



规则波作用下方形排柱附近 水流特性数值模拟*

王泽能¹, 刘世建², 吕文舒³, 陈 瑞⁴

(1. 广西北部湾投资集团有限公司, 广西 南宁 530022;

2. 广西交科集团有限公司, 广西 南宁 530022; 3. 北京工业大学, 北京 100124;

4. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410015)

摘要: 为研究规则波作用下方形排柱附近流动特性, 基于计算流体力学软件 FLOW-3D, 运用质量源造波方法, 离散 RNG $k-\varepsilon$ 方程控制下的雷诺时均 Navier-Stokes 方程建立无反射三维数值波浪水槽。与物理模型试验结果对比, 建立的数值模型性能良好。运用数值计算结果, 分析排柱周围自由表面三维运动特征和方形排柱周围速度场与涡量场分布特性, 采用无量纲方法分析方形排柱后方波浪透射系数 K_t 的变化规律。结果表明: 规则波作用下方形排柱周围流场呈周期性变化规律, 最大涡量值在方形排柱单柱的上下游角隅区交替出现。在数值模拟试验范围内, 透射系数 K_t 随波陡 H/L 的变化略有波动, 但不显著; 透射系数 K_t 随相对水深 d/L 的增大逐步减小。

关键词: 方柱; 规则波; 水流特性; 透射系数; 数值模拟

中图分类号: TV 92; U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)02-0016-07

Numerical simulation of flow characteristics around square columns under regular waves

WANG Ze-neng¹, LIU Shi-jian², LYU Wen-shu³, CHEN Rui⁴

(1. Guangxi Beibu Gulf Investment Group Co., Ltd., Nanning 530022, China;

2. Guangxi Transportation Science and Technology Group Co., Ltd., Nanning 530022, China;

3. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

4. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410015, China)

Abstract: To study flow characteristics around square columns under regular waves, this paper establishes a non-reflective three-dimensional (3D) numerical wave flume with a mass-source wave generation method and the Reynolds time-averaged Navier-Stokes equation under the constraint of a RNG $k-\varepsilon$ turbulence model in FLOW-3D. The built numerical model works well compared with the physical model. With the results of numerical calculations, the paper analyzes the 3D motion characteristics of the free surface around columns and the distribution characteristics of the velocity field and vorticity field around square columns. The changing law of the wave transmission coefficient K_t behind the square columns is explored using a dimensionless method. The results show that the flow field around the square columns changes periodically under regular waves, and the maximum vorticity alternately appears at the upper and lower corners of a single column among the square columns. Within the scope of the numerical simulation test, K_t fluctuates slightly with the change of the wave steepness H/L but not significantly and gradually decreases with the increase in the relative water depth d/L .

Keywords: square column; regular wave; flow characteristic; transmission coefficient; numerical simulation

收稿日期: 2021-04-01

*基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2015CB057705)

作者简介: 王泽能(1971—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事交通工程研究。

波浪与方柱相互作用是流体力学领域的经典问题,相关研究开展较早。万德成等^[1]运用VOF方法追踪自由表面,较早地建立了孤立波翻越直立方柱流动的数值水槽;李玉成等^[2]通过试验研究,对方柱在规则波作用下的流场特征进行了初步探讨。

近年来,随着多种透空式防波堤^[3-4]、透水丁坝^[5]、透水潜坝等^[6]新型建筑物的提出,波浪、水流作用下透空结构周围水动力特性正引起相关研究学者与工程技术人员的注意。结合恰当的湍流模型开展数值模拟研究,可充分了解此类结构周围流场特征组成部分。曹洪建等^[7]运用naoe-FOAM-SJTU求解器,模拟三维溃坝波在方柱周围剧烈流动的过程,计算结果与试验数据吻合较好。蒋昌波等^[8]、姚宇等^[9]先后在孤立波条件下对圆形排柱周围水动力特性进行了数值模拟研究。海显盛等^[10]采用Boltzmann方法成功模拟了弯曲河道方形桥墩周围的紊动特征。陈浩民等^[11]运用有限元方法离散Berkhoff缓坡方程计算非淹没双直立圆柱周围波高分布。殷铭简等^[12]采用OpenFoam建立数值波浪水槽,探讨孤立波与密排桩防波堤相互作用的数值模拟研究。从近期相关成果可以看出,排柱式防波堤^[13]、海洋钻井平台、跨海大桥与海上风电场等^[14]都有排柱类结构的运用。然而前人大多是研究单个方柱在孤立波背景下的流动特性,或是圆形排柱周围流动特性,对于规则波作用下方形排柱周围的水流特性认识尚有不足。关于规则波同方形排柱的相互作用问题尚有待进一步研究。

本文基于FLOW-3D计算流体力学软件,采用RNG $k-\varepsilon$ 方程控制的N-S方程配合VOF自由表面追踪方法建立波浪-方形排柱相互作用水槽,对规则波作用下方形排柱附近的流动特征进行数值模拟研究,可为相关实际工程提供参考。

1 数学模型

1.1 控制方程

采用连续方程和雷诺时均N-S方程作为波浪

作用下方形排柱附近周围流体运动的控制方程。

连续方程:

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

N-S方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \end{cases} \quad (2)$$

式中: t 为时间; ρ 为水的密度; P 为压力; u 、 v 、 w 分别为各方向上的速度分量; A_x 、 A_y 、 A_z 分别为各方向上的面积分数; G_x 、 G_y 、 G_z 分别为各方向上的重力加速度; V_F 为体积分; f_x 、 f_y 、 f_z 分别为各方向上的黏滞力加速度。

1.2 湍流模型选择

大涡模拟和RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型均具有准确模拟结构物周围流场特征的能力,但大涡模拟需要占用大量的计算资源,并需要非常精细的网格,综合计算能力与处理成本高。选用RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,模型紊动动能 k_T 和紊动耗散率 ε_T 的表达式如下:

$$\frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial k_T}{\partial x} + vA_y \frac{\partial k_T}{\partial y} + wA_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right) = P_T + G_T + D_{k_T} - \varepsilon_T \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + vA_y \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + wA_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right) = \frac{C_1 \varepsilon_T}{k_T} (P_T + C_3 G_T) + D_\varepsilon - C_2 \frac{\varepsilon_T^2}{k_T} \quad (4)$$

式中: P_T 为速度梯度产生的紊动动能; G_T 为浮力产生的紊动动能; C_1 、 C_3 分别取1.42和0.20, C_2 由 k_T 和 P_T 计算得到; D_{k_T} 和 D_ε 分别为对应面积分数和体积分上的紊动扩散项。

1.3 数值水槽源项设定

参考Lin^[15]提出的质量源造波法,在数值水槽中添加一个长 L 、宽 W 、高 H 的质量源模型,通过给定质量源模型上随时间变化的体积流率来实

现波浪模拟，具体的体积流率 V_{fr} 表达式如下：

$$V_{fr}=2c\eta(t)W \tag{5}$$

式中： c 为波浪传播速度； W 为水槽宽度； $\eta(t)$ 为波面方程。在波浪模拟的前 3 个周期内，对体积流率叠加包络函数 R ，预防计算发散。

$$R=\begin{cases} 1-\exp\left(-\frac{2t}{T}\right) & \left(\frac{t}{T}\leqslant 3\right) \\ 1 & \left(\frac{t}{T}>3\right) \end{cases} \tag{6}$$

1.4 边界条件设置

在模拟波浪传播时，底部为无滑移固壁边界；顶部为对称边界；两侧为对称边界；为了保持水槽内的水体质量守恒，水槽出入口均设置成压力边界，并给定静水压强和静水位高程值。质量源模型两侧均有波形生成，在水槽出入口设置 1~2 倍波长海绵层区域。试验段布置在水槽中段 $x=10\text{ m}$ 处，并将加密嵌套网格设为对称边界，数值水槽布置见图 1，方形排柱模拟段几何参数见图 2。

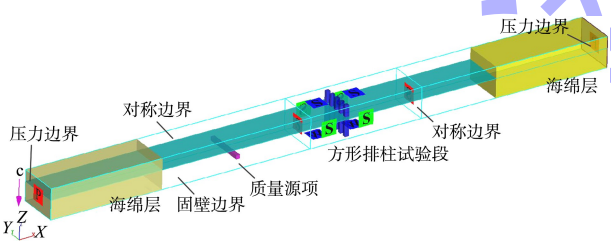


图 1 边界条件

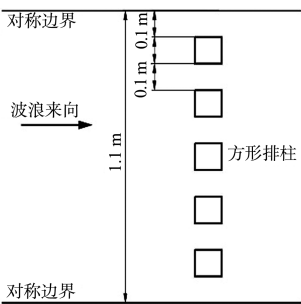


图 2 模拟试验段布置

1.5 自由表面追踪方法

FLOW-3D 软件采用三步流体体积法 (Tru-VOF) 来追踪自由液面的流动情况。当界面参数 $a_w=0$ ，当前网格中视为不存在液体；当界面参数 a_w 的取

值在 0~1，表示当前网格气液共存；当界面参数 $a_w=1$ ，表示当前网格被液体充满，不存在气体。气、液交界面追踪由以下方程来求解：

$$\frac{\partial a_w}{\partial t}+\frac{\partial a_w}{\partial x_i}=0 \quad (i=1,2,3) \tag{7}$$

VOF 法流体体积函数为 $F=F(x,y,z,t)$ ，其表达形式如下：

$$\frac{\partial F}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left\{\frac{\partial (FA_xu)}{\partial x}+\frac{\partial (FA_yv)}{\partial y}+\frac{\partial (FA_zw)}{\partial z}\right\}=0 \tag{8}$$

1.6 模型求解与验证

采用有限差分法对控制方程进行离散处理，以 GMERS 方法配合自适应步长方法进行求解。将质量源波面方程设置为水深 $d=0.2\text{ m}$ 、波高 $H=0.01\text{ m}$ 、周期 $T=1\text{ s}$ 的规则波方程进行数值模拟。数值水槽全长 20 m，将质量源模型设置在距数值水槽左边界 $x=5\text{ m}$ 处。在水槽中段设置大小为 0.01 m 的均匀网格，在数值水槽两端设置 3 m 的海绵层并配合设置变步长渐变网格段波吸收波浪，共计约 550 万个网格，数值试验均在这一验证网格下开展。提取水槽中段波面数据同数值解进行对比。图 3 显示，同理论值相比，所建立的波浪数值水槽波面情况具有良好的重复性。

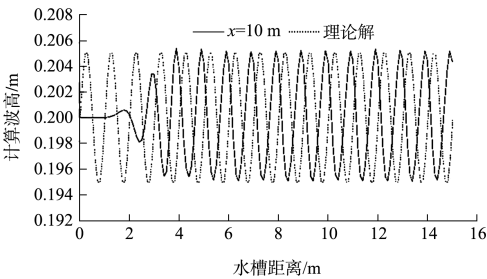


图 3 波面验证对比

为验证数值水槽模拟结构周围流速过程的准确性，参考王珍等^[16]进行的规则波作用下墩柱周围流动特性试验，在数值水槽中建立相同圆形墩柱结构，设置水深 $d=0.6\text{ m}$ 、波高 $H=0.17\text{ m}$ 、周期 $T=2.0\text{ s}$ ，选取水深 $d=6.8\text{ cm}$ 处墩柱正面特征点流速进行比较。图 4 显示，数值水槽计算得到的水平流速与横向流速同实测值相比误差在合理范围内，证明所建立的波浪数值水槽具有良好的流速计算能力。

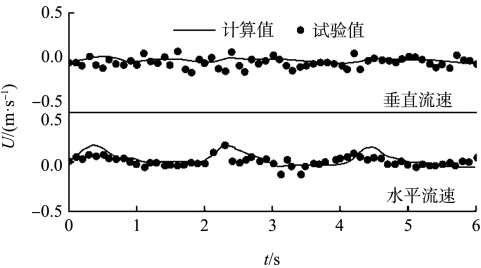


图 4 流速验证对比

2 方形排柱周围波浪传播特性数值模拟结果分析

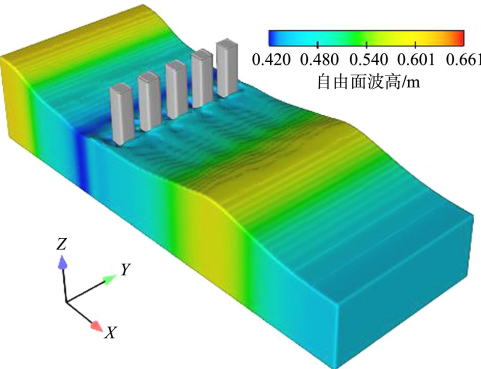
设定多种波高、周期、水深开展多种工况数值模拟。通过波浪自由面特征与流速、涡量等定量指标对规则波作用下方形排柱周围波浪传播特性研究。

方形排柱设置足够高度, 在模拟过程中不发生顶面越浪。在方形排柱后 $x=11\text{ m}$ 处设置浪高监测点记录排柱周围水面线历时特征, 透射系数是评价结构后方波浪传播特性的主要指标, 根据透射波高 H_t 和入射波高 H_i 计算透射系数 K_t , 见式(9)。

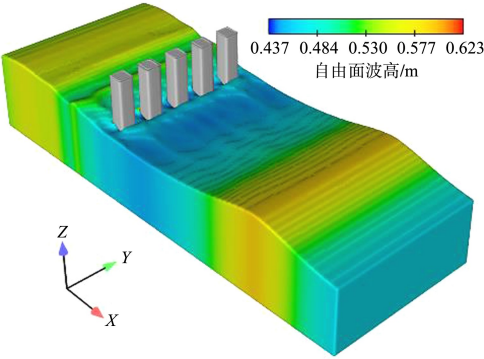
$$K_t = \frac{H_t}{H_i} \tag{9}$$

2.1 波面三维运动过程

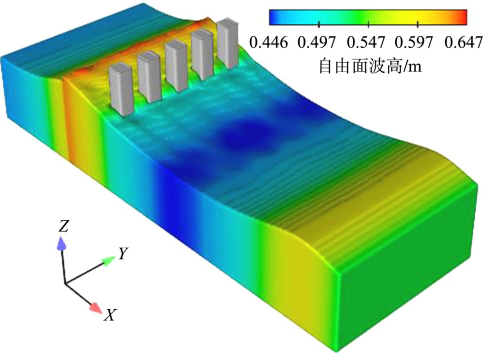
选取典型波况($d=0.5\text{ m}, T=1.2\text{ s}, H=0.14\text{ m}$), 根据数值水槽嵌套加密区的模拟结果, 在波面稳定后, 绘制方形排柱周围三维波面运动图, 在特征时刻对方形排柱周围一个波周期 T 内的波面运动情况进行观测, 见图 5。波浪沿 x 轴正向方形排柱布置区传播。在图 5a)、b) 所示前半周期内, 波浪逐渐进入方形排柱影响区域范围内, 由于方形排柱的阻滞作用, 方形排柱前端的反射波面初步形成。



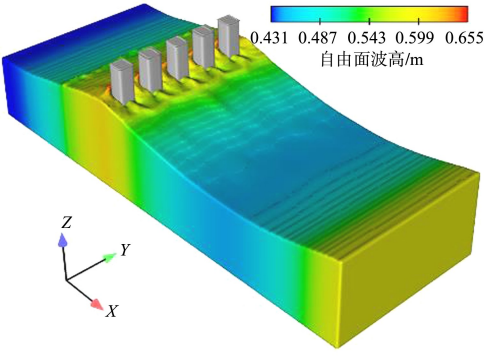
a) $t=0$



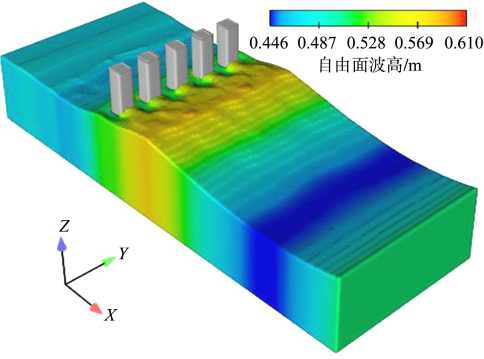
b) $t=0.25T$



c) $t=0.375T$



d) $t=0.5T$



e) $t=0.625T$

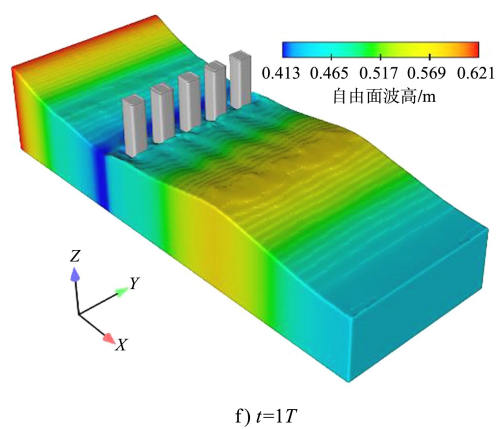
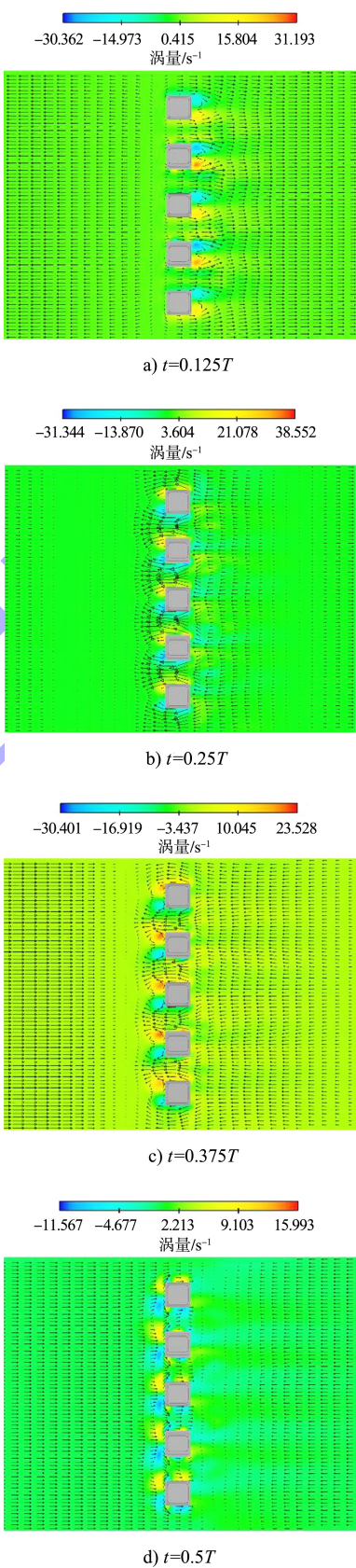


图 5 方形排柱周围波面三维运动

图 5c)~e)所示波浪周期内,波峰到达排柱前端,入射波波峰同排柱前反射波叠加在排柱前形成壅高,当入射波波峰运动至排柱轴线时,入射波波面在排柱的作用下发生分离,水体从排柱间的间隙区域涌入排柱后方。排柱后方水体相互掺混形成复杂的排柱后方波面分布特征。当波峰线越过排柱轴线后,波面逐渐恢复,由于结构阻滞与水体掺混的能量耗散,波高降低,以透射波形式继续向后传播,继而波谷区域通过排柱轴线区域,在波浪负向速度梯度的作用下,水体回流,壅水出现在桩后,见图 5f)。从波面模拟情况上看,所建立的数值水槽三维表面追踪能力强,可以精细刻画排柱结构周围流场特征。

2.2 方形排柱周围平面速度-涡量场特征

方形排柱周围波面的多样变化,提示排柱周围水体发生了复杂的波浪-结构相互作用。同波浪与单体结构物作用不同,方形排柱的几何特征决定其周围流场特性有其自身特征。选择典型波况($d=0.5\text{ m}, T=1.2\text{ s}, H=0.14\text{ m}$),复合提取相对水深 $z/d=0.6$ 处 xy 平面上一个波周期 T 内典型时刻的涡量与速度矢量分布,对方柱周围流场特性进行分析,见图 6。



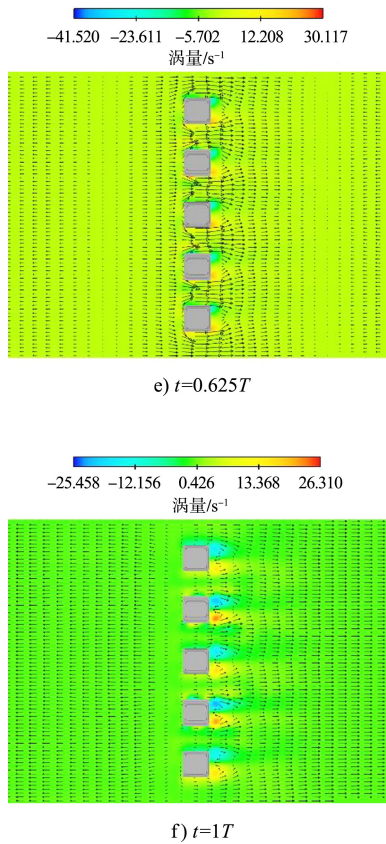


图 6 方形排柱周围水平流速涡量

数值模拟采用线性波方程控制，在波浪静水面附近，水质点水平运动速度为 0，在波峰和波谷处取得水质点水平运动最大速度。如图 6a)~c) 所示，当波谷经过排柱轴线分布区域时，排柱间负向流速不断增大，且由于排柱压缩波面，使得排柱间距中的水体在波谷经过排柱轴线时获得最大负向流速；同时，涡量峰值出现在方柱前端角隅处。随着波浪推进，负向流速梯度减小，当波峰半周期经过时涡量峰值在方柱角隅处反向，随波浪水体的传播出现在方柱后端角隅处。在一个波浪周期内，最大涡量的分布位置在方柱角隅处交替出现，充分反映了波浪的周期性运动特征与方形排柱的结构特性。

2.3 波陡 H/L 对方形排柱波浪透射系数 K_t 的影响

取固定水深 $d=0.5\text{ m}$ ，在不同波周期 $T=1.0\sim 1.4\text{ s}$ 和不同波高 $H=0.08\sim 0.14\text{ m}$ 条件下开展数值模拟研究，分析波陡 H/L 对方形排柱后方透射系数 K_t 的影响，见图 7。

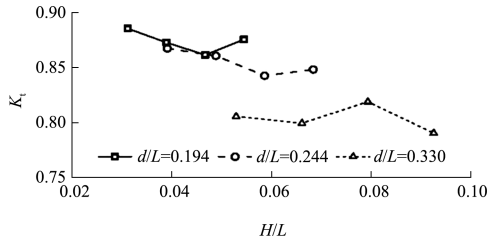


图 7 H/L 对 k_t 的影响

在数值模拟试验范围内，3 种相对水深 ($d/L=0.194, 0.244, 0.330$) 条件下的透射系数 K_t 随波陡 H/L 的变化略有波动，但整体评价影响并不显著。在固定水深条件下，随着相对水深的增大，波长减小则意味着波周期减小，较大波长的波浪经过方形排柱时其透射系数较大。

2.4 相对水深 d/L 对方形排柱波浪透射系数 K_t 的影响

取固定波高 $H=0.10\text{ m}$ ，在不同波周期 $T=1.0\sim 1.6\text{ s}$ 和不同水深 $d=0.45\sim 0.55\text{ m}$ 条件下开展数值模拟研究，分析相对水深 d/L 对方形排柱后方透射系数 K_t 的影响，见图 8。

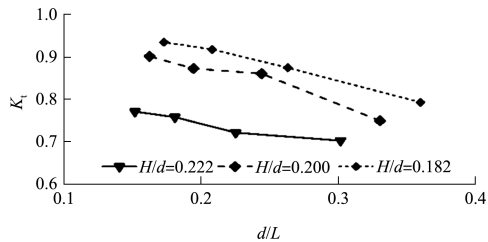


图 8 d/L 对 k_t 的影响

在数值模拟试验范围内，3 种相对波高 ($H/d=0.182, 0.200, 0.222$) 条件下的透射系数 K_t 随着相对水深 d/L 的增大逐步减小。在固定波高条件下，随着水深增加，透射系数 K_t 亦有所增大。对于类似方形排柱的设计计算，应更关注此类工程的工作水深情况。

3 结语

- 1) 与相关试验数据对比，基于 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型封闭与 VOF 方法追踪自由表面所建立的三维质量源造波数值水槽工作性能良好。
- 2) 利用建立的数值水槽对方形排柱周围波面演化情况进行数值模拟研究，排柱周围波面变化

表现出较强的三维特征。水平速度分布与涡量场的演化特征分析,揭示了规则波作用下方形排柱周围流场呈周期性变化规律,最大涡量值在方形排柱单柱的上下游角隅区交替出现。

3)利用无量纲参数波陡 H/L 与相对水深 d/L 分析方形排柱后方波浪透射系数 K_t 的变化规律,在数值模拟试验范围内,透射系数 K_t 随波陡 H/L 的变化略有波动,但整体评价影响并不显著;透射系数 K_t 随相对水深 d/L 的增大逐步减小。

参考文献:

[1] 万德成, 缪国平. 数值模拟波浪翻越直立方柱[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 1998(3): 363-370.

[2] 李玉成, 康海贵, 李广伟, 等. 垂直柱周围的波动流场及其受力的研究[J]. 海洋通报, 1996(2): 50-61.

[3] 齐鲁尚. 透空式防波堤透浪的数值模拟[J]. 水运工程, 2017(1): 69-71.

[4] 金凤, 万超. 不规则波对透空有梁面板底部缓变作用的数值模拟[J]. 水运工程, 2019(2): 10-14+21.

[5] 张凯, 侍克斌, 李玉建, 等. 水力插板透水丁坝坝头冲刷深度规律初探[J]. 人民黄河, 2016, 38(12): 74-78.

[6] 王宇迪. 透水潜坝渗流特性数值仿真研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.

[7] 曹洪建, 万德成, 杨驰. 三维溃坝波绕方柱剧烈流动的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2013, 28(4): 414-422.

[8] 蒋昌波, 邓涯, 姚宇, 等. 孤立波作用下排柱附近流动特性数值分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(8): 1441-1447.

[9] 姚宇, 刘增晟, 袁万成, 等. 双排立柱结构附近孤立波传播变形数值模拟[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(5): 1008-1018.

[10] 海显盛, 魏彭林. 弯曲河道方形桥墩紊流宽度数值模拟[J]. 水运工程, 2018(1): 134-141.

[11] 陈浩民, 倪云林. 非淹没双直立圆柱系统波浪爬升的数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2020(6): 42-47.

[12] 殷铭简, 赵西增, 王红伟. 孤立波与密排桩防波堤相互作用的数值模拟研究[C] //中国力学学会流体力学专业委员会水动力学专业组. 第三十一届全国水动力学研讨会论文集. 北京: 海洋出版社, 2020.

[13] HUANG Z H, LI Y C, LIU Y. Hydraulic performance and wave loadings of perforated/slotted coastal structures: a review[J]. Ocean engineering, 2011, 38(10): 1031-1053.

[14] MO W H, IRSCHIK K, OUMERACI H, et al. A 3D numerical model for computing non-breaking wave forces on slender piles[J]. Journal of engineering mathematics, 2007, 58(1/4): 19-30.

[15] LIN P Z, 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.

[16] 王珍, 陈杰, 何军. 规则波作用下墩柱周围流动特性实验研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2008(3): 58-63. (本文编辑 武亚庆)

(上接第 15 页)

[8] 王喆, 袁庆晴, 马洪新, 等. 射流式挖沟机沟内流场数值计算与分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(3): 292-296.

[9] ZHANG S, GE T, ZHAO M, et al. The prediction of traveling jet trenching in stiff clay based on the erosion failure mechanism [J]. Marine georesources & geotechnology, 2017, 35(7): 939-945.

[10] KOBUS H, LEISTER P, WESTRICH B. Flow field and scouring effects of steady and pulsating jets impinging on a movable bed[J]. Journal of hydraulic research, 1979, 17(3): 175-192.

[11] ADERIBIGBE O O, RAJARATNAM N. Erosion of loose beds by submerged circular impinging vertical turbulent

jets[J]. Journal of hydraulic research, 1996, 34(1): 19-33.

[12] 张浩, 倪福生, 顾磊. 某靶距下射流垂直冲刷坑深的实验研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(2): 238-240.

[13] 顾磊, 倪雁, 黄佳丽, 等. 平面淹没射流垂直冲刷泥沙试验研究[J]. 人民黄河, 2019, 41(6): 38-43.

[14] MAZUREK K A, RAJARATNAM N, SEGO D C. Scour of cohesive soil by submerged circular turbulent impinging jets [J]. Journal of hydraulic research, 2001, 127(7): 598-606.

[15] DONG C, YU G, ZHANG H, et al. Scouring by submerged steady water jet vertically impinging on a cohesive bed[J]. Ocean engineering, 2020, 196: 106781. (本文编辑 武亚庆)