

文章编号: 1000-4750(2015)10-0068-07

# 三维波流耦合水槽模拟模型

丁 阳<sup>1,2</sup>, 马 瑞<sup>1</sup>, 李 宁<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘 要:** 水中结构物通常会受到波浪和水流的联合作用, 为了得到作用在结构上的波流荷载, 该文基于 Flow-3D 软件建立了三维波流水槽的模拟模型。为了准确模拟波浪和水流的相互作用, 避免将造波边界和水流边界同时叠加在入口边界处, 采用质量源造波法来实现内造波。利用 Flow-3D 的二次开发功能在水槽两端设置海绵层消波区, 并结合 Sommerfeld 辐射边界条件来实现水槽的通流消波。对波浪的传播、波流相互作用试验的流场以及波流和柱体结构相互作用试验的流场进行数值模拟, 结果表明: 所建立的三维波流水槽模型可以准确地模拟波浪和水流的相互作用以及波流对结构的联合作用, 并有效地进行消波, 避免了二次反射, 可用于波浪和水流联合作用下水中结构物波流荷载的研究。

**关键词:** 数值波流水槽; 质量源造波; 海绵层消波; 波流相互作用; 水中结构物; 波流荷载

**中图分类号:** O353.2; TV139.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.03.0190

## A SIMULATION MODEL FOR THREE-DIMENSIONAL COUPLED WAVE-CURRENT FLUMES

DING Yang<sup>1,2</sup>, MA Rui<sup>1</sup>, LI Ning<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Engineering Structures Safety, Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Marine structures are usually subjected to the combined action of wave and current. To obtain wave-current loads acting on the structures, a simulation model for three-dimensional wave-current flumes is developed based on CFD software Flow-3D. In order to simulate the interaction between wave and current accurately, a mass source is added into the flume to generate waves, avoiding the simultaneous superposition of wave and current at inflow boundaries. The sponge layers are added at both ends of the flume using the secondary development technology of Flow-3D. These added layers are further combined with Sommerfeld radiation boundary conditions to absorb waves and to allow currents to flow through the flume. Subsequently, the developed model is used to simulate the propagation of waves, the flow field of experiments on the interactions between waves and currents, and the flow field of experiments on the interactions between wave-current and cylinder structures. The comparison shows that the developed model for a three-dimensional wave-current flume can accurately simulate the wave-current interaction and the combined action acting on structures. The model can effectively absorb waves and avoid re-reflection of waves, which can be used to study the wave-current loads acting on marine structures.

**Key words:** numerical wave-current flume; mass source wave generating method; sponge layer for wave-absorbing; wave-current interaction; marine structures; wave-current loads

收稿日期: 2014-03-15; 修改日期: 2014-08-04

基金项目: 国家重点基础研究发展“973”计划项目(2011CB013606); 国家自然科学基金面上项目(51378343)

通讯作者: 李宁(1981—), 男, 山西省人, 副教授, 博士, 从事工程结构抗震研究(E-mail: neallee@tju.edu.cn).

作者简介: 丁阳(1966—), 女, 辽宁沈阳人, 教授, 博士, 博导, 从事钢结构与空间结构设计理论及工程应用研究(E-mail: dingyang@tju.edu.cn);

马瑞(1987—), 女, 天津市人, 博士生, 从事工程结构抗震研究(E-mail: hpkidmr@163.com).

近海桥梁结构、海工建筑/构筑物、近海工程结构等处于复杂的海洋环境中,将受到波浪和水流的联合作用,当水流流速相对较大时,二者对水中结构的联合作用与波浪或水流的单独作用有很大差别<sup>[1]</sup>。目前,波浪对水中结构物的单独作用已经有较多研究<sup>[2-3]</sup>,而关于波浪和水流联合作用的研究相对较少。为了保证其安全性,有必要对波浪和水流联合作用下水中结构物的动力响应进行分析,首先需要获得作用在结构上的波流荷载,现有的研究方法主要包括解析法、试验法和数值模拟法。由于数值模拟法尤其是数值波流水槽法具有节省成本和时间、不受比尺效应影响、建模自由灵活、结果测量方便等优势,主要采用数值波流水槽法对水中结构物的波流荷载进行研究。

近年来,国内外学者针对波流耦合数值模拟计算开展了不少研究。郑金海和 Mase 等<sup>[4-5]</sup>建立了波流共存时多向不规则波浪传播变形的数学模型。Zhang 和 Zheng 等<sup>[6]</sup>建立了浅水波和破碎波下波流底面边界层的模拟模型。Teles 和 Pires-Silva 等<sup>[7]</sup>采用开源软件 Code-Saturne 对波流相互作用进行了数值模拟。Kang 和 Zhu<sup>[8]</sup>采用在入口边界处叠加造波和造流条件的方法建立了数值波流水槽,研究波流与直立方柱的相互作用。该方法需以波流相互作用后的波浪要素作为输入条件,尚无法模拟二者的相互作用效应。Xiao 和 Huang 等<sup>[9]</sup>仿照实验室造波流方法,通过边界造波并在水槽中引入水流入口和出口来模拟波流相互作用。但该方法对求解稳定的流态存在一定困难,且边界造波在模拟波与结构相互作用时会产生二次反射问题。Zhang 等<sup>[10]</sup>采用在入口边界处加均匀速度造流、在质量守恒方程中添加源函数造波的方法建立了二维波流耦合模型,但波流和结构相互作用属于三维问题,有必要建立适用于波流荷载求解的三维波流耦合模型。

为了准确地模拟波浪和水流的相互作用效应,并有效地避免波流与结构相互作用产生的二次反射,本文基于 Flow-3D 软件建立了三维波流水槽的模拟模型,采用边界造流、质量源内造波的方法来实现波流相互作用,并在水槽两端加入海绵层进行消波。通过对波浪的传播、波流相互作用试验的流场以及波流与柱体结构相互作用试验的流场进行数值模拟,验证所建立模型的有效性和准确性。

## 1 数值波流水槽模型的建立

### 1.1 控制方程及求解方法

本文假定流体为不可压缩粘性流体,采用连续性方程和 Navier-Stokes 方程作为控制方程。连续性方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = 0 \quad (1)$$

Navier-Stokes 方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

式中:  $u$ 、 $v$ 、 $w$  为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的速度分量;  $A_x$ 、 $A_y$ 、 $A_z$  和  $V_F$  分别为与 Flow-3D 中 FAVOR 网格技术相关的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向可流动的面积分数和可流动的体积分数;  $\rho$  为流体密度;  $p$  为压力;  $G_x$ 、 $G_y$ 、 $G_z$  为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的重力加速度;  $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的粘滞力加速度。

为了准确模拟波浪、水流和结构物相互作用时流体产生的变形破碎,选择 RNG  $k$ - $\varepsilon$  模型作为湍流模型。湍动能  $k_T$  和其耗散率  $\varepsilon_T$  的输运方程为:

$$\frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial k_T}{\partial x} + vA_y \frac{\partial k_T}{\partial y} + wA_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right\} = P_T + Diff_{k_T} - \varepsilon_T \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + vA_y \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + wA_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right\} = \frac{CDIS1 \cdot \varepsilon_T P_T + Diff_{\varepsilon_T} - CDIS2 \frac{\varepsilon_T^2}{k_T}}{k_T} \quad (6)$$

式中:  $P_T$  为剪切效应引起的湍动能产生项;  $Diff_{k_T}$  和  $Diff_{\varepsilon_T}$  为扩散项;  $CDIS1$  和  $CDIS2$  为模型参数。

采用以分段线性平面表示自由表面的拉格朗日 VOF 对流法对流体的自由表面进行追踪。利用 GMRES(Generalized Minimum RESidual)隐式算法求解压力-速度耦合方程组。具体参见文献[11]。

## 1.2 造波方法

基于 Lin 和 Liu<sup>[12]</sup>提出的质量源造波法, 在三维数值波流水槽中  $x=0$  处添加一个体积为  $L_{ms} \times H_{ms} \times W_{ms}$  的质量源模型, 通过给定随时间变化的质量流率(Mass flow rate)或体积流率(Volume flow rate)来实现造波, 其中  $W_{ms}$  等于水槽宽度,  $L_{ms}$ 、 $H_{ms}$  和质量源模型在高度方向上的位置参照文献[12]选定。根据质量源模型产生的水体增减都用来生成目标波的假定, 可以推导体积流率  $V_{fr}$  的表达式为:

$$V_{fr} = 2C\eta(t)W_{ms} \quad (7)$$

式中: 系数 2 表示质量源在水槽中同时产生两列传播方向相反的波浪;  $C$  为目标波的波速;  $\eta(t)$  为目标波的波面方程。

质量流率为体积流率乘以流体密度。

采用 Skjelbreia 和 Hendrickson 提出的五阶 Stokes 波浪理论来描述入射波, 波面方程表达式为:

$$\eta(t) = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^5 \eta_n \cos[n(kx - \omega t)] \quad (8)$$

式中:  $k$  为波数;  $n$  为波浪的阶数;  $\omega$  为圆频率;  $\eta_n$  为波形系数, 具体表达式参见文献[13]。

于是得到体积流率为:

$$V_{fr} = \frac{2CW_{ms}}{k} \sum_{n=1}^5 \eta_n \cos[n(kx - \omega t)] \quad (9)$$

为了避免在计算初始阶段水槽中产生过大的波浪而使计算不稳定, 将体积流率的表达式乘以一个递增的包络函数, 使波浪在前三个周期内逐渐增大, 递增函数的表达式为:

$$R = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\frac{2t}{T}\right), & \frac{t}{T} \leq 3 \\ 1, & \frac{t}{T} > 3 \end{cases} \quad (10)$$

## 1.3 消波方法

本文采用海绵层结合 Sommerfeld 辐射边界条件的方法来进行数值消波, 防止波浪在边界处反射影响波形的稳定性。由于质量源造波法会在质量源两边同时产生波浪, 所以在水槽两端都要设置海绵层, 如图 1 所示。

一般海绵层的长度为波长的 1 倍~2 倍, 通过对海绵层中流体质点的速度分量进行衰减以达到消波目的。当水槽中波浪和水流共存时, 为了使水流顺利地流入和流出水槽, 采用如下关系式对海绵层中的流体质点速度进行处理:

当  $x \leq x_1$  或  $x \geq x_2$  时:

$$u'(x) = U + [u(x) - U] \cdot \mu_1(x) \quad (11)$$

$$w'(x) = w(x) \cdot \mu_2(x) \quad (12)$$

$$\mu_i(x) = \sqrt{1 - \left(\frac{x - x_i}{x_{si}}\right)^2} \quad (13)$$

式中:  $i=1, 2$ ;  $u(x)$ 、 $w(x)$  分别为每一个时间步计算完成后得到的流体质点水平速度和竖向速度;  $u'(x)$ 、 $w'(x)$  分别为经海绵层衰减后得到的流体质点水平速度和竖向速度;  $U$  为水流速度;  $\mu_1(x)$ 、 $\mu_2(x)$  分别为两端海绵层的衰减系数;  $x_1$ 、 $x_2$  分别为两端海绵层的起始位置;  $x_{s1}$ 、 $x_{s2}$  分别为两端海绵层长度。

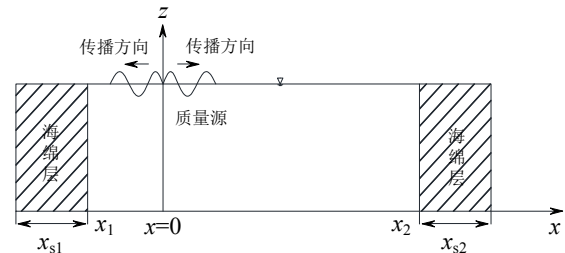


图 1 海绵层消波示意图

Fig.1 Sketch of sponge layers for absorbing waves

在 Flow-3D 中通过修改用户程序 qsadd.f 来实现海绵层消波。同时, 海绵层中单元在波浪传播方向上采用逐渐增大的网格尺寸, 以减少网格数并增加额外的数值耗散。

## 1.4 边界条件和初始条件

本文所建立的三维数值波流水槽的边界条件如图 2 所示。水槽的前端和末端, 在模拟波浪的传播时设为出流(Outflow)边界, 在模拟波浪和水流相互作用时相应地设为速度(Velocity)边界; 水槽底面设为无滑移壁面(No-slip Wall)边界; 其余各面均设为对称(Symmetry)边界。

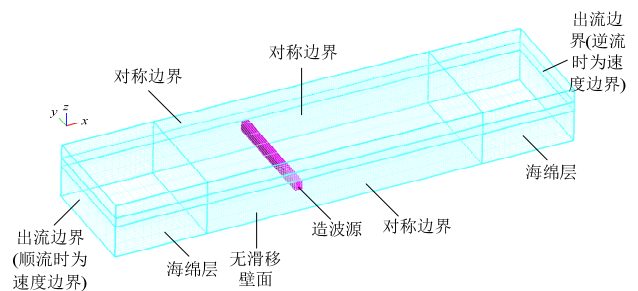


图 2 边界条件示意图

Fig.2 Sketch of boundary conditions

初始条件: 初始时刻整个水槽中的初始速度为水流速度(无流时初始速度为 0), 压强为具有沿  $z$  方向的静水压强, 采用静水水面来初始化流场。

## 2 算例计算与分析

为验证所建立的三维数值波流水槽模型造波流的准确性和消波的有效性, 分别对波浪的传播、波流相互作用试验的流场以及波流和柱体结构相互作用试验的流场进行数值模拟。

### 2.1 波浪传播的数值模拟

本文对水深  $h=2\text{ m}$ , 波高  $H=0.4\text{ m}$ , 周期  $T=2.7\text{ s}$  的波浪进行数值模拟, 通过数值解与五阶 Stokes 波理论解的对比分析, 验证所建模型造波的有效性和海绵层的消波性能。水槽尺寸为  $90\text{ m}\times 25\text{ m}\times 3\text{ m}$ , 质量源模型设在  $x=0$  处, 两侧海绵层消波段长度约为 2 倍波长。参照文献[11,14]建议的网格划分方法, 并对不同网格密度的算例进行试算, 综合考虑模拟精度和计算效率后, 本文采用如下网格划分方法: 在  $x$  方向上一个波长内约划分为 100 个网格, 海绵层内采用向边界逐渐增大的网格;  $z$  向在波高范围内加密为 11 个网格, 其余采用向两侧逐渐增大的网格;  $y$  向均匀划分为 25 个网格。

图 3 为  $t=13T$  时数值波流水槽内的三维波面图。从图中可以看出, 质量源造波处产生两列传播方向相反的波浪, 波浪在水槽中传播得比较平稳, 波高沿传播方向分布较均匀, 两侧海绵层消波区可以有效地吸收波能, 使波高逐渐衰减。将  $x=20\text{ m}$  和  $x=59.72\text{ m}$  处的波面数值解和五阶 Stokes 波理论解进行对比, 如图 4 所示。由图可知, 在  $x=20\text{ m}$  处, 可以生成波形稳定的波浪, 平均波高约为  $0.4\text{ m}$ , 数值解与理论解吻合较好。 $x=59.72\text{ m}$  处, 水面几乎没有波动, 说明波浪在海绵层内得到了充分衰减, 可以有效地防止波浪在出流边界处反射回水槽中影响波形的稳定性。以上说明本文所建模型能够准确地模拟波浪的传播, 且网格划分方法合理。

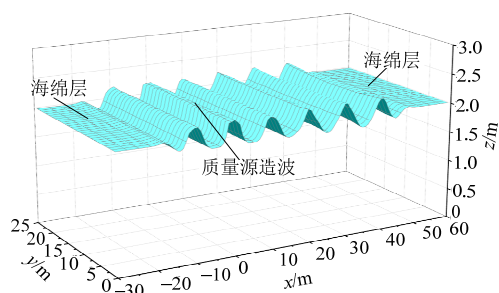


图 3  $t=13T$  时的三维波面图  
Fig.3 Three dimensional wave surface at  $t=13T$

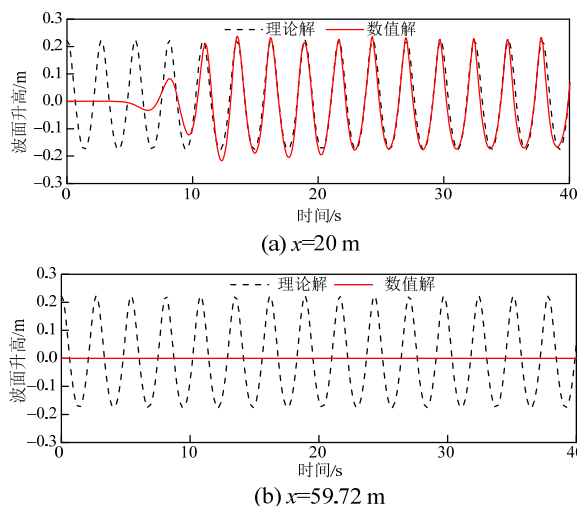
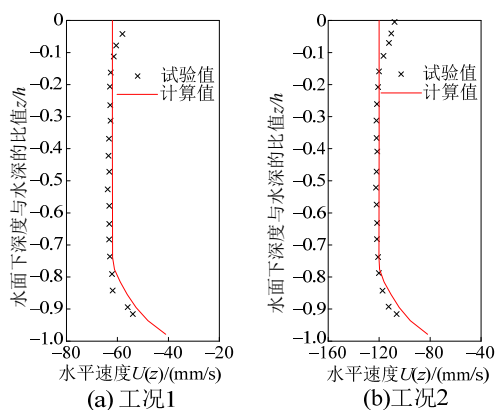


图 4 不同位置处波面数值解与五阶 Stokes 波理论解对比  
Fig.4 Comparison of numerical and fifth-order stokes theoretical results of wave trains at different locations

### 2.2 波流相互作用试验流场的数值模拟

本文对 Thomas<sup>[15]</sup>的逆流试验流场以及 Kemp 和 Simons<sup>[16]</sup>的顺流试验流场进行数值模拟, 通过将数值模拟结果与试验结果进行对比分析, 验证所建模型模拟波浪在水流中变形的准确性和海绵层在波流共存时消波的有效性。

Thomas 的试验对不同速度逆流下的波浪变形进行了研究, 试验水槽长  $27\text{ m}$ , 宽  $0.72\text{ m}$ , 水深为  $0.55\text{ m}$ , 静水中的波浪周期为  $1.25\text{ s}$ , 波高为  $0.0184\text{ m}$ , 4 种工况下水流的平均速度分别为  $-0.0597\text{ m/s}$ 、 $-0.1162\text{ m/s}$ 、 $-0.1598\text{ m/s}$  和  $-0.2030\text{ m/s}$ 。本文建立一个尺寸为  $22.5\text{ m}\times 0.7\text{ m}\times 1\text{ m}$  的三维数值波流水槽模型对 Thomas 试验的流场进行数值模拟。质量源模型设在  $x=0$  处, 两侧海绵层消波段长度为  $5\text{ m}$ 。 $x$  向、 $z$  向网格划分方法同上,  $y$  向均匀划分为 7 个网格。计算时首先在水槽中模拟水流, 待水流稳定后加入波浪以模拟二者的相互作用, 试验测得和数值计算的水流速度剖面见图 5。



(a) 工况 1

(b) 工况 2

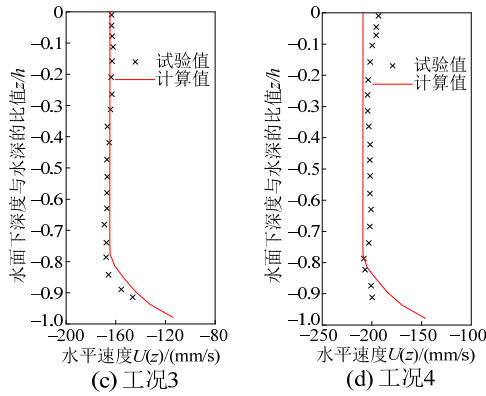


图5 试验测得和数值计算的水流速度剖面图

Fig.5 Experimental and numerical results of the flow velocity profile

图6 将  $x=5\text{ m}$  处静水中波面的数值解与五阶 Stokes 波理论解进行对比, 结果吻合较好。图7 为工况1时  $t=15T\sim 16T$  的波面曲线图, 可以看出水槽中产生了比较平稳的波流场, 波高沿程分布比较均匀, 在两端消波区内波高逐渐衰减到零, 没有出现水流壅塞现象, 说明海绵层在波流共存时可以有效地进行通流消波。

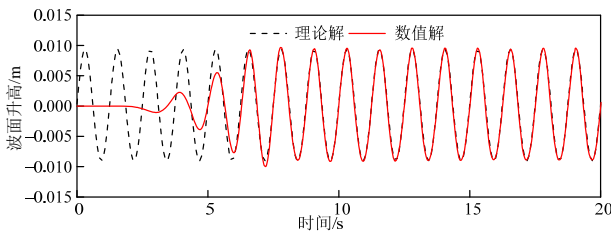


图6  $x=5\text{ m}$  处静水中波面数值解与五阶 Stokes 波理论解对比  
Fig.6 Comparison of numerical and fifth-order Stokes theoretical results of wave trains in still water at  $x=5\text{ m}$

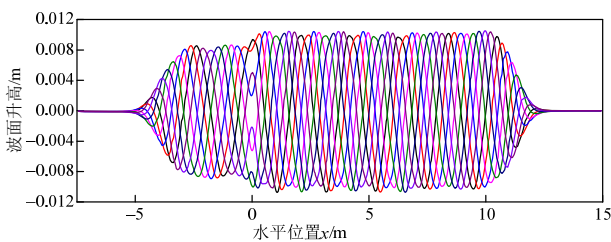


图7  $t=15T\sim 16T$  的波面曲线图(工况1)

Fig.7 Wave surfaces from  $15T$  to  $16T$  (case 1)

图8 为4种工况下  $x=5\text{ m}$  处流水中与静水中波面时程曲线对比图, 可以看出水槽中形成了波高和周期比较稳定的波流场, 波浪与逆流相互作用后波高增大, 波长减小, 且随着水流速度的增加波高和波长变化的幅度增加。4种工况下波高和波长计算值与试验值的对比见表1, 可以看出二者相差较小。将数值计算得到的4种工况下  $x=5\text{ m}$  处水平波动速度幅值与试验测得的数据进行对比, 见图9。从图

中可以看出, 计算得到水平波动速度幅值的分布趋势与试验值基本吻合, 说明模型可以较好地描述逆流作用下流速的变化特性。以上说明本文所建模型可以有效模拟波浪和逆流的相互作用。

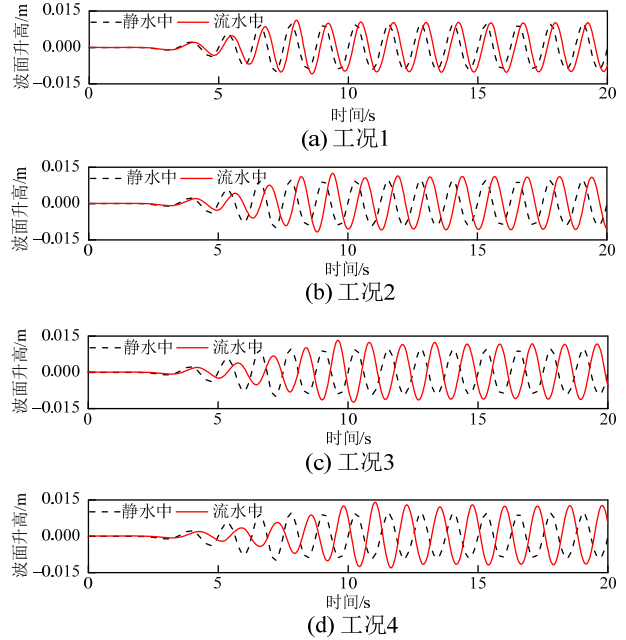


图8  $x=5\text{ m}$  处流水中与静水中波面时程曲线对比  
Fig.8 Comparison of wave trains in current and in still water at  $x=5\text{ m}$

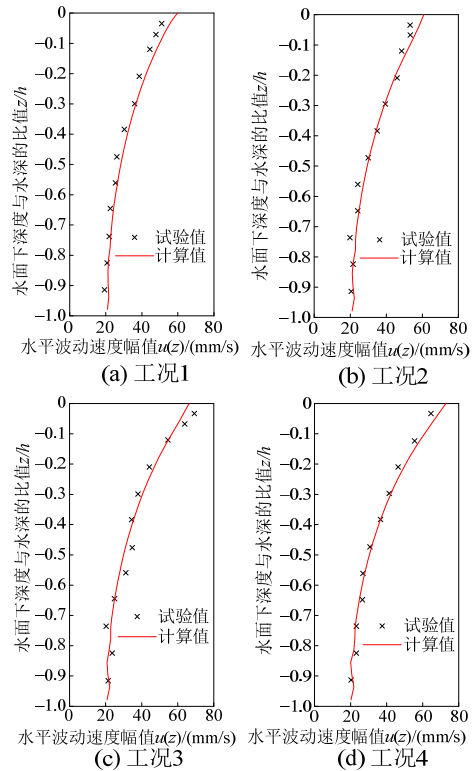


图9  $x=5\text{ m}$  处水平波动速度幅值计算值与试验值对比  
Fig.9 Comparison of numerical and experimental results of the wavelike horizontal velocity amplitude at  $x=5\text{ m}$

表1 Thomas 试验计算值与试验值的比较  
Table 1 Comparison of numerical and experimental results of Thomas tests

平均流速/(m/s)	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	
	-0.0597	-0.1162	-0.1598	-0.2030	
波高	试验值/m	0.01992	0.02122	0.02326	0.02404
	计算值/m	0.02027	0.02182	0.02288	0.02427
	相差/(%)	1.76	2.83	-1.63	0.96
波长	试验值/m	2.143	2.007	1.896	1.820
	计算值/m	2.100	1.975	1.869	1.793
	相差/(%)	-2.01	-1.59	-1.42	-1.48

Kemp 和 Simons 进行了一系列试验研究了不同波浪与顺流的相互作用, 本文选取水深为 0.2 m、波浪周期为 1 s、静水波高为 0.0544 m 的工况进行数值模拟。试验水槽长 14.5 m, 宽 0.457 m, 深 0.69 m。本文建立一个尺寸为 10.025 m×0.25 m×0.3 m 的三维数值波流水槽模型对 Kemp 和 Simons 试验的流场进行数值模拟。质量源模型设在  $x=0$  处, 两侧海绵层消波段长度为 2.5 m。 $x$  向、 $z$  向网格划分方法同上,  $y$  向均匀划分为 5 个网格。计算时首先模拟水流, 待水流稳定后加入波浪以模拟二者的相互作用, 试验测得和数值计算的水流速度剖面见图 10。

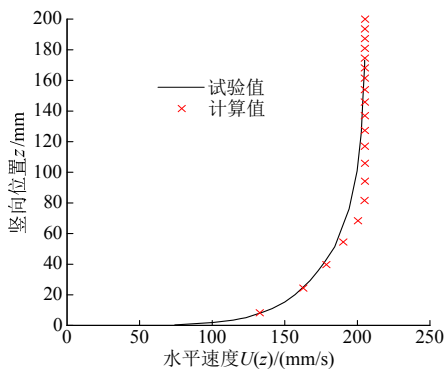


图 10 试验测得和数值计算的水流速度剖面图  
Fig.10 Experimental and numerical results of the flow velocity profile

$x=2.5$  m 处静水中波面时程曲线见图 11, 数值解与五阶 Stokes 波理论解吻合较好。流水中与静水中波面时程曲线对比见图 12, 可以看出水槽中波浪与顺流相互作用达到稳定后波高减小, 波长增大。试验测得水流中波高为 0.0444 m、波长为 1.433 m, 数值模拟得到水流中波高为 0.0426 m、波长为 1.475 m, 相差分别为-4.05%和 2.93%, 数值结果与试验结果吻合较好。此外, 将计算得到的  $x=2.5$  m 处流水中波峰下水平流速剖面与试验测得值进行对比, 见图 13, 可以看出二者吻合较好, 说明模型可以较好模拟顺流作用下流速的变化特性。以上说

明本文所建模型可以有效模拟波浪和顺流的相互作用。

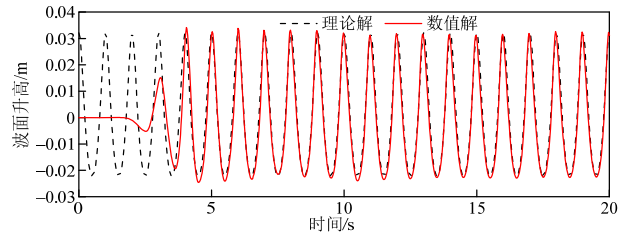


图 11  $x=2.5$  m 处静水中波面数值解与五阶 Stokes 波理论解对比

Fig.11 Comparison of numerical and fifth-order stokes theoretical results of wave trains in still water at  $x=2.5$  m

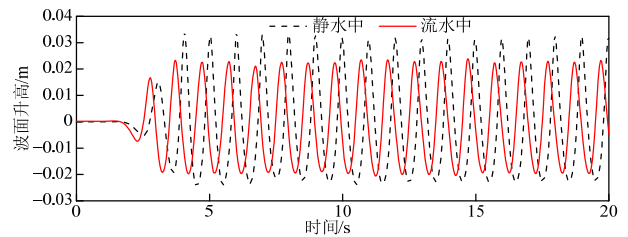


图 12  $x=2.5$  m 处流水中与静水中波面时程曲线对比  
Fig.12 Comparison of wave trains in current and in still water at  $x=2.5$  m

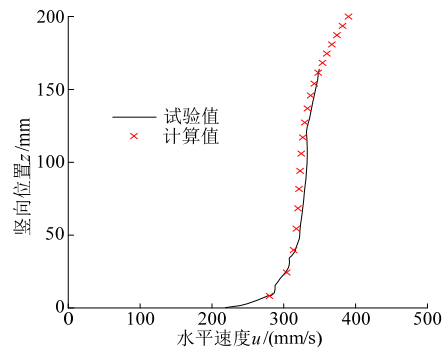


图 13  $x=2.5$  m 处流水中波峰下水平流速剖面计算值与试验值对比

Fig.13 Comparison of numerical and experimental results of horizontal velocity profile under crest at  $x=2.5$  m

### 2.3 波流和柱体结构相互作用试验流场数值模拟

聂锋、潘军宁等<sup>[17]</sup>进行了多组试验研究圆柱、方柱和矩形柱的波流荷载, 本文对水流速度为 0.15 m/s、波高为 0.04 m、周期为 0.7 s 的工况进行数值模拟, 验证所建模型模拟波流对结构联合作用的有效性。试验参数: 水槽长 64 m, 宽 1.8 m, 深 1.8 m, 试验水深为 0.5 m, 圆柱直径为 0.25 m, 方柱边长为 0.25 m(一边与波流传播方向平行), 矩形柱截面尺寸为 0.25 m×0.5 m(长边与波流传播方向平行), 均高 0.85 m。建立一个尺寸为 7.2 m×1.8 m×0.9 m 的三维数值波流水槽, 质量源设在  $x=0$  处, 两侧海绵层消波段长度为 1.6 m, 柱体置于  $x=1.6$  m

处。 $x$  向、 $z$  向网格划分方法同上； $y$  向在柱体附近 0.5 m 内均匀划分为 20 个网格，其余采用逐渐增大网格；为了准确描述柱体周围流场变化，在柱体周围增加一个嵌套网格， $\Delta x = 0.008$  m， $\Delta y = 0.0125$  m；柱体附近网格划分见图 14。计算时首先模拟水流，待水流稳定后加入波浪以模拟二者的相互作用。

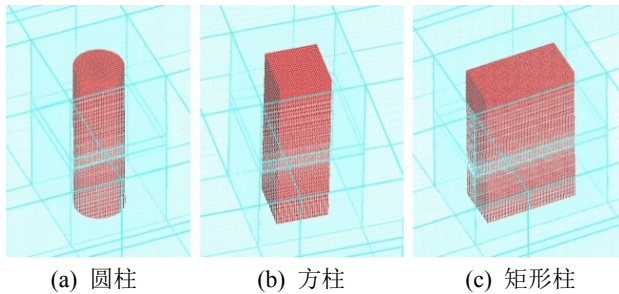


图 14 柱体结构附近网格划分

Fig.14 Mesh near the cylinder structures

首先在水槽中不加入柱体结构进行计算， $x=1.6$  m 处波面时程曲线见图 15，可以看出波流相互作用后能够形成稳定波列，测得平均周期约为 1 s，平均波高约为 0.04 m，表明柱体结构附近波流场与试验工况吻合良好。

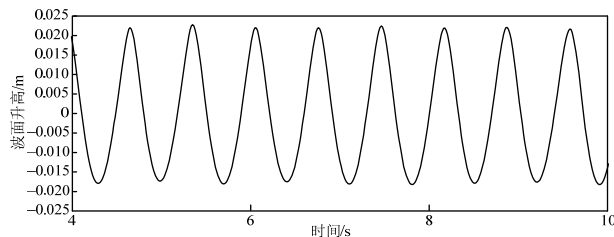


图 15  $x=1.6$  m 处波面时程曲线

Fig.15 Wave trains at  $x=1.6$  m

在水槽中加入柱体结构计算作用在柱体结构上的波流荷载，将计算出的水平最大平均波流荷载与试验结果进行对比，见表 2。可以看出：模拟结果与试验结果吻合较好，说明本文所建模型可以有效地模拟波流对结构的联合作用。

表 2 计算结果与试验结果的比较

Table 2 Comparison of numerical and experimental results

	圆柱	方柱	矩形柱
试验值/N	17.08	21.77	15.90
计算值/N	16.06	21.85	15.60
相差/(%)	-5.97	0.37	-1.89

### 3 结论

(1) 以 Flow-3D 软件为基础建立了三维波流水槽的模拟模型，采用添加质量源模型的方法实现水槽内造波，避免将造波边界和主流边界同时叠加在

入口边界处，利用软件的二次开发功能添加海绵层实现水槽的通流消波，避免波浪在边界反射影响波形的稳定性。

(2) 通过对波浪的传播、波流相互作用试验的流场以及波流和柱体结构相互作用试验的流场进行数值模拟，证明所建模型可以形成稳定的波流场，准确地模拟波浪和水流的相互作用以及波流对结构的联合作用，并有效地进行消波，避免了二次反射。

(3) 本文所建立的三维波流耦合水槽模拟模型可用于波浪和水流联合作用下水中结构物波流荷载的研究。

### 参考文献:

- [1] 李玉成, 滕斌. 波浪对海上建筑物的作用[M]. 北京: 海洋出版社, 2002: 121.  
Li Yucheng, Teng Bin. Wave action on maritime structures [M]. Beijing: China Ocean Press, 2002: 121. (in Chinese)
- [2] 沈洁, 勾莹, 滕斌. 波浪与弹性板作用的数值模拟[J]. 工程力学, 2012, 29(12): 287—294.  
Shen Jie, Gou Ying, Teng Bin. Numerical simulation of the interaction between waves and floating elastic plate [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(12): 287—294. (in Chinese)
- [3] 严开, 邹志利, 李献丽. 不同二阶绕射波浪力理论公式的结果互比[J]. 工程力学, 2013, 30(4): 28—34.  
Yan Kai, Zou Zhili, Li Xianli. The results contrast with different theory formula of second-order diffraction wave force [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4): 28—34. (in Chinese)
- [4] 郑金海, Mase H. 波流共存场中多向随机波浪传播变形数学模型[J]. 水科学进展, 2008, 19(1): 78—83.  
Zheng Jinhai, Mase H. Numerical modeling of multi-directional random wave transformation in wave-current coexisting water areas [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(1): 78—83. (in Chinese)
- [5] Zheng J, Mase H, Demirbilek Z, et al. Implementation and evaluation of alternative wave breaking formulas in a coastal spectral wave model [J]. Ocean Engineering, 2008, 35(11): 1090—1101.
- [6] Zhang C, Zheng J, Wang Y, et al. Modeling wave-current bottom boundary layers beneath shoaling and breaking waves [J]. Geo-Marine Letters, 2011, 31(3): 189—201.
- [7] Teles M J, Pires-Silva A A, Benoit M. Numerical modelling of wave current interactions at a local scale [J]. Ocean Modelling, 2013, 68: 72—87.
- [8] Kang A, Zhu B. Wave-current interaction with a vertical square cylinder at different Reynolds numbers [J]. Journal of Modern Transportation, 2013, 21(1): 47—57.

(参考文献[9]—[17]转第 88 页)

- for granular assemblies [J]. *Geotechnique*, 1979, 29(1): 47–65.
- [17] Harireche O, McDowell G R. Discrete element modeling of cyclic loading of crushable aggregates [J]. *Granular Matter*, 2003, 5(3): 147–151.
- [18] Lu M, McDowell G R. The importance of modelling ballast particle shape in the discrete element method [J]. *Granular Matter*, 2007, 9(1/2): 69–80.
- [19] 井国庆. 铁路有砟道床[M]. 中国: 中国铁道出版社, 2012.  
Jing Guoqing. Railway ballasted track bed [M]. China: China Railway Publishing House, 2012. (in Chinese)
- [20] 高亮, 刘秀波. 流变力学理论在铁路轨道结构力学研究中的应用[J]. *工程力学*, 2001, 18(6): 117–123.  
Gao Liang, Liu Xiubo. Application of the rheologic mechanics theory to track structures of railway [J]. *Engineering Mechanics*, 2001, 18(6): 117–123. (in Chinese)
- [21] 刘玉涛, 李成辉, 王豪, 史青翠. I型双块式无砟轨道传力杆受力研究[J]. *工程力学*, 2012, 29(12): 182–185.  
Liu Yutao, Li Chenghui, Wang Hao, Shi Qingcui. Stress analysis of the dowel steel in CRTS I double-block ballastless track [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(12): 182–185. (in Chinese)
- [22] Lu M, McDowell G R. Discrete element modelling of ballast abrasion [J]. *Geotechnique*, 2006, 56(9): 651–655.
- [23] Lim W L, McDowell G R. Discrete element modelling of railway ballast [J]. *Granular Matter*, 2005, 7(1): 19–29.
- [24] Indraratna B, Ngo N T, Rujikiatkamjorn C. Deformation of coal fouled ballast stabilized with geogrid under cyclic load [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, 139(8): 1275–1289.
- [25] Indraratna B, Nimbalkar S S, Rujikiatkamjorn C. Enhancement of rail track performance through utilisation of geosynthetic inclusions [J]. *Geotechnical Engineering Journal*, 2014, 45(1): 17–27.

(上接第 74 页)

- [9] Xiao H, Huang W, Tao J, et al. Numerical modeling of wave-current forces acting on horizontal cylinder of marine structures by VOF method [J]. *Ocean Engineering*, 2013, 67: 58–67.
- [10] Zhang J S, Zhang Y, Jeng D S, et al. Numerical simulation of wave-current interaction using a RANS solver [J]. *Ocean Engineering*, 2014, 75: 157–164.
- [11] 张婷. 波浪的三维数值模拟及其应用[D]. 天津: 天津大学, 2009.  
Zhang Ting. Three-dimensional numerical simulation of waves and its application [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese)
- [12] Lin P, Liu P L F. Internal wave-maker for Navier-Stokes equations models [J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1999, 125(4): 207–215.
- [13] Skjelbreia L, Hendrickson J. Fifth order gravity wave theory [J]. *Coastal Engineering Proceedings*, 1960, 1(7): 184–196.
- [14] 赵雁飞. 海上风电支撑结构波浪力及基础冲刷的三维数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.  
Zhao Yanfei. Three-dimensional numerical simulation of wave force on the offshore wind turbine structure and scour around foundation [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- [15] Thomas G P. Wave-current interactions: an experimental and numerical study. Part 1. Linear waves [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1981, 110: 457–474.
- [16] Kemp P H, Simons R R. The interaction between waves and a turbulent current: Waves propagating with the current [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1982, 116: 227–250.
- [17] 聂锋, 潘军宁, 王晓敏, 等. 大尺度柱状结构物波流荷载研究[J]. *水利水运工程学报*, 2013(3): 65–70.  
Nie Feng, Pan Junning, Wang Xiaomin, et al. A study of wave-current force acting on large scale cylinder structures [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2013(3): 65–70. (in Chinese)