用时, 可能由于浮绳框产生一定的漂移, 波浪传递的能量在网箱系统中产生叠加, 从而缆绳的最大张力在经历几个波浪周期后产生最大值。具体经历的波数, 有待进一步研究。

(2)考虑到 大比例尺模型的试验结果相对准确, 本实验设计时采用大比例尺  $\lambda=1/10$ , 但由于水槽造波机最大的波高为 30 cm 左右, 相对于实际波高 3 m, 在换算时与海上实际波高有一定的差距。按照模型实验准则, 本实验工况换算为实际海况为: 流速 31.62 cm/s 和 47.43 cm/s, 最大波高 3 m 左右, 周期 3.16~6.96 s; 锚绳实测到的最大张力为 7.541 kg(周期 1.6 s, 波高 32.63 cm), 换算为实际工况时为 754 1 kg。由于试验模型扶手管和立柱的管径没有按大比例尺 1/10 换算的相应材料, 模型和实物的比例尺为 1/6.25 和 1/5.5, 故与实际换算时, 存在一定的误差。

(3)在纯波作用下, 网箱后侧缆绳 4 所受的张力在所有缆绳中最大, 且在同波高条件下, 缆绳最大张力产生的周期为 1.6 s, 但周期 1.8 s 时的张力与 1.6 s 相近, 两者张力差值约为 10%。前端缆绳 1 的最大张力稍小于后侧缆绳, 最大张力产生的周期为 1.3 s。本实验波高/波长比大于 1/20, 为

深水波, 故波长  $\lambda=gt^2/2\pi$  ( $g$  为重力加速度,  $t$  为波浪周期)。周期  $t=1.3$  s 时, 波长 2.64 m; 周期  $t=1.6$  s 时, 波长 3.99 m; 周期  $t=1.8$  s 时, 波长 5.05 m。网箱模型框架中部直径为 1.31 m, 浮绳框尺寸 2.5 m  $\times$  2.5 m。纯波作用下, 前端缆绳出现在 1.3 s 周期, 此时波长约为框架尺寸的 2 倍; 后端后侧缆绳最大张力出现在 1.6 s 周期, 波长约为框架直径的 3 倍; 周期 1.8 s 时后侧缆绳最大张力稍小于周期 1.6 s 时后侧缆绳网箱最大张力, 此时波长约为浮绳框边长的 2 倍。由此可知, 当网箱框架尺寸和浮绳框尺寸与波长呈倍数关系时, 导致网箱缆绳受力增大。

(4)在波流联合作用下, 网箱前端缆绳 1、2 的张力最大, 其他缆绳张力明显降低。最大张力在同波高条件下, 张力随波浪周期的增加而减少。网箱在波流作用下呈“漂移”状态<sup>[10]</sup>, 降低了网箱的运动幅度。在水流的推动下, 网箱产生较大的漂移力, 远大于纯流作用下的缆绳最大张力和纯波作用下最大张力之和。在同波高条件下, 周期越小, 波浪蕴含的能量越大, 故周期增大, 张力减小<sup>[9]</sup>。在周期 1.6 s 和 1.8 s 时, 两者缆绳最大张力仍然相近, 说明波长与网箱尺寸和浮绳框尺寸呈整数倍时, 对缆绳受力起到相同的作用。

(5)网箱左右缆绳在实际作业时, 受力有所偏差, 最大差值约 30%<sup>[10]</sup>。但不是一直表现为一侧缆绳偏大。一方面可能是由于网箱在水池中布设时, 缆绳的张紧程度不同, 网箱对来浪和来流不完全对称等原因引起的; 另一方面可能是由于波浪经过网箱破碎后, 使网箱产生横摇所致。需要



进一步实验验证。

(6)本实验对于流速的实验工况较少,不能将波浪和流速等参数同时与缆绳最大张力进行回归,这值得进一步探讨。另外可开展不同角度来浪和来流与缆绳张力之间关系的研究,以得出与实际作业状况更加相符的结果。

#### 参考文献:

- [1] 林德芳, 关长涛, 黄文强. 海水养殖网箱工程技术发展现状与展望[J]. 渔业现代化, 2002, (4): 6-9.
- [2] Chen J, Guang C, Xu H, et al. Marine fish cage culture in China. The future of mariculture: a regional approach for responsible development in the Asia-Pacific region [M], FAO/NACA Regional Workshop, 2006: 285-293
- [3] Loverich G F, Gace L. The affect of currents and waves on several classes of offshore cages [J]. Open Ocean Aquac, 1997, 4: 61-73.
- [4] Fredriksson D W, Swift M R, Irish M R, et al. Sea cage and mooring system dynamics using physical and numerical models with field measurements[J]. Aquac Eng, 2003, 27: 117-146.
- [5] 宋伟华, 梁振林, 黄六一, 等. 应用两种不同的波浪理论计算方形网箱水平波浪力[J]. 中国水产科学, 2005, 12(1): 91-98.
- [6] 李玉成, 桂福坤, 宋芳, 等. 漂浮状态下重力式及碟形网箱运动及锚绳受力特性的比较[M]. 深水抗风浪网箱技术研究. 北京: 海洋出版社, 2005: 129-136.
- [7] 高晓芳. 圆形升降式深海养殖网箱的力学分析、建模及仿真[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [8] Fredriksson D W, DeCewa J, Swift M R, et al. The design and analysis of a four-cage grid mooring for open ocean aquaculture [J]. Aquac Eng, 2004, 32: 77-94
- [9] Huang C C, Tang H J, Liu J Y. Effects of waves and currents on gravity-type cages in the open sea [J]. Aquac Eng, 2008, 38: 105-116
- [10] 郑国富, 黄桂芳, 魏观渊, 等. 波浪作用下圆柱形近海抗风浪网箱缆绳的张力特性[J]. 水产学报, 2007, 31: 84-91.
- [11] 周应祺. 渔具力学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 119-140.

## Tension of anchor lines of single gravity grid mooring cage under combining effects of wave and current

HUANG Liuyi<sup>1</sup>, LIANG Zhenlin<sup>1,2</sup>, WAN Rong<sup>1</sup>, Kinoshita Takeshi<sup>4</sup>, ZHAO Fenfang<sup>1</sup>, SONG Weihua<sup>3</sup>, WAN Xinxin<sup>1</sup>, SHI Jiangao<sup>5</sup>

1. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. Shandong University at Weihai, Weihai 264209, China;

3. Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316004, China;

3. The University of Tokyo, Tokyo 1538505, Japan;

5. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China

**Abstract:** The characters of tension in the mooring lines of a single HDPE gravity cylindrical cage were studied by experimental tests. The proto type of cage had a perimeter of 40 m and a height of 10 m. Based on the Dixon rule of gear tests, two scales were chosen for the experimental model, i.e.  $\lambda = 1/10$  and  $\lambda = 1/2$ . The experiments were carried out in Ocean Engineering Basin of Institute of Industrial Science of the University of Tokyo. The grid mooring system used in the experiments was geometrically similar to the proto type. The horizontal projections of the front mooring lines were in the same direction of current or incident waves. Uniform current was produced in the whole basin at a velocity of 0 cm/s, 10 cm/s and 15 cm/s. Regular waves with a period of the range from 1 s to 2.2 s and a height varying from 10 cm to 30 cm were generated. Tension in the mooring lines was measured. The following conclusions were made from the analysis of measured data: (1) Under the actions of current only, the tension in the front mooring lines was greater than that in rear mooring lines. (2) Under the actions of waves only, the tension in the rear mooring lines was greater than that in the front mooring lines. An empirical formula for the maximum tension ( $T_{\max}$ ) in the rear mooring lines was deduced. It turned out that the maximum tension was linearly related to the wave height ( $H$ ), i.e.  $T_{\max} = C_1 H + C_2$  ( $C_1$  and  $C_2$  are constants). (3) Under the combining effects of waves and current, the tension of the front anchor line was again greater than that in the rear one. Another empirical formula was deduced. It showed that the maximum tension in the front mooring lines was exponentially increased with the wave height, i.e.  $T_{\max} = C_3 e^{C_4 H}$  ( $C_3$  and  $C_4$  are constants).

**Key words:** gravity cylindrical cages; the maximal tension of anchor line; wave; current

**Corresponding author:** WAN Rong. E-mail: rongwan@ouc.edu.cn