

文章编号 : 1005-9865 (2005) 03-0001-06

水深对超大型 FPSO 波浪载荷响应影响试验研究

谢永和^{1,2}, 李润培¹, 杨建民¹, 许劲松¹

(1. 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200030; 2. 浙江海洋学院 工程学院, 浙江 舟山 316004)

摘 要: 随着超大型浮式生产储卸油装置 FPSO (floating production storing and offloading) 在渤海浅水海域的广泛应用, 水深对 FPSO 波浪载荷响应的影响问题突现出来。对缩尺比为 1:100 的三模块分节模型进行了水深对超大型 FPSO 波浪载荷响应影响的试验研究, 试验结果表明水深对 FPSO 波浪诱导载荷的影响很大。

关键词: 模型试验; 超大型 FPSO; 波浪诱导载荷; 浅水海域

中图分类号: P751

文献标识码: A

Experimental study on the effects of water depth on wave-induced loads response of a very large FPSO

XIE Yong-he^{1,2}, LI Run-pei¹, YANG Jian-min¹, XU Jin-Song¹

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 2. Engineering College of Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316004, China)

Abstract: With the wide use of very large FPSO in the shallow water area of Bohai Bay, a new subject concerning the effects of water depth on wave-induced loads response of FPSO appears. In the present paper, a 3-module model experiment with scale 1:100 is described, and the effects of water depth on wave-induced loads response of a very large FPSO are studied. The experimental result shows that the water depth has a substantial effect on wave-induced loads.

Key words: model test; very large FPSO; wave-induced loads; shallow water area

近年来, FPSO 在海上油气开发中得到了越来越广泛的应用。大多数在渤海海域服役的 FPSO 工作在浅水海域。主尺度大与水深吃水比小, 直接导致其船体水动力特性与深水条件下的水动力特性有较大区别。因此, 对超大型 FPSO 在浅水中的波浪诱导载荷响应进行试验研究十分必要, 通过试验研究可为浅水超大型 FPSO 系泊系统设计、船体疲劳寿命计算以及运动安全性评估等提供更加科学的依据^[1~10]。

本文所进行的试验在于研究 FPSO 在特定海况下波浪诱导载荷响应随水深变化的规律。尽管船舶波浪载荷的模型试验方法经过了多年发展已相对成熟, 但对于有限水深船舶波浪诱导载荷的试验研究方面开展得不多, 国外也较少见到相关发表的文章。

因此如何在模型试验中模拟实际海况, 研究船舶可能遭受的波浪诱导载荷响应, 并探讨其随水深变化规律是本试验研究的主要目的。

1 浅水超大型 FPSO 试验模型

为了使实验结果能反映实际结构物在波浪中动力响应规律, 模型和实际结构之间需要满足几何相似、水

收稿日期: 2004-12-09

基金项目: 国家 863 计划重大专项资助项目 (2002AA602011)

作者简介: 谢永和 (1967 -), 男, 浙江舟山人, 副教授, 博士研究生, 主要从事船舶与海洋工程结构力学研究。

动力相似以及结构相似条件。

1.1 几何相似条件

几何相似条件即模型和实船之间的结构几何形状、波长和波高等的相似条件：

= \frac{L_p}{L_m} \tag{1}

1.2 水动力相似条件

水动力相似条件即模型和实船之间的 Froude 数及 Strouhal 数相同：

F_n = \frac{V_m}{\sqrt{gL_m}} = \frac{V_p}{\sqrt{gL_p}}, \quad S_t = \frac{V_p T_p}{L_p} = \frac{V_m T_m}{L_m} \tag{2}

从方程(1)、(2)可以得到：

\frac{V_p}{V_m} = \frac{T_p}{T_m} = \frac{1}{2}, \quad \frac{f_p}{f_m} = \frac{1}{2} \tag{3}

式中：为模型缩尺比， V 、 L 、 T 分别表示结构物运动速度、特征长度和运动周期， f 为运动频率。

1.3 结构相似条件

对于实型和模型来说，它们对应点的应变相似：

\frac{M_p y_p}{E_p I_p} = \frac{M_m y_m}{E_m I_m}, \quad \frac{E_p I_p}{E_m I_m} = \frac{F_p L_p^2}{F_m L_m^2} = \frac{L_p^5}{L_m^5} = 5 \tag{4}

式中： M 、 EI 、 y 分别为垂向弯曲弯矩、弯曲刚度和某一点(考察该处的位移、应变)至结构中心线的垂直距离， F 为作用在实际结构和模型上的流体外力。注脚 p 和 m 分别代表实船和模型。

模型木质，船模和实船的主要尺度见表 1。

表 1 船模和实船的主要尺度

Tab. 1 Principal characteristics of the test model		
主尺度	模 型	实 船
两柱间长 L_{PP}/m	2.81	281
水线长 L_{OA}/m	2.88	288
型宽 B/m	0.65	65
型深 D/m	0.294	29.4
设计吃水 T/m	0.222	22.20
重心纵坐标 x_g/m	- 0.017 7	- 1.77
重心垂坐标 y_g/m	0.112 1	11.21
排水量 /kg	376.33	376.33 $\times 10^6$
横摇惯性半径/m	0.178 3	17.83
纵摇惯性半径/m	0.698 1	69.81
艏摇惯性半径/m	0.717 8	71.78

在船舳处和距船艏 1/4 船长处将模型剖切为三段，模块之间各有 0.01 m 的间隙，用强力胶将一薄层橡胶带粘贴在船体外表面，以阻止水流进入模型两部分之间的间隙，同时确保前后两部分模型过渡流畅，试验模型见图 1。模块间用铝制试验棒连接，铝棒的弯曲刚度与实船的弯曲刚度相似，铝棒上粘贴测量波浪诱导垂直弯矩和剪力的应变片，并各自组成一个惠斯通电桥，这种布局有利于进行温度和湿度补偿，以及消除横、纵向载荷对垂向弯矩和剪力的影响，应变片的粘贴方式见图 2。模型两端用两根刚度很低的弹簧系泊，以限制模型的漂移。超大型 FPSO 在水池中的模型试验见图 3。

2 试验标定

将船模静置于试验水池中，先在船舳放置若干块重量成对的砝码。每次移动等重量的砝码各 1 块(2、3、2、3、2 kg)至距离船舳为 d (标定时距离设定为 1 m)的 A 、 B 部位，记录应变仪的读数。通过测量的 m 组数据绘制成 M_y 、 N_z 的标定曲线，应变片的标定方法与标定曲线见图 4、5。试验中，中垂状态的弯矩和剪力设定为正值，中拱状态弯矩和剪力设定为负值，弯矩和剪力的正方向如图 4 所示。在试验件安装前进行预标定，最大标定弯矩为 17.5 kgm，最大标定剪力为 35 kg，载荷和应变仪读数之间处于严格的线性关系，确保了应变片正式标定的有效性。

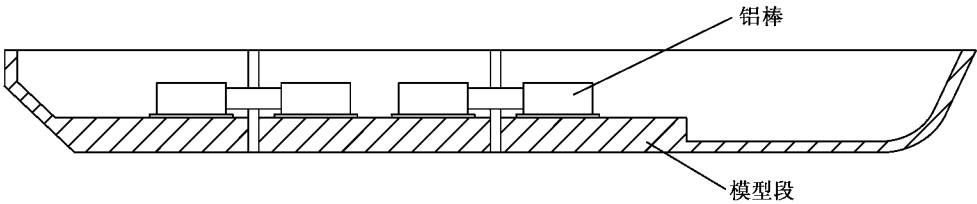


图 1 试验模型

Fig. 1 Experiment model

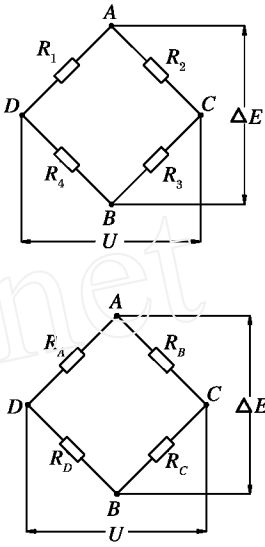
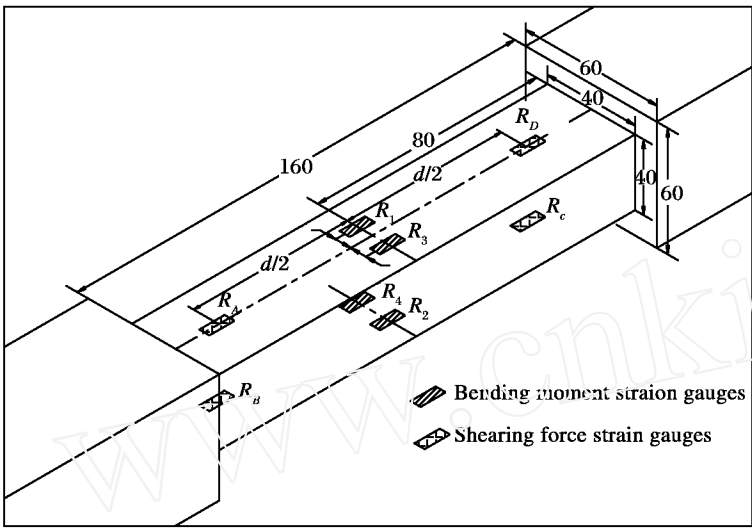


图 2 应变片的布局

Fig. 2 The arrangement of strain gauges

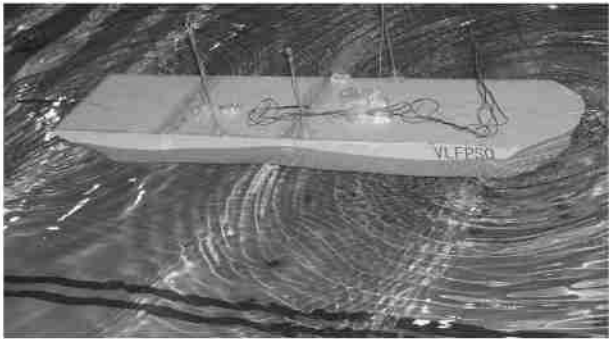


图 3 超大型 FPSO 模型试验 (浪向角 180°)

Fig. 3 Model experiment of a very large FPSO (wave angle 180°)

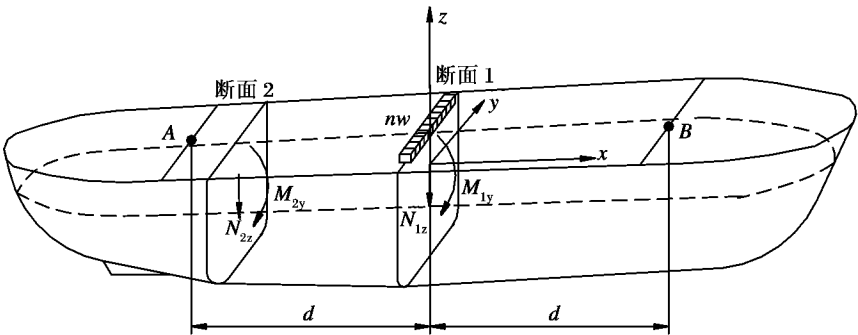


图 4 应变片的标定

Fig. 4 The calibration of strain gauges

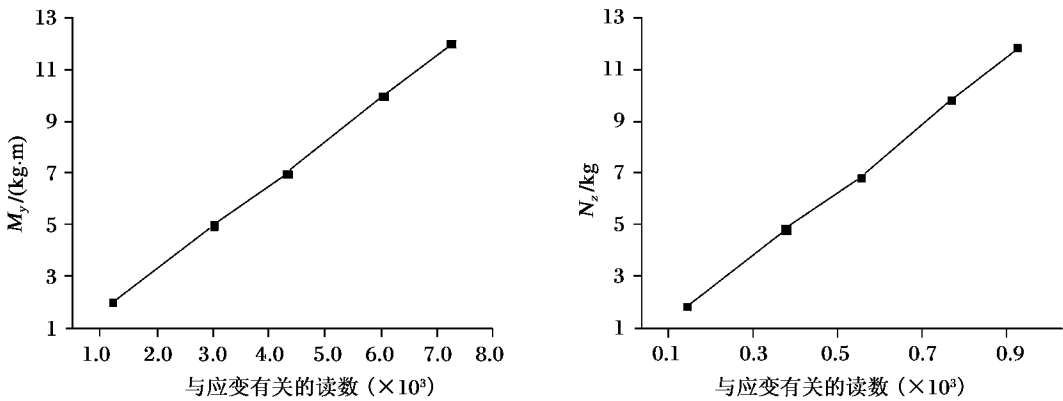


图 5 标定曲线
Fig. 5 Calibration curve

3 试验工况

试验是在上海交通大学海洋工程水池中进行。水池长 50 m、宽 30 m、水深 6 m；双推板大功率液压造波机,可产生规则或不规则的长峰波,最大波高可达 0.5 m；消波装置安装在造波机对岸,具有良好的消波性能；所有试验数据由自动采集及实时分析系统进行处理；水池设有大面积假底,水深可在 0~5 m 范围内调节,便于进行变水深的试验研究。

试验内容包括两部分,分别是在规则波和不规则波上进行浅水超大型 FPSO 波浪诱导载荷响应随水深变化规律的试验研究。试验工况组合见表 2。

表 2 试验工况
Tab. 2 Experimental cases

规则波	水深/cm	25.75, 33.0, 66.0, 200.0
	波浪周期/s	3.14, 2.51, 2.09, 1.79, 1.57, 1.40, 1.26, 1.05, 0.79, 0.63, 0.52, 0.45, 0.39
	浪向角/(°)	180
不规则波	水深/cm	25.75, 33.0, 44.0, 66.0, 100.0, 200.0
	浪向角/(°)	135, 180
	波谱	双参数 PM 谱

4 试验结果及分析

4.1 不规则波试验

分别进行了 6 个水深在 180 与 135 海况下的不规则波试验,为了节省篇幅本文只列出了水深 25.75 m 迎浪时的试验结果。图 6 列出了 25.75 m 水深不规则波的试验波谱、波浪弯矩与波浪剪力 RAO 的试验结果,图中圆点为迎浪情况下规则波试验所得的 RAO 值。

从图 6 可以看出,当波浪频率大于 0.25 rad/s (波长船长比 < 0.9) 时,规则波与不规则波试验获得的 RAO 值很吻合,表明在 > 0.25 rad/s 的所有情况下存在线性关系,同时也表明具有较高的试验精度。

4.2 规则波试验

本文在试验过程中保持 FPSO 的吃水不变,通过改变试验水深获得 FPSO 波浪载荷在不同水深时的传递函数,探索波浪诱导载荷随水深变化的规律。文中对波浪弯矩、波浪剪力进行了无因次化处理,无因次化算子分别取为 $M_y \cdot 10^2 / (g L^2 B a)$ 与 $N_z \cdot 10 / (g L B a)$,其中, ρ 是海水密度, g 是重力加速度, L 是船长, B 是船宽, a 是波幅。

图 7、图 8 为试验所得到的不同水深条件下船艏(断面 1)波浪诱导垂向弯矩和距离船艏 1/4 船长处(断面 2)波浪诱导垂向剪力传递函数的变化规律曲线,图中 H/T 为水深吃水比。由图可见,当 $L/B < 0.9$,随着水深的减小,波浪诱导垂向弯矩和剪力幅值增大,且在极浅水情况下,波浪诱导载荷增大非常明显。

然而,当 $L/B > 0.9$ 并且水深吃水比小于 1.5 时,波浪载荷随水深的变化难于找出其规律性,这是因为 L/B 越大,波长也越长,在所讨论的水深中入射波处于严重的非线性状态,这一点在不规则波试验中也已体

现。有关波浪非线性对波浪载荷的影响还有待进一步的研究。

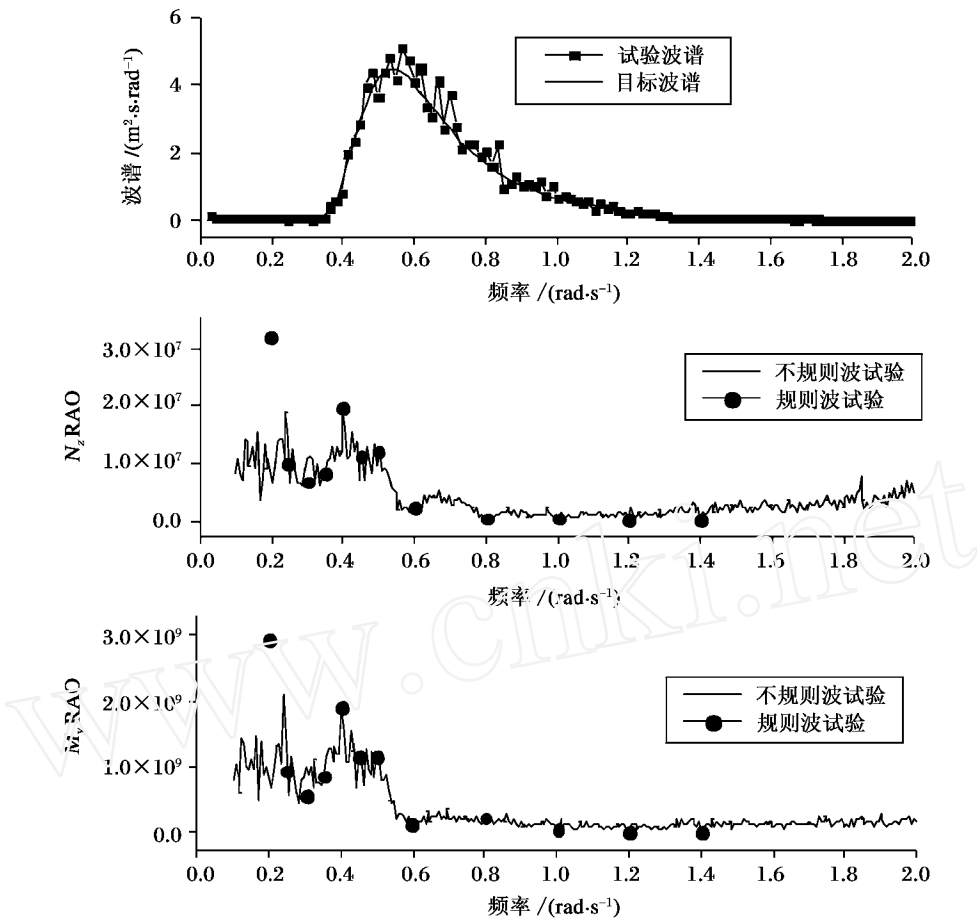


图 6 25.75 m 水深的谱分析结果(浪向角 = 180 °)
Fig. 6 Spectral analysis results of water depth 25.75 m(= 180 °)

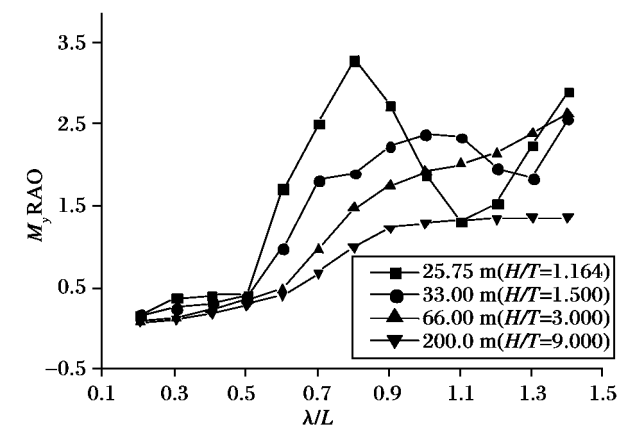


图 7 FPSO 不同水深的波浪弯矩传递函数(= 180 °)
Fig. 7 Transfer functions of bending moment of large FPSO at various water depths(= 180 °)

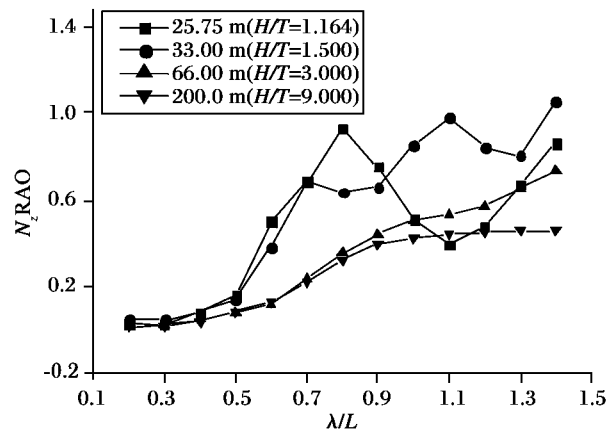


图 8 FPSO 不同水深的波浪剪力传递函数(= 180 °)
Fig. 8 Transfer functions of shearing force of large FPSO at various water depths(= 180 °)

5 结 语

当低频(/ L 较大)时,难于找出波浪诱导载荷随水深变化的规律性。当频率较高(/ L 较小)时,波浪垂向弯矩与剪力随水深的变浅而增加,尤其是极浅水时随着水深的变浅垂向弯矩与剪力增加得非常明显。因此,当进行浅水超大型 FPSO 结构设计时,考虑水深对波浪载荷的影响是十分重要的。

致谢:本文实验是在上海交通大学海洋工程国家重点实验室张承懿、姚美旺、王敏声等老师大力帮助下完成的,在此特致衷心

谢忱。

参考文献:

- [1] Geogre Z W, Frank M S. Experimental determination of bending moments and shear forces in a multisegmented ship model moving in waves[J]. International Shipbuilding Progress, 1970, 10:12 - 24.
- [2] Andersen P. Ship motions and sea loads in restricted water depth[J]. Ocean Engineering, 1979, 6:557 - 569.
- [3] Ractliffe A T, Mitchell G H G. Wave loading on floating docks under tow[J]. International Shipbuilding Progress, 1984, 31:88 - 93.
- [4] Wang X Z, Torgeir Moan. Stochastic and deterministic combination of still water and wave bending moment in ships[J]. Marine Structure, 1996, 9:787 - 810.
- [5] Jelena V P. Wave loads on ships sailing in restricted water depth[J]. Marine Structures, 2003, 16:469 - 485.
- [6] Xu J S, Haddara. Estimation of wave-induced ship hull bending moment from ship motion measurements[J]. Marine Structures, 2001, 14:593 - 610.
- [7] 王志军,李润培,舒志. 不同于结构模型对箱式超大型浮体结构承弹性响应的影响[J]. 海洋工程, 2002, 20(1):1 - 6.
- [8] 陈国建,杨建民,张承懿. 箱式超大型浮体的承弹性模型试验[J]. 海洋工程, 2003, 21(3):1 - 5.
- [9] 吕海宁,杨建民,姚美旺. 箱式超大型浮体在非均匀海洋环境下的水弹性试验[J]. 海洋工程, 2004, 22(1):1 - 8.
- [10] 李文龙,谭家华. 超大型海洋浮式储油系统的风险评估[J]. 海洋工程, 2004, 22(3):1 - 8.

www.cnki.net