

新型浮式系泊系统靠泊动力响应分析

乐丛欢^{1,2}, 丁红岩^{1,2,3}

- (1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072;
3. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 以新型浮式系泊系统为研究对象, 通过 1:40 的模型试验首先分析无波浪作用下船舶排水量和船速等因素对浮体系泊系统靠泊动力响应的影响, 并将浮式系泊系统的靠泊试验结果与相同工况下刚性靠泊试验结果进行对比分析, 然后对典型海况(波高 2 m, 周期 6 s, 入射角 90°的波浪)作用下的新型浮式系泊系统进行靠泊分析, 得到其在不同靠泊速度下的动力响应。试验结果表明, 相对于刚性靠泊, 浮式靠泊的靠泊力小, 吸收的能量更大。船速和船舶排水量是影响靠泊动力响应的主要因素, 船速和排水量的增大将会大大增加护舷撞击力, 并使浮式系(靠)泊平台产生较大的位移。由于偏心的影响, 船艏首先系(靠)泊, 能量大部分被船艏靠泊平台所吸收, 船艉系(靠)泊平台吸能比例很小, 尤其当初始靠泊能量较小时, 两平台吸能差异更明显。随着船速和船舶排水量增大, 船艏和船艉靠泊的时间间隔越小, 两系(靠)泊平台位移及护舷撞击合力的差距也越小, 船艉系(靠)泊平台吸能比例逐渐增大。

关键词: 浮式系泊系统; 模型试验; 靠泊速度; 撞击力

中图分类号: P752

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2013)01-0051-07

Berthing Dynamic Response Analysis of New Floating Mooring System

Le Conghuan^{1,2}, Ding Hongyan^{1,2,3}

- (1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin 300072, China;
2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A series of berthing tests are conducted on a 1:40 scale model of the new floating mooring system in the non-wave-induced condition to analyze the influence of vessel's displacement and berthing velocity and other factors on the dynamic response of the new floating mooring system, and the test results of the new floating mooring are compared with the results of rigid berthing system in the same conditions, and further berthing analysis of the floating mooring system is done by the model tests in the wave with wave height of 2 m, wave period of 6 s and 90° incident angle to obtain the dynamic response of the floating mooring system with the different berthing velocities. The results show that the impact force is smaller and the absorption of energy is larger in floating berthing compared with those in rigid berthing. Berthing velocity and displacement of the vessel are the main factors of the berthing dynamic response, and the impact force on fenders and displacement of berthing and mooring platform will increase greatly with the increase of berthing velocity and displacement of the vessel. Owing to the uneven distribution of vessel mass, berthing takes place first at bow berthing and mooring platform, most of the energy is absorbed by the bow berthing and mooring platform while the stern berthing and mooring platform absorbs only a very small proportion of the berthing energy. Especially when the initial berthing energy is small, the differences of the two platforms in the energy absorption are more obvious. As the berthing velocity and displacement of the vessel increase, the time interval between the bow and stern berthing becomes smaller, the differences of platform displacement and impact force on fender between two berthing and mooring platforms become smaller, and energy-absorbing ratio of stern berthing

收稿日期: 2011-07-10; 修回日期: 2011-11-21.

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA051705); 国家国际科技合作专项资助项目(2012DFA70490); 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室开放基金资助项目.

作者简介: 乐丛欢(1983—), 女, 博士, leconghuan@163.com.

通讯作者: 乐丛欢, leconghuan@163.com.

and mooring platform gradually increase.

Keywords: floating mooring system; model test; berthing velocity; impact force

在海洋油气生产作业期间,由于平台储油能力有限,需要输油穿梭船定期将原油运输到港口. 对于一些中小型储油平台和对生产作业有较高稳性的浮式生产系统,出于安全角度考虑,油船不能直接停靠其上,需要提供辅助的系泊系统用于油船的定位输油作业. 系泊系统主要分为固定式和浮动式两种. 固定式系泊系统由打入海底的桩柱支撑,整体稳定性好,适用于水深较浅的海域,随着水深的增加,固定式系泊系统由于自重和建造成本的大幅增加而不再适用. 浮动式系泊系统由水浮力支撑,可多次移位、重复使用,适用于深水海域,但其整体稳定性较差,对地基及环境条件要求较高. 随着海洋开发的不断深入,呈现出多种新颖的系泊方式,并通过了理论和试验的验证.

本文研究的系泊系统是一种刚性与柔性相结合的新型浮式系泊系统,该浮式系泊系统具有建造成本低,施工简单、施工周期短的优势,适用于浅水开发.

1 新型浮式系泊系统

新型浮式系泊系统如图 1 所示. 该新型浮式系泊系统由中间 2 个独立的浮式系(靠)泊平台及两侧刚性系泊平台构成. 两侧的刚性平台主要是为了增强系泊的约束性,提高其定位效果. 位于中间的 2 个浮式系(靠)泊平台(见图 2)由上部结构、锚链和基础构成,其中上部结构包括水下浮筒以及带护舷的立柱,浮筒提供的恒定的净浮力使锚链处于受拉状态. 如图 3 所示,当船舶靠泊时,上部结构在浮力、锚链拉力和船体靠泊力的共同作用下,产生一定的侧移和下沉,并带动周围水体运动,新型浮式系泊系统通过浮式系(靠)平台的变位吸收大量能量,优化了受力模式,因而船舶与平台之间的相互作用力较小^[1-2].

浮动式系泊系统主要包括张紧式和悬链线式两种^[3-5],目前多采用悬链线式. 浮式系泊系统由于具有可浮动性,其受力复杂,关于浮式系泊的研究仍处于初步阶段^[6-8]. 新型浮式系泊系统涉及到船体及多浮体之间的耦合运动问题,系统的运动相对复杂. 船体靠泊时与浮式平台发生碰撞,两者之间的撞击力很难确定,并且由于浮体的运动速度是时变的,所以引起的惯性力、黏性力、附加质量也是时变的. 若再加上波浪的作用,整体、系统地分析将非常复杂. 本文

设计了比例尺为 1 : 40 的多组模型试验,对不同靠泊工况组合下浮式系泊系统的运动特性及动力响应进行定性定量的分析.

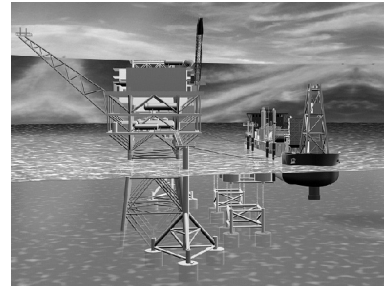


图 1 浮式系泊系统
Fig.1 Floating mooring system

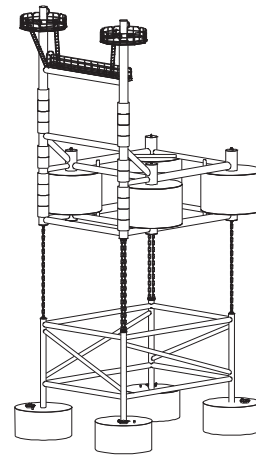


图 2 浮式系(靠)泊平台
Fig.2 Floating berthing and mooring platform

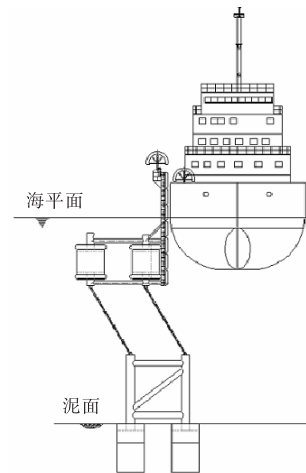


图 3 浮式系(靠)泊平台变位吸能
Fig.3 Floating berthing and mooring platform absorbing energy by changing positions

2 试验设计

2.1 试验模型

2.1.1 系(靠)泊平台模型

试验模型按重力和惯性力弗劳德相似定律 1 : 40 比例进行相似比尺设计^[9-10], 模型如图 4 所示, 具体尺寸见表 1. 以下表示中均采用“原型尺寸(模型尺寸)”形式.

2.1.2 护舷模拟

护舷原型为型号为 D400 × 400 × 1500 半圆型 D 型橡胶护舷. 模型设置高度与原型护舷高度几何相似, 受力点与原型护舷中心的受力点位置相同.

2.1.3 锚链模型

锚链模型采用基本无弹性的尼龙线与多级弹簧钢片的组合体模拟, 通过改变弹簧钢片的长度来模拟

原型的拉力-伸长关系曲线相似, 参数见表 1.

2.1.4 船舶模型

试验船舶为万吨级穿梭油轮船, 船型参数见表 2. 船舶模型采用木制船模, 与原型保持几何相似. 采用铅制砝码压载配重模拟船舶的压载和满载状态, 船舶模型通过仪器测试, 满足吃水、重量、重心位置、质量惯性矩和自振周期等与原型相似.



图 4 浮式系泊系统模型

Fig.4 Model of floating mooring system

表 1 浮式系泊系统模型尺寸

Tab.1 Main characteristic parameters of floating mooring system

| 系(靠)泊平台 | | | | | | 锚链 | |
|----------------|--------------|---------------|----------------------|---------------|---------------|-------------|----------------------------|
| 浮筒直径/m | 浮筒高度/m | 中轴线间距/m | 浮筒截面积/m ² | 结构总高度/m | 筒顶与甲板的距离/m | 直径/mm | 质量/(kg · m ⁻¹) |
| 6.5 (0.163) | 4 (0.100) | 12 (0.300) | 33.2 (0.021) | 22 (0.550) | 15 (0.375) | 84 (2.1) | 155 (0.097) |

表 2 试验船型主要尺寸参数

Tab.2 Main characteristics of vessel

| 船况 | 船长/m | 型宽/m | 型深/m | 排水量/t | 吃水/m | 重心位置/m | 横摇惯量/(kg · m · s ²) | 纵摇惯量/(kg · m · s ²) | 横摇周期/s |
|----|-----------------|----------------|----------------|-------------------|-----------------|--|---------------------------------|---------------------------------|----------------|
| 满载 | 148.8 (3.72) | 18.4 (0.46) | 12.9 (0.32) | 12 500 (0.195) | 6.30 (0.16) | (71.5, 9.20, 4.89) (1.79, 0.23, 0.12) | 4.61 × 10 ⁷ (18) | 1.40 × 10 ⁹ (545) | 8.80 (1.39) |
| 压载 | 148.8 (3.72) | 18.4 (0.46) | 12.9 (0.32) | 5 000 (0.078) | 3.00 (0.075) | (71.9, 9.20, 5.59) (1.80, 0.23, 0.14) | 1.97 × 10 ⁷ (8) | 4.69 × 10 ⁸ (183) | 7.84 (1.24) |

2.2 试验仪器设备

试验水池: 长 40 m, 宽 11 m, 深 1 m. 试验水池设有造波机和消波装置.

测量设备: 电容式波高仪、加速度传感器、位移传感器、力传感器、摄像系统、波浪率定系统、水温计以及相应的信号放大器和信息采集系统.

2.3 仪器布置

如图 5 所示, 船舶系(靠)泊平台(平台 A)和船艏系(靠)泊平台(平台 B)的靠船柱顶端各布置 1 个 3 自由度的加速度传感器, 用于测量在船舶撞击作用下系(靠)泊平台的横荡、纵荡、垂荡 3 个运动方向上的加速度. 同时在 2 个平台上分别布置位移传感器, 测量平台位移变化. 在每个锚链与筒形基础的连接处安装 1 个拉力传感器, 测量锚链张力.

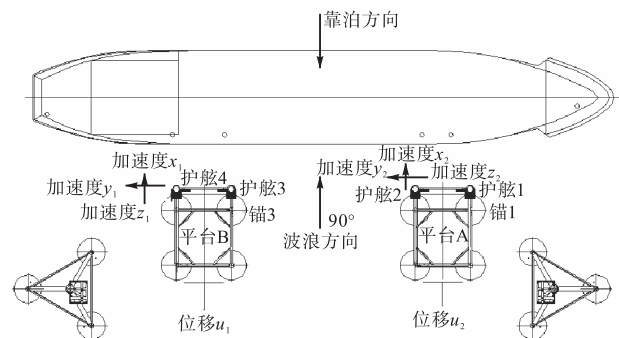


图 5 传感器布置

Fig.5 Arrangement of instrumentation

2.4 测试组合方案

在净浮力 (300 t/4.69 kg) 及水深 (25 m/0.625 m) 一定的情况下, 进行包括无波浪情况下及波浪(波向

角 90°)作用下靠泊试验,主要考虑船速、排水量和波浪等参数的影响,试验组合见表 3;表 4 为无波浪刚性系(靠)泊(平台 A 和平台 B 固定)试验组合,用于对比浮式靠泊效果。

表 3 浮式靠泊试验组合

Tab.3 Test combinations of floating berthing

| 组合 | 波浪 | 排水量/t | 船速/kn |
|----|---|----------------|-------------|
| 1 | 无 | 5 000 (0.078) | 0.4 (0.063) |
| 2 | 无 | 5 000 (0.078) | 0.7 (0.009) |
| 3 | 无 | 5 000 (0.078) | 1.0 (0.005) |
| 4 | 无 | 12 500 (0.195) | 0.4 (0.063) |
| 5 | 无 | 12 500 (0.195) | 0.7 (0.009) |
| 6 | 无 | 12 500 (0.195) | 1.0 (0.005) |
| 7 | 规则波 $H=2\text{ m}, T=6\text{ s}$ ($H=5\text{ cm}, T=0.949\text{ s}$) | 12 500 (0.195) | 0.4 (0.063) |
| 8 | 规则波 $H=2\text{ m}, T=6\text{ s}$ ($H=5\text{ cm}, T=0.949\text{ s}$) | 12 500 (0.195) | 0.7 (0.009) |
| 9 | 规则波 $H=2\text{ m}, T=6\text{ s}$ ($H=5\text{ cm}, T=0.949\text{ s}$) | 12 500 (0.195) | 1.0 (0.005) |
| 10 | 随机波 $H_s=2\text{ m}, T_p=6\text{ s}$ ($H_s=5\text{ cm}, T_p=0.949\text{ s}$) | 12 500 (0.195) | 0.4 (0.063) |
| 11 | 随机波 $H_s=2\text{ m}, T_p=6\text{ s}$ ($H_s=5\text{ cm}, T_p=0.949\text{ s}$) | 12 500 (0.195) | 0.7 (0.009) |
| 12 | 随机波 $H_s=2\text{ m}, T_p=6\text{ s}$ ($H_s=5\text{ cm}, T_p=0.949\text{ s}$) | 12 500 (0.195) | 1.0 (0.005) |

注: H 为规则波波高, T 为规则波周期, 随机波采用 JONSWAP 波谱; H_s 为随机波有义波高, T_p 为随机波谱峰周期。

表 4 刚性靠泊试验组合

Tab.4 Test combinations for rigid berthing

| 组合 | 波浪 | 排水量/t | 船速/kn |
|----|----|----------------|-------------|
| 13 | 无 | 5 000 (0.078) | 0.7 (0.009) |
| 14 | 无 | 5 000 (0.078) | 1.0 (0.005) |
| 15 | 无 | 12 500 (0.195) | 0.7 (0.009) |
| 16 | 无 | 12 500 (0.195) | 1.0 (0.005) |

3 试验结果与分析

试验中得到了大量的数据,通过快速傅里叶变换对原始数据进行滤波分析.由于篇幅限制,文中只给出部分试验结果。

3.1 无波浪情况下靠泊分析

图 6 和图 7 分别为无波浪试验组合下,平台 A 和平台 B 位移时程曲线.对比图 6 和图 7 平台位移时程曲线可以发现船舶首先靠泊,船艏稍后靠泊,这主要是由于船舶在没有动力驱使下,由于偏心的存在(船舶重心偏向于船艏),无法实现平靠.由于船舶首先靠泊,船舶靠泊能量大部分在船艏靠泊时被平台 A 和周围水体吸收,平台 A 的位移都远大于平台 B;尤其当船速和排水量较小时,初始靠泊能量较小,平台 A 和平台 B 位移差距更明显.从图 7 可以进一步发

现,船舶压载情况下,以 0.4 kn 的速度低速靠泊时,由于初始靠泊能量较小,船艏并未与平台 B 发生碰撞,这与试验观测结果一致.随着船速和排水量的加大,船舶和船艏靠泊的时间间隔越小,平台 A 和平台 B 位移的差距也越小,平台 B 吸能比例逐渐增大。

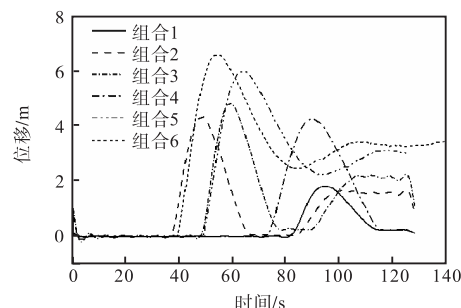


图 6 平台 A 位移时程曲线

Fig.6 Displacement-time curves of platform A

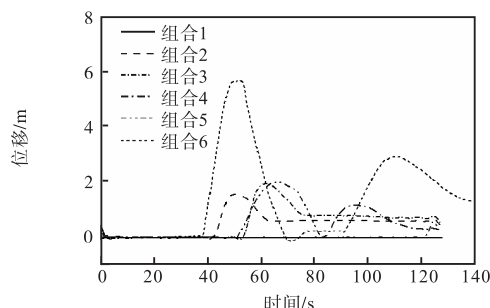


图 7 平台 B 位移时程曲线

Fig.7 Displacement-time curves of platform B

图 8 和图 9 分别为无波浪试验组合下,平台 A 和平台 B 最大位移曲线.从图 8 和图 9 可知船速和排水量对于平台位移影响很大,压载靠泊时,船速从 0.4 kn 增至 1.0 kn,系(靠)泊平台的平均位移(平台 A 和平台 B 位移平均值)由 0.92 m 增至 3.40 m,增幅达 269.3%,其中平台 A 最大位移达到 4.85 m.与压载相比,满载靠泊将引起平台 A 和平台 B 的更大范围的运动.满载靠泊时,船速从 0.4 kn 增至 1.0 kn,系(靠)泊平台的平均位移由 2.73 m 增至 6.19 m,增幅达 126.5%,其中平台 A 最大位移达到 6.63 m。

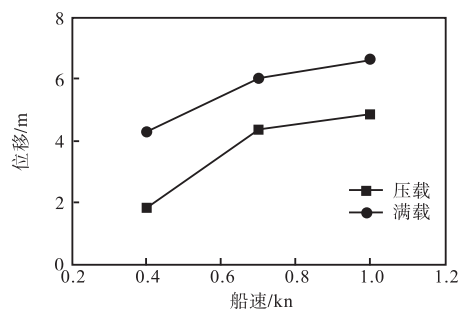


图 8 平台 A 的最大位移

Fig.8 Maximum displacement of platform A

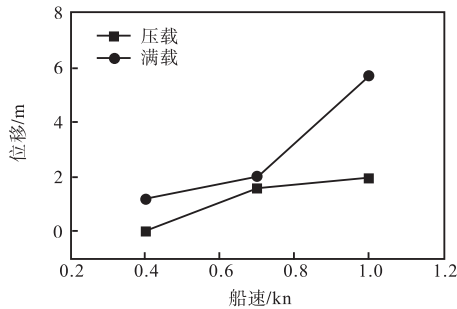


图9 平台B的最大位移

Fig.9 Maximum displacement of platform B

图 10 和图 11 分别为无波浪试验组合下, 护舷 1 (位于平台 A)、护舷 4 (位于平台 B) 撞击力时程曲线. 从图 10 和图 11 可以发现, 撞击力的试验结果与平台位移结果吻合, 与船艏发生碰撞的护舷 1 撞击力远大于与船艉发生碰撞的护舷 4. 船速和排水量对于护舷撞击力的影响很大, 满载情况下船速从 0.4 kn 增加到 1.0 kn, 护舷 1 的最大撞击力从 166.5 kN 增长到 232.7 kN, 涨幅达 39.8%; 护舷 4 的最大撞击力从 52.7 kN 增长到 98.9 kN, 涨幅达 87.7%. 排水量从 5 000 t 增加到 12 000 t, 1.0 kn 船速下, 护舷 1 的撞击力从 177.6 kN 增长到 232.7 kN, 涨幅达 31.0%; 护舷 4 的最大撞击力从 49.0 kN 增长到 98.9 kN, 涨幅达 101.8%. 从撞击力的角度也可知, 船艉系(靠)泊平台 B 吸能比例随船速和排水量的增大而逐渐增大. 由于船艏首先靠泊, 所以船舶第 1 次靠泊时间可以认为是船舶与护舷 1 的撞击时间. 从护舷 1 的撞击力时程曲线计算出的撞击时间可知, 靠泊时间主要由船速决定: 船速越大, 撞击时间越短; 其中船速为 1.0 kn 时, 组合 3 和组合 6 的撞击时间大约为 16.2 s; 当船速为 0.4 kn 时, 组合 1 和组合 4 的撞击时间约为 30.5 s.

表 5 给出了浮式系(靠)泊平台与刚性系(靠)泊平台护舷处最大撞击力结果. 与刚性靠泊相比, 浮式靠泊可以有效减小靠泊时的最大撞击力, 其中平台 A 护舷撞击合力降低比例达到 45%以上, 平台 B 护舷撞击合力降低比例达到 80%以上. 结果显示当其他条件一定时, 船速越大, 撞击力降低比例越大. 从护舷最大撞击力来看, 满载情况下船速在 1.0 kn 以内, 刚性靠泊时可能出现的最大护舷撞击力达到 2 458.2 kN, 而浮式靠泊时可能出现的最大护舷撞击力为 578.7 kN, 仅为刚性靠泊护舷撞击力的 30.13%.

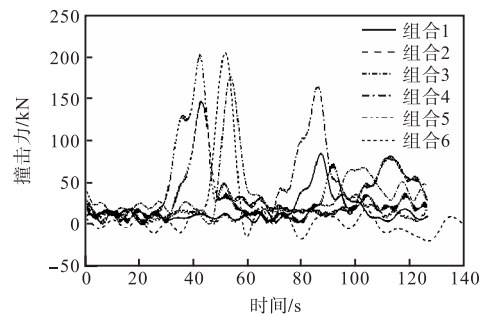


图 10 护舷 1 撞击力时程曲线

Fig.10 Impact force-time curves of fender 1

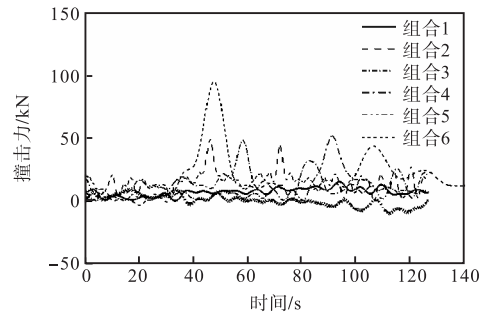


图 11 护舷 4 撞击力时程曲线

Fig.11 Impact force-time curves of fender 4

表 5 浮式靠泊与刚性靠泊最大撞击力对比

Tab.5 Comparisons of the maximum impact force between floating berthing and rigid berthing

| 船速/ kn | 排水量/ t | 平台 A | | | | | 平台 B | | | | |
|-----------|-----------|---------------|-------|---------------|-------|--------------|---------------|-------|---------------|-------|-------------|
| | | 护舷 1 最大撞击力/kN | | 护舷 2 最大撞击力/kN | | 合力降低比 例/% | 护舷 3 最大撞击力/kN | | 护舷 4 最大撞击力/kN | | 合力降低 比例% |
| | | 刚性 | 浮式 | 刚性 | 浮式 | | 刚性 | 浮式 | 刚性 | 浮式 | |
| 0.7 | 5 000 | 1 189.7 | 149.5 | 14.1 | 499.5 | 46.09 | 19.4 | 42.5 | 840.9 | 49.76 | 89.28 |
| 1.0 | 5 000 | 1 653.6 | 177.7 | 18.2 | 502.7 | 59.30 | 145.4 | 48.6 | 864.5 | 49.03 | 90.33 |
| 0.7 | 12 500 | 1 461.4 | 204.5 | 28.2 | 540.4 | 49.99 | 26.7 | 199.3 | 1 086.9 | 10.74 | 81.14 |
| 1.0 | 12 500 | 1 677.2 | 232.7 | 24.2 | 578.7 | 52.31 | 864.7 | 334.1 | 2 458.2 | 98.90 | 86.97 |

3.2 波浪下靠泊分析

波浪的要素很多, 包括波高、周期、波向等, 波浪影响系泊系统的响应很复杂, 限于篇幅本文只初步对渤海典型海况波浪下靠泊(波高 2 m, 周期 6 s)与无波浪靠泊进行对比, 今后将会对波浪因素进行专门的论述. 图 12 和图 13 分别为规则波试验组合下, 平台 A 和

平台 B 位移时程曲线. 对比图 12 和图 13 可以发现, 在逆浪的作用下, 仍然是船艏首先靠泊. 船艉后靠泊. 与无波浪工况不同的是, 满载情况下, 当船速为 0.4 kn 时, 船艉无法与平台 B 发生碰撞. 这主要是由于波浪作用方向与船舶靠泊方向相反, 波浪阻力消耗了一部分初始靠泊能量. 船舶靠上台后, 受到护舷提供的

撞击反力和波浪力的作用下,随后与平台发生分离,平台在锚链的拉力作用下,逐渐恢复到平衡位置,随后在波浪力的作用下,船舶与系(靠)泊平台将发生二次碰撞,此时平台位移和撞击力都比第 1 次要小。

表 6 给出了无波浪及波浪(规则波($H=2\text{ m}$, $T=6\text{ s}$),随机波($H_s=2\text{ m}$, $T_p=6\text{ s}$))工况下浮式靠泊时各参数极值情况.从表 6 可知,与无波浪作用规律相似,在规则波和随机波作用下,当其他要素一定时,船速越大,系(靠)泊平台位移越大,这意味着更多的撞击能量通过系(靠)泊平台的变位方式被吸收.与无波浪工况对比发现,在波浪作用下,平台的各向加速度均得到不同程度的放大,随机波作用下系(靠)泊平台的靠泊动力响应明显大于相同波高和周期的规则波作用下的动力响应.当船速较小时,由于波浪力方向与靠泊方向相反,波浪力的作用使得平台 A 和平台 B 位移小于同条件下无波浪靠泊状态.随着船速的增大,波浪引起的水的阻尼对船艏的速度影响有减弱的趋势,这和无波浪靠泊时的趋势是一致的.当船速为 1.0 kn 时,无波浪下船舶系(靠)泊平台位移为 6.625 0m,相同条件下的规则波下船舶系(靠)泊平台的位移为 7.084 8 m,随机波下船舶系(靠)泊平台的位移达到了 7.793 3 m;可见,波浪作用下船舶满载靠泊时,由于波浪力的作用,系(靠)泊平台可能发生更大的位移,以吸收波浪作用到船舶上产生的能量,而

随机波作用下船舶将引起更大的平台位移;同时在波浪作用下满载靠泊时,船速不宜大于 1.0 kn.

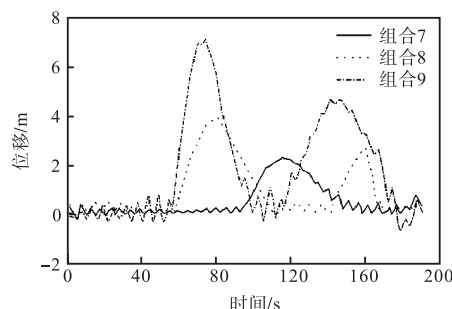


图 12 规则波作用下船舶系(靠)泊平台位移时程曲线
Fig.12 Displacement-time curves of bow berthing and mooring platform in the regular wave

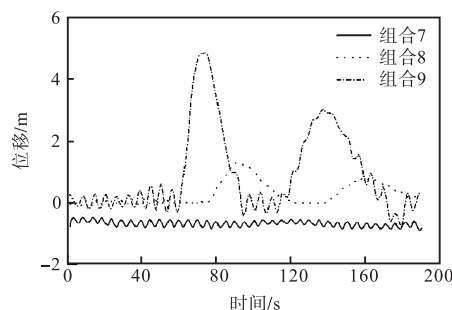


图 13 规则波作用下船舶系(靠)泊平台位移时程曲线
Fig.13 Displacement-time curves of stern berthing and mooring platform in the regular wave

表 6 无波浪及波浪(规则波、随机波)工况下靠泊动力响应(满载)

Tab.6 Berthing dynamic response in the no wave, regular wave and irregular wave (full load) conditions

| 工 况 | | x 向最大加速度 | | y 向最大加速度 | | z 向最大加速度 | | 位移/m | |
|---|--------|----------|---------|----------|----------|----------|---------|---------|----------|
| | | 平台 A | 平台 B | 平台 A | 平台 B | 平台 A | 平台 B | 平台 A | 平台 B |
| 无波浪 | 0.4 kn | 0.017 g | 0.012 g | 0.002 g | 0.010 g | 0.004 g | 0.005 g | 4.276 3 | 1.186 8 |
| | 0.7 kn | 0.004 g | 0.022 g | 0.004 g | 0.006 g | 0.001 g | 0.002 g | 6.080 1 | 2.070 8 |
| | 1.0 kn | 0.094 g | 0.063 g | 0.006 g | 0.026 g | 0.005 g | 0.015 g | 6.625 0 | 5.747 6 |
| 规则波 ($H=2\text{ m}$, $T=6\text{ s}$) | 0.4 kn | 0.037 g | 0.027 g | 0.013 g | -0.007 g | 0.003 g | 0.010 g | 2.371 9 | -0.314 1 |
| | 0.7 kn | 0.053 g | 0.070 g | 0.037 g | 0.016 g | 0.001 g | 0.018 g | 4.101 0 | 1.329 3 |
| | 1.0 kn | 0.109 g | 0.102 g | 0.078 g | 0.049 g | 0.001 g | 0.011 g | 7.084 8 | 4.884 6 |
| 随机波 ($H_s=2\text{ m}$, $T_p=6\text{ s}$) | 0.4 kn | 0.084 g | 0.040 g | 0.049 g | -0.010 g | 0.011 g | 0.015 g | 2.846 3 | -0.345 5 |
| | 0.7 kn | 0.079 g | 0.162 g | 0.034 g | 0.037 g | 0.001 g | 0.042 g | 5.126 3 | 1.435 6 |
| | 1.0 kn | 0.260 g | 0.119 g | 0.310 g | 0.069 g | 0.004 g | 0.015 g | 7.793 3 | 5.128 8 |

4 结 论

(1) 相对于刚性靠泊,浮式靠泊的靠泊力小,吸能大.浮式系泊系统具备了传统刚性系泊系统所不具备的吸能缓冲作用,靠泊安全性提高.

(2) 船速是影响靠泊动力响应的主要因素之一.船速越大,撞击时间越短,护舷处撞击力越大,同

时平台的位移越大;对于本系泊系统,船舶满载的情况下,船速不宜大于 1.0 kn,当船速大于 1.0 kn,护舷最大撞击力将超过护舷设计反力,同时浮式平台位移过大,靠泊安全性能得不到保障.

(3) 船舶排水量对于该浮式系泊系统的靠泊动力响应影响较大.排水量越大,护舷处撞击力越大,同时浮式系(靠)泊平台的位移越大.

(4) 由于船体结构重心偏向船艏,船舶首先靠

泊, 靠泊能量大部分被船艏系(靠)泊平台所吸收, 船艏系(靠)泊平台的位移和护舷撞击力都远远大于船艉系(靠)泊平台. 尤其当撞击能量较小时, 这种差异越明显. 随着船速和船舶排水量的加大, 船艏和船艉靠泊的时间间隔越小, 船艏系(靠)泊平台和船艉系(靠)泊平台上护舷撞击合力及位移的差距也越小. 所以当初始靠泊能量较小时, 船艉系(靠)泊平台的吸能比例小. 随着初始靠泊能量增大, 船艉系(靠)泊平台吸能比例逐渐增大.

(5) 与无波浪工况对比发现, 在波浪作用下, 平台的各向加速度均得到不同程度的放大. 随机波作用下系(靠)平台的靠泊动力响应明显大于相同波高和周期的规则波作用下的动力响应.

参考文献:

- [1] 蒋致禹, 顾敏童, 谢仲安, 等. 基于非线性数值模拟的工程船靠泊响应研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(9): 181-184.
Jiang Zhiyu, Gu Mintong, Xie Zhongan, et al. Responses of engineering ships during berthing based on nonlinear numerical simulations[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(9): 181-184(in Chinese).
- [2] Jiang Zhiyu, Xie Zhongan, Gu Mintong. Analysis of mechanics during berthing of engineering ships[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2010, 14(12): 1394-1404.
- [3] 童波, 杨建民, 李欣. 深水半潜式平台系泊系统动力特性研究[J]. 海洋工程, 2009, 27(1): 1-7.
Tong Bo, Yang Jianmin, Li Xin. Comparison and analysis of dynamic effect for mooring system of semi-submerged platform in deep water[J]. *The Ocean Engineering*, 2009, 27(1): 1-7(in Chinese).
- [4] 唐友刚, 张素侠, 张若瑜, 等. 深海系泊系统动力特性研究进展[J]. 海洋工程, 2008, 26(1): 120-126.
Tang Yougang, Zhang Suxia, Zhang Ruoyu, et al. Advance of study on dynamic characters of mooring systems in deep water[J]. *The Ocean Engineering*, 2008, 26(1): 120-126(in Chinese).
- [5] 王建超, 贡金鑫. 柔性系靠泊结构系缆力计算[J]. 水利水运工程学报, 2010(2): 107-113.
Wang Jianchao, Gong Jinxin. Mooring force calculation of flexible berthed structures[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2010(2): 107-113(in Chinese).
- [6] Johanning L, Smith G H, Wolfram J. Measurements of static and dynamic mooring line damping and their importance for floating WEC devices[J]. *Ocean Engineering*, 2007, 34(14/15): 1918-1934.
- [7] Agarwal A K, Jain A K. Dynamic behavior of offshore spar platforms under regular sea waves[J]. *Ocean Engineering*, 2003, 30(4): 487-516.
- [8] Ji Chunyan, Yuan Zhiming, Chen Minglu. Study on a new mooring system integrating catenary with taut mooring[J]. *China Ocean Engineering*, 2011, 25(3): 427-440.
- [9] 丁红岩, 王高峰, 刘建辉. 多筒基础平台自浮拖航系拖点位置试验分析[J]. 天津大学学报, 2007, 40(5): 548-553.
Ding Hongyan, Wang Gaofeng, Liu Jianhui. Analysis of towing points in towing multi-bucket foundation platform[J]. *Journal of Tianjin University*, 2007, 40(5): 548-553(in Chinese).
- [10] 中华人民共和国交通部. JTJ/T 234—2001 波浪模型试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
Ministry of Communications of the People's Republic of China. JTJ/T 234—2001 Wave Model Test Regulation[S]. Beijing: China Communications Press, 2002(in Chinese).