

倒 π 型防波堤构型垂荡水动力系数黏流 分析研究

张益凡, 马山*, 段文洋, 陈小波

(哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 哈尔滨, 150001, Email: mashan0451@126.com, telephone: 13936462199)

摘要: 本研究基于 STAR-CCM+软件对倒 π 型结构防波堤进行强迫垂荡计算, 将所得出的水动力系数同势流值进行比较, 研究了该种结构防波堤的水动力黏性效应。结果表明, 此种防波堤的水动力系数与其运动的频率及幅值相关。黏性对附加质量的影响只有在大幅运动时(振幅吃水比 $>3/20$)才能体现出来, 并且对频率的变化并不敏感; 而黏性对阻尼系数的影响在小振幅时(振幅吃水比 $<1/20$)就能体现出来, 并且对频率的变化十分敏感, 高频运动时($\omega > 12$)体现的最为明显。

关键词: 浮式防波堤构型; 垂荡水动力系数; 黏性效应

1 引言

采用势流方法计算防波堤等带有尖角薄板的浮式结构物的运动时, 忽略了流动分离和漩涡的影响, 得出的运动往往与实际情况不符。为了研究倒 π 型防波堤结构水动力载荷的黏性效应, 研究势流预报方法的适用性, 同时为黏流水动力载荷系数对势流算法结果进行修正提供参考, 便于采用势流方法进行浮式防波堤水动力性能的高效计算。本研究基于 STAR-CCM+软件对该种结构的防波堤进行强迫垂荡计算, 研究该种结构防波堤的水动力黏性效应。

2 验证算例

由于缺少倒 π 型防波堤水动力系数的试验值, 在正式开始计算之前有必要对采用的数值模拟方法进行正确性验证。

基金项目: 国家自然科学基金 (51879058)

验证算例选自 Li^[1]。选取文中如图 1 所示板进行验证，板的横截面为正方形，边长为 0.4m，板的边缘为长方形，厚度为 0.005m。将板放于自由面下 1m 处，进行强迫垂荡试验，试验工况可见表 1，试验装置布置示意图可见图 2。

表 1 强迫垂荡验证算例工况表

浸没深度(m)	振荡频率(Hz)	振荡幅值(mm)
1.0	0.6	13,25,32,38,51,64,76

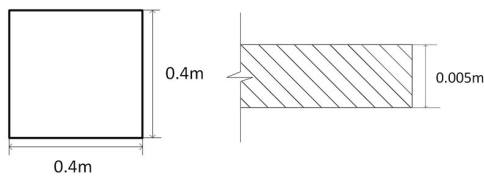


图 1 垂荡板尺寸示意图

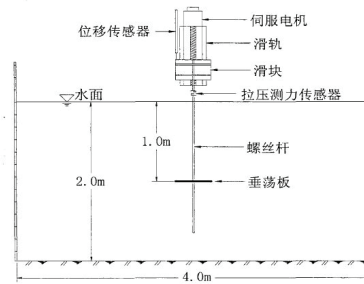


图 2 垂荡板试验装置示意图^[1]

这里 KC 数的定义为：

$$KC = \frac{2\pi a}{L} \quad (1)$$

其中， L 表示板的边长， a 为板垂荡运动的振幅。

图 3 和图 4 为 C_a 、 C_d 系数模拟值与试验值对比图，其中 C_a 系数最大相对误差小于 5%， C_d 系数最大相对误差小于 6%，可以认为该数值模拟方法具有较高的精度。可以用来进行防波堤强迫垂荡运动的计算。

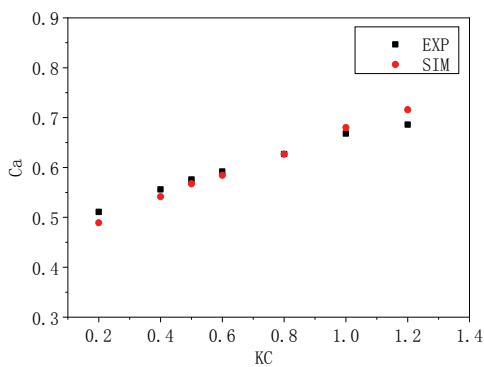


图 3 C_a 随 KC 数变化

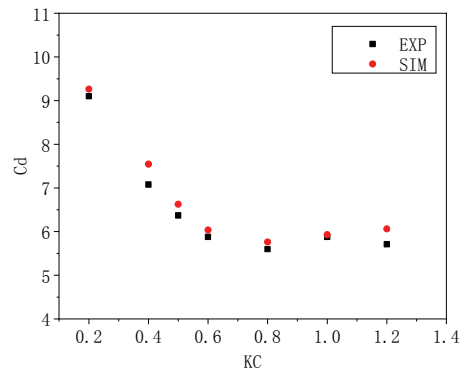


图 4 C_d 随 KC 数变化

3 防波堤水动力系数计算

3.1 模型介绍

此次计算采用的模型如图 5 所示。水深 $h=0.6\text{m}$ ，防波堤型宽 $B=0.5\text{m}$ ，吃水 $d=0.12\text{m}$ 或 0.2m ，板长 $c=0.0625\text{m}$ 或 0.125m ，板厚为 0.008m 。为了后期能更好地验证自由运动状态下防波堤的防波性能，数值模拟采用的尺度同防波堤绕射试验^[2]相一致。

在绕射实验^[2]中，根据重力相似准则，模型比尺取 1:33。模型尺度下采用的频率 ω 范围取 2~14rad/s。对应实尺度下的频率范围为 0.348~2.437rad/s，基本包括了海浪谱的能量集中区。

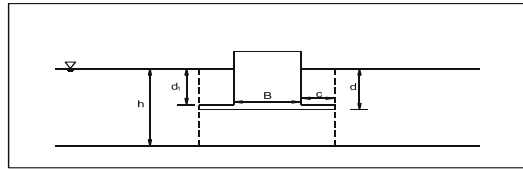


图 5 防波堤模型示意图

计算域的大小与强迫振荡所引起波的波长有关。通过尝试，计算域的长度取 16 倍的波长比较合适，左右两侧均设有消波区，消波阻尼区长度取 4 倍波长。选用重叠网格来进行防波堤强迫垂荡计算。背景域与重叠域网格划分情况如图 6 所示。计算第一层边界层厚度时所选取的 y^+ 为 5。

此算例中计算域左右两端边界条件设为压力出口，前后两端边界条件设置为对称平面，上方边界条件设置为压力出口，底部边界条件设置为壁面。湍流模型选择 SST $k-\omega$ 。选择全 y^+ 壁面处理。此算例采用隐式非定常求解方式，根据库朗数小于 0.5 来确定时间步。

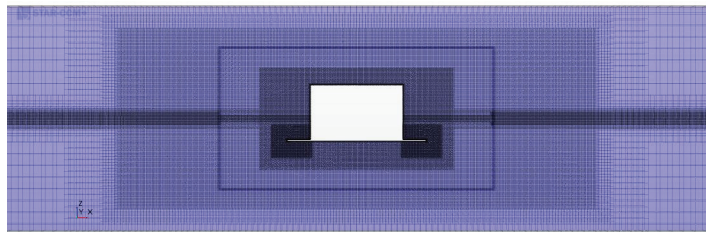


图 6 计算域网格划分情况

3.2 网格收敛性分析

采用大小不同的三套网格进行收敛性分析，每套网格的基础尺寸及网格数见表 2。

表 2 网格收敛性分析用表

	基础尺寸(m)	总网格数	背景域网格数	重叠域网格数
粗网格	1.0	22552	6240	16312
中等网格	0.5	125368	35016	90352
细网格	0.25	805940	236360	569580

比较三套网格得出的防波堤所受垂向力时历曲线可看出（图 7），防波堤受到的垂向力随着网格数的增加有明显的收敛趋势。为节省计算成本，下节的模拟全部基于中等网格进行。

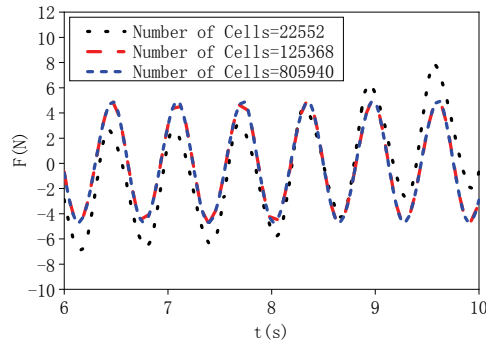


图 7 垂向力时历曲线不同网格下计算结果

3.3 水动力系数获取

在得到防波堤稳态水动力时历曲线后，采用最小二乘法，得出其水动力系数。本文中采用线性水动力假设。假设防波堤做强迫垂荡时受到的垂向力如下：

$$-M\ddot{X} - N\dot{X} - CX = f(t) \quad (8)$$

其中 $f(t)$ 为作用在防波堤上的水动力(矩)。

4 计算结果

4.1 同频率不同振幅下的水动力系数比较

选取吃水为 0.12m，板长为 0.125m 时的工况来分析同频率、不同振幅对防波堤垂荡水动力系数的影响。这里振动频率 ω 取 10 rad/s，振幅选取 0.001~0.048m 间的 17 个数，由公式(1)可知，对应的 KC 数范围在 0.008~0.4 之间。

由图 8 可知， $KC < 0.1$ 时，附加质量系数模拟值在势流值附近振荡，最大相对误差小于 0.5%，可以认为此时势流得出的附加质量系数是相当准确的。 $KC < 0.2$ 时阻尼系数与振幅呈线性关系，考虑流体黏性效应的阻尼系数结果相比于势流结果差别明显。 $KC > 0.1$ 附加质量系数模拟值与势流值开始出现偏差。当 $KC > 0.2$ 时阻尼系数不再随着幅值线性变化，漩涡阻尼的非线性效应可能是原因之一。

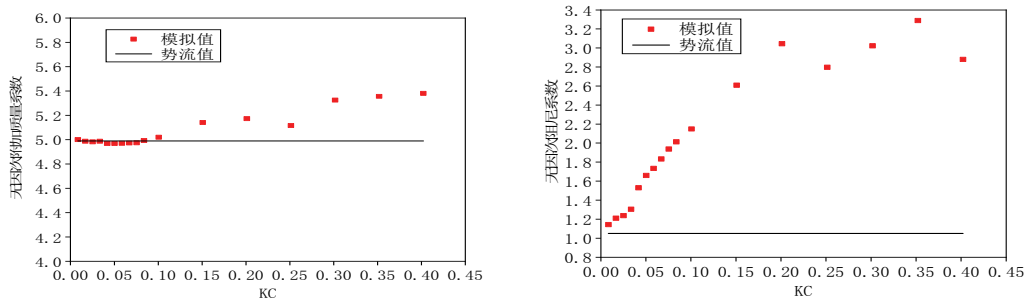


图8 无因次化垂荡水动力系数模拟值随幅值的变化图

4.2 同振幅不同频率下的水动力系数比较

下面选取两种吃水，两种底板长度的防波堤构型来分析同振幅、不同频率对防波堤垂荡水动力系数的影响。这里振动幅值 a 取 $0.006m$ (吃水的 $1/20$)，振动频率 ω 的范围在 $2\sim 14rad/s$ 之间。

计算工况表见表 3，根据板长及吃水的不同将工况依次进行编号，共分为 4 组。其中每组工况计算 13 个频率点。

图 9 中实线为势流值，离散点为黏流计算值。横轴为频率(rad/s)，纵轴为无因次附加质量系数和阻尼系数。其中 A、B、C、D 分别对应工况 1 至工况 4 时的无因次附加质量系数，E、F、G、H 分别对应工况 1、2、3、4 时的无因次阻尼系数。

表 3 同振幅不同频率强迫运动计算工况

工况序号	振荡频率 ω (rad/s)	板长 c (m)	吃水 d (m)
1	$2\sim 14$	0.125	0.12
2	$2\sim 14$	0.0625	0.12
3	$2\sim 14$	0.125	0.2
4	$2\sim 14$	0.0625	0.2

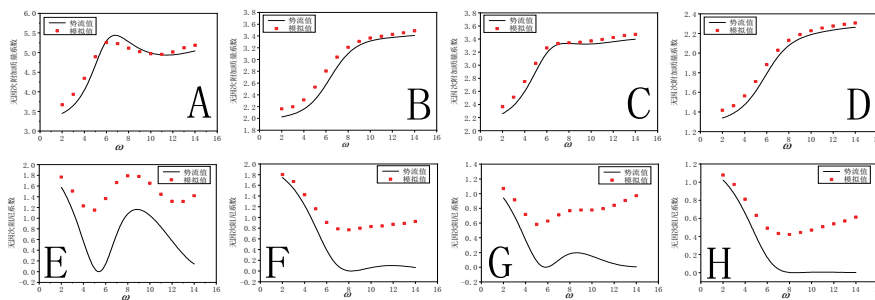


图9 不同工况下强迫垂荡水动力系数

由图 9 可知，小振幅下 (振幅吃水比为 $1/20$)且振动频率 ω 在 $2\sim 14rad/s$ 范围内变化时，垂荡附加质量系数模拟值与势流值差距较小，相对差别最大值在 8.44% ，说明小振幅下，

黏性对附加质量影响较小。而垂荡阻尼系数模拟值与势流值差距较大,除工况二中极个别点外,两者间的相对误差在整个频率范围内都大于 10%,说明即使在小振幅下,黏性对阻尼仍有很大贡献。

5 结论

研究了高频运动时($\omega=10$),垂荡水动力系数随运动幅值的变化规律以及小幅运动时(振幅吃水比 $<1/20$)垂荡水动力系数随频率的变化规律。结果表明,倒 π 型防波堤的垂荡水动力系数与其运动的频率及幅值相关。可以看出,黏性对附加质量的影响只有在大幅运动时(振幅吃水比 $>3/20$)才能体现出来,并且对频率的变化并不敏感;而黏性对阻尼系数的影响在小振幅时(振幅吃水比 $<1/20$)就能体现出来,并且对频率的变化十分敏感,高频运动时($\omega>12$)体现的最为明显。

参 考 文 献

- 1 Li J.X., Liu S.X., Zhao Min. Experimental investigation of the hydrodynamic characteristics of heave plates using forced oscillation[J]. Ocean Engineering, 2013,66:82-91.
- 2 杨朕. 带水平外突底板的方箱浮式防波堤消波性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学船舶工程学院, 2015.

Heaving hydrodynamic coefficient analysis of an inversed- π type breakwater based on CFD simulation

ZHANG Yi-fan, MA Shan*, DUAN Wen-yang, CHEN Xiao-bo

(College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, 150001,

Email:mashan0451@126.com)

Abstract: In order to study the hydrodynamic viscous effect of an inversed- π type breakwater, harmonic heaving motion was on it based on viscous flow commercial software STAR-CCM+. Results show that hydrodynamic coefficients of this breakwater were affected both by its motion frequency and amplitude. The influence of viscosity on added mass become relatively more evident when the motion amplitude is large, but it is not sensitive to the oscillation frequency. However, the influence of viscosity on damping coefficient is quite evident, even when motion amplitude is small, and it is sensitive to the oscillation frequency.

Key words: Floating breakwater structure; vertical hydrodynamic coefficient; viscous effect.