

## 立柱式钻井平台内孤立波载荷尺度效应研究

王 旭<sup>1,2</sup>, 张新暑<sup>1,2</sup>, 尤云祥<sup>1,2</sup>

(1. 海洋工程国家重点实验室(上海交通大学), 上海 200240; 2. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

**摘 要:**在海洋内孤立波作用下,立柱式钻井平台会产生大幅度的运动响应,影响钻井平台的作业效率与安全,其中平台内孤立波载荷的准确预测是关键。为此,以 3 类内孤立波理论(KdV、eKdV 和 MCC)的适用性条件为依据,通过构建两层流体中内孤立波对立柱式钻井平台强非线性作用的数值模拟方法,结合模型试验分析了立柱式钻井平台内孤立波载荷的尺度效应。结果表明,在大尺度条件下采用 Morison 公式和傅汝德-克雷洛夫公式分别计算内孤立波的水平力和垂向力仍然是可行的。此外,内孤立波载荷模型试验中,立柱式钻井平台内孤立波水平力及垂向力的尺度效应因流体黏性影响的不同而产生差异,受黏性影响较大的水平力尺度效应显著,而受黏性影响较弱的垂向力的尺度效应较弱,可以忽略。

**关键词:**钻井平台 内孤立波 载荷 尺度效应 数值模拟

**中图分类号:**P751 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0890(2015)04-0030-07

## The Study on Scale Effect of Internal Solitary Wave Loads of Cylindrical Drilling Platforms

Wang Xu<sup>1,2</sup>, Zhang Xinshu<sup>1,2</sup>, You Yunxiang<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200240, China; 2. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration Equipment, Shanghai, 200240, China)

**Abstract:** Under internal solitary ocean waves, a cylindrical drilling platform would drift, which could affect the efficiency and safety of operations on the platform, so the accurate prediction of internal solitary wave load is critical. Based on the application conditions of the theories of three kinds of internal solitary waves (KdV, eKdV and MCC), the scale effects of internal solitary wave load of a cylindrical drilling platform were analyzed through numerical simulation for the strong nonlinear action of internal solitary wave in a two-layer fluid, and in model tests. The results showed that it was feasible to calculate horizontal and vertical forces of internal solitary waves in large scales by using the Morison formula and Froude-Krylov formula. In addition, in the model experiments of internal solitary wave load demonstrated that scale effect differences existed between horizontal and vertical forces. The scale effect was less on the horizontal force compared with vertical one due to fluid viscosity influence difference. The viscosity effect on vertical force might be neglected.

**Key words:** drilling platform; internal solitary waves; load; scale effect; numerical simulation

南海油气资源丰富,已成为我国深海油气资源开发的主战场<sup>[1]</sup>,但南海内孤立波活动频繁。1990年,在流花油田就曾发生过因内孤立波而导致缆绳拉断、船体碰撞,甚至发生拉断和挤破漂浮软管的故事,严重影响了钻井平台的安全作业<sup>[2]</sup>。合理确定各种海洋环境条件下立柱式钻井平台的载荷是深海浮式结构物设计过程中的关键环节。直立圆柱型结

**收稿日期:**2015-04-21;**改回日期:**2015-06-15。

**作者简介:**王旭(1985—),男,河南洛阳人,2006年毕业于江苏科技大学船舶与海洋工程专业,2009年获大连理工大学船舶与海洋结构物设计制造专业硕士学位,2015获上海交通大学船舶与海洋结构物设计制造专业博士学位,主要从事船舶与海洋工程水动力学方面的研究。

**联系方式:**(021)34202721,61602194@qq.com。

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“深海海底井口-隔水管-平台动力学耦合机理与安全控制”(编号:2015CB251203)资助。

构是立柱式钻井平台等各种深海结构物的主体结构形式,目前海洋工程界一般采用 Morison 公式这种工程简化方法来计算直立圆柱体的内孤立波载荷,如:Y. Cheng 等<sup>[3]</sup>和 S. Cai 等<sup>[4-5]</sup>将 Morison 公式与 KdV 理论结合,J. Xie 等<sup>[6]</sup>将 Morison 公式与 MCC(Miyata-choi-Camassa)理论<sup>[7]</sup>结合,研究了内孤立波作用下直立圆柱体的载荷特性问题。尤云祥等<sup>[8-9]</sup>将 Morison 公式与 eKdV(extended KdV)理论<sup>[10]</sup>结合,研究了内孤立波作用下张力腿和半潜式平台的载荷与动力响应问题,而宋志军等<sup>[11]</sup>则将 Morison 公式与 KdV(Korteweg-de Vries)理论<sup>[10]</sup>结合,研究了内孤立波作用下 Spar 平台的载荷与动力响应问题。然而,在上述文献中,Morison 公式中的惯性力和拖曳力系数都是参照表面波的方法选取的,缺乏理论和试验依据。为此,黄文昊等<sup>[12]</sup>以系列试验为依据给出了圆柱型结构惯性力和拖曳力系数的选取方法,但上述这些简化方法是否适用于现实大尺度海洋环境条件下的载荷计算仍然不确定。此外,南海实际环境条件中,内孤立波的相速度可达 1.6~2.0 m/s,最大振幅可达 100 m 多<sup>[13]</sup>,这是无法在内孤立波试验水槽中实现的,受制于试验条件及分析工具的限制,目前对于内孤立波载荷试验的尺度效应尚未进行深入研究,模型试验得到的内孤立波载荷经换算后,在实际大尺度条件下直接使用是否合理,目前仍然并不清楚。计算流体力学(computational fluid dynamics,简称 CFD)方法为深入认识内孤立波尺度效应提供了一条有效的途径,采用 CFD 方法可以在不同尺度条件下直接获得内孤立波与浮式结构物相互作用过程中浮式结构物的水动力特性及载荷构成,从而为验证大尺度条件下工程简化计算方法的适用性以及分析模型试验的尺度效应提供了可能。

鉴于此,笔者采用 Navier-Stokes 方程,建立了振幅及其波形可控的内孤立波 CFD 数值模拟方法。在此基础上,对不同尺度条件下内孤立波与立柱式钻井平台的相互作用进行数值模拟,以验证目前立柱式钻井平台内孤立波载荷简化方法在大尺度条件下的适用性,同时对模型试验的尺度效应进行研究和分析。

## 1 数值方法

考虑两层流体中内孤立波与立柱式钻井平台的相互作用,设两层流体均为不可压流体,上层流体的深度与密度分别为  $h_1$  和  $\rho_1$ ,下层流体的深度与密度

分别为  $h_2$  和  $\rho_2$ 。内孤立波为平面向进波,界面位移为  $\zeta$ ,沿  $Ox$  轴正方向传播,立柱式钻井平台直径为  $D$ ,吃水深度为  $d$ 。建立直角坐标系  $Oxyz$ ,其中  $Oxy$  平面位于流体静止时两层流体的界面上, $Oz$  轴与平台中心轴重合且以竖直向上为正。

笔者采用 CFD 方法模拟内孤立波诱导流场,进而获得内孤立波对立柱式钻井平台的载荷。在此基础上,研究立柱式钻井平台内孤立波载荷的尺度效应。为此,采用求解 Navier-Stokes 方程的方法模拟内孤立波诱导流场,其中流场控制方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{u}_i}{\partial x_i} = 0 \\ \frac{\partial \mathbf{u}_i}{\partial t} + \mathbf{u}_j \frac{\partial \mathbf{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \frac{\partial \mathbf{u}_i}{\partial x_j} \right] + \mathbf{f}_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{u}_i$  为速度矢量,m/s; $\mathbf{p}$  为动压力矢量,Pa; $t$  为时间,s; $\mathbf{f}_i$  为重力矢量,N; $\nu$  为运动黏性系数,m<sup>2</sup>/s; $\rho$  为流体密度,kg/m<sup>3</sup>,当  $\zeta < z < h_1$  时, $\rho = \rho_1$ ;当  $-h_2 < z < \zeta$  时, $\rho = \rho_2$ 。

将平台直立置于两层流体中,平台壁面取无滑移不可穿透边界条件,计算域顶部及底部要求满足如下壁面条件:

$$\begin{cases} w|_{z=h_1} = 0 \\ w|_{z=-h_2} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

流场计算的控制区域包括内孤立波生成传播区和消波区 2 个区域(见图 1)。采用速度入口方法生成内孤立波,当在生成传播区中形成稳定的内孤立波后,对所生成内孤立波的传播特性进行监测分析,并对立柱式钻井平台的内孤立波载荷进行计算。

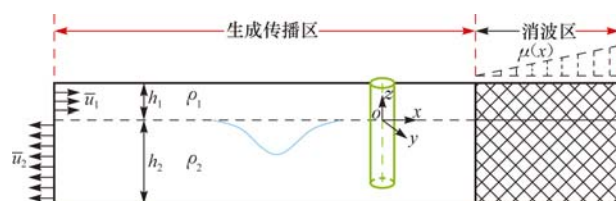


图 1 数值水槽示意

Fig. 1 The sketch of the numerical water flume

设内孤立波振幅为  $a$ ,相速度为  $c$ ,则其诱导上下层流体中的层深度平均水平速度分别为<sup>[2]</sup>:

$$\bar{u}_1 = -c \frac{\zeta}{h_1 - \zeta} \quad (3)$$

$$\bar{u}_2 = c \frac{\zeta}{h_2 + \zeta} \quad (4)$$

式中: $\bar{u}_1$  为上层流体层深度的平均水平速度,m/s; $\bar{u}_2$  为下层流体层深度的平均水平速度,m/s。

在内孤立波生成与传播过程中,两层流体的界面会发生变化,采用 VOF(volume of fluid)方法追踪两层流体界面的变化<sup>[14]</sup>。利用海绵层消波方法对水槽尾部的内孤立波进行消波处理,该方法在消波区通过在动量方程右端添加源项 $-\mu(x)u_i$ 的方式实现,其中 $\mu(x)$ 为海绵层衰减系数<sup>[15]</sup>。

立柱式钻井平台的内孤立波水平力 $F_x$ 及垂向力 $F_z$ 由摩擦力和压差力 2 部分组成,即:

$$F_x = \mu \int_S \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \mathbf{n}_y + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \mathbf{n}_z \right] ds + \int_S -p \mathbf{n}_x ds \quad (5)$$

$$F_z = \mu \int_S \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \mathbf{n}_x + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \mathbf{n}_y \right] ds + \int_S -p \mathbf{n}_z ds \quad (6)$$

式中: $S$ 为平台湿表面积, $m^2$ ;两式中右端的第一项为平台侧表面和底部的载荷摩擦力, $N$ ;第二项为平台侧表面的载荷压差力, $N$ ;( $\mathbf{n}_x, \mathbf{n}_y, \mathbf{n}_z$ )为平台表面法向矢量,方向指向平台外部。

下面给出立柱式钻井平台力矩的计算方法,设 $\bar{z}$ 为立柱式钻井平台中心轴上某点到力矩转动中心的距离, $F_x$ 为在该点附近作用在单位长度立柱式钻井平台侧表面上的水平力,则在孤立波作用下立柱式钻井平台的力矩可表示为:

$$M_y = \int_{\bar{d}-d}^{\bar{d}} F_x \bar{z} d\bar{z} \quad (7)$$

式中: $\bar{d}$ 为力矩转动中心至平台底部距离, $m$ ;  $M_y$ 为立柱式钻井平台的力矩, $N \cdot m$ 。顺时针时, $M_y$ 为正;逆时针时, $M_y$ 为负。

依据文献[16]确定 3 类内孤立波(KdV、eKdV 和 MCC)理论的适用性条件,从而计算得到入口边界处上下层流体层深度的平均水平速度,具体计算方法如下:

记 $h = h_1 + h_2$ 为总水深, $\epsilon = |a|/h$ 为非线性参数, $\mu = (h/\lambda)^2$ 为色散参数,其中 $\lambda$ 为内孤立波特征宽度。根据内孤立波的振幅等条件,利用有限深水 KdV、eKdV 和 MCC 的理论解,分别计算相应内孤立波的非线性参数 $\epsilon$ 和色散参数 $\mu$ 。如果 $\mu < \mu_0$ 且 $\epsilon \leq \mu$ ,则选择 KdV 的理论解作为数值模拟的入口边界条件;如果 $\mu < \mu_0$ 且 $\mu < \epsilon \leq \sqrt{\mu}$ ,则选择 eKdV 的理论解作为数值模拟的入口边界条件;如果 $\mu < \mu_0$ 且 $\epsilon > \sqrt{\mu}$ 或 $\mu \geq \mu_0$ ,则选择 MCC 的理论解作为数值模拟的入口边界条件。

## 2 结果与分析

文献[12]利用大型密度分层水槽,对内孤立波作用下立柱式钻井平台的载荷特性进行了系列试验。模型试验参数:平台直径 $D$ 为 0.15 m,吃水 $d$ 为 0.535 m;水槽长 $L$ 为 30 m,宽度 $B$ 为 0.6 m;水深 $h$ 为 1 m;平台中心轴距离速度入口端 9 m;上下层流体密度分别为 998 和 1 025  $kg/m^3$ ;上下层流体深度比分别为 1:9,2:8 和 3:7。结合深海 Spar 平台的实际尺寸,相对于模型尺寸,笔者选取 150:1,200:1 和 300:1 等 3 种尺度比的数值模型研究平台内孤立波载荷的尺度效应。表 1 为上述 3 种尺度比条件下的数值模型尺寸。

表 1 3 种尺度比条件下的数值模型尺寸

Table 1 The sizes of numerical models at three scale ratios

尺度比 $k$	水槽长 $L/m$	水槽宽 $W/m$	水深 $h/m$	平台直 径 $D/m$	平台吃 水 $d/m$
150:1	4 500	90	150	22.5	80.25
200:1	6 000	120	200	30.0	107.00
300:1	9 000	180	300	45.0	160.50

力矩转动中心至平台底部距离为 $\bar{d} = d + 0.15k$ 。由于作用于平台的力矩可以由水平力沿垂向积分得到,其载荷特性与水平力载荷特性相类似,所以主要讨论水平力和垂向力的尺度效应。定义 $F_x = F_x/(\rho_1 g D^2 d)$ 和 $\bar{F}_z = F_z/(\rho_1 g D^3)$ 为无因次内孤立波水平力和无因次内孤立波垂向力,同时定义特征时间 $\bar{t} = t/\sqrt{k}$ ,其中 $k$ 为相对于试验模型的尺度比。为分析黏性影响的需要,定义雷诺数 $Re = U_{\max} D/\nu$ ,其中 $U_{\max}$ 为内孤立波诱导的最大水平速度。

### 2.1 模型试验尺度效应分析

尺度效应是模型试验必须考虑的关键问题之一。根据文献[12]的试验结果,采用数值水槽方法,对立柱式钻井平台内孤立波载荷的模型试验尺度效应进行分析。为此,在数值模拟中,选择 Case A 和 Case B 两种工况进行比较,其中 Case A 工况的数值水槽及柱体尺寸与文献[12]中的模型试验一致,水槽上下层流体深度比 $h_1:h_2 = 3:7$ ,内孤立波无因次振幅 $a_d/h = 0.101$ ;而 Case B 工况选择基于试验模型尺度比为 200:1 的数值模型,数值水槽及柱体尺寸见表 1,而上下层流体深度比及无因次振幅均与 Case A 工况相同。

图 2 给出了 Case A 和 Case B 两种工况下的内孤立波无因次水平力时历数值模拟结果,并与文献[12]的试验结果进行了比较。由图 2 可知:Case A 工况下,模型尺度下的立柱式钻井平台内孤立波无因次水平力数值模拟结果与试验结果吻合良好,两者相对误差 6.25%,且均在特征时间  $\bar{t}=61$  达到峰值;而在 Case B 工况下,无因次水平力时历曲线同样在特征时间  $\bar{t}=61$  到达峰值,与 Case A 工况相符。比较 Case A 和 Case B 两种工况下的无因次水平力时历曲线,可以发现 Case B 工况下无因次水平力幅值明显小于 Case A 工况下模型试验结果,与模型水平力无因次幅值的相对误差达到 31.25%,这说明在求解大尺度浮式结构物内孤立波水平力载荷幅值时,尺度效应非常显著。如果忽略尺度效应,直接对模型试验得到的载荷直接进行尺度换算,将高估平台内孤立波水平力。

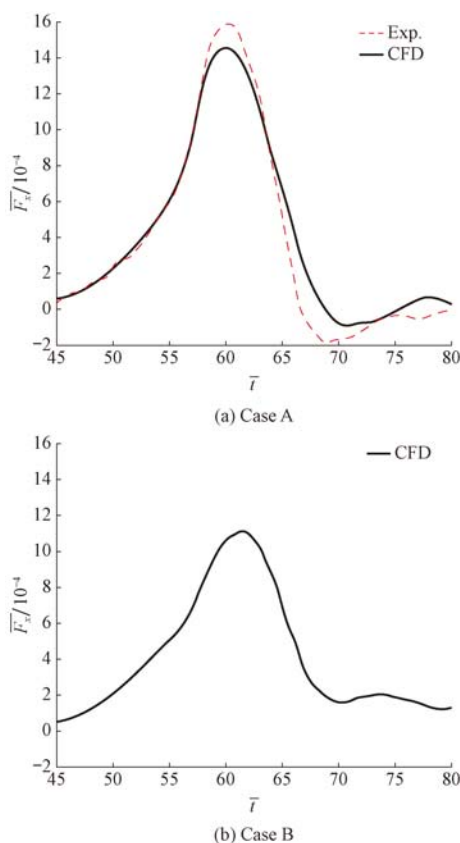


图 2 Case A 和 Case B 两种工况下内孤立波无因次水平力时历曲线

Fig. 2 Time-variant curve for dimensional horizontal forces of internal solitary waves in Case A and Case B

图 3 给出了 Case A 和 Case B 两种工况下的内孤立波无因次垂向力时历数值模拟结果,并与文献[12]中的试验结果进行了比较。由图 3 可知:Case

A 工况下,模型尺度下的立柱式钻井平台内孤立波垂向力数值模拟结果与试验结果吻合良好,两者相对误差 4.17%,且均在特征时间  $\bar{t}=61.7$  达到峰值;而在 Case B 工况下,无因次垂向力时历曲线也在  $\bar{t}=61.7$  到达峰值,与 Case A 工况相符。比较 Case A 和 Case B 两种工况下的无因次垂向力时历曲线,可以发现 Case B 工况下无因次垂向力幅值与 Case A 工况模型试验结果相差较小,相对误差为 5.56%。这说明对于垂向力,尺度效应较小,在求解大尺度浮式结构物内孤立波垂向力载荷幅值时,可以忽略尺度效应,直接进行尺度换算。

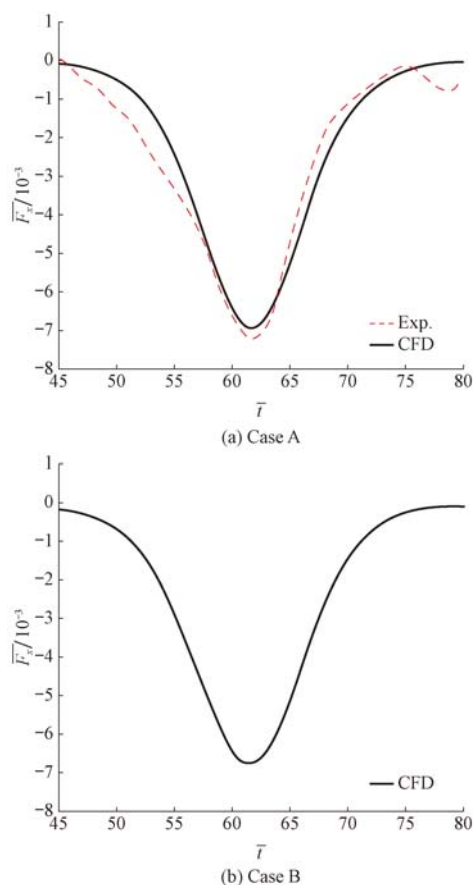


图 3 Case A 和 Case B 两种工况下内孤立波无因次垂向力时历曲线

Fig. 3 Time-variant curve for dimensional vertical forces of internal solitary waves in Case A and Case B

由上述分析可知,就尺度效应而言,平台内孤立波水平力和垂向力两种载荷存在很大不同,水平力的尺度效应非常显著,不可忽略,而垂向力的尺度效应较小,可以忽略。因此,需要从载荷构成的角度分析出现这种差异的原因,由式(5)和式(6)可知,水平力及垂向力均由摩擦力和压差力两部分构成。根据黏性的影响,可以将立柱式钻井平台内孤立波的水



平和垂向压差力进一步划分为波浪压差力和黏性压差力两部分;波浪压差力被认为与内孤立波诱导的水质点波动有关,可以采用无黏条件下 Euler 模拟方法得到;黏性压差力归因于流体黏性效应导致的压差力增量,通过 N-S 模拟所得压差力减去波浪压差力得到。这样水平力或垂向力均可以划分为摩擦力、波浪压差力和黏性压差力 3 部分。

图 4 为 Case A 和 Case B 两种工况下的构成内孤立波无因次水平力 3 种载荷的时历曲线。由图 4 可以看出:无因次摩擦力  $f_x$  与无因次波浪压差力  $F_x^{pw}$  或无因次黏性压差力  $F_x^{pv}$  相比均非常小,可以忽略;无论是 Case A 工况还是 Case B 工况,波浪压差力和黏性压差力的量级相当,这意味着黏性对立柱式钻井平台的内孤立波水平力影响是非常显著的;比较 Case A 和 Case B 两种工况的无因次水平波浪压差力幅值,两者的相对误差为 0.88%,这说明水平波浪压差力的尺度效应是非常微弱的;比较两种工况的无因次水平黏性压差力幅值,两者的相

对误差为 26.60%,这说明水平黏性压差力的尺度效应是非常显著的。综合上述分析,造成立柱式钻井平台水平力尺度效应显著的原因是黏性压差力,即黏性效应的影响。另外,通过对比 Case A 和 Case B 两种工况可以看出,雷诺数  $Re$  从 Case A 工况的  $9.7 \times 10^3$  增大到 Case B 工况的  $2.7 \times 10^7$  时,Case B 工况的无因次水平黏性压差力幅值明显小于 Case A 工况的,同时黏性压差力在水平力中的比重也随之明显降低。

图 5 为 Case A 和 Case B 两种工况的构成内孤立波无因次垂向力 3 种载荷的时历曲线。由图 5 可以看出:无因次摩擦力  $f_z$  与无因次波浪压差力  $F_z^{pw}$  或无因次黏性压差力  $F_z^{pv}$  相比均非常小,可以忽略;无论是 Case A 工况还是 Case B 工况,黏性压差力与波浪压差力相比也非常小,这意味着黏性效应较弱,立柱式钻井平台的内孤立波垂向力主要由波浪压差力构成;比较 Case A 和 Case B 两种工况的无因次波浪压差力幅值,两者的相对误差为 5.63%,

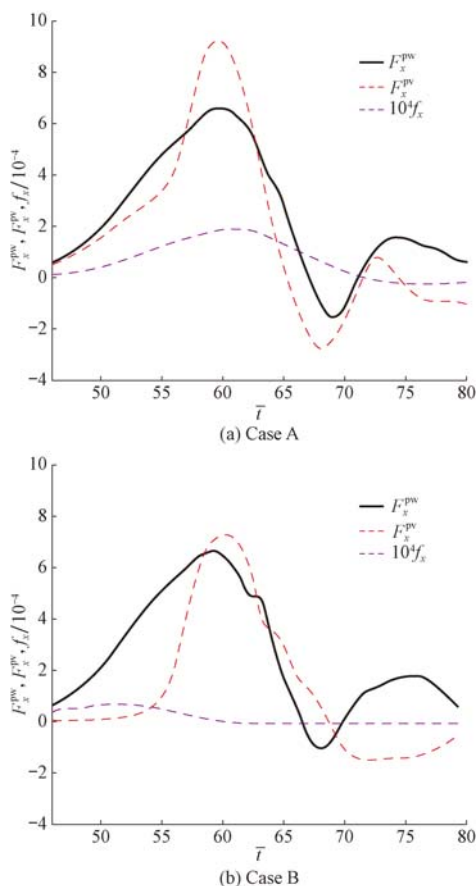


图 4 Case A 和 Case B 两种工况下内孤立波水平力 3 种无因次载荷成分时历曲线

Fig. 4 Time-variant curve for three dimensional loads of horizontal forces of internal solitary waves in Case A and Case B

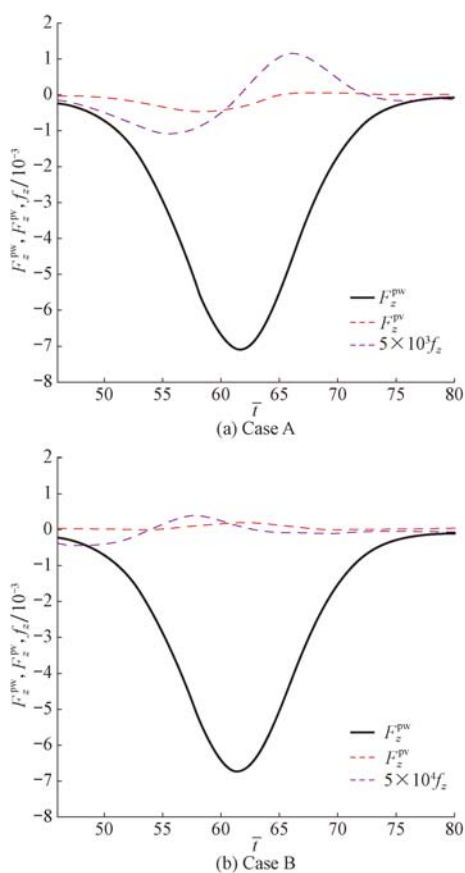


图 5 Case A 和 Case B 两种工况下内孤立波垂向力 3 种无因次载荷成分时历曲线

Fig. 5 Time-variant curve for three dimensional loads of vertical forces of internal solitary waves in Case A and Case B

这说明波浪压差力的尺度效应是非常微弱的,这说明由于构成垂向力主要成分的波浪压差力的尺度效应较小,因而立柱式钻井平台垂向力的尺度效应也较小。

由此可见,模型试验水平力、垂向力尺度效应差异显著的根本原因在于黏性效应的不同,受黏性影响较大的水平力的尺度效应显著,而受黏性影响较弱的垂向力的尺度效应则可以忽略。

## 2.2 工程简化方法尺度效应分析

通过上述分析可知,采用模型试验方法将内孤立波水平力试验结果直接换算到实际尺度是不可行的。为此,进一步研究了一种工程简化方法的尺度效应。其具体做法是分别采用 Morison 公式和傅汝德-克雷洛夫力公式求解平台内孤立波的水平力和垂向力。这种做法在模型试验尺度雷诺数低 ( $Re \leq 1 \times 10^4$ ) 的情况下被证明是适用的<sup>[12]</sup>,但在实际海洋环境中雷诺数高 ( $Re > 1 \times 10^7$ ) 的情况下的适用性尚不清楚。因此,笔者采用 CFD 模拟方法对大尺度条件下该简化方法的适用性进行分析。

记  $U_1$  和  $W_1$  分别为当  $\zeta < z < h_1$  时内孤立波诱导的水质点瞬时水平速度和垂向速度,记  $U_2$  和  $W_2$  分别为当  $-h_2 < z < \zeta$  时内孤立波诱导的瞬时水平速度和垂向速度,则可得<sup>[17]</sup>:

$$U_i = \bar{u}_i + \left\{ \frac{\bar{h}_i^2}{6} - \frac{[z + (-1)^i h_i]^2}{2} \right\} \bar{u}_{ixx} \quad (8)$$

$$W_i = (-1)^{i+1} [h_i + (-1)^i z] \bar{u}_{ix} \quad (9)$$

$$\text{其中} \quad \bar{h}_i = h_i + (-1)^i \zeta \quad (10)$$

定义  $U$  和  $W$  如下:当  $\zeta < z < h_1$  时,  $U = U_1$ ,  $W = W_1$ ;当  $-h_2 < z < \zeta$  时,  $U = U_2$ ,  $W = W_2$ 。那么,利用式(7)和式(8),可得单位长度立柱式钻井平台侧表面内孤立波载荷的 Morison 公式为<sup>[18]</sup>:

$$F_n = \rho C_m \frac{\pi D^2}{4} \dot{V}_n + \frac{1}{2} C_d \rho D |V_n| V_n \quad (11)$$

式中:  $C_m$  为惯性力系数;  $C_d$  为拖曳力系数;  $V = (U, 0, W)$  为水质点速度,  $m/s$ ;  $\dot{V}_n$  为水质点加速度,  $m/s^2$ ;  $V_n$  为垂直于平台侧表面的速度分量,  $m/s$ 。

文献[12]根据系列试验结果,建议 Morison 公式(式(10))中的惯性力系数和拖曳力系数采用下式计算:

$$\begin{cases} C_m = 2.0 \\ C_d = 1 + 2.3e^{-Re \times 10^{-4}} \end{cases} \quad (12)$$

另一方面,由伯努利方程可得内孤立波诱导的

流体动压力为<sup>[12]</sup>:

$$p = \rho \left[ cU - \frac{1}{2} (U^2 + W^2) \right] \quad (13)$$

根据式(13)对平台底部进行压力积分,可得作用其底部的傅汝德-克雷洛夫力为:

$$F_B = \int_{S_B} p n_z ds \quad (14)$$

式(12)中,  $C_m$  和  $C_d$  是根据内孤立波水槽试验数据回归得到的,由于内孤立波水槽主尺度等因素,模型试验中的雷诺数  $Re$  最大只能做到  $10^4$  量级,而实际情况的雷诺数最大可达  $10^8$  量级。因此,在利用上述工程简化方法估算立柱式钻井平台内孤立波载荷时,同样存在尺度效应问题。

图 6 给出了尺度比为 200 : 1, 上下层流体深度比  $h_1 : h_2 = 3 : 7$ , 无因次振幅为  $a_d/h = 0.101$  工况下,利用简化方法计算所得立柱式钻井平台内孤立

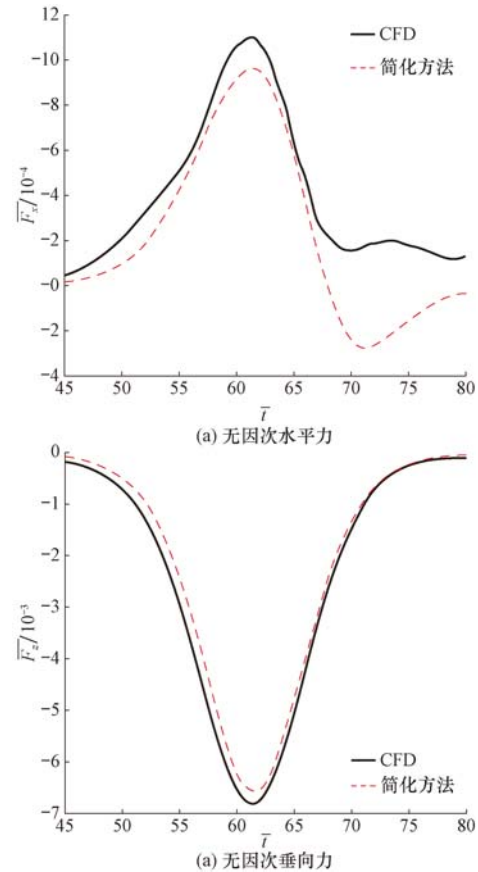


图 6 简化方法计算和 CFD 数值模拟的内孤立波无因次水平力、垂向力幅值

Fig. 6 The amplitudes of dimensional horizontal and vertical forces of internal solitary waves calculated with simplified methods and simulated with CFD numerical values

波无因次水平力、垂向力与 CFD 数值模拟结果。由图 6 可知,简化方法计算得到的无因次水平力与 CFD 数值模拟结果趋势大体一致,两者幅值相对误差为 10.9%;而无因次垂向力与 CFD 数值模拟结果相吻合,两者幅值相对误差为 4.4%。这说明使用简化方法在大尺度、高雷诺数(该工况  $Re=2.7 \times 10^7$ )条件下,求解立柱式钻井平台内孤立波载荷仍然是可行的。

### 3 结 论

1) 在大尺度、高雷诺数条件下,采用 Morison 和傅汝德-克雷洛夫公式计算其内孤立波水平力和垂向力是可行的。

2) 立柱式钻井平台内孤立波水平力及垂向力的尺度效应因受流体黏性影响的不同而出现差异,受黏性影响较大的水平力的尺度效应显著,而受黏性影响较弱的垂向力的尺度效应则可以忽略。

3) 在实际尺度情况下,由于计算量等因素,CFD 数值模拟方法仍受到限制。而在实际尺度雷诺数下通过模型试验所得到 Morison 公式的拖曳力系数和惯性力系数计算公式仍适用,因此可以利用由模型试验获得的拖曳力系数和惯性力系数的计算公式计算出这 2 个系数,再利用工程简化方法估算实际尺度下的内孤立波载荷。

### 参 考 文 献

#### References

- [1] 王友华,王文海,蒋兴迅.南海深水钻井作业面临的挑战和对策[J].石油钻探技术,2011,39(2):50-55.  
Wang Youhua, Wang Wenhai, Jiang Xingxun. South China Sea deepwater drilling challenges and solutions[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(2): 50-55.
- [2] 陈景辉.南海流花11-1深水油田开发工程[J].中国海洋平台,1996,11(1):44-46,4.  
Chen Jinghui. Liuhua 11-1 deepwater fields development project in the South China Sea[J]. China Offshore Platform, 1996, 11(1): 44-46, 4.
- [3] Cheng Y, Li J, Liu Y. Recent advances in fluid mechanics[M]. Berlin: Springer, 2004.
- [4] Cai S, Long X, Gan Z. A method to estimate the forces exerted by internal solitons on cylinder piles[J]. Ocean Engineering, 2003, 30(5): 673-689.
- [5] Cai S, Long X, Wang S. Force and torques exerted by internal solitons in shear flows on cylinder piles[J]. Applied Ocean Research, 2008, 30(1): 72-77.
- [6] Xie J, Jian Y, Yang L. Strongly nonlinear internal soliton load on a small vertical circular cylinder in two-layer fluids[J]. Applied Mathematical Modelling, 2010, 34(8): 2089-2101.
- [7] Choi W, Camassa R. Fully nonlinear internal waves in a two-fluid system[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1999, 396: 1-36.
- [8] 尤云祥,李巍,时忠民,等.海洋内孤立波中张力腿平台的水动力特性[J].上海交通大学学报,2010,44(1):56-61.  
You Yunxiang, Li Wei, Shi Zhongmin, et al. Hydrodynamic characteristics of tension leg platforms in ocean internal solitary waves[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2010, 44(1): 56-61.
- [9] 尤云祥,李巍,胡天群,等.内孤立波中半潜平台动力响应特性[J].海洋工程,2012,30(2):1-7,19.  
You Yunxiang, Li Wei, Hu Tianqun, et al. Dynamic responses of a semi-submersible platform in internal solitary waves[J]. The Ocean Engineering, 2012, 30(2): 1-7, 19.
- [10] Helfrich K R, Melville W K. Long nonlinear internal waves[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2006, 38: 395-425.
- [11] 宋志军,勾莹,滕斌,等.内孤立波作用下 Spar 平台的运动响应[J].海洋学报:中文版,2010,32(2):12-19.  
Song Zhijun, Gou Ying, Teng Bin, et al. The motion responses of a Spar platform under internal solitary wave[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 32(2): 12-19.
- [12] 黄文昊,尤云祥,王旭,等.圆柱型结构内孤立波载荷实验及其理论模型[J].力学学报,2013,45(5):716-728.  
Huang Wenhao, You Yunxiang, Wang Xu, et al. Internal solitary wave loads experiments and its theoretical model for a cylindrical structure[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 45(5): 716-728.
- [13] 方欣华,杜涛.海洋内波基础和中国海内波[M].青岛:中国海洋大学出版社,2005.  
Fang Xinhua, Du Tao. Fundamentals of oceanic internal waves and internal waves in the China Seas[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2005.
- [14] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201-225.
- [15] 韩朋.基于 VOF 方法的不规则波阻尼消波研究[D].大连:大连理工大学,2009.  
Han Peng. The study of damping absorber for irregular waves based on VOF method[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [16] 黄文昊,尤云祥,王旭,等.有限深两层流体中内孤立波造波实验及其理论模型[J].物理学报,2013,62(8):354-367.  
Huang Wenhao, You Yunxiang, Wang Xu, et al. Wave-making experiments and theoretical models for internal solitary waves in a two-layer fluid of finite depth[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(8): 354-367.
- [17] Camassa R, Choi W, Michallet H, et al. On the realm of validity of strongly nonlinear asymptotic approximations for internal waves[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 549: 1-23.
- [18] 周光炯,严宗毅,许世雄,等.流体力学:下册[M].北京:高等教育出版社,2003.  
Zhou Guangjiong, Yan Zongyi, Xu Shixiong, et al. Fluid mechanics: Part II [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.

[编辑 刘文臣]