

文章编号: 1000-0615(2019)06-1518-09

DOI: 10.11964/jfc.20181211587

水下圆形重力式网箱缆绳张力对波、流的响应特性

刘圣聪¹, 黄六一^{1*}, 倪益¹, 程晖¹, 赵芬芳¹,
王欣欣¹, 梁振林^{1,2}, KINOSHITA Takeshi³

(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 264209;

3. 东京大学, 日本 东京)

摘要: 通过模型试验研究了周长40 m、网高10 m的HDPE圆形升降式网箱沉降在水下时的缆绳张力。试验采用狄克逊准则, 模型大比例尺 $\lambda=10$ 和小比例尺 $\lambda_a=\lambda_d=2$; 网箱采用网格形式锚泊系统。试验时前主缆绳水平方向与波流夹角为 0° , 试验流速为0、5、10和15 cm/s, 波浪周期范围1.3~2.2 s, 波高范围10~30 cm。在各试验条件下对主缆绳和系框绳以及浮框绳张力进行了测试, 以受力最大的缆绳为研究对象, 分析了缆绳最大张力与波流因子之间的关系。结果显示: ①在纯流作用下, 前主缆绳受力最大; 在纯波作用下, 后侧主缆绳受力最大, 最大张力随波高增大呈线性增长趋势, 随周期变化的影响较小。②在波流作用下, 高流速、低波高、高波周期条件时前主缆绳受力最大; 在低流速、高波高、低波周期时后侧主缆绳受力最大; 前主缆绳受水流作用影响较大, 后侧主缆绳受波浪作用影响较大。③在波流作用下, 各缆绳最大张力随波高、流速增大而增大, 随周期增大而减小; 后侧主缆绳最大张力无量纲量随波陡增大且基本呈线性增长趋势。

关键词: 升降式重力式网箱; 缆绳张力; 波浪; 水流

中图分类号: S 972.1

文献标志码: A

离岸抗风浪网箱设置在开放海域, 易遭遇恶劣的海洋环境载荷, 特别是台风或风暴潮影响, 对网箱造成破坏。升降式网箱通过向浮管中注水等方法, 使网箱沉降到水下一定深度, 以躲避台风、急浪袭击, 保护网箱设施和养殖对象的安全^[1]。我国南方沿海各省近年来每年有8~10次台风经过, 对传统网箱养殖和浮式离岸抗风浪网箱养殖造成严重损失, 升降式网箱必然成为我国南方海区开展深海网箱养殖的主要设施之一。然而, 由于升降式网箱操作复杂、造价高等问题, 目前我国升降式网箱数量不超过100只^[2]。

升降式网箱主要由相对刚性的浮框系统、柔性的网衣系统和锚泊系统组成。国外技术成熟的有挪威的HDPE圆形升降式网箱、美国的蝶

形网箱和日本的方形钢结构升降式网箱等, 我国应用最普遍的是HDPE圆形升降式网箱^[3]。确保网箱锚泊系统安全是网箱设计和布设过程中的重要研究内容之一, 尤其在波流联合作用下, 锚泊系统局部缆绳会产生瞬间的最大张力, 对缆绳强度有更高的要求。国内外学者运用数值计算和水槽模型试验等手段对不同锚泊方式(单点锚泊^[4-5]、网格锚泊^[6-8])和不同箱体形状(圆柱形^[9-10]、圆台型^[11-12]、蝶形^[13-14]、方形^[15])的网箱在波流作用下的缆绳张力特性进行研究, 对升降式网箱的设计制作^[16-18]、沉降控制系统^[3]以及水动力特性^[19]都有一定分析研究。上述研究并未对我国常用的网格形式锚泊圆形重力式网箱处于水下状态时的缆绳张力特性作细致的模型试验研

收稿日期: 2018-12-19 修回日期: 2019-03-26

资助项目: 山东省重点研发计划(2016CYJS04A01-5, 2017CXGC0107); 国家海洋局项目(GHME2016YY02)

通信作者: 黄六一, E-mail: huangly@ouc.edu.cn

究, 研究结果准确性与适用性仍有待实践检验。

本实验通过水槽模型试验研究波流作用下网箱形式锚泊圆形重力式网箱处于水下状态时的缆绳张力特性, 分析网箱锚泊系统在波浪、波流作用下缆绳最大张力与水流、波浪因子之间的关系, 并与黄六一等^[8]的研究结果进行比较, 以期更深入地了解升降式网箱在水下时的水动力特性, 为圆形重力式升降式网箱及其锚泊系统设计提供参考数据, 并为数值模拟研究提供实证数据。

1 材料与方法

1.1 试验设备

试验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)中进行。水槽本体参数为50 m(L)×10 m(W)×5 m(D), 试验段位于水槽中部, 尺寸为20 m(L)×10 m(W), 试验段底部可以在槽底和水面之间自由升降, 能够调节试验水深。试验水槽的波浪周期为0.5~5.0 s, 最大波高30 cm, 流速范围0~20 cm/s。波高仪KENEK WAVE HEIGHT METER CHT6-40, 最大测量波高40 cm, 测量频率10 Hz(精度±0.3%)。流速仪ACM100-D, 流速范围0~200 cm/s(精度±2%)。拉力计自制, 测量范围0~5 kg、0~10 kg, 测量频率10 Hz, 精度均为±0.5%。

1.2 试验模型

实物网箱为目前我国常用的HDPE圆形重力式升降式抗风浪网箱, 网箱周长40 m, 直径12.7 m, 网高10 m, 网箱可以处于水面和水下2个状态。由于试验中有波流联合作用, 在比较各种模型试验准则的基础上, 选用狄克逊准则相对比较吻合^[20]。根据水槽试验段尺寸, 模型大尺度比 $\lambda=10$, 小尺度比 $\lambda_a=\lambda_d=2$ 。由于按比例尺换算没有对应尺寸的HDPE管材, 模型网箱框架选用PPR管材。PPR相对密度为0.9~0.92, 拉伸屈服应力大于20 MPa, HDPE相对密度为0.92~0.96, 拉伸屈服应力18~25 MPa, 两者材料性能相似^[21-22]。使用的缆绳材质与实际缆绳相同, 直径按照相似准则换算, 以保持缆绳弹性相似。实物网箱和模型网箱换算参数见表1。

1.3 试验布置图

由于网箱系统结构与波流来向呈左右对称,

拉力计采用单侧布设(图1)。前端缆绳设置2个拉力计(No.1和No.2), 考察左右缆绳张力的差异, 拉力计编号对应缆绳位置见表2。

1.4 试验工况

根据试验设备的性能和技术参数, 试验时波浪周期采用1.3~2.2 s, 波高10~30 cm, 流速5~15 cm/s(表3)。

1.5 数据处理方法

本研究定量分析网箱水动力与波浪因子的关系, 相关波浪理论遵从有限振幅波理论。在波浪和波流作用下, 取缆绳张力随时间变化曲线稳定震荡后的5个波峰平均值作为缆绳最大张力。

波流作用下, 水流作用影响明显, 缆绳最大张力无量纲量方程采用下式:

$$F' = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho L D v^2}$$

式中, F' 为波浪力无量纲量, F 为波浪力(N), ρ 为水密度(kg/m^3), L 为波长(m), D 为网箱直径(m), v 为流速(m/s)。

2 结果

2.1 纯流作用下缆绳张力分布

纯流作用下, No.1缆绳张力随时间变化基本不变(图2), 因此在研究水流作用下缆绳张力时采用平均值。No.1、No.2缆绳张力最大, 其次为No.9、No.11和No.3缆绳, No.4和No.8缆绳张力很小, 其他缆绳在纯水流作用下基本处于松弛状态(图3)。

2.2 纯波作用下缆绳张力

波浪-张力曲线 纯波作用下, 以波高20 cm、周期1.6 s条件为例, 波浪未到达网箱时, 缆绳处于松弛状态; 当波浪作用到网箱, 缆绳张力迅速增大, 并在7~9个震荡周期后达到最大, 之后处于稳定的周期性张力振荡作用(图4)。

各缆绳最大张力分布 波高为20 cm, 不同周期条件下, 除了周期为1.3 s时No.1缆绳最大张力最大, No.4缆绳最大张力明显大于其他缆绳张力, 其次为No.1、No.2缆绳, 再次为No.3缆绳, No.5缆绳张力较小。No.1、No.2缆绳最大张力随周期增大而减小, 在周期为1.3 s时张力最大; No.4缆绳和No.8缆绳随周期变化的影响较小(图5)。

表 1 实物网箱与模型网箱参数表

Tab. 1 Parameter of prototype and model of the cage

名称 items	实物网箱 prototype of cage			模型网箱 model of cage		
	网箱规格/m specs of cage	材料 material	材料规格/mm specs of cage	网箱规格/m specs of cage	材料 material	材料规格/mm specs of cage
浮框系统 floating frame system						
内浮管 inner floating pipe	40(P)	HDPE	Φ250×22.7	4	PPR	Φ25×2.3
外浮管 outer floating pipe	42.8(P)	HDPE	Φ250×22.7	4.28	PPR	Φ25×2.3
连接件 joint	0.45(L)	HDPE	Φ320	0.045	PPR	Φ32
立柱 pillar	1(L)	HDPE	Φ125×11.4	0.1	PPR	Φ20×1.8
扶手 handrail	40(P)	HDPE	Φ110×6.7	4	铝塑管	Φ20×1.8
网衣系统 netting system						
网袋 net	40(P)×11(H)	PA	23tex×(48~40)	4×1.1	PA	23tex×(18~20)
底圈 bottom circle	40(P)	钢 steel	Φ40	4	钢 steel	Φ4
沉子 sinker	8 pieces	混凝土 concrete	50 kg	8 pieces	钢 steel	50 g
锚泊系统 mooring system						
浮子 buoy	4 pieces	PE	70 0kg	4 pieces	PE	0.7 kg
缆绳 main rope	35(L)	PE	Φ38~42	3.5	PE	Φ4
浮框绳 rope frame	25(L)×25(L)	PE	Φ28~30	2.5×2.5	PE	Φ3
系框绳 bridle	11(L)	PE	Φ28~30	1.1	PE	Φ3
铁链 chain	2(L)	铁 steel	Φ25~30	0.2	铁 steel	Φ3

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

Notes: HDPE. high density polyethylene; PA. nylon; PE. polyethylene; PP. polypropylene; P. perimeter; L. length; H. height

缆绳最大张力与波浪因子之间的关系
纯波作用下, No.4缆绳受力最大, 考虑缆绳破断强度, 应以最大张力缆绳作为研究对象。将No.4缆绳作为研究对象, 探讨波浪因子与最大张力之间的关系。No.4缆绳最大张力随波高增大基本呈线性增大。相同波高下, 周期为1.3 s时张力最大(图6)。通过回归分析, 同一周期条件下, 缆绳最大张力与波高的关系式为 $F=C_1H+C_2$ (C_1 和 C_2 为常数)(表4)。

2.3 波流作用下缆绳张力

波流-张力曲线 波流作用下, 以流速10 cm/s、周期1.6 s、波高20 cm条件为例, 波浪未到达网箱时, 缆绳受恒定流速水流作用, 且缆绳张力稳定; 当波浪作用到网箱, 缆绳张力迅速增大, 在5~6个震荡周期时出现最大值, 并呈现稳定的周期性张力振荡作用(图7)。

波流作用下缆绳最大张力 波流作用下, 波高为20 cm, 在流速为5 cm/s时, No.4缆绳最大

张力明显大于其他缆绳张力, 且在不同周期下, 其最大值是其他主缆绳(No.1、No.2、No.3、No.5)2倍以上(图8-a); 在流速为10 cm/s时, No.4缆绳最大张力明显大于其他缆绳张力, 其次为No.1、No.2缆绳, 再次为No.3缆绳(图8-b); 在流速为15 cm/s时, No.4缆绳最大张力在周期为1.8 s和2.2 s时小于No.1缆绳, 在周期为1.6 s时大于No.1、No.2缆绳, No.3缆绳张力变化不大(图8-c)。

波流作用下, No.5和No.10缆绳几乎不受力, No.1、No.2和No.9缆绳最大张力随流速的增大而增大; No.4和No.8缆绳最大张力随流速增大无明显变化; No.11、No.12缆绳张力相近, 且随流速增大无明显变化; No.6和No.7缆绳受力较小。各缆绳最大张力都随周期的增大而减小。

缆绳最大张力与波流因子之间的关系
波流作用下, No.1缆绳受水流作用影响较大, No.4缆绳受波浪周期影响较大。对此, 分别对No.1缆绳在不同流速下最大张力与波高关系以及No.4缆绳在不同周期下最大张力与波高关系进行分析。

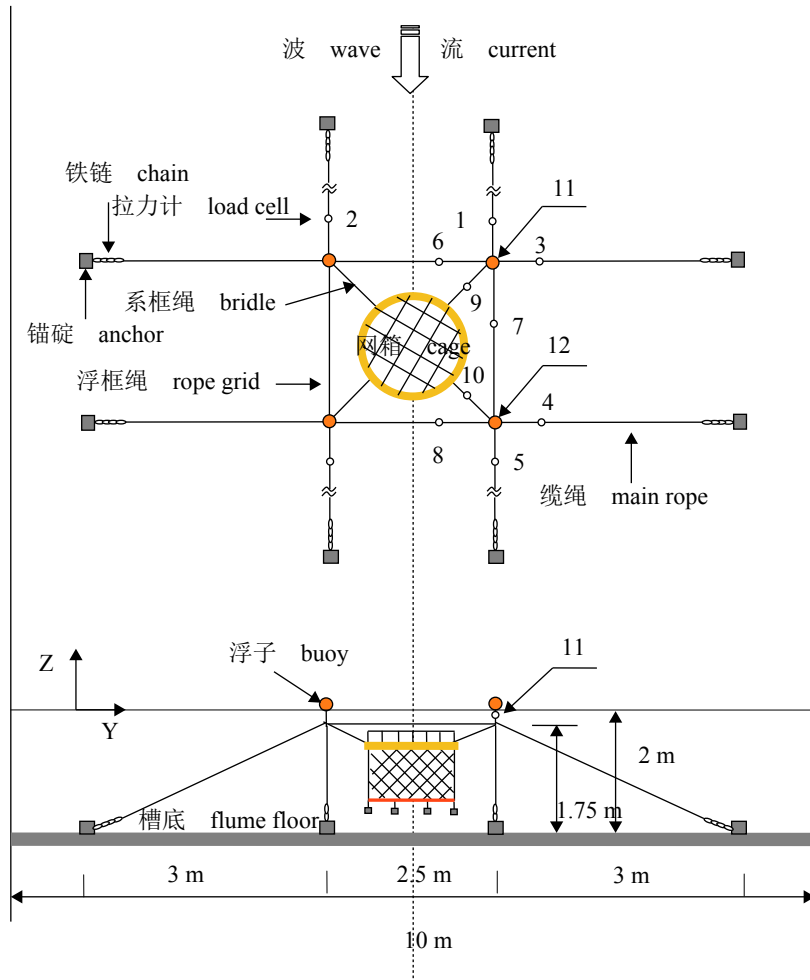


图 1 网箱模型及拉力计布置图

Fig. 1 Layout of model cage and load cells

波流作用下, No.4缆绳张力随波高增大呈线性方式增长; 同一周期条件下, 缆绳最大张力与波高的关系式为 $F=C_3H+C_4$ (C_3 和 C_4 为常数)(表5)。将 C_3 和 C_4 分别与周期 t 回归, 可得出 $C_3=1.041e^{0.216t}$ ($R^2=0.975$), $C_4=-28.44\ln(t)+22.978$ ($R^2=0.996$)。

波流作用下, No.1缆绳张力随波高增大呈线性方式增长; 同一流速条件下, 缆绳最大张力与波高的关系式为 $F=C_5H+C_6$ (C_5 和 C_6 为常数)(表6)。将 C_5 和 C_6 分别与流速 v 回归, 可得出 $C_5=1.37e^{-6.07v}$ ($R^2=0.999$), $C_6=24.889\ln(v)+74.44$ ($R^2=0.999$)。

波流作用下, 缆绳最大张力无量纲量随波陡增大基本呈线性方式增长; 同时, 流速越大, 缆绳最大张力无量纲量越大(图9)。缆绳最大张力无量纲量与波陡的关系为 $F'=C_7H+C_8$ (C_7 和 C_8 为常数)(表7)。将 C_7 和 C_8 分别于流速 v 回归, 可得出 $C_7=327.02e^{-20.52v}$ ($R^2=0.972$), $C_8=1.021e^{-22.74v}$ ($R^2=0.999$)。

3 讨论

整个试验过程中, No.1缆绳最大张力都大于No.2缆绳。一方面可能是由于整个系统装配布设不是完全对称引起的; 另一方面也可能是由于波浪经过网箱破碎后, 使网箱产生横摇所致, 与郑国富等^[10]研究结果相似。

波浪和波流作用下, No.4缆绳张力最大, 与桂福坤等^[7]研究结果相同。试验中发现, 波浪和波流作用下, 网箱整体后移, 由于网箱在来浪和来流的前端的运动水深大于后端, 使网箱整体前倾, 前端缓冲浮子入水深度大于后端缓冲浮子, 造成后侧缆绳向后侧方的运动幅度增大, 从而使No.4缆绳张力最大。

波流作用下, No.1和No.2缆绳受水流作用影响较大, No.4缆绳受波浪作用影响较大。No.4缆绳基本不受水流作用的影响, 而No.1和No.2缆绳

表 2 拉力计编号与缆绳关系

Tab. 2 Load cell number with corresponding line

拉力计编号 serial number	缆绳位置 position of cable	拉力计量程/kg range of load cell
1	右前主缆绳 left front anchor line	10
2	左前主缆绳 right front anchor line	10
3	前侧主缆绳 front side anchor line	10
4	后侧主缆绳 rear side anchor line	10
5	后主缆绳 rear anchor line	10
6	浮绳框前缆绳 front line of rope frame	5
7	浮绳框侧缆绳 side line of rope frame	10
8	浮绳框后缆绳 rear line 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 line	5
12	后浮子绳 rear buoy line	5

表 3 试验工况参数表

Tab. 3 Parameter of experimental condition

流速/(cm/s) current velocity	波高/cm wave height	周期/s period
	10	1.3, 1.6, 1.8, 2.2
0~5, 10~15	20	1.3, 1.6, 1.8, 2.2
	30	1.3, 1.6, 1.8, 2.2

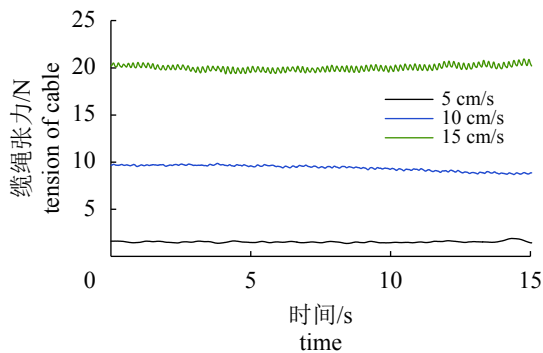


图 2 纯流作用下No.1缆绳张力曲线
Fig. 2 Tension of No.1 anchor lines in current

受水流作用影响较大,可能由于No.1和No.2缆绳正面受流,缆绳始终处于张紧的状态,受水流影响最大。而No.4缆绳在水流作用下,由于处于网箱后侧,始终处于松弛状态。

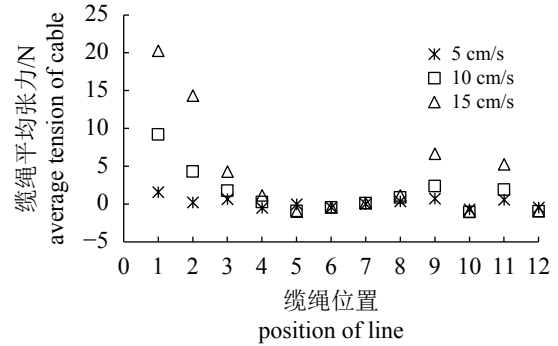


图 3 纯流作用下各缆绳平均张力
Fig. 3 Average tension of different line in currents

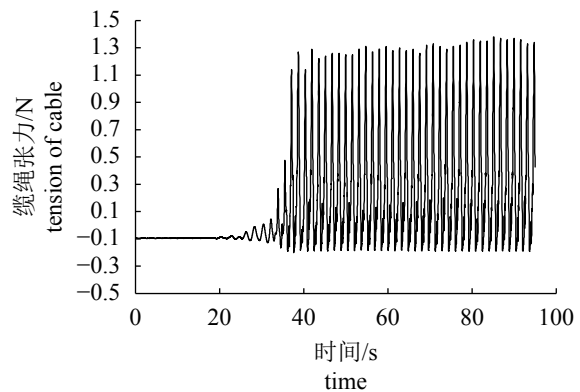


图 4 纯波作用下No.1缆绳张力曲线
Fig. 4 Tension of No.1 anchor line in wave

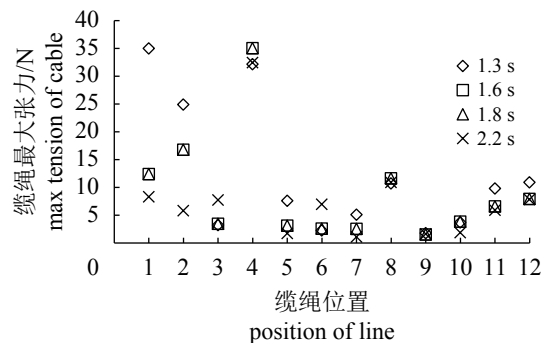


图 5 纯波条件下各位置缆绳最大张力分布
Fig. 5 Maximal tension of different lines to different period waves without current

本研究结果与黄六一等^[8]研究结果进行比较,发现在纯流和纯波作用下,最大缆绳张力都同样分别在No.1、No.2缆绳和No.4缆绳处。在波流作用下,浮式网箱最大张力缆绳为No.1、No.2缆绳,沉式网箱最大张力缆绳为No.4缆绳;浮式网箱缆绳最大张力与波高呈幂函数关系,沉式

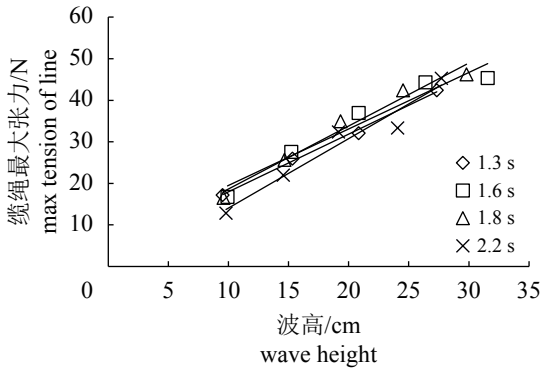


图 6 No.4缆绳最大张力与波高关系

Fig. 6 Relationship between maximal tension of No.4 rope and wave height

表 4 No.4缆绳最大张力与波高的关系

Tab. 4 Relationship between maximal tension of No.4 main line and wave height

周期/s period	最大张力与波高关系 Relationship between tension and wave height	相关系数 correlation coefficient
1.3	$F=1.389H+4.073$	$R^2=0.996$
1.6	$F=1.359H+5.895$	$R^2=0.942$
1.8	$F=1.512H+3.574$	$R^2=0.973$
2.2	$F=1.669H-2.616$	$R^2=0.949$

注: F : 缆绳张力, H : 波高, 下同

Notes: F : maximal tension. H : wave height, the same below

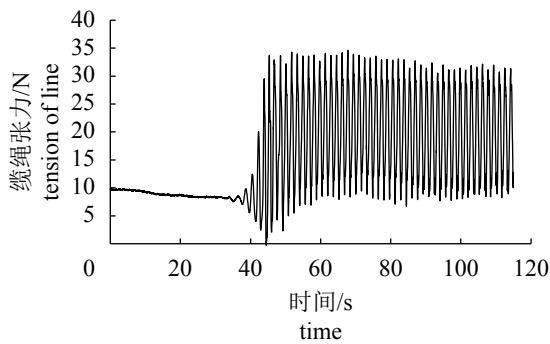


图 7 波流作用下No.1缆绳张力曲线

Fig. 7 Tension of No.1 anchor line to current and wave

网箱缆绳最大张力与波高呈线性关系。其原因可能是浮式网箱在波流作用下呈“漂移”状态,使No.1、No.2缆绳张紧,网箱后侧各个缆绳则受力较小;而沉式网箱在波流作用下漂移作用较小,波浪作用较大时No.4缆绳受力较大,水流作用较大时No.1、No.2缆绳受力较大。

本试验对于不同周期的试验工况较少,不

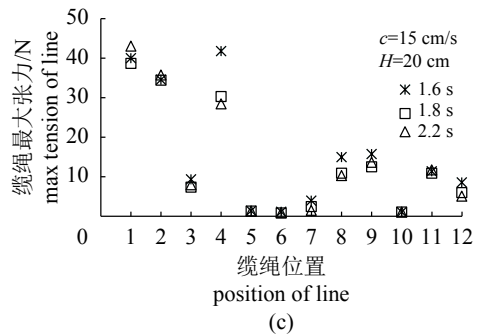
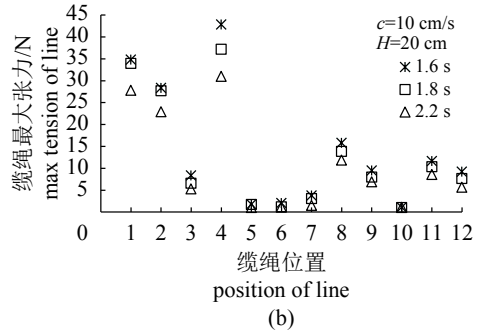
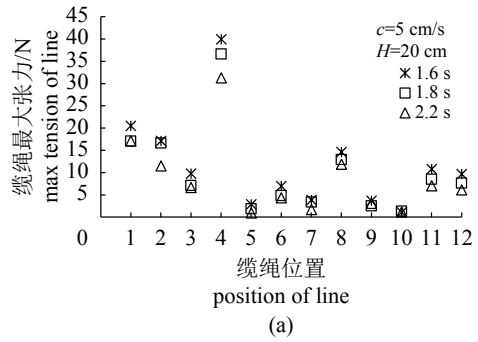


图 8 波高20 cm时, 3个流速下不同周期作用下各缆绳最大张力分布

Fig. 8 Maximal tension of different lines in 20 cm wave height with different wave periods and currents

表 5 流速10 cm/s时No.4缆绳最大张力与波高的关系

Tab. 5 Relationship between maximal tension of No.4 main line and wave height with 10 cm/s current

周期/s period	最大张力与波高关系 Relationship between tension and wave height	相关系数 correlation coefficient
1.6	$F=1.481H+9.398$	$R^2=0.972$
1.8	$F=1.516H+6.604$	$R^2=0.978$
2.2	$F=1.679H-0.431$	$R^2=0.997$

能将波浪和流速等参数同时与缆绳最大张力进行回归, 需要进一步研究。同时, 今后可以展开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。

表 6 周期为 1.8 s时No.1缆绳最大张力与波高的关系

Tab. 6 Relationship between maximal tension of No.1 main line and wave height with 1.8 s period

流速/(cm/s) flow velocity	最大张力与波高关系 relationship between tension and wave height	相关系数 correlation coefficient
5	$F=1.01H+0.0335$	$R^2=0.973$
10	$F=0.749H+16.714$	$R^2=0.861$
15	$F=0.551H+27.486$	$R^2=0.979$

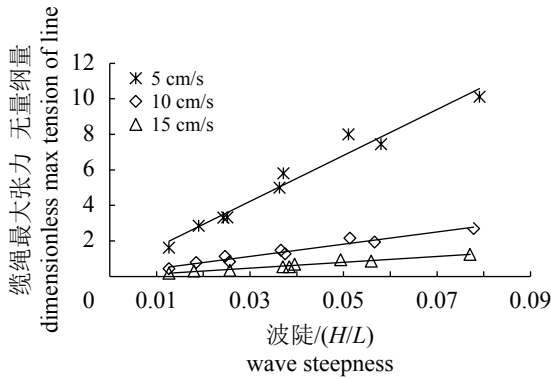


图 9 No.4缆绳最大张力无量纲量与波陡关系

Fig. 9 Relationship between the dimensionless maximal tension of No.4 main line and wave steepness

表 7 No.4缆绳最大张力无量纲量与波陡关系

Tab. 7 Relationship between the dimensionless maximal tension of No.4 main line and wave steepness

流速/(cm/s) flow velocity	缆绳最大张力与波陡关系 relationship between dimensionless maximal tension and wave steepness	相关系数 correlation coefficient
5	$F^*=129.51(H/L)+0.335$	$R^2=0.966$
10	$F^*=34.419(H/L)+0.100$	$R^2=0.954$
15	$F^*=16.645(H/L)-0.035$	$R^2=0.959$

注: F^* . 缆绳最大张力无量纲量; H/L . 波陡

Notes: F^* . dimensionless maximal tension; H/L . wave steepness

参考文献:

[1] 袁军亭, 周应祺. 深水网箱的分类及性能[J]. 上海水产大学学报, 2006, 15(3): 350-358.
Yuan J T, Zhou Y Q. Classification of offshore fish cages and their performances[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2006, 15(3): 350-358(in Chinese).

[2] Chen J X, Guang C T, Xu H, *et al.* Marine fish cage culture in China[M]//Lovatelli A, Philips M J, Arthur J R, *et al.* The future of mariculture: a regional approach for responsible Development in the Asia-Pacific region. Rome: FAO/NACA Regional Workshop, 2006: 285-293.

[3] 黄滨, 关长涛, 崔勇, 等. 国产HDPE升降式深水网箱下沉关键技术的研究[J]. 渔业科学进展, 2009, 30(5): 102-107.
Huang B, Guan C T, Cui Y, *et al.* Study on key techniques for submergence of HDPE submersible deep-sea cage[J]. *Marine Fisheries Research*, 2009, 30(5): 102-107(in Chinese).

[4] Xu T J, Dong G H, Li Y C, *et al.* Numerical study of a self-submersible single-point mooring gravity cage in combined wave-current flow[J]. *Applied Ocean Research*, 2014, 48: 66-79.

[5] Shainee M, DeCew J, Leira B J, *et al.* Numerical simulation of a self-submersible SPM cage system in regular waves with following currents[J]. *Aquacultural Engineering*, 2013, 54: 29-37.

[6] Fredriksson D W, DeCew J, Swift M R, *et al.* The design and analysis of a four-cage grid mooring for open ocean aquaculture[J]. *Aquacultural Engineering*, 2004, 32(1): 77-94.

[7] 桂福坤, 李玉成, 吴常文. 波浪条件下带底圈重力式网箱动力特性的试验研究[J]. 中国海洋平台, 2007, 22(4): 12-18.
Gui F K, Li Y C, Wu C W. Experimental study on the mooring line forces of gravity cage with bottom ring in waves[J]. *China Offshore Platform*, 2007, 22(4): 12-18(in Chinese).

[8] 黄六一, 梁振林, 万荣, 等. 波流作用下网格锚泊的单个重力式网箱缆绳张力[J]. 中国水产科学, 2011, 18(3): 636-645.
Huang L Y, Liang Z L, Wan R, *et al.* Tension of anchor lines of single gravity grid mooring cage under combining effects of wave and current[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2011, 18(3): 636-645(in Chinese).

[9] 杨新华, 高晓芳, 陈雷. 圆柱形沉浮式深海养殖网箱的受力分析[J]. 中国海洋大学学报, 2004, 34(6): 1081-1084.
Yang X H, Gao X F, Chen L. Analysis of forces on a columniform-lift offshore cage[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2004, 34(6): 1081-1084(in Chinese).

[10] 郑国富, 黄桂芳, 魏观渊, 等. 波流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(1): 84-89.
- Zheng G F, Huang G F, Wei G Y, *et al.* Study on the characters of tension in mooring lines of anti-stormy-wave cage with cylindrical net under the combined action of waves and currents[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2007, 31(1): 84-89(in Chinese).
- [11] 王新雷. 圆台型网箱在水流作用下水动力特性数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- Wang X L. Numerical simulation of the hydrodynamic behaviour of the truncated cone fishing cage in current[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010(in Chinese).
- [12] 黄小华, 郭根喜, 胡昱, 等. HDPE圆柱形网箱与圆台形网箱受力变形特性的比较[J]. *水产学报*, 2011, 35(1): 124-130.
- Huang X H, Guo G X, Hu Y, *et al.* Comparison on the forces and deformation between HDPE cylinder net-cage and truncated-cone net-cage in current[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(1): 124-130(in Chinese).
- [13] 李玉成, 桂福坤, 宋芳, 等. 漂浮状态下重力式及碟形网箱锚绳受力特性的比较[J]. *水产学报*, 2005, 29(4): 570-573.
- Li Y C, Gui F K, Song F, *et al.* Comparison on the force characteristics of mooring lines between gravity cage and sea station cage under floating condition[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2005, 29(4): 570-573(in Chinese).
- [14] 徐为兵, 朱克强, 张大朋, 等. 网格锚定单体碟形网箱的水动力特性研究[J]. *海洋科学*, 2015, 39(10): 68-72.
- Xu W B, Zhu K Q, Zhang D P, *et al.* Hydrodynamic characteristics of single grid mooring ocean spar sea station[J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(10): 68-72(in Chinese).
- [15] 赵云鹏, 陈小芳, 许条建, 等. 波浪作用下一种鲆鲽类方形网箱水动力特性数值模拟研究[J]. *中国水产科学*, 2012, 19(5): 889-899.
- Zhao Y P, Chen X F, Xu T J, *et al.* Numerical investigation of hydrodynamic properties of gravity cage for flatfish culture during exposure to wave action[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2012, 19(5): 889-899(in Chinese).
- [16] Kim T H, Yang K U, Hwang K S, *et al.* Automatic submerging and surfacing performances of model submersible fish cage system operated by air control[J]. *Aquacultural Engineering*, 2011, 45(2): 74-86.
- [17] Drach A, Tsukrov I, DeCew J, *et al.* Engineering procedures for design and analysis of submersible fish cages with copper netting for exposed marine environment[J]. *Aquacultural Engineering*, 2016, 70: 1-14.
- [18] Kim T, Lee J, Fredriksson D W, *et al.* Engineering analysis of a submersible abalone aquaculture cage system for deployment in exposed marine environments[J]. *Aquacultural Engineering*, 2014, 63: 72-88.
- [19] 郑琦. 不同下潜深度下网箱水动力特性试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- Zheng Q. Experimental study on hydrodynamic characteristics of net cage under different submergence depth[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017(in Chinese).
- [20] 周应祺. 渔具力学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 119-140.
- Zhou Y Q. Mechanics of fishing gear[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001: 119-140(in Chinese).
- [21] 袁春海. 乙丙无规共聚PPR管材料B4101性能分析及生产工艺优化[J]. *中外能源*, 2009, 14(7): 86-89.
- Yuan C H. Analysis of properties of PPR tubular material B4101 and optimization of production technologies[J]. *Sino-Global Energy*, 2009, 14(7): 86-89(in Chinese).
- [22] 林德芳, 关长涛, 黄文强, 等. 抗风浪网箱材料性能的研究[J]. *海洋水产研究*, 2004, 25(5): 57-60.
- Lin D F, Guan C T, Huang W Q, *et al.* Study on material performance of anti-wave cage[J]. *Marine Fisheries Research*, 2004, 25(5): 57-60(in Chinese).

Characters of lines tension of submerged circle gravity cage under effects of waves and currents

LIU Shengcong¹, HUANG Liuyi^{1*}, NI Yi¹, CHENG Hui¹, ZHAO Fenfang¹,
WANG Xinxin¹, LIANG Zhenlin^{1,2}, KINOSHITA Takeshi³

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

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

3. The University of Tokyo, Tokyo, Japan)

Abstract: In the paper, the characters of tension in the mooring lines of a single HDPE gravity cylindrical cage under water are studied by experimental tests. The prototype of cage has a perimeter of 40m and a net height of 10m. Based on the Dixon rule of gear tests, two scales are chosen for the experimental model, i.e. $\lambda=10$ and $\lambda_a=\lambda_d=2$. The horizontal projections of the front mooring lines are in the same direction of current or incident waves. Uniform current is produced in the whole basin at a velocity of 0 cm/s, 5 cm/s, 10 cm/s and 15 cm/s. Regular waves with a period within the range of 1.3 s to 2.2 s and a height varying from 10 cm to 30 cm are generated. Tensions in the mooring lines are measured. The following conclusions might be drawn from the analysis of measured data.(1) Under the actions of current only, the average tension in the front main cable is greater than that of other lines. Under the actions of waves only, the maximum tension in the rear side main cable is greater than that of other lines. The maximum tension is linearly related to the wave height. The maximum tension of the front main line decreases with the increase of the period.(2) Under the combined effects of waves and currents, the maximum tension in the front main line is greater than that of other lines under high flow velocity, low wave height and high wave period; the maximum tension in the rear side main line is greater than that of other lines under low flow velocity, high wave height and low wave period.(3) Under the combined effects of waves and currents, the maximum tension of each line increases with the increase of the wave height, the increase of the flow velocity, and the decrease of the wave period.

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

Corresponding author: HUANG Liuyi. E-mail: huangly@ouc.edu.cn

Funding projects: Key R&D Plan of Shandong Province(2016CYJS04A01-5, 2017CXGC0107); State Oceanic Administration Project (GHME2016YY02)