

基于 FLOW-3D 的三维数值波流水槽的构建及应用研究

侯勇俊¹, 熊烈², 何环庆³, 杨晖⁴

(1. 西南石油大学 机电工程学院, 四川 成都 610500; 2. 中国石油天然气集团公司川庆钻探工程有限公司, 四川 成都 610000; 3. 宝鸡石油机械有限责任公司, 陕西 宝鸡 721002; 4. 中国石油天然气集团公司工程技术分公司, 北京 100007)

摘要: 为获得具有自由液面的三维波流水槽, 基于 FLOW-3D 有限差分程序, 选用 RNG κ - ϵ 紊流模型, 基于线性波速度入口法造波, 采用 VOF 方法对自由液面进行追踪。构建具有自由液面的三维波流联合作用数值水槽, 对比压力出流边界与 Sammerfeld 辐射边界发现, 在波流水槽内采用压力出流边界能够保持流体体积守恒, 波形稳定; 加入的孔隙结构, 不仅能保证良好的消波效果, 而且流体能够顺利通过, 对消除反射波影响效果良好; 与实验结果对比发现, 垂向时均流速与实验数据拟合较好。波流场中桩柱前形成明显下潜水流及漩涡, 是形成局部冲刷主要原因。本文所构建的波流数值模型波形稳定、具有良好的波流特性, 能较好反应波浪与水流之间的相互作用, 可进一步模拟波流场与结构物之间的相互作用或波流作用下泥沙冲刷等研究。

关键词: 三维数值水槽; FLOW-3D; 波流联合作用; 孔隙消波

中图分类号: O353.2 文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2015)09-0111-06

doi: 10.11759/hyxx20140902003

近年来, 随着计算机技术的飞速发展, 通过建立数值水槽来进行仿真实验研究日趋成为当前研究热点。数值水槽与传统的物理实验相比较, 具有后处理方便精确、低造价、易于调整试验条件、无比例尺效应等诸多优点。由于可以在不干扰流场的情况下测量数值水槽, 这能有效避免物理实验中外界因素干扰对流场的影响, 获得详细、系统的水槽数据, 因而在海洋工程、港口和近岸研究中越来越得到广泛应用。

波浪水流互作用问题是非线性科学的前沿课题, 常用的数学模型主要分为两大类: 基于势流理论^[1-2]的 Laplace 方程模型和基于 N-S 方程的黏性流模型^[3]。实际工况中, 由于波浪与结构物的相互作用, 会有如波浪破碎、波浪翻卷等复杂的三维非线性情况发生^[6], 而波浪也多是非线性波。这时, 基于势流理论不再适用, 而基于 N-S 方程的黏性流三维模型考虑流体黏性, 更接近实际。

秦楠等^[4]基于 FLUENT 程序构建了二维数值波流水池, 使用动量源项消波方法对反射波进行衰减, 获得了不同波流条件下波浪在顺流和逆流的变形。张卓等^[5]在微幅波理论简化控制方程引入 Grant-Madsen 波流边界层模型, 获得紊动切应力及流速垂向分布表达式。吴永胜^[3]等通过推导 N-S 方程建立了

二维波流互作用数学模型, 建立了波流联合作用时边界层内、外流场结构紊动数学模型, 能较好地描述波流同向和逆向时的相互作用特性。李勇^[6]等基于 Reynolds 平均的 N-S 方法考虑了波流联合作用, 建立了合理的边界条件, 具有较好的波流特性。

目前对数值水槽的研究并没有考虑自由液面的影响, 且多集中在纯波浪水槽或者二维波流水槽, 但在近岸和近海工程中实际多是受到波浪和水流的共同作用, 不同于纯波浪作用, 波流共同作用下的三维流场结构更加复杂, 构建难度更大, 针对波流水槽的研究也更有研究价值和实际意义^[6]。

本文考虑到波浪的非线性和波流互作用, 基于 FLOW-3D 有限差分程序, 采用速度入口法造波, 比较不同的出流边界对水槽的影响。使用 FAVOR 网格处理技术, 有效克服有限差分程序对复杂边界拟合不好的缺点, 建立了具有自由液面的三维数值波流水槽, 加入了孔隙结构进行消波。最后与实验数据

收稿日期: 2014-09-02, 修回日期: 2014-11-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51074132)

作者简介: 侯勇俊(1967-), 男, 四川盐亭人, 博士, 教授, 主要研究方向为海洋石油装备、石油钻采机械、机械系统动力学, E-mail: hyj2643446@126.com; 熊烈, 通信作者, 主要研究方向为海洋石油装备, 电话: 15982043914, E-mail: xionglicswpu@163.com

进行对比,验证了数值水槽具有较好的波流水力特性,并研究了桩柱在波流场中的局部冲刷。

1 数学模型以及计算方法

1.1 控制方程

本文中涉及的流体为不可压缩黏性牛顿流体。在连续性方程(公式(1))和动量方程(公式(2)~公式(4))加入了体积和面积参数。研究中加入了孔隙介质消波,为了描述流体在孔隙介质中的流动,在动量方程中加入拖曳力项 F_d 。

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

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

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

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

其中 u 、 v 、 w 分别为速度在 x 、 y 、 z 方向上的分量; A_x 、 A_y 、 A_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上的可流动面积分数。 G_x 、 G_y 、 G_z 分别为重力加速度在 x 、 y 、 z 方向上的分量; V_F 为孔隙介质占总体积的比例分数,也称孔隙率; P 为压力; f_x 、 f_y 、 f_z 分别为黏滞力加速度在 x 、 y 、 z 方向上的分量。

1.2 紊流模型

本文的紊流模型选用 RNG k - ε 模型,方程中同样加入体积参数和面积参数,紊动动能 k_T 和紊动耗散率 ε_T 满足公式(5)和公式(6):

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

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + vA_y \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + wA_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right) = \frac{C_1 \cdot \varepsilon_T}{k_T} (P_T + C_3 \cdot G_T) + D_{\varepsilon} - C_2 \frac{\varepsilon_T}{k_T} \quad (6)$$

其中 C_1 、 C_2 、 C_3 为常数项, $C_1=1.44$, $C_2=1.92$, $C_3=0.2$; P_T 为速度梯度引起的紊动动能 k 的产生项; D_{k_T} 和 D_{ε}

为扩散项。

本文所研究的模型采用拉格朗日 VOF 对流法^[9]来追踪自由液面的变化。对流项采用非守恒形式进行离散,选取中心差分格式和迎风格式相结合的离散方法。速度-压力项采用 GMRES 方法求解离散方程。在计算的初始时刻,计算域压强取为沿 z 方向的静水压强,流体初始速度为 0,液面为静水水面。

2 边界条件的构建与孔隙消波

2.1 边界条件

入口边界:在入口网格边界基于线性波理论速度入口法造波,同时加入入流边界,叠加成为波流入口边界。

出流边界:通常波浪水槽中使用 Sammerfeld 辐射边界对小振幅波进行消波,但本文研究发现 Sammerfeld 辐射边界并不适用波流水槽,在 2.3 部分将单独进行讨论。

自由液面:动力学边界条件取为 $P=P_{\text{大气}}$,并且自由液面速度分量沿法向梯度为 0,即自由液面切应力为 0。

其他边界:本模型左右两侧采用的是对称边界(Symmetry),各物理量的垂向梯度为 0,即 $\partial F / \partial y = 0$;上边界采用刚盖假定(Symmetry),各物理量的垂向梯度为 0,即 $\partial F / \partial z = 0$;底面边界采用粗糙壁面边界(rough wall),取为非滑移边界。

2.2 孔隙结构消波

孔隙结构消波方面,Tuck^[9]和 Siew 等^[10]的研究结果表明,水下的孔隙结构能够有效减小入射波能量,降低波浪振幅;Cho 等^[11]研究了具有一定倾斜角度的孔隙结构的消波性能,发现比水平板的消波性能要好。基于此,本文在出流边界设置孔隙结构,对反射波进行处理,采用斜坡式孔隙结构对数值水槽进行消波处理。

孔隙结构设置如图 1,前水槽长度为 6 倍波长,斜坡孔隙斜率为 3;矩形孔隙长为 1 倍波长,孔隙率为 0.8。

根据 Qi^[11]的实验设置算例:水槽长 15 m,约为 6 倍波长,宽 1 m,高 1 m,水深 0.5 m,波高 $H=0.104$ m,周期 $T=1.4$ s。首先计算纯波浪水槽测试孔隙消波效果。在计算纯波浪水槽中,出流边界采用孔隙结构和 Sammerfeld 辐射边界相结合进行消波, Sammerfeld 辐射边界对出流边界处理如公式(7)所示。中 U 为辐

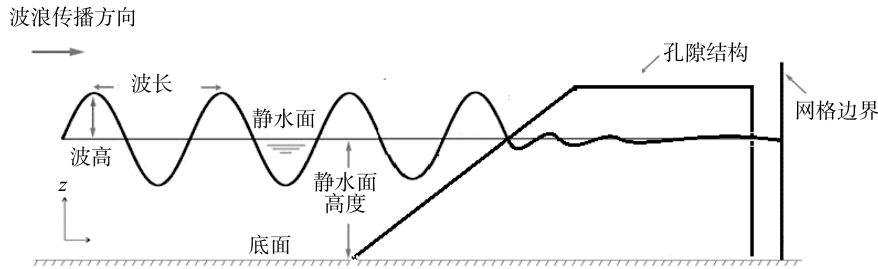


图 1 孔隙结构设置示意图

Fig.1 Definition sketch of porous structure

射变量, 在这里取为速度; n 为辐射边界法向量; C 为波浪传播速度。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + C \frac{\partial U}{\partial n} = 0 \quad (7)$$

消波效果如图 2 所示。可以看出, 当仅使用 Sammerfeld 辐射边界, 没有设置孔隙结构时, 波面波形经过几个周期之后开始受到反射波干扰, 波形趋于不稳定。加入孔隙结构之后, 经过几个周期, 波形并没有太大变化, 反射波几乎没有影响。

图 3 为波流经过孔隙结构之后自由液面高度云图。可以看出, 由速度入口法造波, 波形稳定, 沿波浪传播方向波高分布均匀完整; 经过孔隙结构之后, 波高明显降低, 波浪能量减小。表明本文所采用的造波方法合理, 孔隙结构消波效果良好。

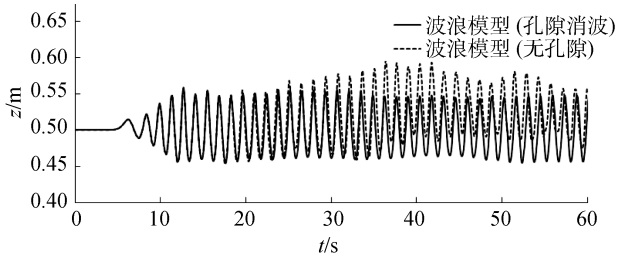


图 2 孔隙消波前后波面对比

Fig.2 Comparison of wave elevation before and after absorbed in porous structure

自由液面高度/m

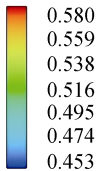


图 3 孔隙消波自由液面三维瞬时波面图

Fig.3 Change of free-surface after wave absorb

2.3 出流边界处理

为了考察不同的出流边界对水槽的影响, 分别设置出流边界为 Sammerfeld 辐射边界和压力出流边界。这里同样按照 Qi^[12]实验设置算例。分别计算纯波浪水槽和波流水槽, 水流速度 $v=0.23$ m/s。

在波流水槽中, 出流边界使用纯波浪水槽的 Sammerfeld 辐射边界时, 图 4 为 $x=5$ m 处波高时程图。由图 4 可见, 无论考虑孔隙介质与否, 此时水槽已经不能保持水槽内流体体积守恒。这是由于入口边界水流进入水槽, 出流边界不能有效控制水流流出, 流体体积增加, 水位随着时间而上升, 这并不符合实际情况。

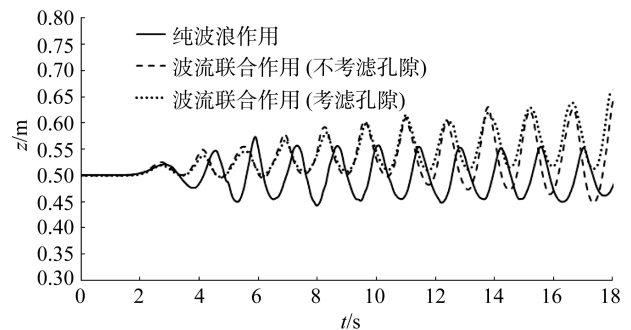


图 4 $x=5$ m 处波流联合与纯波浪波高时程对比

Fig.4 Comparison of wave elevation between wave-current flume and wave flume at $x=5$ m

本文在波流水槽中, 将右端出流边界考虑为压力出口边界, 压力为静水压强。图 5 为引入压力出口边界之后与纯波浪波高时程在 $x=5$ m 处对比图。可以看出, 在采用了压力出流边界时, 当水槽内水位高于正常水位, 压力逼迫水流流出边界, 降低水槽内水位; 当水槽内水位低于正常水位时, 边界压力使得水流流入水槽内, 水位上升, 保持水槽内体积守恒。稳定之后, 波流联合作用时的波形、纯波浪时的波形与理论值拟合较好。这表明, 所采用的压力出

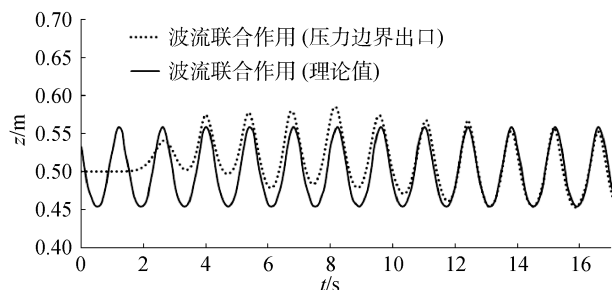


图 5 引入压力出口边界波高时程对比

Fig.5 Comparison between wave-current flume and wave flume at $x=5$ m

流边界条件合理, 维持水槽内流体体积守恒作用较好, 加入的孔隙结构消波效果良好。

3 水槽波流特性的验证

为了验证水槽的波流特性, 选取 Van^[13]的实验报告的数据进行计算, 并对本模型的波流特性结果进行验证, 实验条件如表 1 所示。

表 1 Van 的实验条件^[13]

Tab.1 Van's experiment condition^[13]

实验编号	水深(m)	波高(m)	周期(s)	流速(m/s)
WC3	0.52	0.121	2.5	0.1
WC11	0.51	0.119	2.5	0.44

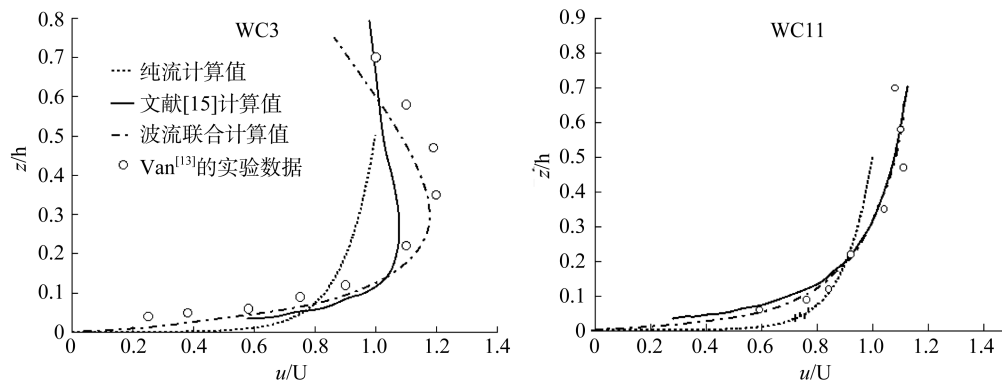


图 6 本文计算结果与 Van^[13]实验结果比较

Fig.6 Comparison between the numerical results and Van Rijn's measured results

4 波流水槽应用研究

为了研究波流场中圆形桩柱的影响, 在 WC3 流场中加入 $D=0.1$ m 的圆柱形桩柱。

图 7 为桩柱在水流方向的截面速度矢量图(沿桩柱中心线 x 轴方向截面), 由图 7 可以看出, 由于边界层水流速度梯度存在, 下部水流遭遇桩柱时形成下

水槽长度设置约为 6 倍波长, 模型大小设置为 $36 \text{ m} \times 0.8 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, 边界条件和孔隙结构设置如上文所述, 为验证底部边界处理方式是否合理, 分别计算了纯水流状态和波流联合状态。待水槽内波形稳定和紊流充分发展之后, 垂向流速如图 6 所示。可以看出, 底部床面由于受黏性作用, 迅速形成边界层, 中上部受下边界影响最小。纯水流流速与充分发展的水力光滑紊流流速相比, 基本符合; 波流水槽计算出的时均流速与 Van 的实验结果基本符合, 水流垂直结构较好。而丁雷^[15]在计算中上部边界使用的刚盖假定, 在水流速度较快时(WC11)计算结果与本文结果一致; 水流速度较慢时(WC3), 从图中可以看出, 与实验值以及本文计算结果相差较大, 表明本文计算结果较为合理。

同时, 从图中还可以看出, 与纯水流状态的流速相比, 波流联合作用状况下, 在接近自由液面时, 流速比纯水流状况的流速要大; 在靠近底部床面时, 波流联合的流速比纯水流流速要小。并且随着水流流速的增大, 这种流速的变化有减小的趋势。这个结果与 Kemp 等^[14]的研究结果一致。

与实验数据对比之后可以看出, 计算结果与实验数据拟合较好, 本文波流数值模型对底部边界和自由液面的处理方式合理可行, 能较好地模拟波流联合作用时的水流垂直结构。

潜水流和旋涡, 增大桩柱周围水流切应力, 有学者认为这是桩柱周围形成泥沙的局部冲刷的主要原因。

此外, 基于 FLOW-3D 的本模型还能提取底部边界的临界切应力, 并加入由研究人员自定义的泥沙运输模型, 能够用于波流状态下泥沙启动和局部冲刷研究。

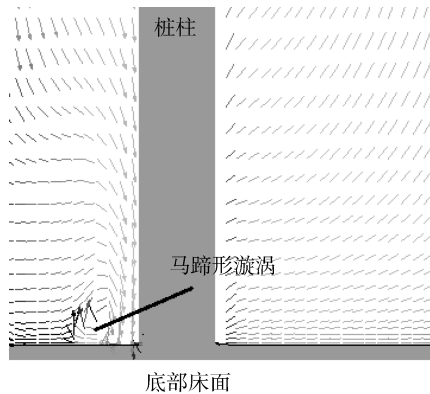


图 7 桩柱前的下潜水流
Fig.7 Down flow before pier

5 结论

本文模型建立是基于 FLOW-3D 有限差分程序构建了波流联合水槽, 研究表明:

- 1) 定性分析了孔隙结构的消波效果, 设置的孔隙结构能够有效消除波浪反射, 在获得良好消波效果的同时, 保证水流顺利通过孔隙结构。
- 2) 比较不同边界对水槽的影响, 研究表明, 选取压力出流边界为出流边界, 能够很好地消除波流水槽水位上升带来的影响, 保持水槽内水位稳定。
- 3) 与国内外研究多次引用的实验数据进行对比, 基本吻合, 具有良好的波流特性。
- 4) 波流场中, 圆柱前端形成明显下潜水流, 这是桩柱产生局部冲刷的主要因素, 波峰经过桩柱时, 发生波浪破碎。

本文所构建的波流模型合理可靠, 且 FLOW-3D 是美国 Flow Science 公司开发的广泛应用于水利工程、环境工程的流体动力学软件。程序的前处理、计算、后处理可在同一界面进行, 使用方便。具有如泥沙模型、多孔介质模型、波浪模型等多种可由用户自定义的物理模型, 能够模拟如湍流、层流、多相流、自由表面流、化学反应、传热等复杂物理现象, 友善的人机交互和极高的易用性, 为进一步研究河海和近海建筑物在波流条件下的互作用提供了很好的方法。

参考文献:

[1] Perlin A, Kit E. Apparent roughness in wave-current flow: implication for coastal studies [J]. Hydraulic Eng,

2002, 128(8) : 729-741.

- [2] SH I John Z, WANG Y. The vertical structure of combined wave-current flow [J]. Ocean Eng, 2008, 35: 174-181.
- [3] 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, 04: 13-17.
- [4] 秦楠, 鲁传敬, 李杰. 数值波流水池构造方法研究[J]. 水动力研究与进展, A 辑, 2013, 28(3): 349-356.
- [5] 张卓, 宋志尧, 孔俊. 波流共同作用下流速垂线分布及其影响因素分析[J]. 水科学进展, 2010, 21(6): 801-807.
- [6] 李勇, 林緬. 三维波流数值水槽的构建方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, (50)06: 865-868, 886.
- [7] 黄华, 邓冰, 陈昱松, 等. 数值波浪水槽构建与二阶 Stokes 波仿真[J]. 系统仿真学报, 2012, 1: 227-231.
- [8] Barkhudarov M R. Lagrangian VOF advection Method for Flow-3D[K]. Flow Science Inc Technical Note Fsi03tn63r, 2004.
- [9] Tuck E O. Matching Problem Involving Flows Through Small Holes [J]. Adv Appl Mech, 1975, 15: 89-158.
- [10] Siew P F, Hurley D G. Long Surface Waves Incident on A Submerged Horizontal Plate [J]. Fluid Mech, 1977, 83: 141-151.
- [11] Cho I H, Kim M H. Wave Absorbing System Using Inclined Perforated Plates [J]. Fluid Mech, 2008, 608: 1-20.
- [12] Qi W G, Gao F P. Physical modeling of local scour development around a large-diameter monopile in combined waves and current [J]. Coastal Engineering, 2014, 83: 72-81.
- [13] Van Rijn L C. Data Base: sand concent ration profiles and sand transport for current sand / or waves [R]. Netherlands , Delft University of Technology, Delft Hydraulics Report H 1148-04/05, 1991.
- [14] 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.
- [15] 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: 大连理工大学, 2004.

Three-dimensional wave-current numerical model and application based on FLOW-3D

HOU Yong-jun¹, XIONG Lie², HE Huan-qing³, YANG Hui⁴

(1. Southwest Petroleum University, School of Mechanical Engineering, Chengdu 610500, China; 2. CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Chengdu 610000, China; 3. CNPC Baoji Oilfield Machinery CO., LTD, Baoji 721002, China; 4. China National Petroleum Corporation, Beijing 100007, China)

Received: Sept., 2, 2014

Key words: Three-dimensional numerical flume; FLOW-3D; wave-current interaction; wave-absorbing

Abstract: In order to obtain three-dimensional numerical wave-current flume with free surface. Based on FLOW-3D with RNG $k-\varepsilon$ turbulence model, the Volume of Fluid (VOF) method was used to track the nonlinear free surface. Contrast pressure outflow boundary and Summerfield radiation boundary show that pressure outflow could maintain fluid volume conservation. And the reflected waves can be absorbed in porous structure at the rear part of the wave flume. Compared with the experiment, it shows that this numerical model accurately predicts flow vertical distribution characteristics and the interaction between waves and currents. Down flow and eddy can be observed in the front of cylinder. The numerical wave-current model can be used to simulate the interaction between wave-current and structures, or sediment scour in wave-current.

(本文编辑: 李晓燕)