

直立码头前船波浪力耦合计算模型¹⁾

王大国^{*,†,**,2)} 邹志利[†] 唐春安^{**}

^{*}(大连大学材料破坏力学数值试验研究中心, 大连 116622)

[†](大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024)

^{**}(大连理工大学土木水利学院, 大连 116024)

摘要 建立了外域用 Boussinesq 方程、内域用刚体运动方程的直立码头前二维船剖面波浪力的时域计算耦合模型, 内域与外域在交界面的匹配条件是流量连续和压力相等. 进行了相关模型实验, 并把计算结果与实验结果进行了对比. 推导了船体与水底和直立码头之间间隙内流体运动的自振频率, 研究了间隙内流体运动的共振现象.

关键词 Boussinesq 方程, 刚体运动方程, 耦合模型, 共振现象, 波浪力

中图分类号: TV139.2⁺6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0459-1879(2006)06-0767-09

引 言

港口系泊船运动是港口设计和使用的关键问题^[1]. 系泊船的碰撞是确定码头结构强度和稳定性的决定因素. 特别是直立码头前系泊船, 当港口入射波浪频率与间隙内流体运动的自振频率接近时, 可以激发起港内共振波浪, 波浪作用力大, 确定系泊船运动和其靠泊力尤为重要. 邹志利^[2]提出了为解决港口内靠码头系泊船运动问题的思路, 首先要获取港内波浪状况和码头前船体所受波浪力, 然后单独研究船在波浪激励作用下系泊系统的动力响应. 对于前一问题, 齐鹏等^[3]提出了外域用 Boussinesq 方程、内域用 N-S 方程耦合模型来求解直立码头前船所受非线性波浪力. 但该方法要用差分法数值求解 N-S 方程, 与单独用差分或有限元数值方法求解 Laplace 方程^[4~7]或 N-S 方程^[8,9]计算直立码头前船所受非线性波浪力一样, 不太适用船与直立码头之间间隙较小的情况, 难以分析间隙内流体运动的共振现象.

本文建立了一种新的直立码头前二维船剖面波浪力的时域计算耦合模型: 船剖面左侧与入射边界的区域为外域, 其控制方程为 Boussinesq 方程; 船剖面底部水域以及船剖面右侧与直立码头之间的水域为内域, 其控制方程为刚体运动方程. 两域在交

界面外的连接条件是流量连续和压力相等. 进行了相关模型实验, 实验结果和数值计算结果对比表明该耦合模型具有满意的精度, 可适用于工程计算. 推导了船剖面与水底和直立码头之间间隙流体运动的自振频率, 分析了间隙内流体运动的共振现象和船所受非线性波浪力非线性特征.

1 耦合模型

如图 1 所示, 将笛卡尔坐标系 $o-xy$ 的原点放在静水面上的入射边界处, x 轴的正方向与波浪的传播方向一致, y 轴的正方向与重力方向相反. 整个计算域划分为 Ω_1 和 Ω_2 两个域, 其中 Ω_1 为船剖面左侧与造波板之间的流域, 称为外域, 其控制方程为 Boussinesq 方程; Ω_2 为船剖面底侧与海底和船剖面右侧与直立码头之间的流域, 称为内域, 其控制方程为刚体运动方程. 在外域与内域的交界面 $\overline{a_1a_2}$ 上满足流量连续和压力相等连接条件. 图 1 中, a_1 和 a_2 是交界面 $\overline{a_1a_2}$ 两个端点; h 是静水深; d 是船剖面吃水深度; δ_1 是船剖面底面与海底的间隙; δ_2 是船剖面右侧与直立码头的间隙; p_1 是交界面 $\overline{a_1a_2}$ 上的压力; $\overline{b_1b_2}$ 是船剖面底面与海底之间流体和船剖面右侧与直立码头之间流体的交界面; p_2 是交界面 $\overline{b_1b_2}$ 上的压力; b_1 和 b_2 是交界面 $\overline{b_1b_2}$ 两个端点; β 是交界面 $\overline{b_1b_2}$ 与直立码头之间的夹角; B

2005-09-01 收到第 1 稿, 2006-05-31 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金 (59979002)、长江学者和创新团队发展基金和辽宁省教育厅 (2005058) 资助项目.

2) E-mail: dan.wangguo@163.com

压力相等

$$p^- = p^+ \quad (9)$$

式中, $\bar{u}_1$, ζ_1 和 p^- 分别是外域 Ω_1 在界面 $\overline{a_1 a_2}$ 处的水深平均速度、波面升高和压力; p^+ 是内域 Ω_2 在界面 $\overline{a_1 a_2}$ 处的压力. 对应高阶 Boussinesq 方程 (1),(2), 式 (9) 中 p^- 沿水深是四次多项式分布 [12]

$$p = \begin{cases} \rho g(\zeta - y) + \frac{1}{2}\rho[(h + y)^2 - (h + \zeta)^2] \cdot \\ \quad [\bar{u}_{xt} + \bar{u}\bar{u}_{xx} - (\bar{u}_x)^2] - \\ \quad \frac{1}{24}\rho[(h + y)^2 - (h + \zeta)^2]^2 \bar{u}_{xxx}, \quad y \geq 0 \\ \rho g\zeta + \frac{1}{2}\rho[(h + y)^2 - (h + \zeta)^2] \cdot \\ \quad [\bar{u}_{xt} + \bar{u}\bar{u}_{xx} - (\bar{u}_x)^2] - \\ \quad \frac{1}{24}\rho[(h + y)^2 - (h + \zeta)^2]^2 \bar{u}_{xxx}, \quad y < 0 \end{cases} \quad (10)$$

1.4 耦合求解过程

耦合求解过程包括: 预报过程. 先由 $n + 1$ 时刻的预报速度 $\bar{u}^{*n+1}$ 和上一时刻的速度 $\bar{u}^n$ 通过 $(\bar{u}^{*n+1} - \bar{u})/\Delta t$ (Δt 是时间步长) 来求式 (10) 中 $\bar{u}_t$, 应用式 (10) 计算外域 Ω_1 在界面 $\overline{a_1 a_2}$ 处的压力 p^- . 接着应用压力相等匹配条件 (9), 得出式 (7) 中的压力 p_1 , 由式 (7) 计算出船体与水底之间的流体速度 u_1^{n+1} . 然后应用速度 u_1^{n+1} 和流量连续条件 (8) 计算出 $\bar{u}_1$, 作为外域 Ω_1 的右端速度边界条件. 应用该边界条件和入射边界, 求解外域 Ω_1 中 Boussinesq 方程; 同时, 根据流量连续条件 (6) 和 $\frac{\partial \zeta}{\partial t} = u_2$, 分别计算出船剖面右侧与直立码头之间的流体速度 u_2^{n+1} 和波面升高 ζ^{n+1} .

校正过程. 这一步是用预报过程求解出的外域速度 $\bar{u}^{n+1}$ 取代预报过程中的预报速度 $\bar{u}^{*n+1}$, 重复预报过程的计算. 将所得速度与预报过程求解的速度作比较, 若两者相对误差很小 (不超过 1%), 则可结束 $n + 1$ 时间步的计算, 否则需重复以上过程, 即进行迭代求解.

1.5 水平力与垂向力的计算

由于 u_1 和 u_2 沿间隙保持不变, 垂向一维欧拉方程和水平一维欧拉方程可简化为

$$p_y = -\rho(u_{2t} + g) \quad (11)$$

$$p_x = -\rho u_{1t} \quad (12)$$

分别对式 (11) 和式 (12) 积分, 可得船剖面右侧和船剖面底侧的压力求解公式

$$p = \rho \left(\frac{\delta_1}{\delta_2} \frac{u_1^{n+1} - u_1^n}{\Delta t} \right) (\zeta - z) + \rho g \zeta \quad (13)$$

$$p = -\rho(x - x_1) \frac{u_1^{n+1} - u_1^n}{\Delta t} + p_0 \quad (14)$$

式中, x_1 为界面 $\overline{a_1 a_2}$ 的水平坐标; p_0 为界面 $\overline{a_1 a_2}$ 的压力.

波浪对船剖面的水平作用力和垂向作用力分别由水平压力和垂向压力在各自的作用面上积分求出. 船剖面左侧单位长度水平力 F_1 由式 (10) 的积分式计算

$$F_1 = \int_{-d}^{\zeta^*} p dy \quad (15)$$

式中, ζ^* 为外域在界面 $\overline{a_1 a_2}$ 处的波面升高. 船剖面右侧单位长度水平力 F_2 由式 (13) 的积分式计算

$$F_2 = \int_{-d}^{\zeta} p dy \quad (16)$$

船剖面单位长度总的水平力 $F_h = F_1 - F_2$. 单位长度垂向力, 即单位长度船剖面底面上受力用式 (14) 对船剖面底面单位长度积分得到, 即

$$F_v = -\frac{1}{2}\rho B^2 \frac{u_1^{n+1} - u_1^n}{\nabla t} + B p_0 \quad (17)$$

2 模型实验

模型实验是在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室一波浪水槽中进行. 水槽长度为 46 m, 宽度为 0.7 m, 深度为 1 m. 入射波是由水槽一端的活塞式造波机产生的, 如图 2, 船模型放置在距造波机 27.4 m 的水池中间处. 实验中的实验参数 (如船模型的大小、船与码头和海底的距离) 是参考直立码头船的常见尺度, 大致相当于 1:50 比例来设计的. 取船模型宽度 $B = 0.6$ m, 长度 $L = 0.4$ m, 高度为 0.45 m. 直立码头在船模型右侧距模型 0.06 m, 模型与水底的水深也为 0.06 m. 研究中将模型固定不动, 即仅考虑波浪透射问题. 实验中将模型通过支承杆固定在水槽上方的固定架上, 模型两旁与水槽边分别放置一个长 0.15 m, 与模型一样宽和一样高的木箱. 为避免木箱与模型产生摩擦, 它们之间有 0.003 m 的间隔, 见图 3. 波面升高由放置在水槽中不同位置处浪高仪来测量, 具体位置如图 2. 力由测力器测出, 实验中同时测出了水平力与垂向力, 测力器布置在模型上方的中心处, 如图 2, 图 3. 造波板作正弦或椭圆余弦运动, 生成的入射波要素见表 1.

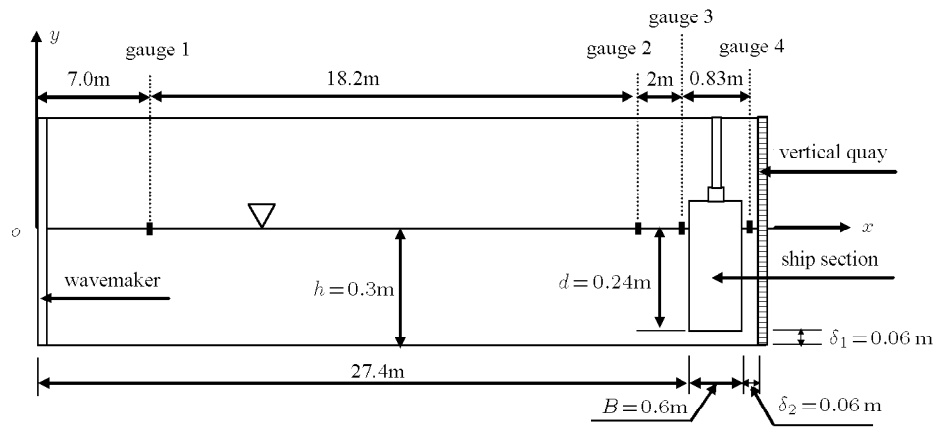


图 2 实验布置

Fig.2 Experimental setup

表 1 入射波浪要素

Table 1 Incident wave characteristics

	Test case 1	Test case 2	Test case 3	Test case 4
incident wave	cnoidal wave	sine wave	cnoidal wave	sine wave
water height H /m	0.06	0.06	0.06	0.06
wave period T /s	2	3	4	5
water depth h /m	0.3	0.3	0.3	0.3
ship draft d /m	0.24	0.24	0.24	0.24

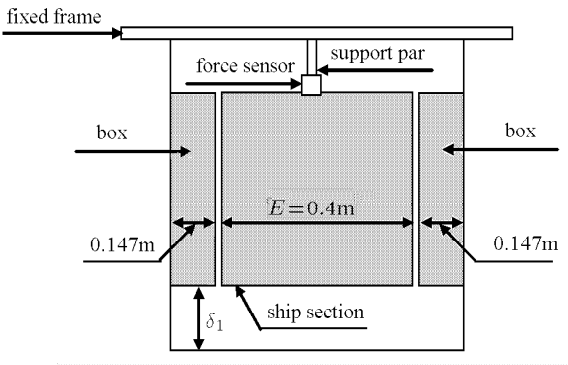


图 3 实验水槽横截面

Fig.3 The cross section of wave flume

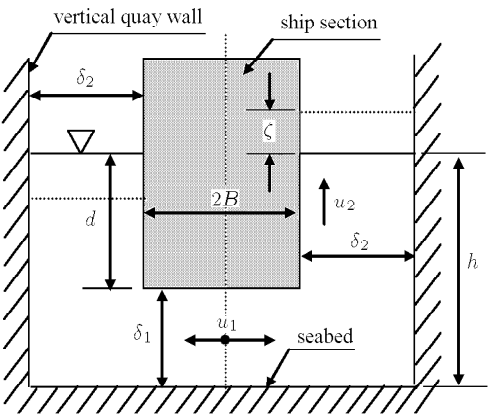


图 4 船与码头和海底之间流体自由运动示意图

Fig.4 The free motions of the fluid in the gap

3 船与海底和直立码头之间流体的自振频率

图 4 给出了由船剖面、直立码头以及它们各自沿船左侧边界 $\overline{MM}$ 的镜像所组成的封闭区域. 当封闭区域的流体 (即间隙内的流体) 在重力作用下自由晃动时, 根据刚体运动方程可得间隙内的流体运动满足

$$[(h + \zeta) + (h - \zeta)]\ddot{u}_2\delta_2\rho + 2\dot{u}_1B\delta_1\rho = -2\zeta\delta_2\rho g \quad (18)$$

或

$$h\ddot{u}_2\delta_2 + B\dot{u}_1\delta_1 = -\zeta\delta_2g \quad (19)$$

由于 u_2 沿船剖面与码头之间的间隙是不变的, 于是可以得到

$$u_2 = \dot{\zeta} \quad (20)$$

把式 (6) 和式 (20) 代入式 (19) 可得

$$\ddot{\zeta} + \omega_N^2\zeta = 0 \quad (21)$$

式中

$$\omega_N = \sqrt{g/(h + B)} \quad (22)$$

ω_N 就是间隙内流体运动的自振频率. 把 $h = 0.3\text{m}$, $B = 0.6\text{m}$, 代入式 (22) 可得 $\omega_N = 3.30$, 把 ω_N 无因次化后可得 $\omega_N/\sqrt{g/h} = 0.58$. 由 $T_N = 2\pi/\omega_N$ 可得间隙内流体运动的自振周期为 $T_N = 1.90\text{s}$, 无因次化后可得 $T_N\sqrt{g/h} = 10.86$.

4 计算结果与实验结果对比

为了检验本文数值模型的精度, 取数值计算流

体区域大小与实验中的一样, 如图 2 所示. 计算条件取与实验条件一致, 见表 1.

4.1 波面升高数值计算结果与实验结果的对比

图 5 给出了入射波周期 $T = 2\text{s}$ 造波板作椭圆余弦运动各个浪高仪位置处的波面升高数值计算结果和实验结果; 图 6 给出了 $T = 5\text{s}$ 造波板作正弦运动各个浪高仪位置处的波面升高数值计算结果和实

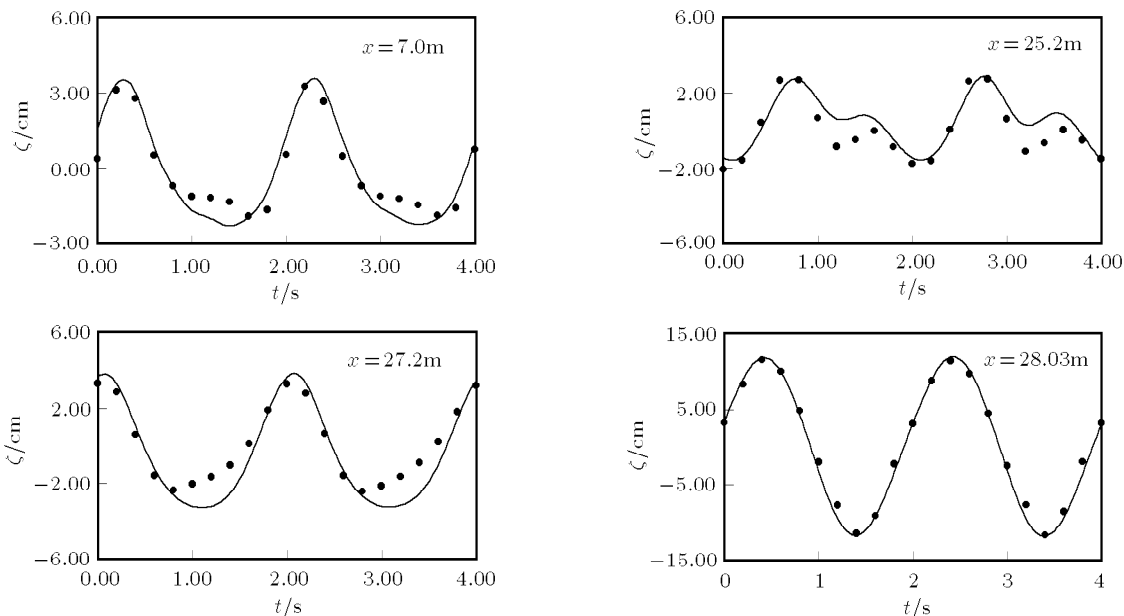


图 5 数值计算 (线) 和实验 (点) 的波面升高时间历程

Fig.5 Time history of wave elevations (Case 1: $T = 2\text{s}$, $H = 0.06\text{m}$)

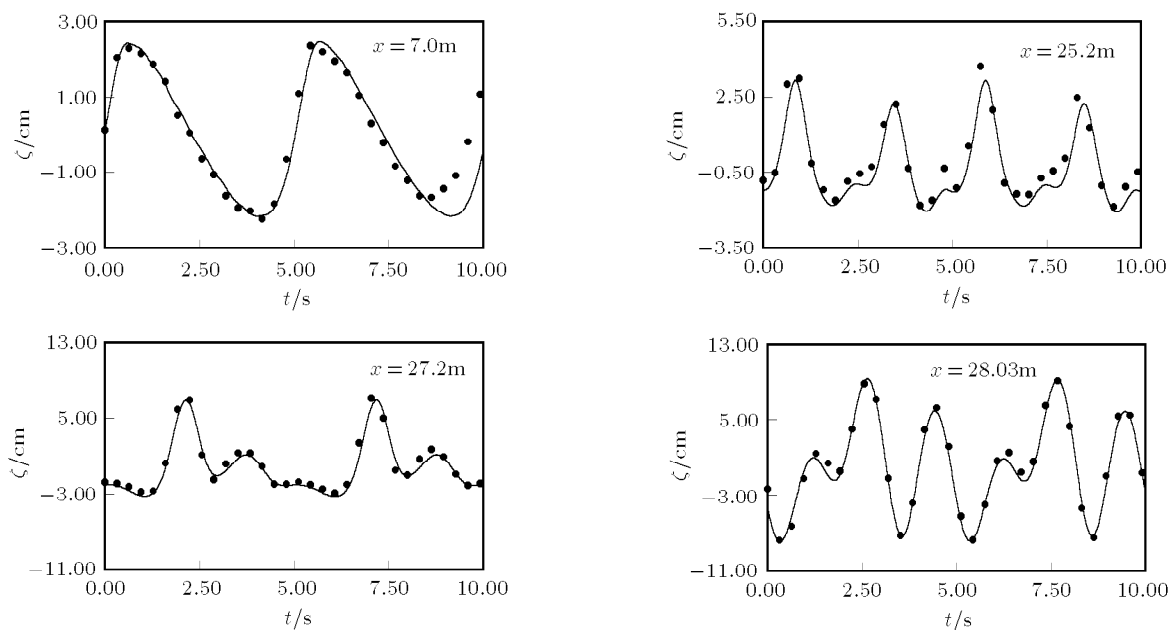


图 6 数值计算 (线) 和实验 (点) 的波面升高时间历程

Fig.6 Time history of wave elevations (Case 4: $T = 5\text{s}$, $H = 0.06\text{m}$)

验结果. 图 5, 图 6 中入射波高都为 $H = 0.06\text{ m}$. 图中: $x = 7.0\text{ m}$ 处浪高仪给出了没有任何反射波的波面升高时间历程, $x = 25.2\text{ m}$, $x = 27.2\text{ m}$ 处浪高仪给出了包括反射波的波面升高时间历程, $x = 28.03\text{ m}$ 处浪高仪给出了船与直立码头之间流体的波面升高时间历程. 图 5 中, 在 $x = 7.0$, $x = 25.2$ 和 $x = 27.2\text{ m}$ 浪高仪位置处, 数值计算结果与实验结果有一定误差, 但这并不是由该耦合模型引起的, 而是由外域数值模型算波浪水槽时引起的^[13]. 在 $x = 28.03\text{ m}$ 浪高仪位置处, 图 5 中的最大波峰 (只有 1 个波峰); 图 6 中第 3 个次峰, 都远大于对应这些图中 $x = 7.0\text{ m}$

浪高仪位置处的值. 这是因为在图 5 中, 入射波周期是 2 s ; 在图 6 中, 入射波的三次谐波周期是 1.67 s , 它们都与船与直立码头和海底之间流体的自振周期 (1.9 s) 接近, 产生共振现象所引起的.

4.2 力的数值计算结果与实验结果的对比

图 7~图 10 给出了不同入射波况下力的数值计算结果与实验结果的对比. 图中 L 为模型长度, B 为模型宽度, d 为模型吃水深度. 由图可知, 无论是水平力还是垂向力, 数值计算结果都与计算结果符合很好.

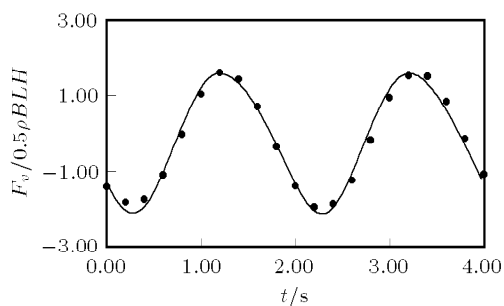
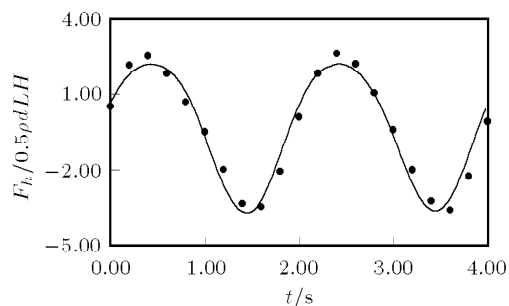


图 7 直立码头前船剖面数值计算 (线) 和实验 (点) 的水平 (左图) 和垂向 (右图) 波浪力时间历程

Fig.7 Time history of horizontal (left) and vertical (right) wave forces on ship against vertical quay (Case 1: $T = 2\text{ s}$, $H = 0.06\text{ m}$)

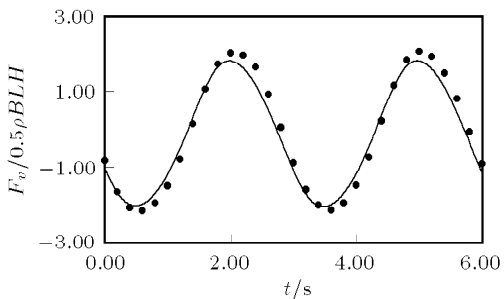
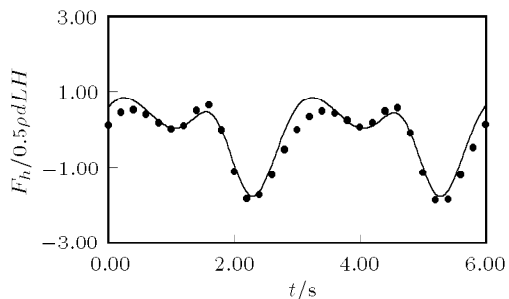


图 8 直立码头前船剖面数值计算 (线) 和实验 (点) 的水平 (左图) 和垂向 (右图) 波浪力时间历程

Fig.8 Time history of horizontal (left) and vertical (right) wave forces on ship against vertical quay (Case 2: $T = 3\text{ s}$, $H = 0.06\text{ m}$)

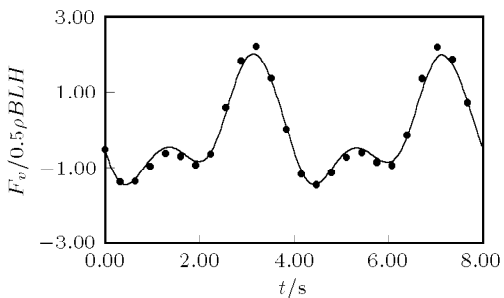
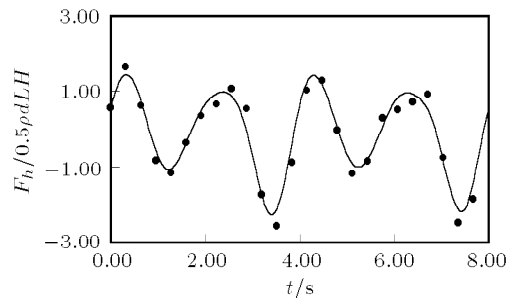


图 9 直立码头前船剖面数值计算 (线) 和实验 (点) 的水平 (左图) 和垂向 (右图) 波浪力时间历程

Fig.9 Time history of horizontal (left) and vertical (right) wave forces on ship against vertical quay (Case 3: $T = 4\text{ s}$, $H = 0.06\text{ m}$)

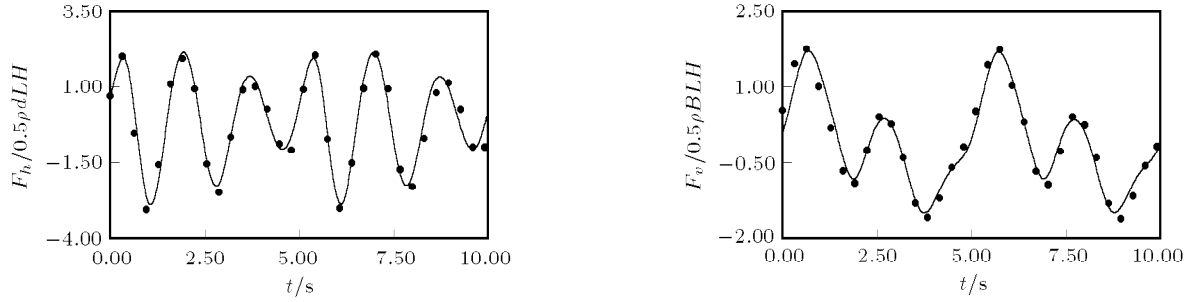


图 10 直立码头前船剖面数值计算 (线) 和实验 (点) 的水平 (左图) 和垂向 (右图) 波浪力时间历程
Fig.10 Time history of horizontal (left) and vertical (right) wave forces on ship against vertical quay

(Case 4: $T = 5\text{ s}$, $H = 0.06\text{ m}$)

5 港口内波浪非线性特征和共振现象分析

文献 [14] 给出了在没有码头情况下船所受波浪力的数值计算和实验结果. 从有直立码头和没有码头船所受波浪力对比可知: 直立码头前船所受波浪力, 尤其是水平波浪力, 不同于没有码头时船所受波浪力. 这主要是因为由于直立码头的存在, 使船与码头之间的流体容易产生共振现象. 为了对此现象进行分析, 将波浪力的时间历程 (实验结果) 进行傅里叶分析, 以便得到基频力和各高阶力的大小, 即

$$F_h(t) = F_h^{(0)} + F_h^{(1)} \sin(\omega t + \beta_1) + F_h^{(2)} \sin(2\omega t + \beta_1) + \dots + F_h^{(i)} \sin(i\omega t + \beta_i) + \dots \quad (23)$$

$$F_v(t) = F_v^{(0)} + F_v^{(1)} \sin(\omega t + \beta_1) + F_v^{(2)} \sin(2\omega t + \beta_1) + \dots + F_v^{(i)} \sin(i\omega t + \beta_i) + \dots \quad (24)$$

式中, $F_h^{(i)}$, $F_v^{(i)}$ 分别是各阶水平和垂向力的幅值, β_i 是相位角. 图 11 给出了 $H/h = 0.2$ 时直立码头前船所受水平波浪各阶力 ($F_h^{(i)}$) 和垂向波浪各

阶力 ($F_v^{(i)}$) 随 $T\sqrt{g/h}$ 的变化; 为了对比, 图 12 给出了在相同入射波要素下, 没有码头时船所受水平波浪各阶力 ($F_h^{(i)}$) 和垂向波浪各阶力 ($F_v^{(i)}$) 随 $T\sqrt{g/h}$ 的变化. 从图 11(左图) 和图 12(左图) 可以看出, 当入射波的一次谐波周期接近间隙内流体运动的自振周期 ($T_N\sqrt{g/h} = 10.86$) 时, 即入射波周期为 $T = 2\text{ s}$ ($T\sqrt{g/h} = 11.4$) 时入射波将会激发起船与码头之间流体的共振波, 使直立码头前船所受波浪水平一阶力 (见图 11 左图) 比没有码头时船所受波浪水平一阶力 (见图 12 左图) 增加了 1.32 倍, 但高阶力变化不大; 当入射波的二次谐波周期接近间隙内流体运动的自振周期时, 即入射波周期为 $T = 4\text{ s}$ ($T\sqrt{g/h} = 22.8$) 时入射波的二次谐波将会激发起船与码头之间流体的共振波, 使直立码头前船所受波浪水平二阶力 (见图 11 左图) 比没有码头时船所受波浪水平二阶力 (见图 12 左图) 增加了 1.13 倍, 但直立码头前船所受波浪水平一阶力和三阶力均减小了; 当入射波的三次谐波周期接近间隙内流体运动的自振周期时, 即入射波周期为 $T = 5\text{ s}$ ($T\sqrt{g/h} = 28.5$) 时入射波的三次谐波将会激发起船与码头之间流体的共振波, 使直立码头前船所受波浪水平三阶力 (见

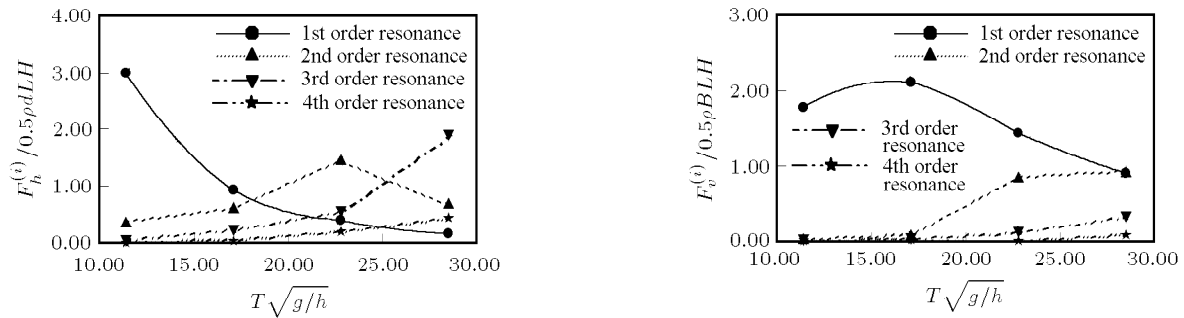


图 11 直立码头前船所受波浪水平 (左图) 和垂向 (右图) 各阶力随周期 $T\sqrt{g/h}$ 的变化

Fig.11 The effects of $T\sqrt{g/h}$ on Fourier components of experimental wave forces on ship section against vertical quay

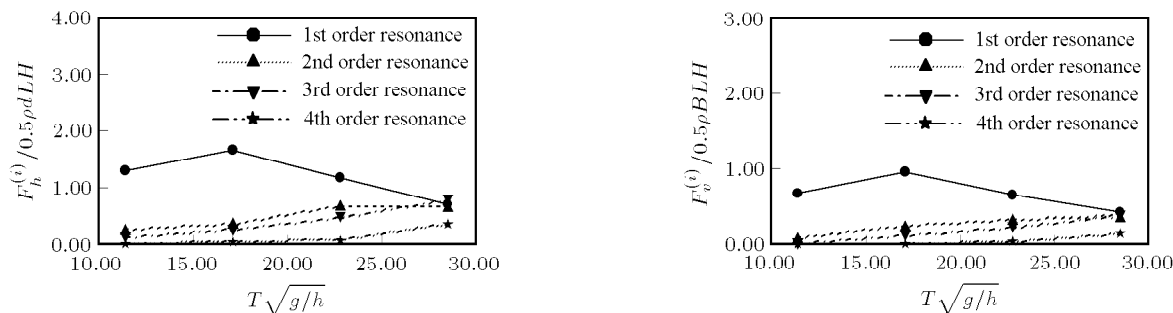


图 12 没有码头时船所受波浪水平 (左图) 和垂向 (右图) 各阶力随周期 $T\sqrt{g/h}$ 的变化

Fig.12 The effects of $T\sqrt{g/h}$ on Fourier components of experimental wave forces on ship section without any quay

图 11 左图) 比没有码头时船所受波浪水平三阶力 (见图 12 左图) 增加了 1.42 倍, 而直立码头前船所受波浪水平一阶力反而减小, 二阶力和四阶力变化不大. 从图 11(右图) 和图 12(右图) 也可以看出, 直立码头前船所受垂向波浪各阶力随 $T\sqrt{g/h}$ 的变化趋势与没有码头时船所受垂向波浪各阶力随 $T\sqrt{g/h}$ 的变化趋势相同, 说明直立码头前船所受垂向波浪力受共振影响较小.

6 结 论

推导了船与海底和直立码头之间流体运动的自振频率, 从实验和数值两方面研究了间隙内流体运动的共振现象: 当入射波浪的基频或高频与间隙内流体运动的自振频率接近时, 将会激发起间隙内流体运动的共振现象, 使直立码头前船所受水平一阶力或水平高阶力比没有码头时船所受水平一阶力或高阶力增大一倍以上.

建立了外域用 Boussinesq 方程、内域用刚体运动方程直立码头前船所受波浪力计算的垂向二维耦合模型, 两域在交界面外的连接条件是流量连续和压力相等. 进行了相关模型实验, 通过波面升高、波浪对船作用水平力和垂向力的数值计算结果与实验结果对比表明, 该耦合模型具有满意的精度, 且该方法数值处理简单, 具有良好的工程应用前景.

参 考 文 献

- 李玉成. 不规则波作用下的船舶撞击作用. 海洋学报, 1980, 3(2): 363~370 (Li Yucheng. Irregular waves striking forces on ship. *Acta Oceanologica Sinica*, 1980, 3(2): 363~370 (in Chinese))
- 邹志利. 港口内靠码头系泊船运动的计算. 海洋工程, 1995, 13(3): 25~36 (Zou Zhili. A mathematical model simulation of a ship moored against a quay in harbor. *Ocean Engineering*, 1995, 13(3): 25~36 (in Chinese))
- 齐鹏, 王永学, 贺五洲. 港口内靠码头系泊船波浪力时域模型. 清华大学学报 (自然科学版), 2003, 43(2): 262~265 (Qi Peng, Wang Yongxue, He Wuzhou. Time-domain model for wave forces on a ship moored against a quay in a harbor. *J Tsinghua Univ (Sci & Tech)*, 2003, 43(2): 262~265 (in Chinese))
- Boo SY, Kim CH, Kim MH. A numerical wave tank for nonlinear irregular waves by 3-D higher order boundary element method. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 1994, 4(4): 265~272
- Celebi MS, Kim MH, Beck RF. Fully nonlinear 3-D numerical wave tank simulation. *Journal of Ship Research*, 1998, 42(1): 33~45
- Turnbull MS, Borthwick AGL, Taylor ER. Wave-structure interaction using coupled structured-unstructured finite element meshes. *Ocean Engng*, 1995, 22: 785~798
- Wu GX, Taylor ER. Finite element analysis of two-dimensional non-linear transient water waves. *Applied Ocean Research*, 1994, 16: 363~372
- Nichols BD, Hirt CW. Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 1981, 39: 201~225
- Park JC, Kim MH. Fully nonlinear wave-current-body interaction by a 3D viscous numerical wave tank. Proceedings of the Eighth International Offshore and Polar Engineering Conference, Montreal, Canada, 1998
- 邹志利. 适合复杂地形的高阶 Boussinesq 水波方程. 海洋学报, 2001, 23(1): 109~119 (Zou Zhili. Higher-order Boussinesq equations for rapidly varying topography. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(1): 109~119 (in Chinese))
- Zou Zhili, Xu Benhe. Numerical model for solving Boussinesq-type equations: comparison and validation. *Acta Oceanologica Sinica*, 1998, 17(3): 375~386
- Zou Zhili. Higher order Boussinesq equations. *Ocean Engineering*, 1999, 26: 767~792
- 王大国, 邹志利. 非线性浅水长波的数值模拟与实验研究. 水科学进展, 2004, 15(2): 178~183 (Wang Daguo, Zou Zhili. Experimental study and numerical simulation of long nonlinear shallow water waves. *Advances in Water Science*, 2004, 15(2): 178~183 (in Chinese))
- 王大国, 邹志利. 系泊船非线性波浪力时域计算: 二维模型. 海洋学报, 2004, 26(2): 104~117 (Wang Daguo, Zou Zhili. Time

stepping solutions of nonlinear wave forces on moored ship (in Chinese))
in harbor. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 26(2): 104~117

STUDY ON NONLINEAR WAVE MOTIONS AND WAVE FORCES ON SHIP SECTIONS AGAINST VERTICAL QUAY IN A HARBOR ¹⁾

Wang Daguo^{*,†,**,2)} Zou Zhili[†] Tang Chunan^{**}

^{*}(Research Center for Numerical Tests on Material Failure, Dalian University, Dalian 116622, China)

[†](The State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Department of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

^{**}(School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract A two-dimensional time-domain coupled numerical model is developed to calculate the nonlinear wave forces acting on a ship section against vertical quay in a harbor. The fluid domain is divided into an inner domain and an outer domain. The outer domain is the area between the left side of the ship section and the incident boundary, where the flow can be expressed by Boussinesq equations. The rest area is the inner domain, which is the domain beneath the ship section plus the domain between the right side of the ship section and the vertical quay wall. The flow in the inner domain can be expressed by Newton's Second Law. Matching conditions on the interface between the inner domain and the outer domain are the continuation of volume flux and the equality of pressures. The numerical results of the coupled model agree well with the experimental data for wave elevations and wave forces. The natural frequency of the fluid motions in the gap between a ship section, seabed and vertical quay wall is derived. It is shown from the experimental data and numerical results that the resonance waves in the gap are induced by the first or higher harmonics of incident waves, and the first or higher order horizontal wave forces on the ship section against vertical quay wall increase greatly when the frequency of the harmonics of incident waves is close to the natural frequency of fluid motions in the gap.

Key words Boussinesq equations, Newton's Second Law, coupled model, resonance phenomenon, wave forces

Received 1 September 2005, revised 31 May 2006.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (59979002), the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University of China and the Project of the Educational Department of Liaoning Province of China (2005058).

2) E-mail: dan_wangguo@163.com