

# 基于 FLOW 3D 的密排管桩防波堤 透射系数研究

魏建宇, 谭彬政, 任赵飞

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:** 港内波高大小对泊稳条件影响重大。以海外某离岸式化工码头为工程背景, 采用新型密排管桩防波堤为研究对象, 探讨不同波浪工况下防波堤的透射性能。基于 FLOW 3D 的有限差分法, 建立具有自由水面的三维数值波浪水池, 通过与物理模型试验对比验证模型的准确性, 分析在不同波陡、不同周期波浪条件下, 不同管桩间缝宽的透射系数。结果表明: 随波浪周期的增大, 透射系数先增大后趋于平缓, 当入射波浪周期大于一定范围时, 防波堤对于波浪的掩护作用不再增强; 在小周期波浪条件下, 透射系数随桩间缝宽的增大而增大, 当相对缝宽为 0.05 时, 透射系数低于 70%。研究结果可为实际工程应用提供指导。

**关键词:** FLOW 3D; 密排管桩防波堤; 透射系数; 反射系数

中图分类号: U656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)12-0055-05

## Transmission coefficient of breakwater for densely packed pipe pile based on FLOW 3D

WEI Jianyu, TAN Binzheng, REN Zhaofei

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** The magnitude of the wave height in the port has a significant impact on the mooring stability conditions. This article takes an offshore chemical terminal overseas as the engineering background and takes the new type of densely packed pipe piles breakwater as the research object to explore the transmission performance of the breakwater under different wave conditions. Based on the finite difference method of FLOW 3D, a three-dimensional numerical wave tank with a free water surface is established. The accuracy of the model is verified by comparing it with the experimental data. The results show that as the wave period increases, the transmission coefficient first increases and then tends to flatten. When the incident wave period exceeds a certain range, the protective effect of the breakwater on the waves is no longer enhanced. Under small-period wave conditions, the transmission coefficient increases with the increase in the width of the pile gap. When the relative width of the pile gap is 0.05, the transmission coefficient is less than 70%. The research results can guide practical engineering applications.

**Keywords:** FLOW 3D; densely packed pipe pile; transmission coefficient; reflection coefficient

在工程实际中, 钢管桩常用作高桩梁板式码头的承载基础, 防波堤常采用斜坡堤等结构形式, 较少使用密排管桩, 目前对于密排管桩防波堤与波浪相互作用的研究还处于初步阶段。张婷<sup>[1]</sup>运用 FLOW 3D 数值模拟方式研究波浪与小尺度桩柱、大尺度圆柱以及透空式水平面板的相互作用。姜雪亮<sup>[2]</sup>运用 FLOW 3D 模拟计算直立式码头在波浪作

用下的越浪量, 将结果与已有的经验公式进行对比, 为码头设计中越浪量的计算提供了新思路。侯勇俊等<sup>[3]</sup>详细研究了基于 FLOW 3D 的三维数值波流水池, 并对压力出流边界以及效波孔隙结构的设置进行分析。陈兰坤等<sup>[4]</sup>运用 FLOW 3D 研究新型附带消浪板桩基透空堤的消浪性能。另外, 部分学者运用数值模拟研究了圆形桥墩、桩基与波浪相互

收稿日期: 2023-04-11

作者简介: 魏建宇 (1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口海工结构设计工作。

作用泥沙冲刷的效应<sup>[5-8]</sup>。随着计算机技术的快速发展,运用 FLOW 3D 研究波浪与密排钢管桩相互作用已经成为较便捷的办法,通过研究可为密排钢管桩防波堤的设计运用提供技术支撑。

## 1 工程概况

海外某化工码头的原泥面高程为-9.5 m,为离岸式新型双层框架组合密排高桩码头结构。码头通过3 km长的引桥与陆域相接。码头结构设计理念为“大浪不挡,小浪可控”,对于极端波浪,不考虑控制港内波浪,下层桩基透空结构允许波浪越浪和透射,以减少结构受力,上层结构高度设置考虑越浪对工艺设备的影响;对于作业期内的波浪,下层密排桩基结构体系阻碍波浪,以满足港内作业的波高要求。码头平面见图1,典型的码头断面见图2。

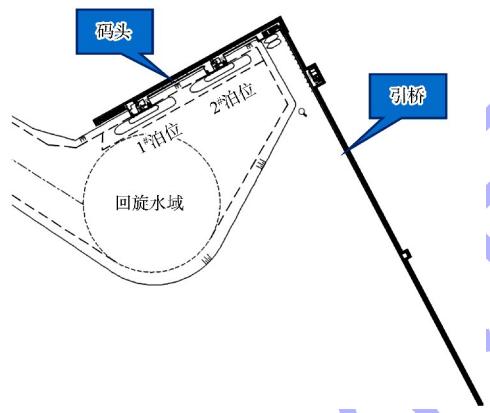


图1 码头平面布置

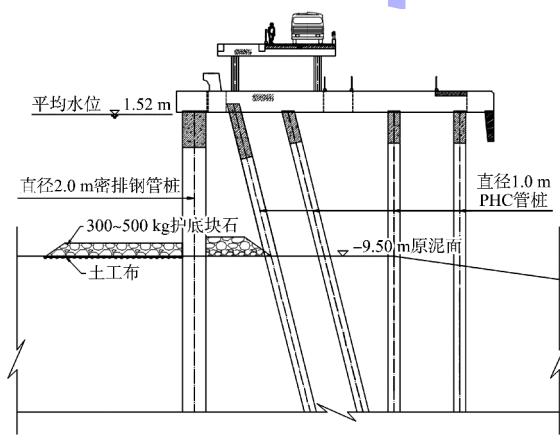


图2 码头断面

化工码头结构体系包括海侧挡浪体系、港内侧下层系、靠泊体系和上层码头作业平台体系。海侧

挡浪体系为组合式密排桩基结构,由若干个密排桩等间距布置,密排桩顶部采用纵梁连成整体,同时为防止密排桩前后冲刷,设置护底结构防护。码头密排桩防波堤平面见图3。

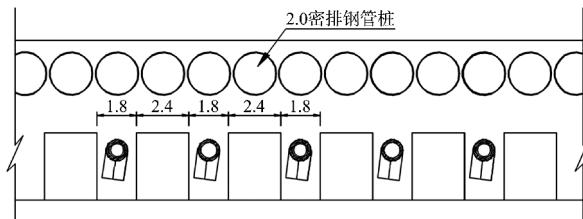


图3 码头密排桩防波堤平面 (单位: m)

## 2 数值模型

采用 FLOW 3D 对密排钢管桩的透浪特性进行数值计算。FLOW 3D 不需要额外架构网格生成模块或者后处理模块。FLOW 3D 采用有限差分法求解 Navier-Stokes 方程,其独特的 FAVOR 网格处理技术,可在结构的网格内部定义独立复杂的几何体,达到利用简单的矩形网格表示任意复杂的几何形状的目的。软件网格容易生成,数值精度高,内存要求相对较小。最大优势是可以快速、精确地预测自由液面的流动,使其在模拟波浪传播过程中具有很好的适应性。

### 2.1 理论控制方程

在笛卡尔坐标系下,采用 RNG 的湍流  $k-\varepsilon$  水流模型,进行不同工况下三维水池波浪与结构物相互作用的模拟。涉及的流体为不可压缩的黏性牛顿流体,其动量方程和连续方程中含有面积和体积分数参数,主要的计算表达式如下:

连续方程:

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

动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x - \frac{1}{\rho V_F} \left[ \frac{\partial}{\partial x}(A_x \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z}(A_z \tau_{xz}) \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y - \frac{1}{\rho V_F} \left[ \frac{\partial}{\partial x}(A_x \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z}(A_z \tau_{yz}) \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z - \frac{1}{\rho V_F} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{zz}) \right] \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为密度;  $A_x$ 、 $A_y$ 、 $A_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向可流动面积分数;  $u$ 、 $v$ 、 $w$  为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向速度分量;  $V_F$  为流动体积分数 (孔隙率);  $G_x$ 、 $G_y$ 、 $G_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向重力加速度;  $p$  为液体压力;  $\tau_{ij}$  为液体的剪应力, 其中  $i$ 、 $j$  分别代表作用面以及作用方向。

## 2.2 数值水池

### 2.2.1 水池布置

工程设计断面中静水位高程为 1.52 m, 原泥面高程为 -9.50 m, 水深为 11.02 m。由于密排钢管桩的对称特性, 因此仅研究单个缝作用下的正向规则波浪传播特性, 大大降低了网格数量, 提高了数值计算效率, 节约计算机运算内存。

数值水池中为了让造波源产生的规则波充分演化后与结构物相互作用, 根据物理模型试验的布置, 建立长 300 m ( $x$  方向)、宽 2.1 m ( $y$  方向)、高 16 m ( $z$  方向) 的数值模型水池, 见图 4。根据波浪传播理论, 波浪在传播至水池尾部会发生反射等现象影响计算结果, 为减少反射波浪的影响, 模型中在数值水池尾部设置大孔隙的消波结构, 当波浪穿过结构物后在水池尾部与大孔隙的消波结构相互作用以消除波浪剩余能量, 减小对计算结果的影响。计算中, 密排桩结构物设置于 100 m 处, 并在 50、200 m 处设置波面参数监测点 (浪高仪), 用于监测波面时刻变化结果。

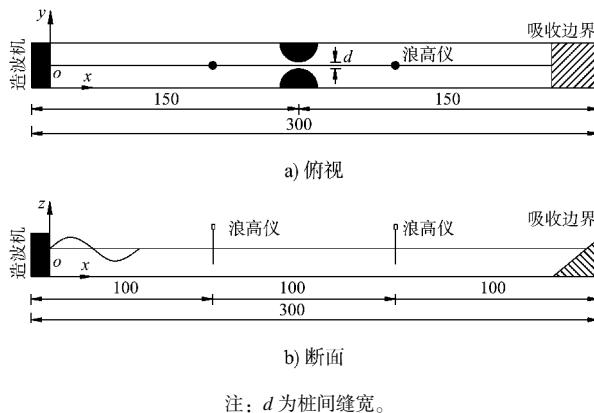


图 4 数值水池布置 (单位: m)

### 2.2.2 入射波浪参数

主要研究正向规则波作用下密排管桩结构防波堤的透射系数。为研究不同入射波高、周期以及桩间缝宽对波浪透射系数的影响, 选取的波试验参数见表 1。

表 1 试验参数

入射角度/ (°)	桩间缝宽 $d/m$	平均周期 $T_m/s$	入射波高 $H_m/m$
			1.0
0.05	5	5	1.5
			2.5
0	3	3	1.5
			1.0
0.10	5	5	1.5
			2.5
0.20	8	8	1.5
			1.0
0.30	14	14	1.5
			1.0
	3	3	1.5
			1.0
	5	5	1.5
			2.5
	8	8	1.5
			1.0
	14	14	1.5
			1.0
	5	5	1.5
			2.5

数值计算中对每组工况进行编号, 如 D1H2.5T1-0.1 代表: 桩径  $D = 1$  m, 入射波高  $H_m = 2.5$  m、 $T_m = 1.0$  s, 钢管桩间距 0.1 m, 以此类推。计算中采样间隔为 0.20 s, 规则波采样总时长为 100 s, 采样频次共计 500 次。通过波浪统计处理程序统计波浪传播过程中不同位置的平均波高等参数, 用于计算波浪透射系数, 采用两点法计算程序将波浪的入反射分离用于统计波浪的反射系数。

### 2.2.3 水池边界条件以及网格划分

数值模拟采用长度方向 ( $x$  方向) 为 300 m 的水池, 入射波浪沿  $x$  方向, 其中  $x_{\min}$  边界为规则波入射边界, 静水深为 11.02 m,  $x_{\max}$  为 outflow (流出) 边界, 同时设置大孔隙的消浪结构; 水池宽度方向为  $y$  方向, 由于  $y$  方向结构具有对称性, 为了减小计算网格数量, 加快计算速度, 因此  $y_{\min}$

和  $y_{\max}$  采用对称边界；水池竖直方向为  $z$  方向，其中  $z_{\min}$  边界设置为固壁边界， $z_{\max}$  边界设置为大气压边界，将流体与大气区分计算。

FLOW 3D 模拟的精度主要取决于网格的数量，划分的网格尺寸越小越好。张婷研究了 FLOW 3D 中网格划分对数值模拟精度的影响，发现网格长宽比为 3 时计算结果较佳，并对波浪波高范围内及密排桩位置进行网格局部加密，最小网格尺寸为 0.1 m。

#### 2.2.4 数值水池验证

对不含密排桩结构物的数值水池进行水池的造波、消波特性验证，水池内水深为 11.02 m，输入的波浪工况为  $H2.5T5$ ，入射波浪波速为 7.5 m/s，波长 37.18 m，因此 300 m 长度范围内即可存在约 8 个波，取计算时间为 100 s，待波浪传播稳定后监测数值水池 100 m 处的波面数据并与理论进行比较，见图 5。可知数值计算结果与波浪理论值吻合较好，说明基于 FLOW 3D 方法建立的数值水池可较好地模拟正向规则波浪传播特性。

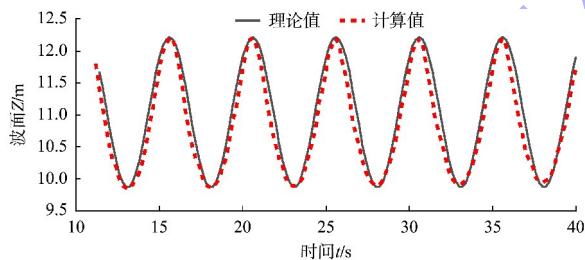


图 5 100 m 位置处数值水池计算结果与理论值对比

在数值波浪水池中为研究结构物波浪透射性能的可靠性，选取两种不同波浪条件下 ( $D1T14H2$  和  $D1T8H2$ ) 1 m 桩径的防波堤，当桩间缝宽分别为 0.05、0.10、0.20、0.30 m 时，统计波浪与结构物作用前后的波高平均值，并根据公式(6)求解透射系数。

$$\eta_T = H_L / H_F \quad (6)$$

式中： $\eta_T$  为波浪传播透射系数， $H_L$  为桩后波浪平均波高， $H_F$  为入射波浪平均波高。

透射系数与物模试验结果对比见图 6。可知在同一种波浪工况下，采用 FLOW 3D 数值模拟得到

的波浪透射系数与物理模型试验的统计结果最大误差在 5% 以内，吻合良好，说明所建立的波浪数值水池可很好地模拟波浪与密排桩基结构的相互作用，为后续研究波浪与结构物相互作用提供了方法支撑。

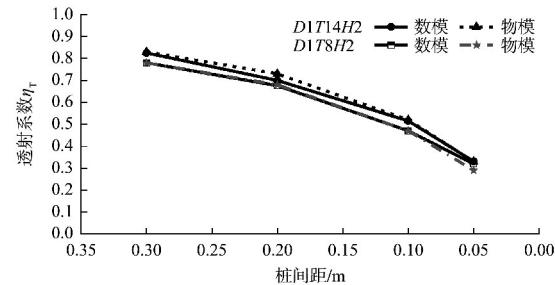


图 6 数模以及物模波浪透射系数对比

### 3 计算结果分析

#### 3.1 入射周期对透射系数的影响

为研究不同入射周期波浪对密排管桩防波堤透射系数的影响，对比分析相同波高、不同周期波浪条件下，相同桩径和桩间缝宽下的防波堤波浪透射系数，结果见图 7。可知随着入射波浪周期的增大，波浪的透射系数先增大后趋于平缓，说明长周期浪的透射性较强，也说明当入射波浪的周期大于一定数值后，密排管桩防波堤对于波浪的掩护作用不再明显增强。

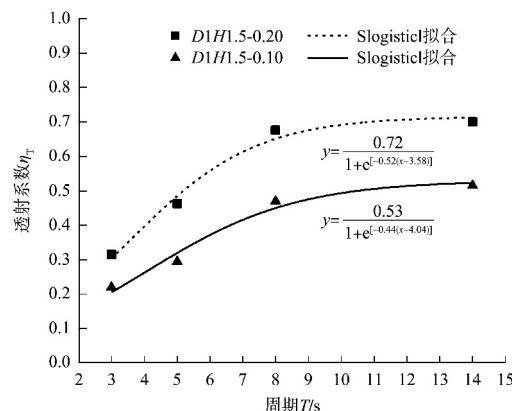


图 7 不同入射周期对透射系数的对比

#### 3.2 入射波陡对透射系数的影响

为研究不同入射波陡情况下波浪对密排管桩防波堤透射系数的影响，对比分析相同周期、不同波高的入射波浪条件下，相同的桩径、桩间缝宽下防波堤透射系数，结果见图 8。

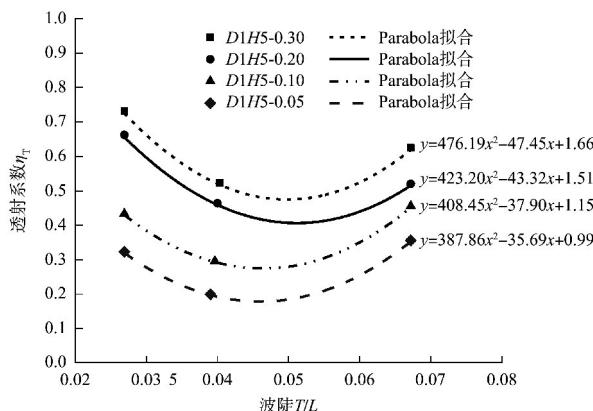
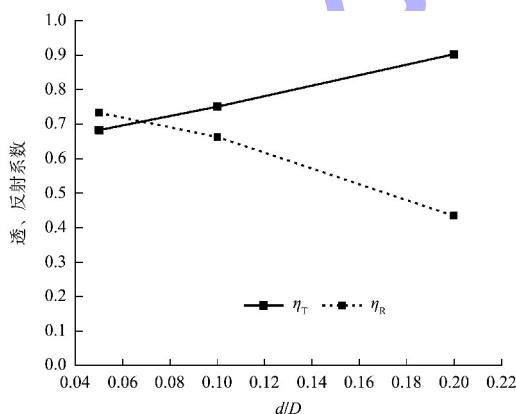


图 8 不同入射波陡对透射系数的对比

由图 8 可知, 在相同的入射周期、桩径、桩间缝宽情况下, 随着入射波浪波陡增大, 波浪的透射系数先减小后增大, 这是由于随入射波高增大, 波浪波陡增大, 波浪非线性增强, 当达到极端状态时, 波浪破碎导致能量耗损, 后随着波陡继续增大, 能量重新分布, 透射系数随之增大。另外, 从图中可以看出, 当桩间缝隙间距越小, 破碎波陡越小。

### 3.3 相对缝宽 $d/D$ 对透射系数的影响

为研究不同相对缝宽  $d/D$  对波浪与密排管桩相互作用下的防波堤透射系数的影响, 对比分析相同周期、相同波高的入射波条件下, 不同相对缝宽的防波堤透射系数, 并采用两点法对入反射浪进行分离, 统计得到波浪反射系数, 结果见图 9。

图 9 相对缝宽  $d/D$  对  $T5H1.0$  透、反射系数的影响对比

由图 9 可知, 在小周期波浪条件下, 波浪透射系数随密排管桩间缝宽的增大呈线性增大, 当桩间缝宽与桩径的比值为 0.05 时, 密排管桩防波堤的透射系数低于 70%。同时, 波浪反射系数  $\eta_R$

随着相对缝宽的增大呈线性减小。实际工程项目中, 根据港池泊稳条件以及作业要求可以试算求得密排管桩防波堤的相对缝宽以及桩径、桩间距, 为工程实际使用提供参考。

## 4 结论

- 1) 防波堤的透射系数随波浪周期的增大先增大后趋于平缓, 说明当入射波浪的周期大于一定数值后, 密排管桩防波堤对于波浪的掩护作用不再明显增强。
- 2) 防波堤的透射系数随波陡的增大先减小后增大, 可能由于在波陡增大过程中波浪发生破碎引起能量损耗而后又重新分布所致, 且选定 4 组不同缝宽的变化规律一致。
- 3) 在小周期波浪条件下, 波浪透射系数随密排管桩间缝宽的增大呈线性增大, 当桩间缝宽与桩径的比值为 0.05 时, 密排管桩防波堤的透射系数低于 70%。可以为密排管桩防波堤设计中港池泊稳条件的验算提供参考。

## 参考文献:

- [1] 张婷. 波浪的三维数值模拟及其应用 [D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [2] 姜雪亮. Flow 3D 在直立式码头平均越浪量计算中的应用研究 [J]. 建筑与预算, 2020(6): 80-83.
- [3] 侯勇俊, 熊烈, 何环庆, 等. 基于 FLOW-3D 的三维数值波流水槽的构建及应用研究 [J]. 海洋科学, 2015, 39(9): 111-116.
- [4] 陈兰坤, 潘新颖. 基于 FLOW-3D 的新型桩基透空堤消浪性能研究 [J]. 水运工程, 2022(1): 59-65.
- [5] 吉鸿敏, 张新燕, 朱德兰. 单圆柱桥墩冲刷的三维数值模拟 [J]. 中国农村水利水电, 2015(11): 152-155, 160.
- [6] 骆光杰, 詹懿德, 葛畅, 等. 基于 Flow (3D) 的海上风电单桩基础冲刷防护数值模拟研究 [J]. 水力发电, 2021, 47(8): 110-114.
- [7] 刘成林, 陈宇豪. 基于 Flow-3D 的水平射流冲刷泥沙数值模拟 [J]. 人民长江, 2016, 47(6): 87-91.
- [8] 张曙光, 尹进步, 张根广. 基于 Flow-3D 的圆柱形桥墩局部冲刷大涡模拟 [J]. 泥沙研究, 2020, 45(1): 67-73.

(本文编辑 赵娟)