

规则波作用下桩基透空型防波堤的冲刷研究

黄姗姗, 王振鲁, 潘新颖, 梁丙臣, 杨博

Scouring study of pile foundation perforated breakwater under regular wave action

HUANG Shanshan, WANG Zhenlu, PAN Xinying, LIANG Bingchen, YANG Bo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20240327003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑长径比及冲刷的单桩基础侧向承载特性分析

Analysis of lateral bearing behaviors of scoured monopile foundations considering the influence of length-to-diameter ratio

水利水运工程学报. 2023(5): 95 <https://doi.org/10.12170/20220419001>

规则波对大直径群桩作用的数值模拟研究

Numerical simulations of the group effect of large-diameter columns in regular waves

水利水运工程学报. 2020(6): 121 <https://doi.org/10.12170/20191006001>

打桩过程互层土中桩基侧摩阻力变化研究

Study on change of friction in pile driving in interlayered soil

水利水运工程学报. 2023(6): 126 <https://doi.org/10.12170/20220625002>

基于埋置梁广义位移法的桩基拱式渡槽受力分析

Analysis of arch aqueduct on pile foundation based on generalized displacement method for built-in beam

水利水运工程学报. 2022(5): 113 <https://doi.org/10.12170/20210929002>

砂土中钻井船插桩对邻近群桩影响的模型试验

Model tests on effects of spudcan penetration on an adjacent pile group

水利水运工程学报. 2020(3): 75 <https://doi.org/10.12170/20190316001>

高桩承台基础波浪荷载数值模拟

Numerical simulation of wave-current load on high pile cap foundation

水利水运工程学报. 2023(5): 56 <https://doi.org/10.12170/20220119002>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20240327003

黄姗姗, 王振鲁, 潘新颖, 等. 规则波作用下桩基透空型防波堤的冲刷研究 [J]. 水利水运工程学报, 2024(5): 103-112. (HUANG Shanshan, WANG Zhenlu, PAN Xinying, et al. Scouring study of pile foundation perforated breakwater under regular wave action[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(5): 103-112. (in Chinese))

规则波作用下桩基透空型防波堤的冲刷研究

黄姗姗¹, 王振鲁^{1,2}, 潘新颖^{1,2}, 梁丙臣^{1,2}, 杨博¹

(1. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 山东省海洋工程重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 基于 FLOW-3D 软件, 开展了 3 组波高、3 组波周期、5 种挡板形式条件下的冲刷模拟试验, 分析了不同工况下防波堤结构流场变化、海床冲刷地形变化。研究表明: 在规则波作用下, 波高变化对防波堤结构流场变化及海床冲刷地形变化影响程度较小。波周期则与防波堤结构周围的泥沙冲刷效率呈正相关, 且影响程度较大。不同的波周期会导致挡板开孔方式对海床冲刷地形的变化呈现不同的规律, 当波周期为 1.5 s 时, 随着挡板开孔率的增加、挡板下部面积的增大, 冲刷坑面积及体积逐渐减小, 且呈线性分布; 当波周期为 2.0、2.5 s 时, 冲刷面积及体积呈二次曲线分布。

关键词: 桩基透空式防波堤; 挡浪板; 群桩冲刷

中图分类号: U656.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2024)05-0103-10

防波堤作为重要的近海建筑物之一, 能够有效减小波浪对海岸线造成的破坏、维持水面稳定^[1-2], 其中透空式防波堤具有良好的消浪特性和环境友好特征^[3-4]。邱大洪等^[5]假定波浪绕射现象, 推导出任意水深单个竖直薄板防波堤的透、反射系数; 唐雯等^[6]提出一种新型透空组合板式防波堤, 其兼具开孔水平板式及开孔挡板式防波堤作用, 在增强消浪效果的同时, 可减小结构受力; Fang 等^[7]为增强消波性能, 提出附带 4 层淹没式水平开孔板防波堤, 并设置 2 层、8 层水平板进行对比, 发现增加水平板层数能有效增强对长入射波的耗散; Peng 等^[8]提出附带水平开槽板桩式防波堤 (pile breakwaters with horizontal slotted plates, PHSP), 并通过 OpenFOAM 和 OlaFlow 进行了波浪作用下的数值模拟, 结果表明 PHSP 既可保证防波堤透水性, 又能有效增强波浪能量耗散, 并减少波浪传输, 开槽板的孔隙率对透、反射系数有显著影响, 随着孔隙率的增大, 透射系数增大、反射系数减小。

在实际工程应用中, 也需要考虑挡板形式对海床冲刷的影响。Huang 等^[9]在规则波和不规则波作用下, 进行桩基式防波堤的物理模型冲刷试验, 发现当波高越大、水深越小时, 泥沙运动更为剧烈, 最大冲刷深度增大; 侯仲荃等^[10]基于 FLOW-3D 研究空心块体开孔率对泥沙冲淤变化的影响, 结果表明开孔率与水流流速呈负相关, 且开孔率较小时制紊效果更强; Mojtahedi 等^[11]提出一种桩基式防波堤, 由 9 根根桩及“ \perp ”型上部结构组成, 并在规则波和不规则波条件下, 分别对方桩和圆桩进行物理模型试验, 结果表明方桩的反射系数较大, 且床面剪应力较大; Lu 等^[12]对桩周冲刷的时间因素展开研究, 在清水和动床条件下, 采用均匀石英砂进行水槽试验, 并提出能进行可靠预测的考虑水流流速和桩群等效宽度的改进时间因子; Du 等^[13]在波流耦合和纯水流条件下, 对方桩的局部冲刷展开物理模型试验, 发现在纯水流条件下, 随着方桩高宽比的增大, 马蹄涡对淹没桩的冲刷深度影响增大, 在波流耦合条件下, 冲刷坑的范围和深度先增后减。本文基于王强等^[14]提出的倾斜挡浪板式桩基透空型防波堤, 拟在规则波作用下, 通过改变波要素、挡板形式, 分析海

收稿日期: 2024-03-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2601100); 国家自然科学基金资助项目(52101338)

作者简介: 黄姗姗(2000—), 女, 江西宜春人, 硕士研究生, 主要从事泥沙冲淤演变方面研究。

E-mail: hss@stu.ouc.edu.cn 通信作者: 王振鲁(E-mail: wangzhenlu@ouc.edu.cn)

床冲刷地形变化,探究此类防波堤结构的冲淤机理。

1 数值模型建立与验证

1.1 模型简介

FLOW-3D 模型以不可压缩流体的 N-S 方程为控制方程进行数值模拟,选取 RNG k - ε 湍流模型对流体与防波堤结构物的相互作用及泥沙运动进行模拟,在模型中加入了包含几何效应的面积积分项和体积分项。控制方程为:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \overline{u_i u_j} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial k_T}{\partial x} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial k_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial k_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right) = P_T + G_T + D_i - \varepsilon_T \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right) = \frac{C_D}{k_T} (P_T + C_D G_T) + D_i - C_D \frac{\varepsilon_T^2}{k_T} \quad (4)$$

式中: u_i 、 u_j 为流体速度; ρ 为流体密度; p 为时均压强; ν 为分子黏性系数; u 、 v 、 w 分别为流体在 x 、 y 、 z 方向的速度分量; $\overline{u_i u_j} = 2/3 k \delta_{ij} - \nu_t ((\partial u_i / \partial u_j) + (\partial u_j / \partial u_i))$, ν_t 为涡黏系数, $\nu_t = C_\mu (k_T^2 / \varepsilon_T)$, k_T 为湍动能, ε_T 为湍动能耗散率, C_μ 为参数,取默认值 0.09, δ_{ij} 为 Kronecker 函数; A_x 、 A_y 、 A_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的可流动面积分数; V_F 为可流动液体的体积分数; P_T 为由速度梯度引起的湍动能源项; C_D 为紊动参数,取默认值 0; G_T 表示由浮力作用引起的湍动能源项,对不可压缩液体取默认值 0; D_i 为紊流扩散项。

以临界切应力判断泥沙是否起动,采用 Soulsby-Whitehouse 公式计算临界 Shields 数 θ_{cr} :

$$\theta_{cr} = \frac{0.24}{1 + 1.2d_*} + 0.055 [1 - \exp(-0.02d_*)] \quad (5)$$

考虑到坡度对泥沙起动的影响,修正式(5)如下:

$$\theta'_{cr} = \theta_{cr} \frac{\cos\psi \sin\beta + \sqrt{\cos^2\beta \tan^2\varphi - \sin^2\psi \sin^2\beta}}{\tan\varphi} \quad (6)$$

泥沙颗粒挟带速度为:

$$u_1 = \alpha \vec{n}_s d_*^{0.3} (\theta - \theta_{cr})^{1.5} \sqrt{\frac{\|g\| d_s (\rho_s - \rho)}{\rho}} \quad (7)$$

式中: $d_* = d_{50} \left[\frac{\rho(\rho_s - \rho)\|g\|}{\mu^2} \right]^{1/3}$, ρ_s 为泥沙密度, d_{50} 为泥沙颗粒中值粒径, μ 为动力黏滞系数, $\|g\|$ 为重力加速度的范数; β 为河床坡度; φ 为泥沙休止角; ψ 为水流方向与上坡方向之间的夹角; u_1 是被转换为悬沙的泥沙量; α 为挟沙系数,取 0.018; \vec{n}_s 表示推移质表面的外法线方向。

使用 Meyer-Peter 表层泥沙推移质单宽输沙率 (q_b) 公式计算单宽输沙率 (体积计的单宽推移质输沙率):

$$q_b = 8(\theta - \theta_{cr})^{1.5} \left[\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) g d^3 \right]^{0.5} \quad (8)$$

式中: θ 为水流强度参数; d 为泥沙颗粒粒径。

1.2 数值水槽布置

参照物理模型^[14],结合计算机计算能力及网格实际需求,选定模型比尺为1:12,建立长50.00 m(x 方向),宽0.60 m(y 方向),高1.10 m(z 方向)的数值水槽。基于线性波理论,采用推板造波形成目标波浪。推板长0.50 m,宽0.60 m,高0.90 m,放置距数值水槽进口5.00 m处,水槽末端设置约2倍波长的消波海绵块。防波堤模型长1.10 m,宽0.60 m,高1.30 m,模型基础采用4排斜方桩,桩直径0.10 m,上部结构为垂直挡浪墙,下部在第一排斜桩处加置开孔挡板,挡板宽0.60 m,长0.72 m(图1),防波堤模型放置在水槽长度方向29.50 m处。

1.3 模型设置

为保证计算精度且控制计算时间,数值水槽共设置7个网格块,挡板处网格尺寸最小, x 方向上在挡板前后5.0 cm范围内进行网格加密, x 、 y 、 z 方向网格尺寸均为0.5 cm,后3排桩基处 x 、 y 、 z 方向网格尺寸均为0.8 cm,并在 z 方向上自由水面附近的波高范围内进行加密,网格总数约为303.6万(图2)。

数值水槽边界条件为: x 轴为水槽长度方向,入口边界为固壁(Wall)边界,出口边界为自由出流(Outflow)边界,以吸收小振幅的线性波; y 轴为宽度方向,入口及出口边界均为固壁(Wall)边界; z 轴为高度方向,入口边界为固壁(Wall)边界,出口边界为对称(Symmetry)边界。

参照物理模型试验进行初始条件设置,数值水槽内为静水面,初始水位设为0.65 m,流体初始速度为0,水槽沿水深方向静水压强为流体初始压强。

1.4 数值模型验证

在拟设防波堤处布置测点,选取水深0.65 m、波高0.10 m、波周期1.5 s时波浪水槽工况进行验证。结果表明,水位稳定,波高分布较为均匀,水槽末端并未反射波浪,与物理模型试验的波周期吻合良好,数值波浪水槽能够准确稳定地进行造波(图3)。

将挡板开孔率为30%的防波堤模型布置于水槽中,对应物理模型试验布置2个相同的测点采集波高数据,测点1位于防波堤模型前6.00 m处,测点2位于防波堤模型后4.00 m(图4)。选取水深为0.65 m、波高为0.06 m、波周期为1.5 s的工况进行水槽消波验证,提取并绘制波型稳定后的6个数值模拟波面数据进行对比(图5)。数值模拟与物理模型结果基本吻合,波面差距较小,对波峰的模拟欠缺,但整体趋势保持一致。因此,认为本文所建立的数值波浪水槽具备较好的造波、消波性能,能够较为准确地模拟物理模型中的部分试验工况。



图1 桩基透空式防波堤

Fig. 1 Perforated pile foundation breakwater

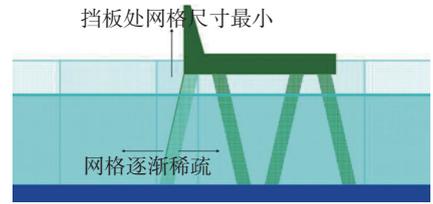


图2 数值水槽 x 方向网格划分

Fig. 2 Mesh division in the x direction of the numerical flume

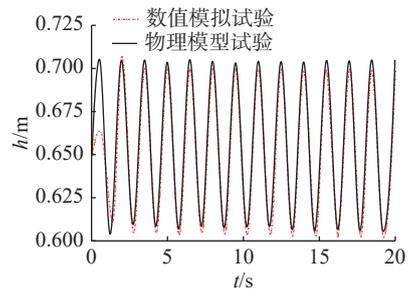


图3 数值水槽造波验证分析

Fig. 3 Wave generation validation analysis in the numerical flume

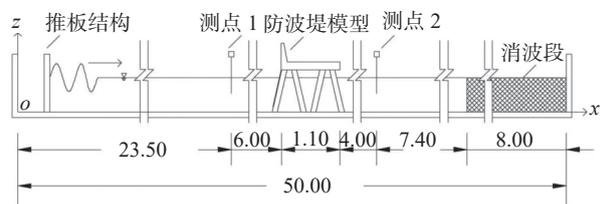


图4 数值波浪水槽整体布置(单位:m)

Fig. 4 Overall layout of the numerical wave flume (unit: m)

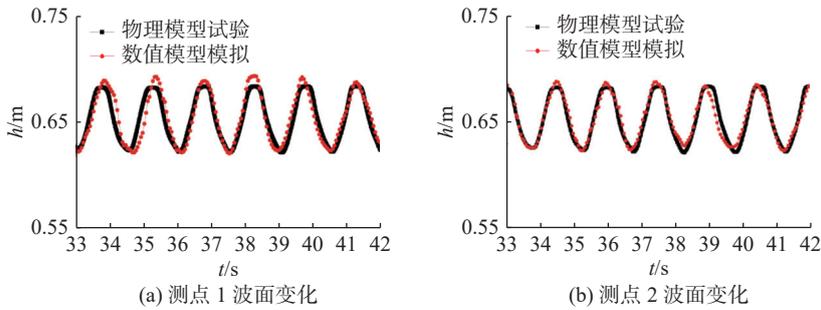


图 5 数值水槽消波验证分析

Fig. 5 Wave damping validation analysis in the numerical flume

本文基于 Sumer 等^[15]在波浪条件下对方桩进行的物理模型冲刷试验进一步验证泥沙冲刷模型的可靠性。Sumer 等^[15]的物理模型试验中,水槽宽 0.60 m、高 0.80 m、长 26.50 m,水槽水深 $H=0.40$ m,泥沙粒径 $d_{50}=0.18$ mm,计算时间 $t=15$ min。水槽宽度与本文建立的数值波浪水槽宽度一致,将方桩模型置于数值水槽中防波堤模型拟设位置,方桩高度取 0.80 m,泥沙厚度取 0.20 m。并选取工况 1 方桩桩径 $D=0.03$ m、波浪周期 $T=1.6$ s、波高 $h=0.16$ m 和工况 2 $D=0.02$ m、 $T=1.4$ s、 $h=0.16$ m 进行验证分析,其余水沙条件与物理模型试验设置一致。数值模型采用渐变网格,桩前后 $2D$ 、左右 $3D$ 范围内网格直径为 0.5 cm,共设置 7 个网格块,网格总数约为 260 万。

将两组工况的物理模型试验结果进行汇总,对 U_m 、 Z/D 进行对比验证(表 1),提取第 2 组工况作用下方桩桩角处的冲刷深度历程曲线(图 6)。可见,数值模拟试验较物理模型试验冲刷更快达到平衡,但二者历程曲线及平衡最大冲刷深度较为一致。Roulund 等^[16]指出,物理模型试验的最大冲刷深度一般略大于数值模拟试验结果。综上可知,本文所建立的泥沙冲刷数值模型可以较好地模拟规则波作用下方桩周围的冲淤情况。

表 1 物理模型试验与数值模拟结果验证

Tab. 1 Validation of physical model experiment and numerical simulation results

工况组别	验证信息	物理模型结果	数值模型结果	误差/%	工况组别	验证信息	物理模型结果	数值模型结果	误差/%
工况1	U_m	0.21	0.22	5.8	工况2	U_m	0.31	0.32	4.5
	Z/D	0.20	0.19	4.4		Z/D	0.35	0.33	5.4

注: U_m 为近底层未受扰动的水质点最大水平速度(m/s); Z/D 为平衡冲刷深度与桩径的比值。

2 数值计算结果与分析

由于防波堤物理试验模型较为复杂,现对防波堤结构稍作简化,将防波堤模型第 1 排斜桩改为直桩,保证挡板开孔率不变,挡板开孔排数由 4 排改为 3 排,行数由 9 行改为 6 行(图 7)。本文数值模拟了挡板 3 种开孔率($\Phi=10^\circ$ 、 20° 、 30°)情况,当开孔率为 20% 时,设置 2 种不规则开孔方式,其中开孔孔径分别与开孔率为 10% 及 30% 时相同,以研究挡板不同开孔方式及开孔率时对桩基透空型防波堤周边海床冲淤变化的影响。

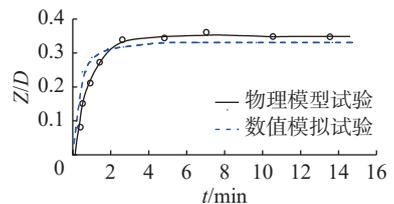


图 6 最大冲刷深度历程曲线对比

Fig. 6 Comparison of maximum scour depth evolution curves

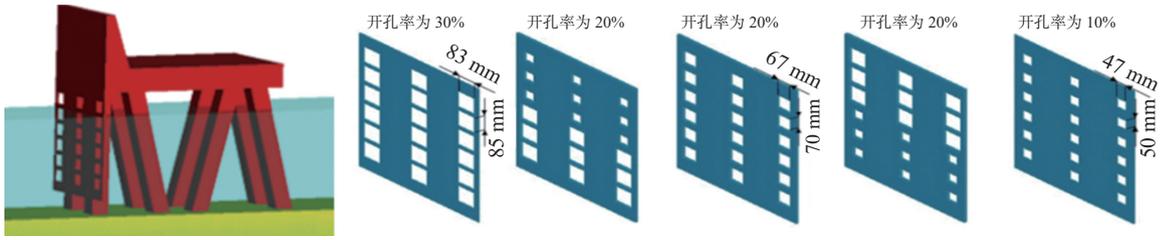


图 7 防波堤模型及挡板形式示意

Fig. 7 Schematic of breakwater model and baffle forms

本文探讨水位位于挡板处时, 波高、波周期、挡板开孔方式等 3 个因素对开孔挡板防波堤结构流场结构及泥沙冲淤变化的影响。本文共设置 25 个试验工况, 具体工况见表 2。

表 2 波浪作用下数值模拟试验工况

Tab. 2 Working conditions of numerical simulation experiments under wave action

工况编号	波高/m	波周期/s	挡板板形式	f_{KC}	工况编号	波高/m	波周期/s	挡板板形式	f_{KC}
D_1	0.10	1.5	挡浪板开孔率为30%	1.38	F_4	0.10	2.5	挡浪板开孔率为20%(30%+10%)	4.33
D_2	0.10	1.5	挡浪板开孔率为20%(10%+30%)	1.53	F_5	0.10	2.5	挡浪板开孔率为10%	4.97
D_3	0.10	1.5	挡浪板开孔率为20%	2.06	G_1	0.12	1.5	挡浪板开孔率为30%	1.76
D_4	0.10	1.5	挡浪板开孔率为20%(30%+10%)	2.88	G_2	0.12	1.5	挡浪板开孔率为20%(10%+30%)	1.91
D_5	0.10	1.5	挡浪板开孔率为10%	2.12	G_3	0.12	1.5	挡浪板开孔率为20%	2.22
E_1	0.10	2.0	挡浪板开孔率为30%	1.68	G_4	0.12	1.5	挡浪板开孔率为20%(30%+10%)	2.94
E_2	0.10	2.0	挡浪板开孔率为20%(10%+30%)	2.92	G_5	0.12	1.5	挡浪板开孔率为10%	2.79
E_3	0.10	2.0	挡浪板开孔率为20%	1.8	H_1	0.14	1.5	挡浪板开孔率为30%	0.97
E_4	0.10	2.0	挡浪板开孔率为20%(30%+10%)	4.68	H_2	0.14	1.5	挡浪板开孔率为20%(10%+30%)	1.03
E_5	0.10	2.0	挡浪板开孔率为10%	4.81	H_3	0.14	1.5	挡浪板开孔率为20%	0.78
F_1	0.10	2.5	挡浪板开孔率为30%	3.53	H_4	0.14	1.5	挡浪板开孔率为20%(30%+10%)	1.06
F_2	0.10	2.5	挡浪板开孔率为20%(10%+30%)	3.46	H_5	0.14	1.5	挡浪板开孔率为10%	1.18
F_3	0.10	2.5	挡浪板开孔率为20%	5.05					

注: 无量纲参数 f_{KC} (Keulegan-Carpenter数)是影响局部参数的综合因子, $f_{KC} = U_m T / D$ 。

将 1.4 节中防波堤模型简化前的数值模拟结果与工况 D_1 进行对比, 以验证简化防波堤模型及改变网格数量的合理性。选取 1.4 节中的测点 1 进行波面数据对比(图 8)。在防波堤模型修改前后波面线差距较小, 因此, 可认为对防波堤模型的简化及模型网格数量的改变是合理的。

2.1 波高影响分析

选取工况 D_3 、 G_3 和 H_3 , 分析改变波高后对冲刷坑形态等造成的差异。

图 9 为不同波高条件下冲刷达到平衡后防波堤结构物桩基周围的冲刷地形, 可见, 波高的改变对冲刷地形的影响并不大, 顺流向第 1 排方桩处形成的冲刷坑形态基本一致, 而第 2 排、第 4 排方桩处的泥沙堆积范围随波高的增加而略有增大, 当波高增加至 0.14 m 时, 第 2 排方桩处的泥沙淤积开始向第 3 排方桩延伸, 第 4 排两并关联方桩的泥沙淤积逐渐融合。

由于冲刷面积及冲刷体积可以更直观地阐述冲刷的二维、三维特性, 选取其他条件相同、波高不同的 4 组工况, 分析波高变化对冲刷坑面积和体积的影响, 波高依次为 0.10、0.12、0.14 m, 组别 1: 工况 D_1 、 G_1 、 H_1 ; 组别 2: 工况 D_2 、 G_2 、 H_2 ; 组别 3: 工况 D_4 、 G_4 、 H_4 ; 组别 4: 工况 D_5 、 G_5 、 H_5 (图 10、图 11)。

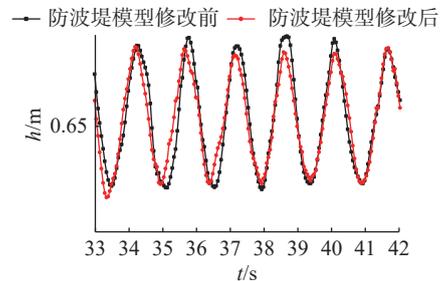


图 8 模型修改后波高对比

Fig. 8 Wave height comparison after model modification

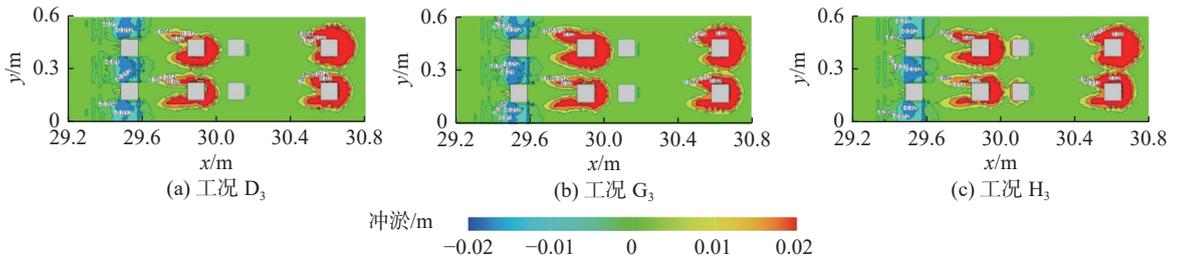


图 9 波高不同时冲淤地形平面

Fig. 9 Planform of sedimentation and erosion terrain at different wave heights

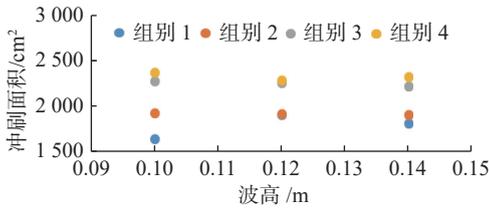


图 10 不同波高时冲刷坑面积变化

Fig. 10 Changes in scour pit area at different wave heights

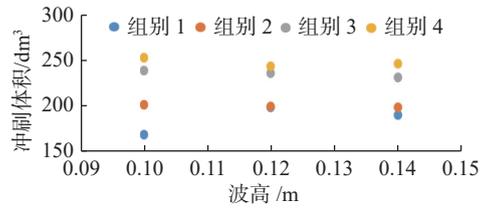


图 11 不同波高时冲刷坑体积变化

Fig. 11 Changes in scour pit volume at different wave heights

随着波高的增大,冲刷坑面积、体积并未呈现明显的规律。在波浪与防波堤模型的相互作用过程中,波高的增大导致流速略微增大,参数 f_{KC} 并没有明显增大,波高变化对海床冲淤地形造成的影响程度较小。

2.2 波周期影响分析

选取工况 D_3 、 E_3 、 F_3 ,分析改变波周期后对冲刷坑形态等造成的差异。图12为冲刷时间 $t=1000$ s时,波周期不同时透空式防波堤桩基周围的冲刷地形。根据Fenton^[17]的理论研究可知,在其他条件不变时,波周期与波长、波速呈正相关。由于波周期与波速成正比,加剧对底部流场的影响,对桩周的冲刷作用增强,可见第1排方桩桩角处的冲刷坑深度范围增大,由于泥沙起动以悬移质的形式随波浪一起运动,后侧的泥沙淤积随着波周期的增大逐渐减小。

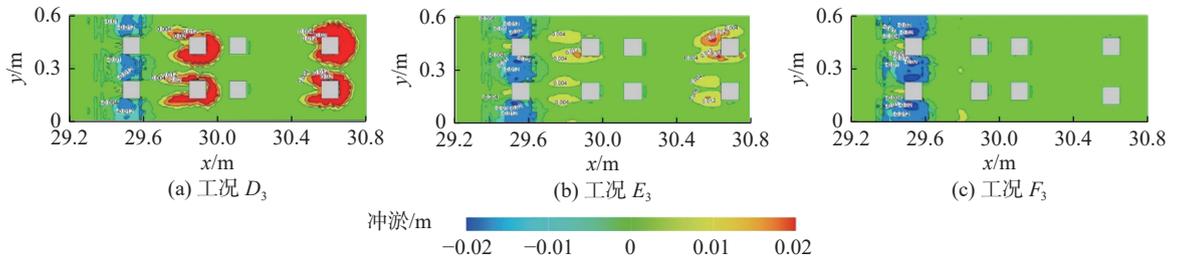


图 12 波周期不同时冲淤地形平面

Fig. 12 Planform of sedimentation and erosion terrain at different wave periods

选取其他条件相同、波周期不同的4组工况,分析波周期变化时对冲刷坑面积和体积的影响。波周期依次为1.5、2.0、2.5s,组别1:工况 D_1 、 E_1 、 F_1 ;组别2:工况 D_2 、 E_2 、 F_2 ;组别3:工况 D_4 、 E_4 、 F_4 ;组别4:工况 D_5 、 E_5 、 F_5 (图13、图14)。

随着波周期增大,流速增大,波周期变化对 f_{KC} 的影响较大,冲刷坑面积、体积均呈线性增加,冲刷面积、体积增长率则较为类似,且不同组别间由于挡板开孔率不同对冲刷面积、体积的变化影响差异较大。

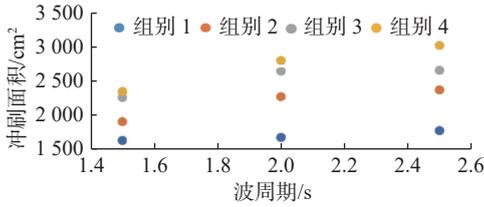


图 13 波周期不同时冲刷坑面积变化

Fig. 13 Changes in scour pit area at different wave periods

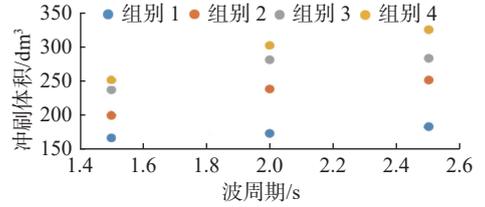


图 14 波周期不同时冲刷坑体积变化

Fig. 14 Changes in scour pit volume at different wave periods

2.3 挡板开孔方式影响分析

选取工况 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 和 D_5 , 分析挡板改变开孔方式后对冲刷坑形态等的影响。当 $t=1\ 000\ s$ 挡板开孔方式不同时透空式防波堤桩基周围冲刷地形见图 15。可见, 冲刷现象主要发生在第 1 排方桩桩角处, 淤积现象主要发生在第 2 排、第 4 排方桩桩后; 当挡板为规则开孔, 随挡板开孔率的减小, 桩角处的冲刷现象逐渐加剧, 桩后的泥沙堆积逐渐向前方延伸, 且有融合趋势; 当开孔率相同时, 堆积沙丘形态基本一致, 冲刷坑深度和范围随挡板下部开孔孔径的减小而略有增大。

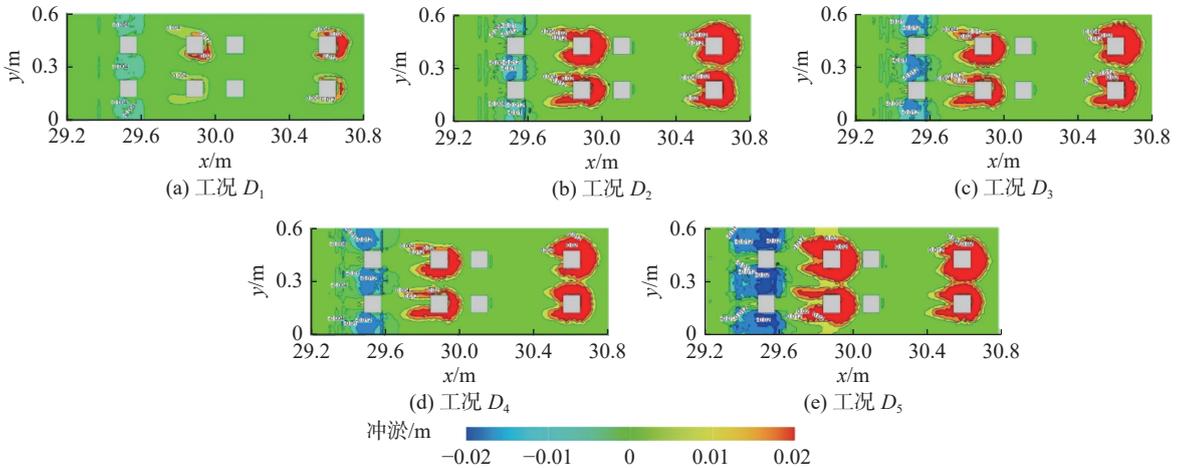


图 15 挡板开孔方式不同时冲淤地形平面

Fig. 15 Planform of sedimentation and erosion terrain with different baffle opening methods

冲刷时间为 $1\ 000\ s$ 时, 提取不同波周期作用下随时间变化的方桩桩角处最大冲刷深度, 基于指数函数进行拟合, 曲线拟合相关系数均在 0.9 以上, 拟合效果较好(图 16)。可见, 桩周最大冲刷深度与挡板开孔率成反比; 当挡板开孔率均为 20%, 桩周最大冲刷深度虽与下部开孔孔径成反比, 但不同工况间差异较小。

冲刷达到平衡后, 选取 $y=0.30\ m$ 处剖面探究挡板形式对冲刷的影响, 坐标原点取在方桩中点处(图 17)。剖面冲刷程度与挡板开孔率、挡板下部开孔孔径均呈负相关, 其中挡板开孔率最小时, 最大冲刷范围、深度最大; 当挡板开孔率均为 20% 时, 冲刷坑范围、深度与挡板开孔孔径呈负相关, 其中工况 D_3 、 D_4 差异较小。

选取其他条件相同、挡浪板规则开孔而开孔率不同的 4 组数值工况, 分析开孔率变化对冲刷坑面积和体积的影响。挡浪板开孔率依次为 30%、20%、10%, 组别 1: 工况 E_1 、 E_3 、 E_5 ; 组别 2: 工况 F_1 、 F_3 、 F_5 ; 组别 3: 工况 G_1 、 G_3 、 G_5 ; 组别 4: 工况 H_1 、 H_3 、 H_5 (图 18、图 19)。

当波周期 T 为 2.0、2.5 s(组别 1、组别 2)时, 随着挡浪板开孔率的增大, 冲刷面积、体积呈二次曲线分布, 挡浪板开孔率为 10% 和 20% 时, 冲刷面积、体积较为接近, 而挡浪板开孔率为 30% 时, 两组别间冲刷面

积、体积均明显减小,较开孔率为 20% 时减小了 41.5% 和 43.1%。当波周期 T 均为 1.5 s(组别 3、组别 4) 时,随着挡浪板开孔率的增加,冲刷坑面积、体积逐渐减小,且呈线性分布;当波高 H 为 0.12 m(组别 3) 时,随挡浪板开孔率的增加,冲刷面积分别减少了 5.68%、11.56%,冲刷体积分别减少了 4.00%、6.63%。当波高 H 为 0.14 m(组别 4) 时,冲刷面积则随挡板开孔率增加减少了 12.66%、10.35%,冲刷体积减少了 7.89%、6.97%。

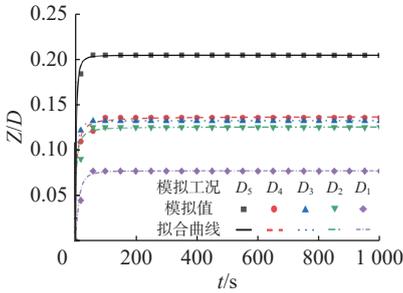


图 16 各工况相对最大冲刷深度历程曲线

Fig. 16 Evolution curves of maximum scour depth under various conditions

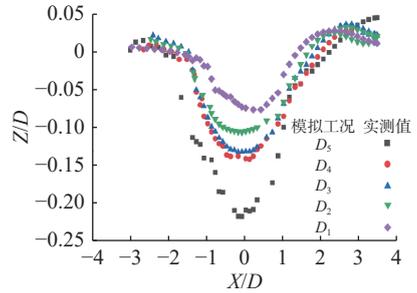


图 17 各工况 I-I' 剖面冲刷剖面曲线

Fig. 17 Scour profile curves along section I-I' for various conditions

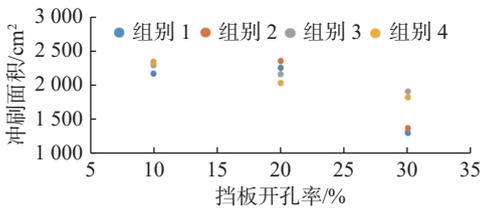


图 18 挡板开孔率不同时冲刷坑面积变化

Fig. 18 Changes in scour pit area with different baffle open rates

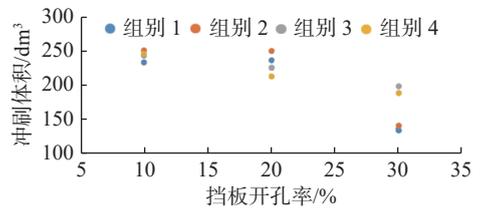


图 19 挡板开孔率不同时冲刷坑体积变化

Fig. 19 Changes in scour pit volume with different baffle open rates

另外,选取其他条件相同、挡浪板开孔率均为 20%,开孔方式不同时的 4 组数值模型工况,分析开孔方式变化对冲刷坑面积和体积的影响,具体如下,组别 1: 工况 E_2 、 E_3 、 E_4 ,下部开孔面积依次为 70.55、46.90、23.50 cm^2 ,下同;组别 2: 工况 F_2 、 F_3 、 F_4 ;组别 3: 工况 G_2 、 G_3 、 G_4 ;组别 4: 工况 H_2 、 H_3 、 H_4 。(图 20、图 21)

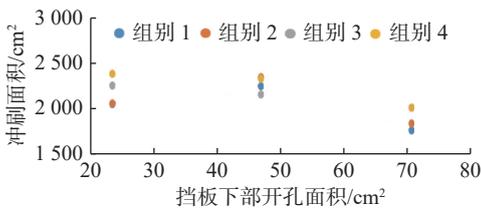


图 20 挡板下部开孔面积不同时冲刷坑面积变化

Fig. 20 Changes in scour pit area with different lower baffle opening areas

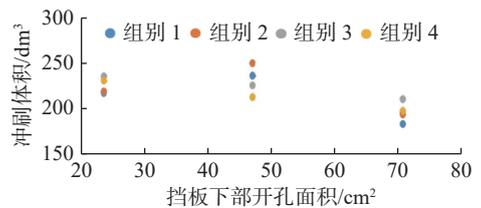


图 21 挡板下部开孔面积不同时冲刷坑体积变化

Fig. 21 Changes in scour pit volume with different lower baffle opening areas

当其波周期 T 为 2.0、2.5 s(组别 1、组别 2) 时,挡浪板为规则开孔时,其冲刷面积、体积较挡浪板为不规则开孔时更大,且随挡浪板下部开孔面积增大,冲刷坑面积、体积均呈二次曲线分布;当下部开孔面积为 23.5、46.9 cm^2 时,其冲刷坑面积、体积较为接近,且明显大于下部开孔面积为 70.55 cm^2 的相应数值。当波周期 T 均为 1.5 s(组别 3、组别 4) 时,随挡浪板下部开孔面积增大,冲刷坑面积、体积逐渐减小,且呈线性分布。当波周期改变时,冲刷坑面积、体积随挡板形式改变展现出不同的规律,当波周期为 2.0、2.5 s 时,挡板

开孔率为 20%,且为规则开孔时,冲刷坑面积、体积最大;当波周期为 1.5 s 时,挡板开孔率为 10% 的冲刷坑面积、体积最大。

3 结 语

本文使用 FLOW-3D 软件模拟了规则波条件下附带挡板的桩基透空型防波堤的泥沙冲刷状况,比较分析了由于波高、波周期、挡板形式改变对流场结构及海床地形变化的影响,主要结论如下:

(1)附带挡板的桩基透空型防波堤能够有效耗散波浪能量、阻碍波浪传播,然而挡板底部流速较大,会对周边海床造成较为明显的冲淤。因此,在此类防波堤结构的设计中,应综合考虑挡板的消浪性能和冲刷影响。

(2)波高对泥沙局部冲刷的影响较小,不同工况间海床地形差异较小;而波周期与桩周泥沙的冲刷呈正相关,后排方桩附近的泥沙淤积随波周期增大而逐渐减少。

(3)在本文的模拟计算工况中,当波周期为 2.0、2.5 s 时,挡板开孔率为 20% 且为规则开孔时,冲刷坑面积和体积较大;当挡板开孔率为 30% 时,冲刷面积和体积有所减小;波周期为 1.5 s,挡板开孔率为 10% 时,冲刷坑面积和体积最大;挡板开孔率相同,而开孔方式不同时,挡板下部孔径较大时的泥沙局部冲刷较小。

(4)在实际工程应用中,当波周期较小时,可以将挡板开孔率设置为 20%,并增大挡板下部孔径以减小周边海床的冲淤;当波周期较大时,可以将挡板开孔率设置为 30%,能减小泥沙局部冲刷。

参 考 文 献:

- [1] 缪银琦,赵西增,殷铭简,等.带翼排桩式防波堤水动力特性研究[J].海洋工程,2024,42(4):86-95. (MIAO Yinqi, ZHAO Xizeng, YIN Mingjian, et al. Research on hydrodynamic characteristics of winged pile-type breakwaters[J]. The Ocean Engineering, 2024, 42(4): 86-95. (in Chinese))
- [2] 才瀚涛,黄华,苏炜.椭圆余弦波对 V 形防波堤绕射波浪力的解析计算[J].水利水运工程学报,2020(5):16-23. (CAI Hantao, HUANG Hua, SU Wei. Analytical calculation of cnoidal wave diffracted force on a V-shaped breakwater[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(5): 16-23. (in Chinese))
- [3] 李昌良,蓝晓俊.水平斜插板透空式防波堤消浪性能数值模拟[J].水利水运工程学报,2018(4):75-80. (LI Changliang, LAN Xiaojun. Numerical simulation of wave dissipation property of a new-type open breakwater[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(4): 75-80. (in Chinese))
- [4] 杜沛霖,孙昭晨,梁书秀.新型直立式透空堤消浪性能数值研究[J].海洋工程,2021,39(1):12-20. (DU Peilin, SUN Zhaochen, LIANG Shuxiu. Numerical study on wave dissipation performance of new type vertical permeable breakwater[J]. The Ocean Engineering, 2021, 39(1): 12-20. (in Chinese))
- [5] 邱大洪,王学庚.深水薄板式防波堤的理论分析[J].水运工程,1986(4):8-12. (QIU Dahong, WANG Xuegeng. Theoretical analysis of deep-water thin-plate breakwater[J]. Port & Waterway Engineering, 1986(4): 8-12. (in Chinese))
- [6] 唐雯,胡俊,程永舟,等.新型透空组合板式防波堤结构型式及消浪特性分析[J].水利水运工程学报,2017(5):37-44. (TANG Wen, HU Jun, CHENG Yongzhou, et al. Analysis of structure and wave dissipation characteristics of a new type of perforated composite plate breakwater[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(5): 37-44. (in Chinese))
- [7] FANG Z C, XIAO L F, KOU Y F, et al. Experimental study of the wave-dissipating performance of a four-layer horizontal porous-plate breakwater[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 151: 222-233.
- [8] PENG J M, LI K, GU S T, et al. Numerical simulation of the interaction between waves and pile breakwater with horizontal slotted plates[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 287: 115777.
- [9] HUANG J J, CHEN G P. Experimental modeling of wave load on a pile-supported wharf with pile breakwater[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 201: 107149.

- [10] 侯仲荃, 石进, 王宪业, 等. 空心块体水沙动力及泥沙淤积特性研究[J]. *海洋学报*, 2022, 44(5): 124-133. (HOU Zhongquan, SHI Jin, WANG Xianye, et al. Study on flow and sediment dynamics and deposition characteristics of hollow block[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(5): 124-133. (in Chinese))
- [11] MOJTAHEDI A, BEIRAGH M S, FARAJPOUR I, et al. Investigation on hydrodynamic performance of an environmentally friendly pile breakwater[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 217: 107942.
- [12] LU Y X, LIANG B C, YIN Z G, et al. Experimental study on time factor of scour around pile groups[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 261: 112125.
- [13] DU S T, WU G X, ZHU D Z, et al. Experimental study of local scour around submerged square piles in combined waves and current[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 113176.
- [14] 王强, 刘睿, 梁丙臣. 倾斜挡浪板式桩基透空型防波堤的消浪性能研究[J]. *海岸工程*, 2022, 41(2): 95-104. (WANG Qiang, LIU Rui, LIANG Bingchen. Experimental study on wave-dissipating performance of pile-supported breakwater with perforated inclined wave screen[J]. *Coastal Engineering*, 2022, 41(2): 95-104. (in Chinese))
- [15] SUMER B M, CHRISTIANSEN N, FREDSE J. Influence of cross section on wave scour around piles[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1993, 119(5): 477-495.
- [16] ROULUND A, SUMER B M, FREDSE J, et al. Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2005, 534: 351-401.
- [17] FENTON J D. A fifth-order stokes theory for steady waves[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1985, 111(2): 216-234.

Scouring study of pile foundation perforated breakwater under regular wave action

HUANG Shanshan¹, WANG Zhenlu^{1,2}, PAN Xinying^{1,2}, LIANG Bingchen^{1,2}, YANG Bo¹

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Engineering, Qingdao 266100, China)

Abstract: Based on the FLOW-3D software, scour simulation experiments were conducted under the conditions of 3 sets of wave heights, 3 sets of wave periods, and 5 types of baffle forms. The study analyzed the changes in the flow field around the breakwater structure and the changes in seabed scouring topography under different working conditions. The results indicate that under the action of regular waves, the variation in wave height has a minor impact on the changes in the flow field around the breakwater structure and the changes in seabed scouring topography. In contrast, the wave period is positively correlated with the efficiency of sediment scour around the breakwater structure, having a more significant impact. Different wave periods lead to different patterns in the changes in seabed scouring topography due to the way the baffles are opened. When the wave period is 1.5 s, with the increase of the baffle open rate and the enlargement of the area at the bottom of the baffle, the area and volume of the scour pit gradually decrease, displaying a linear distribution; when the wave period is 2.0 and 2.5 s, the area and volume of scouring show a quadratic curve distribution.

Key words: pile foundation perforated breakwater; baffle plate; group pile scouring