



# 双浮箱-双水平板浮式防波堤的数值模拟

王铁涛, 刘祚秋

(中山大学工学院 应用力学与工程学系, 广东 广州 510006)

**摘要:** 针对新型双浮箱-双水平板防波堤, 应用 Ansys Workbench 软件和 AQWA Graphical Supervisor (AGS) 图像后处理软件, 建立三维数值模型, 研究浮箱的相对吃水深度、浮箱的相对间距和相对板间距对消波效果的影响以及自身稳定性分析。结果表明: 增大浮箱的吃水深度和相对板间距, 可以减小防波堤的透射系数; 取浮箱相对间距为 0.22~0.33 时, 有更好的消波效果; 双浮箱-双水平板浮式防波堤的固有周期大约为 5 s, 实际应用中应避免固有周期与波浪周期相近。研究结果可以为该型防波堤的设计提供理论基础。

**关键词:** 浮式防波堤; 数值模拟; 频域分析; 透射系数; 幅值响应算子

中图分类号: U 656.24

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)03-0046-05

## Numerical simulation of twin pontoon-twin horizontal plate floating breakwater

WANG Tie-tao, LIU Zuo-qiu

(College of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The numerical simulation model of twin pontoon-twin horizontal plate floating breakwater is established by hydrodynamics simulation software ANSYS/Workbench and AQWA Graphical Supervisor. The investigation of the floating breakwater including the underwater penetration and the spacing of two pontoons and two plates shows that with the increase of the underwater penetration and the spacing of two plates the transmission coefficient decreases. When the relative spacing of two pontoons varies from 0.22 to 0.33, the transmission coefficients turn smaller. The natural period of the twin pontoon-twin horizontal plate floating breakwater is about 4.8~5.3 s. In the design, we should pay attention to avoid producing resonance when the natural period of floating breakwater and the wave period are close. The research will provide a theoretical basis for the breakwater design.

**Keywords:** floating breakwater; numerical simulation; time domain analysis; transmission coefficient; RAO

随着社会的快速发展, 陆上能源逐渐短缺, 人类开发海洋的进程日益加快。防波堤建筑物可有效为海上平台提供保护, 防御波浪对港湾的侵袭, 围护港内水面平稳; 还可以阻挡泥沙的流动, 避免港内淤积; 阻挡流冰涌入港内。在深水环境中, 传统的固定式防波堤造价大幅提高, 所以浮式防波堤成为更好的选择。浮式防波堤较固定式防波堤的主要优势有: 具有极强的海水交换功能; 浮体、缆绳和锚具等这些构件制造工艺简单,

便于调整安放位置; 不需要进行地基处理, 可在软土海床建造; 随着水深的不断增加, 其延米造价更为经济<sup>[1]</sup>。

浮式防波堤结构形式多样, 通常情况下, 浮式防波堤有以下 4 种类型<sup>[2]</sup>: 浮箱式、浮筒式、浮筏式和绳网式。Martinelli<sup>[3]</sup>通过试验的方法对布置缆绳系泊系统的多体浮式防波堤进行了消波特性的研究。Ioanna<sup>[4-5]</sup>通过 WAMIT 数模软件, 基于三维水动力学方程, 分别对不加缆绳系泊系统的

收稿日期: 2015-08-16

作者简介: 王铁涛 (1990—), 男, 硕士研究生, 从事港口航道及近岸工程研究。

铰接多浮体浮式防波堤和添加缆绳系泊系统的铰接多浮体浮式防波堤, 在单频线性规则波的作用下, 进行了消波特性的分析。张伟等<sup>[6]</sup>利用AQWA数值模拟分析软件, 分别在规则波和不规则波作用下, 分析了布置4根传统锚链锚泊系统的单个浮式方箱防波堤的透射效果。为提高消波性能, 国内学者提出了许多新型结构形式, 如板网式浮式防波堤<sup>[7]</sup>、单浮箱-水平板复式防波堤<sup>[8]</sup>、双浮筒-水平板浮式防波堤<sup>[9]</sup>等。其中, 杨彪<sup>[10]</sup>在2014年提出了双浮箱-双水平板浮式防波堤并进行了物理模型试验, 探讨了相对宽度、相对波高和锚链刚度等因素对其消波性能的影响。

双浮箱-双水平板浮式防波堤比双浮箱防波堤有更好的消波效果和水动力特性, 有良好的应用前景<sup>[10]</sup>。但其研究较少, 本文便以双浮箱-双水平板浮式防波堤为研究对象, 通过Ansys Workbench软件建立数学模型, 进行水动力分析。同时运用AQWA Graphical Supervisor图像后处理软件提取数据, 研究相对板间距、相对吃水深度及相对浮箱间距对防波堤消波性能的影响。

## 1 基本理论

在无旋场中, 不可压缩理想流体的速度势控制方程可以用Laplace方程表示:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

假定自由表面的波浪运动及浮式防波堤的运动是微幅的, 因此可以视速度势为线性的。运用线性叠加原理, 总速度势可以分解为入射波速度势、绕射速度势和辐射速度势3部分的线性叠加:

$$\phi = \phi_i + \phi_s + \phi_r \quad (2)$$

式中:  $\phi_i$  表示入射势, 不计浮式防波堤对入射波流场的影响;  $\phi_s$  表示绕射势, 为净值浮式防波堤对流场速度分布所产生的影响;  $\phi_r$  表示辐射势, 为浮式防波堤的振荡对流场速度分布的影响<sup>[11]</sup>。

根据三维势流理论求得入射势、绕射势和辐射势之后, 利用伯努利方程:

$$P = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} - \rho g z \quad (3)$$

可以求出流场内的压力分布, 将其沿防波堤湿表

面积分, 即可得到防波堤受到的一阶波浪力:

$$f_i = - \int_s P n_i ds = - \int_s i \omega \rho (\varphi^I + \varphi^D) n_i ds \quad (4)$$

防波堤在频域下的一阶运动方程为:

$$(m_{ij} + \mu_{ij}) \ddot{x}_j + \lambda_{ij} \dot{x}_j + c_{ij} x_j = f_i (i, j = 1, 2, \dots, 6) \quad (5)$$

式中:  $m_{ij}$  为质量或惯性矩;  $\mu_{ij}$  为附加质量;  $\lambda_{ij}$  为阻尼系数;  $c_{ij}$  为恢复力系数;  $f_i$  为一阶波浪力,  $x_j$  为运动幅值<sup>[11]</sup>。

在workbench中建立双浮箱-水平板浮式防波堤的模型, 设定参数, 进行时域分析。将计算结果文件导入AQWA Graphical Supervisor图像后处理软件, 提取数据, 计算可得防波堤的透射系数。波浪的透射系数为:

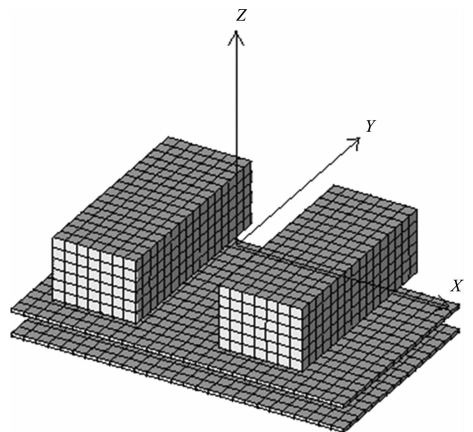
$$K_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (6)$$

防波堤的消波系数为

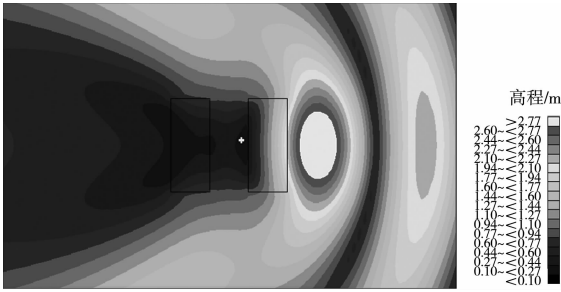
$$K_x = 1 - K_t \quad (7)$$

式中:  $H_t$  为透射波高;  $H_i$  为入射波高。

计算透射波高有两种方法, 一为最大值法, 即选取浮式防波堤后方矩形区域内的最大波浪高程值; 一为平均值法, 即对相同矩形区域内的点进行筛选提取, 再进行均值计算。其中代表防波堤后方矩形区域为  $-7 \leq x \leq 7$ 、 $2B \leq y \leq L_w$ ,  $L_w$  为入射波长。本文采取平均值法,  $x$  轴方向每隔 1.5 m 取一个值,  $y$  轴方向每隔 2 m 取一个值, 然后均值计算可得波浪的透射波高。图1是模型的三维图和计算结果在AQWA Graphical Supervisor显示的波面高程。



a) 防波堤三维模型



b) AQWA Graphical Supervisor 中的波面高程

图1 防波堤模型及计算结果二维视图

### 2 防波堤模型及波浪参数设置

试验海水深度取 30 m，海水密度为 1 025 kg/m<sup>3</sup>。采用规则波，振幅 1 m，频率范围为 1.45 ~ 2 rad/s。

图 2 是防波堤模型。防波堤的尺寸为水深  $D = 30$  m，规则波振幅  $A = 1$  m，单个浮箱尺寸为  $L \times W \times H = 14.4$  m  $\times$  (5、6、7、8) m  $\times$  4.5 m，吃水深度  $D_w = 2.8、3、3.2、3.4、3.6$  m，浮箱间距  $K_1$  为 8、6、4、2 m，防波堤总宽度  $B = 18$  m，单个水平板尺寸为 14.4 m  $\times$  24 m  $\times$  0.25 m，板间距  $K_2$  为 0.7、0.9、1.1、1.3、1.5、1.7 m。其中防波堤的总宽度为两个浮箱外沿的距离，防波堤的吃水深度  $D_w$  是从浮箱的底部向上计算。浮箱与浮箱、浮箱与水平板以及水平板与水平板之间设置刚性链接，不考虑相对位移和相对转动。

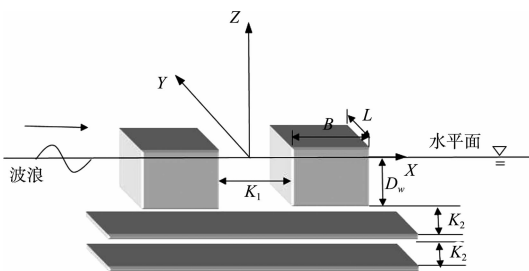


图2 防波堤模型尺寸

### 3 计算结果分析

#### 3.1 模型验证

本文的防波堤模型基于杨彪<sup>[10]</sup>建立的试验模型，予以等比例放缩建立数值模型。如图 3，将防波堤的透射系数随相对宽度  $B/L_w$  ( $B$  为防波堤总宽度， $L_w$  为波长) 变化趋势的数值结果与物理模

型试验结果相比较，可发现二者在数值上是接近的，总体趋势上是相同的，但数值模拟结果呈减小趋势，与试验结果稍有差异。查阅文献[8]发现，相似的防波堤模型的透射系数随相对宽度的增大而减小，与本次数值模拟结果是相似的。图 4 比较数值模型与物理模型的垂荡运动（垂直方向位移/波高），可以看出二者在趋势和数值上都比较接近。以上说明本文所采用的数值模型和方法是正确的。

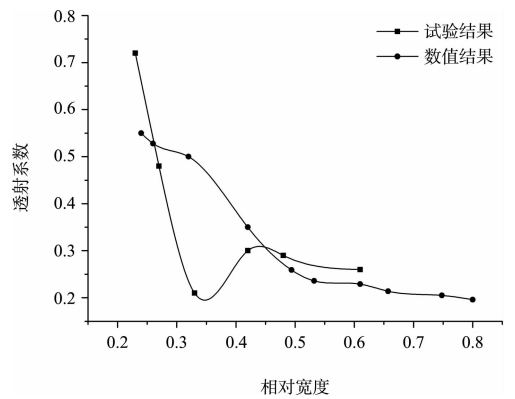


图3 不同相对宽度下防波堤的透射系数比较

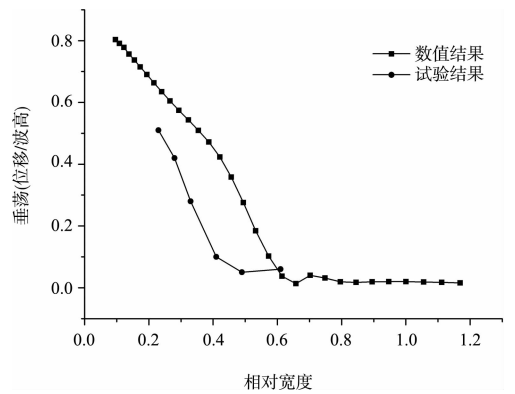


图4 垂荡运动比较

#### 3.2 相对吃水深度对防波堤的消波性能的影响

防波堤的相对吃水深度即吃水深度与水深的比值  $D_w/D$  取单个浮箱尺寸为 14.4 m  $\times$  6 m  $\times$  4.5 m，浮箱间距为 6 m，防波堤总宽度为 18 m。水平板尺寸不变，为 14.4 m  $\times$  24 m  $\times$  0.25 m。板间距为 1.5 m。改变防波堤的吃水深度，取值 3.8、3.6、3.4、3.2、3 m，防波堤的相对吃水深度即为 0.127、0.12、0.113、0.107、0.1。

由图 5 可以看出，对于双浮箱-双水平板浮

式防波堤, 其他参数不变, 透射系数随相对吃水深度的增加而减小。这是因为随着吃水增加, 浮箱与来波方向水体的接触面积更大, 相互作用增加, 波浪从箱下透射过去的能量越少。当相对吃水深度达到 0.12 时透射系数最小, 消波效果最明显; 吃水再增加时, 透射系数又较 0.12 时增加。

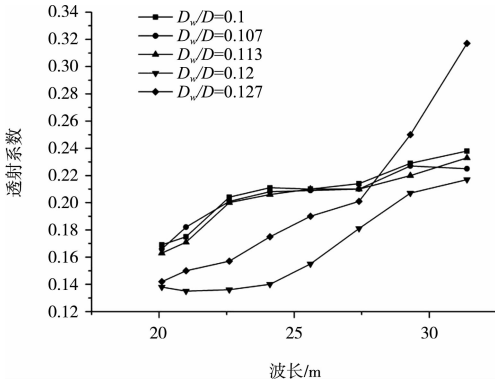


图5 不同相对吃水深度下防波堤的透射系数

### 3.3 浮箱间的相对距离对防波堤消波性能的影响

两浮箱的相对间距为浮箱间距与总宽度的比值  $K_1/B$ 。防波堤的总宽度为两个浮箱的宽度加上其间距, 保持总宽度不变, 为 18 m, 改变浮箱的宽度及浮箱间距, 浮箱宽度取值 5、6、7、8 m, 两浮箱的间距为 8、6、4、2 m。两浮箱的相对间距分别是 0.44、0.33、0.22、0.11。浮箱吃水 3 m, 板间距为 1.5 m。

如图 6 所示, 随着浮箱的相对间距增加, 防波堤的透射系数先减少再增加。当浮箱的相对间距为 0.22、0.33 时, 二者的透射系数最小且相近, 此时消波效果最好。相对间距增大或减少, 透射系数都增加。当相对板间距为从 0.33 变化到 0.11 时, 透射系数增加。随着两浮箱间距不断缩小, 双浮箱可近似看为一个单浮箱, 侧面印证双浮箱较单浮箱有更好的消波效果。

### 3.4 相对板间距对防波堤消波性能的影响

相对板间距为板间距与波高的比值  $K_2/H_1$ , 波高  $H_1$  为 2 m, 保持单个浮箱的尺寸不变, 即为 14.4 m × 6 m × 4.5 m, 浮箱间距为 6 m, 防波堤总宽度为 18 m, 吃水为 3 m。改变板间距, 取值

0.7、0.9、1.1、1.3、1.5、1.7 m, 相对板间距分别是 0.35、0.45、0.55、0.65、0.75、0.85。

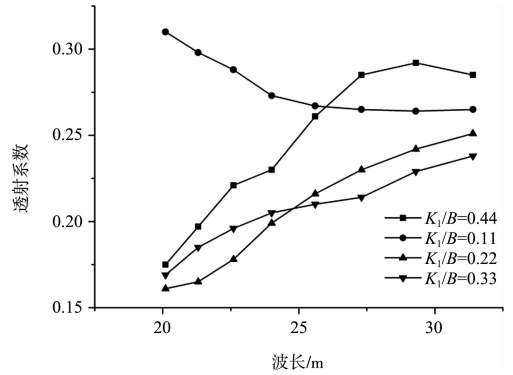


图6 不同浮箱相对间距下防波堤的透射系数

据图 7 可得, 随着相对板间距的增加, 防波堤的透射系数随之减少, 当减少至 0.75、0.85 时, 透射系数趋于稳定, 不随板间距的减少而变化。双层水平板可以与板间的水质点相互作用, 破坏其运动轨迹, 增加整个浮式防波堤与入射波浪的相互作用, 增强防波堤的消波效果。

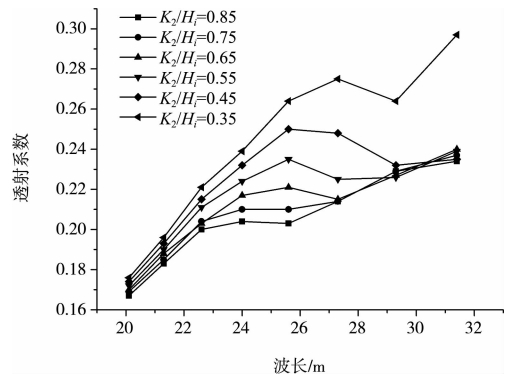


图7 不同板间距下防波堤的透射系数

### 3.5 稳定性分析以不同相对板间距为例

图 8 给出了不同板间距在不同波浪垂直入射条件下的纵摇、横荡、和垂荡的幅值响应算子, 结果显示, 防波堤的纵摇、横荡和垂荡的峰值频率为 1.25 rad/s, 固有周期为 5 s, 当固有周期与遭遇波浪频率接近时, 会产生共振, 导致防波堤剧烈运动, 设计时应避开常见波浪周期。峰值振幅随板间距的增加而减小, 原因是随着板间距的增大, 防波堤的重心下移, 增大了水动力系数, 防波堤更稳定。

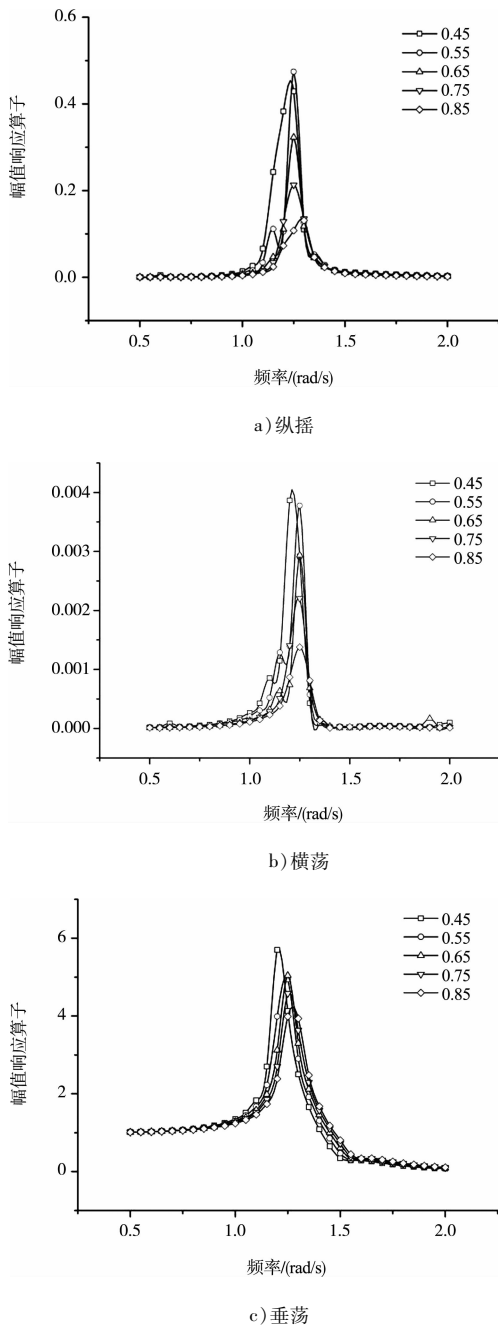


图8 不同相对板间距下防波堤的响应算子

### 4 结论

1) 相对吃水深度对双浮箱-双水平板浮式防波堤的消波性能有影响, 随着吃水深度的增加, 透射系数越小, 相对吃水深度达到 0.12 时, 防波堤的消波效果最好。

2) 随着浮箱的相对间距的变化, 防波堤的透射系数有较大的变化, 是防波堤消波性能一个重要的影响因素。当相对间距为 0.22、0.33 时, 消波效果最好。

3) 在一定范围内, 随相对板间距的增大, 透射系数减少。增加至 0.75、0.85 时, 透射系数趋于定值, 此时有较好的消波效果。

4) 双浮箱-双水平板浮式防波堤的固有周期为 5 s, 当遭遇波浪周期与之相近时, 会引起共振, 破坏防波堤。应根据施工当地的常见波浪周期选择防波堤的类型。

### 参考文献:

- [1] 王永学, 王国玉. 近岸浮式防波堤结构的研究进展与工程应用[J]. 中国造船, 2002(S1): 314-321.
- [2] McCartney M, Bruce L. Floating breakwater design [J]. J Waterway Port Coastal Ocean Eng, 1985, 111 (2): 304-318.
- [3] Martinelli L, Ruol P, Zanuttigh B. Wave basin experiments on floating breakwaters with different layouts [J]. Appl Ocean Res, 2008, 30(3): 199-207.
- [4] Ioanna Diamantoulaki, Demos C Angelides. Analysis of performance of hinged floating breakwaters[J]. Engineering Structures, 2010, 32(8): 2 407-2 423.
- [5] Ioanna Diamantoulaki, Demos C Angelides. Modeling of cable-moored floating breakwaters connected with hinges[J]. Engineering Structures, 2011, 33(5): 1 536-1 552.
- [6] 张伟, 程勇, 马哲, 等. 浮式方箱防波堤的 AQWA 数值模拟研究[J]. 港工技术, 2011(3): 4-6.
- [7] 董国海, 郑艳娜, 李玉成, 等. 板-网结构浮式防波堤消浪性能的试验研究 [J]. 工程力学, 2006, 23 (7): 142-146.
- [8] 董华洋, 王永学, 侯勇, 等. 矩形箱式浮防波堤水动力特性试验研究[J]. 渔业现代化, 2009, 36(3): 7-11.
- [9] 肖霄, 王永学, 王国玉, 等. 双浮筒-水平板式浮防波堤性能研究[J]中国造船, 2010(S2): 484-491.
- [10] 杨彪, 陈智杰, 王国玉, 等. 双浮箱-双水平板式浮式防波堤试验研究 [J]. 水动力学研究与进展, 2014, 29(1): 40-49.
- [11] 彭泽宇, 刘祚秋, 富明慧. 内河锚泊浮式码头水动力性能分析[J]. 水利水运工程学报, 2015(3): 53-58.