

三维波流数值水槽的构建方法

李勇, 林緬

(中国科学院力学研究所, 环境力学重点实验室, 北京 100190)

摘要: 为了模拟波浪与水流的联合作用, 基于 Reynolds 平均的 Navier-Stokes 方法, 构建了一个三维波流数值水槽。使用该模型对不同出流边界条件进行了对比分析。结果表明: 引入合理的入流和出流边界条件, 可以保证在计算稳定后, 水槽平均水面基本保持不变。垂向时均流速分布的计算结果与实验数据吻合良好。这表明: 该波流数值水槽具有较好的波流特性, 可用于计算波浪与水流、以及与三维固定结构之间相互作用。

关键词: 数值波流水槽; 波流相互作用; 自由出流; 数值消波

中图分类号: TV 139.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2010)06-0865-04

Three-dimensional wave-current numerical model

LI Yong, LIN Mian

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A 3-D numerical model was developed based on the Reynolds averaged Navier-Stokes equations (RANS) to simulate the interactions of waves and currents. The model was used to compare the effects of several different boundary conditions for various inflow and outflow boundaries. The results show that the mean water level is usually constant after calculation stabilized using reasonable boundaries. The vertical distributions of the time-average velocity agree well with experimental data. The model accurately predicts the characteristics of the wave-current flows, therefore, it can be used to compute the interactions between waves and current and between wave-current and 3-D fixed structures.

Key words: numerical wave-current tank; interaction of wave and current; free outflow; numerical wave-absorbing

波浪和水流的共同作用影响和制约着海岸和近海工程中的很多物理现象。当波浪、水流联合作用时, 其流场结构以及剪应力特性与纯波以及纯流相比发生了很大变化。因此研究波流共同作用更具有现实意义。通过建立数值波浪水槽来进行仿真实验

已经成为水波动力学领域新的研究热点^[1-2]。

进入 21 世纪以来, 基于粘流理论的数值波浪水槽的研究受到了越来越多的关注^[3-4]。在模拟波流相互作用方面, 绝大多数采用势流理论进行或集中在对波流边界层结构的研究上^[5-7], 少数研究同时探讨了波流共同作用下边界层内与边界层外的流场结构^[8-10], 其中吴永胜等^[9]在建立波流边界层模型的基础上, 建立了二维全水深波流数学模型, 求解了波流共同作用下边界层内外的流场结构。丁雷等^[10]从二维 Navier-Stokes (NS) 方程入手, 应用刚盖假定, 建立了求解波浪和水流相互作用下水流流速垂直结构的数学模型。上述数学模型基于线性微幅波理论, 且都没有考虑自由面的影响。

本文基于 Reynolds 平均的 NS (RANS) 方程建立了三维波流联合作用数值水槽。首先在传统波浪数值水槽基础上, 采用了合理的波流入口, 然后通过数值实验给出了恰当的出口边界条件, 最后与实验结果的比较证明了所建数值水槽的合理性。

1 数学模型

1.1 控制方程

在本文中采用 N-S 方程, 控制方程如下所示:

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_e \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] - D_i u_i + g_i. \quad (2)$$

其中: x_j ($j = 1, 2, 3$) 表示坐标分量; u_j 表示时均流

收稿日期: 2009-05-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40776057);

国家自然科学基金重点基金资助项目 (10532070);

中国科学院知识创新工程 (KZCX2-YW-212-2)

作者简介: 李勇(1978—), 男(汉), 湖南, 助理研究员。

通讯作者: 林緬, 研究员, E-mail: linmian@imech.ac.cn

速分量; p 为压强; ρ 为水的密度; g 为重力加速度; D_i 为衰减系数, 这里通过在动量方程中加入附加源项来实现消波; $\mu_e = \mu + \mu_t$ 为有效黏性系数, μ 为水的动力黏性系数, $\mu = 1.002 \text{ mm}^2/\text{s}$, μ_t 为紊动黏性系数, 根据标准的 $k-\epsilon$ 模型给定, 即 $\mu_t = C_\mu k^2/\epsilon$; k 是紊动动能; ϵ 是紊动耗散率。 k 、 ϵ 分别满足以下方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \epsilon, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 P_k \frac{\epsilon}{k} - C_2 \frac{\epsilon^2}{k}, \quad (4)$$

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}. \quad (5)$$

其中: k 和 ϵ 分别为紊动动能和紊动耗散率的紊流 Schmidt 数; P_k 为紊动生成项。 $k-\epsilon$ 模型中的常数取为: $C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.33$ 。

1.2 计算方法及初始条件

这里采用有限体积法来对控制方程进行离散求解。瞬态项采用一阶隐式格式, 对流项和扩散项采用二阶迎风格式, 压力-速度项采用 PISO (pressure implicit split operator) 算法进行迭代计算。为了能有效地描述自由表面的复杂运动, 这里采用流体体积方法 (VOF) 方法来追踪自由水面的变化。

计算初始条件为: 压强采用静水压强。由于紊动能和紊动能耗散率的初始取值一般对计算结果影响很小, 故在计算中取一小值, 其他所有待求变量均为零。

2 边界条件的构建

侧向边界: 各物理量垂向梯度为零, 即 $\partial \phi / \partial z = 0$ 。

顶部边界: 各物理量垂向梯度为零, 即 $\partial \phi / \partial y = 0$ 。此外, 在自由表面上压力需要满足动力学边界条件, $p_s = p_a$, 其中 p_a 为大气压。在计算过程中, 需要给定自由表面所在单元的压力 $p_{i,j}$, 它可由自由面处的压力 p_s 和相邻插值单元的压力 p_c 通过线性插值得到。

底部边界: 纯波浪作用下, 由于水体往复流运动的时变性, 使床面紊动对水体的影响仅限于靠近床面附近, 此时边界条件取为不可滑移边界条件或

者完全可滑移边界条件对计算结果影响不大。但当考虑波流联合作用时, 由于流的作用, 床面紊动会从边壁附近向自由面处扩散, 随着计算时间的增加最终形成充分发展的紊流, 因此底部边界需采用壁函数进行处理。壁函数形式为

$$\frac{u^*}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y}{k_s} \right) + A + 3.0. \quad (6)$$

其中: u^* 为摩擦速度, $u_* = \sqrt{\tau}$; k_s 为壁面粗糙度; κ 为 Kaman 常数, 取值为 0.41; $A = 5.5$; y 为计算结点到边壁的距离。

上游边界: 采取造波边界条件和入流边界条件相迭加的方式给出。本文采用数值造波方法, 依据行波的解析解或数值解给定造波边界上物理量的时间变化过程。入流边界条件根据垂向平均流速和摩阻流速按对数分布规律给出。为保证计算的稳定性, 在开始造波的第一个周期内, 对所有物理量都进行关于时间的光滑处理, 即:

$$\phi_m = \phi / T, \quad t < T.$$

其中: ϕ 为造波边界条件需要指定的物理量; ϕ_m 为修正后的物理量; T 为波浪周期。

下游边界: 传统的波浪数值水槽出流边界是通过增加海绵层来消除右端边界波浪反射。对海绵层内计算结点的水平和垂向速度做衰减处理, 衰减系数计算式为:

$$D_i = \epsilon_i \sqrt{\frac{g}{h}} (n+1) \left(\frac{x-x_0}{l} \right)^n. \quad (7)$$

其中: l 为消波区长度; x_0 为能量耗散带开始位置; n 、 ϵ_i 为消波参数, 计算时取 $n=2$, $\epsilon_i=0.6$ 。

为了模拟波流联合作用, 上游边界面处水体的净输移不等于零, 而是一个正值。如果在计算区域内没有设置出流条件, 整个计算区域内水的质量将会增加, 水位也会随时间上升。为了模拟波浪联合作用情况下的自由出流, 本文提出修正传统海绵层的基本思想。水平速度的衰减关系式应满足

$$u = \bar{u} + (u - \bar{u}) / D. \quad (8)$$

其中, \bar{u} 为上一个周期计算域内的平均流速。

3 水槽品质的考察

数值算例中计算参数设置为: 平均水深 $h = 20 \text{ m}$, 波浪周期 $T = 4 \text{ s}$, 波高 $H = 2 \text{ m}$, 水流平均速度为 $U = 0.48 \text{ m/s}$ 。计算域 $xyz = 100 \text{ m} \times 24 \text{ m} \times 6 \text{ m}$, 计算网格数为 $400 \times 96 \times 24$ 。

先考察修正海绵层的实际使用效果。图 1 为 $x = 50 \text{ m}$ 位置处波面时程对比。右端不考虑自由出

流条件时,经过几个波浪周期的时间,相对于纯波浪情况,计算域内平均水面就有明显的抬升,这与实际情况是不相符的。考虑前面提出的修正海绵层时,平均水面随着计算时间呈线性抬升。这是由于计算域内水体的质量守恒没有得到精确满足造成。

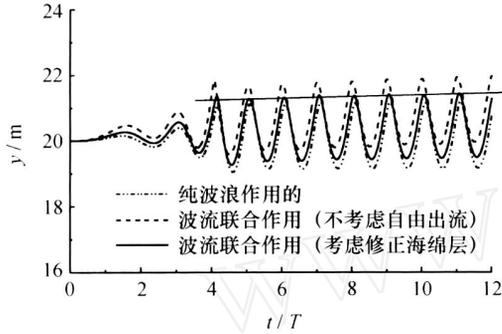


图1 考虑修正海绵层某断面处波面时程对比

为了精确地保证水槽内水体质量的守恒,我们又引入了压强出口边界条件。在右端下游边界面上设定为静水压强,用以控制计算区域内水深的变化。当水槽内水位增加时,由于水槽内压强大于边界面上的压强,水流会在水槽内压强作用下流出水槽;当水槽内水位因上游边界面输入水量为负而降低时,水槽内压强小于下游边界面上的压强,水会从右端边界面流入。这样保证了槽内水深始终为一个恒定值。追加静压边界条件后 $x = 50.0\text{ m}$ 位置处波面时程对比如图 2 所示。

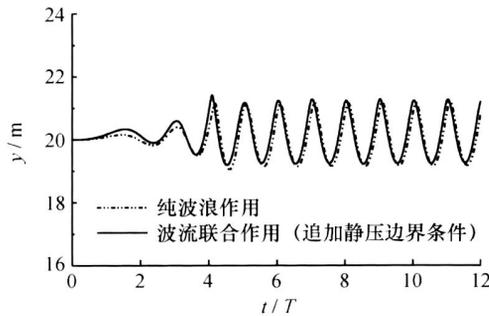


图2 追加静压边界某断面处波面时程对比

波流联合作用情况下水面有少许升高,计算稳定后水面基本保持不变。从模拟结果可以看出本文提出的修正海绵层能够保证上游边界流入的流体正常透过,避免了水面非正常持续抬升。

考察三维波流数值水槽品质优良与否除了要保证水槽内质量守恒之外,还必须考察三维波面传播的规则性。图 3 显示了某一瞬时的波流自由表面沿水槽的分布。从图可以看出波高沿程分布比较均匀,波浪传播很规整,表明修正后的海绵层能够有效

地消除计算域下游界面处的波浪反射,没有发生明显的波浪反射传回现象。上述分析表明:本文所取的修正海绵层加压强出口条件是合理的,可以用于模拟波流联合作用。

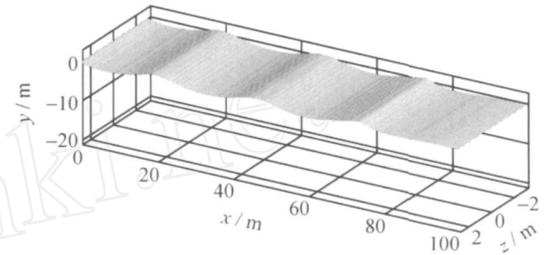


图3 三维瞬时波面图

此外,为说明三维数值波流水槽的应用能力,在水槽中固定放置一长方体结构物,用以模拟波流经过结构物的过程。在距离左端边界 30 m 位置处设置一长 4 m,高 20 m,宽 2 m 的矩形柱体,计算网格数为 $20 \times 80 \times 10$ 。算例 KC 数 (Keulegan-Carpenter number) 为 1.152, Re 数为 1.141×10^6 。KC 数的定义为: $U_m T/B$, 其中: U_m 为波浪特征流速; B 为结构特征长度。

图 4 为模拟得到的一个波浪周期内 4 个典型时刻 ($(1/4) T$ 、 $(2/4) T$ 、 $(3/4) T$ 以及 T) 波流与结构物相互作用三维瞬时波面图。从直观上看计算结果与实验图像非常相像,表明数值水槽能够比较好的实现三维模拟。

4 水槽波流特性的验证

根据 1991 年 Van Rijn 实验报告中的实验数据^[11]对本文所构建的波流水槽进行验证。选取其中的 2 组进行验证。实验参数如表 1 所示。

表1 Van Rijn 实验条件

实验编号	$\frac{h}{m}$	$\frac{H}{m}$	$\frac{T}{s}$	$\frac{U}{m \cdot s^{-1}}$
WC2	0.52	0.106	2.6	0.12
WC11	0.51	0.120	2.5	0.44

验证时计算域取为 $36.0\text{ m} \times 0.8\text{ m} \times 0.5\text{ m}$, 网格数为 $600 \times 50 \times 10$ 。图 5 为时均流速分布数值计算结果与 Van Rijn 实验实测的平均流速垂线分布的比较,两者基本上符合,验证了本文所建波流数值水槽的合理性。

此外,从图 5 还可以看出,波浪要素一定的情况下,当 U 较小时,下层水体速度比相应纯水流流速有所减小,中部水流流速比相应纯水流流速有所增

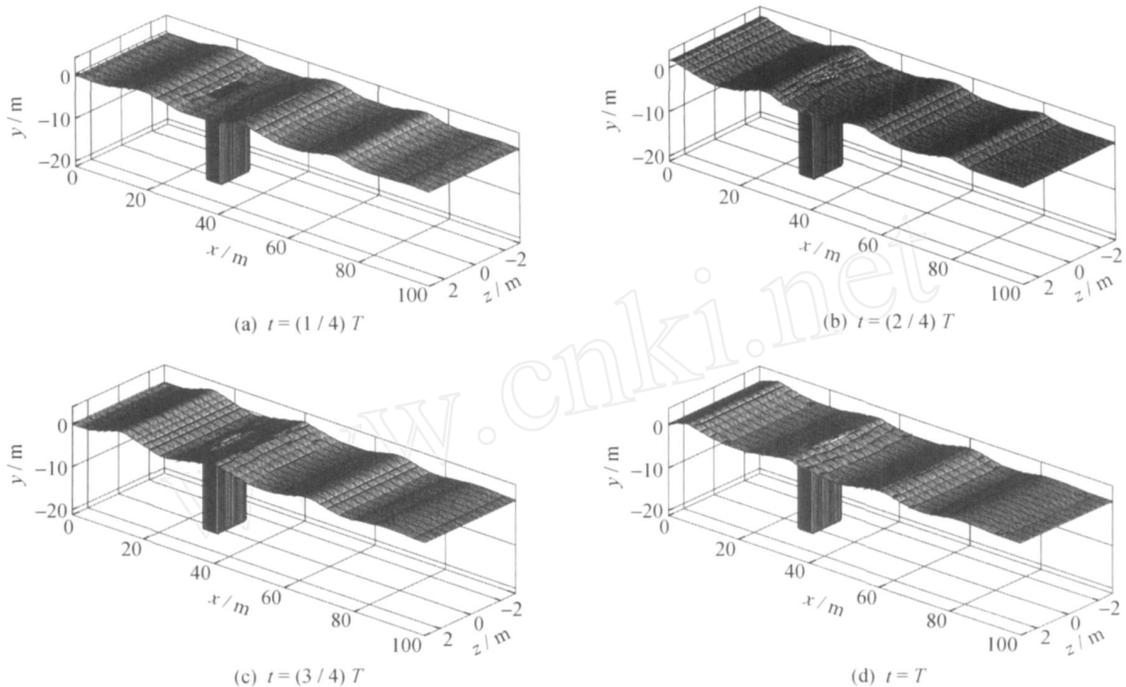


图4 波浪周期内4个典型时刻三维瞬时波面图

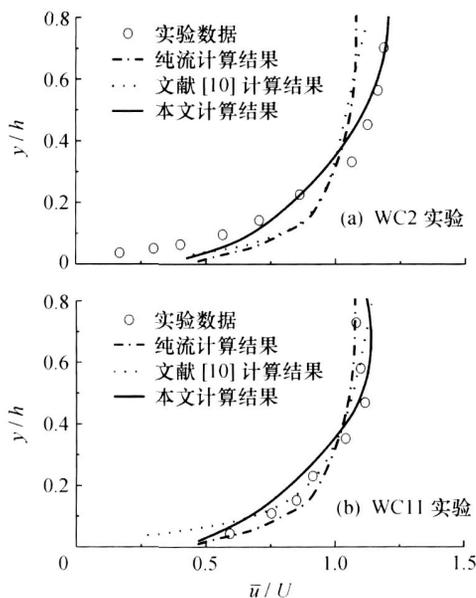


图5 本文数值结果与 Van Rijn 实验结果比较

大;当 U 较大时,时均流速分布变化较为复杂,靠近床面附近流速有所增大,而接近自由面附近水流流速比相应纯水流流速有减小趋势,这与 Kemp 等人^[12]的实验研究结论相符。文[10]在自由面处采用刚盖假定,当平均速度 U 较小时(实验 WC2),计算得到的时均速度垂向分布与纯流情况基本相同,当 U 较大时(实验 WC11),接近自由面附近水流流速比相应纯水流流速有所增大,这与实验分析结果

不尽相同。

由此可以看出:数值水槽模拟波流联合作用时,自由面处边界条件的处理方式对计算结果影响很大。为了模拟得到较好的水流垂直结构,需要采用 VOF 等方法对自由面进行精确模拟。

5 结论

本文基于 RANS 方程构建了三维波流数值水槽,并利用多个数值算例从定性和定量两方面对水槽品质和波流特性进行了分析和验证。定性计算方面,计算稳定后平均水面基本保持不变,波高沿程分布也十分均匀。这表明本文构建数值波流水槽所采用的边界条件处理方式是合理的,能够在有效地消除下游界面处波浪反射的同时使上游界面流入的流体可以正常的透过。定量计算方面,垂向时均流速分布计算结果与实验数据吻合良好。这说明三维数值波流水槽具有较好的波流特性,可以准确地模拟波流联合作用过程。

作者所编写的程序还能够实现实时提取结构物表面的压力和黏性力,得到结构物在波流联合作用下的瞬时外载荷,为进一步研究海洋结构物的响应和安全性问题打下基础。

(下转第 886 页)

- [3] Rees W, Wackernagel M. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth [M]. Gabriola Island, B. C., Canada: New Society Publishers, 1996.
- [4] 项书坚, 杜凌. 可持续发展评价与绿色 GDP 核算述评 [J]. 统计与信息论坛, 2006, 21(6): 17 - 22.
XIANG Shujian, DU Ling. Sustainable development comments and green GDP account review [J]. *Statistics & Information Forum*, 2006, 21(6): 17 - 22. (in Chinese)
- [5] 刘国, 许模, 于静. 可持续发展评价指标体系研究评述 [J]. 成都理工大学学报(社会科学版), 2007, 15(3): 29 - 33.
LIU Guo, XU Mo, YU Jing. Reviews of researches on index system of sustainable development [J]. *J Chengdu Uni Tech (Soci Sci)*, 2007, 15(3): 29 - 33. (in Chinese)
- [6] 中国科学院可持续发展战略研究组. 2004 中国可持续发展战略报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [7] 陈宏伟. 绿色 GDP: 能做到和不能做到的 [J]. 书摘, 2008(5): 45 - 47.
CHEN Hongwei. Green GDP: Able and unable to do [J]. *Digest*, 2008(5), 45 - 47. (in Chinese)
- [8] Wilson J, Tyedmers P, Pelot R. Contrasting and comparing sustainable development indicator metrics [J]. *Ecological Indicators*, 2007, 7(2): 299 - 314.
- [9] JIN Hong, HU Shanying, JIN Yong, et al. Eco-factor of economy growth evaluation method [C]//05AICHE: 2005 AICHE Annual Meeting and Fall Showcase, Conference Proceedings. Cincinnati, OH, United States: American Institute of Chemical Engineers, 2005: 13107 - 13118.
- [10] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要 [EB/OL]. (2009-05-01). http://ghs.ndrc.gov.cn/15ghgy/t20060526_70573.htm.
- [11] 中国科学院可持续发展战略研究组. 2006 中国可持续发展战略报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [12] 潘岳. 关于环境与发展问题的几点看法 [EB/OL]. (2009-05-01). <http://www.china5e.com/dissertation/environment/20070814094446.html>.

(上接第 868 页)

参考文献 (References)

- [1] 李本霞, 余锡平. 潜堤上波浪分裂现象的数值分析 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(12): 1656 - 1659.
LI Benxia, YU Xiping. Numerical analysis of wave decomposition over submerged breakwaters [J]. *J Tsinghua Univ (Sci & Tech)*, 2004, 44(12): 1656 - 1659. (in Chinese)
- [2] 吴乘胜, 朱德祥, 顾民. 数值波浪水槽及顶浪中船舶水动力计算 [J]. 船舶力学, 2008, 12(2): 168 - 179.
WU Chengsheng, ZHU Dexiang, GU Min. Computation of hydrodynamic forces for a ship in regular heading waves by a viscous numerical wave tank [J]. *J Ship Mech*, 2008, 12(2): 168 - 179. (in Chinese)
- [3] Park J C, Uno Y, Matsuo H, et al. Reproduction of fully nonlinear multi-directional waves by a 3D viscous numerical wave tank [C]//11th ISOPE. Stavanger, Norway, 2001.
- [4] 董志, 詹杰民. 基于 VOF 方法的数值波浪水槽以及造波、消波方法研究 [J]. 水动力学研究与进展, 2009, 24(1): 15 - 21.
DONG Zhi, ZHAN Jiemin. Comparison of existing methods for wave generating and absorbing in VOF-based numerical tank [J]. *Hydrodynamics*, 2009, 24(1): 15 - 21. (in Chinese)
- [5] Malarkey J, Davies A G. Modeling wave-current interactions in rough turbulent bottom boundary layers [J]. *Ocean Eng*, 1998, 25: 119 - 141.
- [6] Perlin A, Kit E. Apparent roughness in wave-current flow: implication for coastal studies [J]. *Hydraulic Eng*, 2002, 128(8): 729 - 741.
- [7] SHI John Z, WANG Yun. The vertical structure of combined wave-current flow [J]. *Ocean Eng*, 2008, 35: 174 - 181.
- [8] Dingenmans M W, Van Kester J A Th M, Radder A C, et al. The effect of the CL-vortex force in 3D wave-current interaction [C]//Proc 25th ICCE Orlando, 1996: 4821 - 4832.
- [9] 吴永胜, 练继建, 王兆印, 等. 波浪—水流相互作用模型 [J]. 水利学报, 2002(4): 13 - 17.
WU Yongsheng, LIAN Jijian, WANG Zhaoyin, et al. Interaction model for wave and current [J]. *J Hydr Eng*, 2002(4): 13 - 17. (in Chinese)
- [10] 丁雷. 波流共同作用下水流垂直结构及污染物扩散、离散系数研究 [D]. 大连理工大学, 2004.
DING Lei. Study on the vertical structure and the diffusion and dispersion of pollutants under the interaction of wave and current [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004. (in Chinese)
- [11] Van Rijn L C. Data Base: sand concentration profiles and sand transport for currents and/or waves [R]. Netherlands, Delft University of Technology, Delft Hydraulics Report H1148-04/05, 1991.
- [12] Kemp P H, Simons R R. The interaction between waves and a turbulent current: Waves propagating with the current [J]. *J Fluid Mech*, 1982, 116: 227 - 250.