



基于 Fluent 的双侧挡浪板透空堤透浪特性的计算

邹恒¹, 陈德春¹, 闫少华²

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 浙江省水利水电勘测设计院, 浙江 杭州 310002)

摘要: 基于 Fluent 软件平台, 采用两相流与 VOF 模型, 通过 Fluent 的 UDF 二次开发功能建立数值水槽模型, 且对双侧挡浪板透空式防波堤透浪特性进行数值计算, 经与物理模型试验结果进行对比, 进而展开多组次计算试验, 探究 $d/H > 5$ 条件下双侧挡浪板透空式防波堤透浪特性的影响因素, 基于此, 拟合双侧挡浪板透空式防波堤透浪系数公式, 可计算相应范围条件下双侧挡浪板透空式防波堤透浪系数。

关键词: 防波堤; 透浪系数; Fluent; 公式拟合

中图分类号: U 656. 2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)04-0072-06

Calculation of wave transmission property of double-barrier penetrated breakwater based on Fluent

ZOU Heng¹, CHEN De-chun¹, YAN Shao-hua²

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hangzhou 310002, China)

Abstract: Based on two phase flow and VOF models of software Fluent, a numerical wave tank is established using the UDF function of the software. The wave transmission property of regular waves near a double-barrier penetrated breakwater is studied numerically, and the results are compared with the experimental values. More groups of tests are conducted to study the effect factors of wave transmission property of double barriers penetrated breakwater when $d/H > 5$. Based on those factors, a modified formula is given, which can be used to calculate the transmitted coefficients of the double-barrier penetrated breakwater in corresponding situations.

Keywords: breakwater; transmission coefficient; Fluent; formula fitting

2013年8月, 国务院批准设立上海自由贸易试验区, 位于区内的芦潮港渔港(图1)也将建设成为一个具有综合功能的现代化渔港。拟建渔港位于开敞海岸, 水深、浪大, 且地基为软基, 渔港平面布置形式为东、南防波堤组成L型(图2)。其中南防波堤为透空式, 长542 m, 堤前地形平缓, 涂面高程为-11.0 ~ -11.7 m(吴淞基面); 东堤由长562.5 m的透空堤、长400 m的透空引桥、长360 m的实体堤组成, 东堤堤前地形变化明显, 涂面高程-11.0 ~ 0.7 m。



图1 芦潮港渔港地理位置

收稿日期: 2015-10-20

作者简介: 邹恒(1991—), 男, 硕士研究生, 从事港口海岸及近海工程研究。

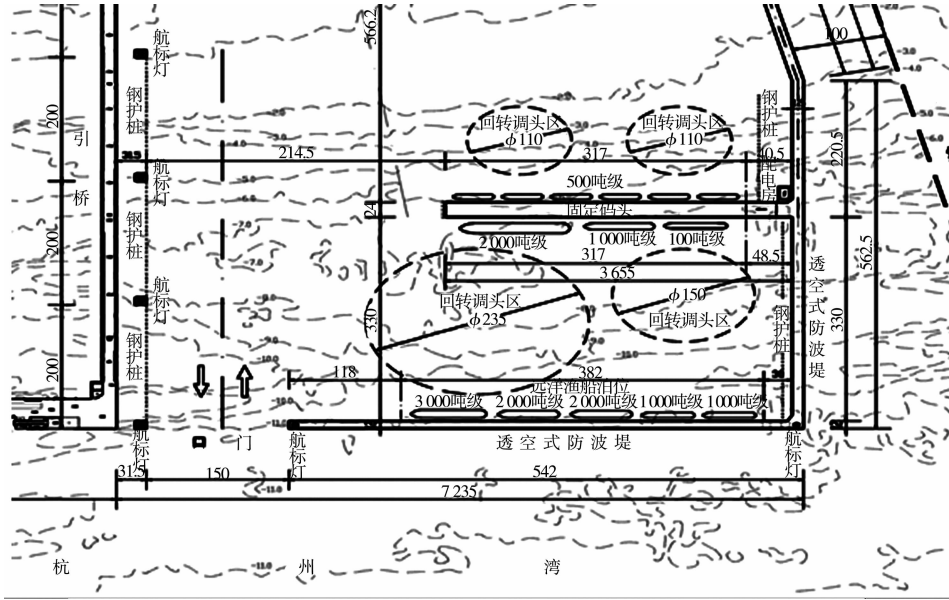


图2 芦潮港渔港防波堤平面布置 (单位: m)

透空式防波堤尺度与断面结构以水深条件较深的南防波堤(图3)为例, 南堤挡浪墙顶高程9.5 m, 前沿底高程-11.5 m, 堤顶宽12 m、堤顶高程7.05 m, 横梁顶高程3.9 m、底高程2.40 m。

前后设置挡浪板, 挡浪板高度4.4 m, 底高程-2.0 m。排架间距为5.0 m, 每樁排架布置4根35:1的预应力管桩, 管径800 mm, 组成2对叉桩。

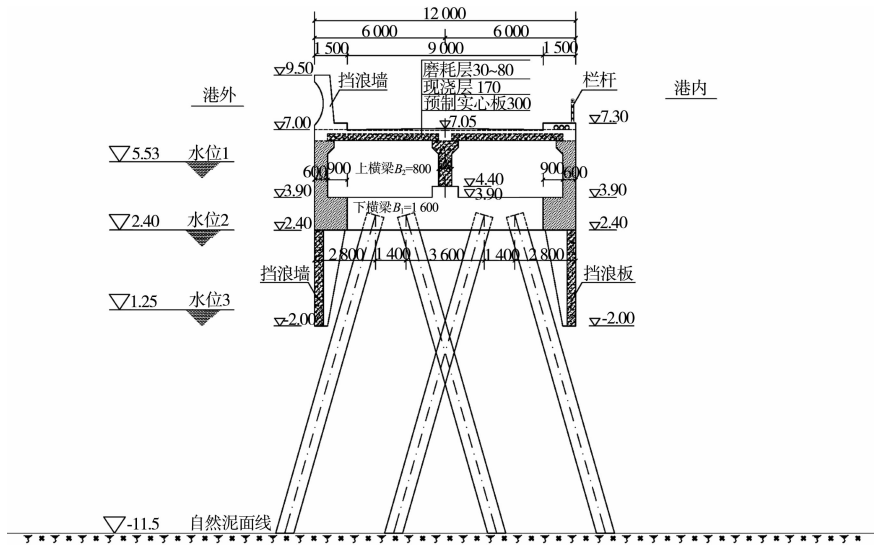


图3 双侧挡浪板透空式防波堤断面 (高程: m; 尺寸: mm)

透空式防波堤的结构选型和消浪机理极其复杂, 目前对于双侧挡浪板桩基透空式防波堤的透浪特性研究多采用物理模型试验^[1-2]。分析对比 JTS 154-1—2011《防波堤设计与施工规范》有关透空式防波堤透浪系数计算公式对于相对水深、波高、波陡条件的适用范围, 芦潮港渔港相应条件均

不在公式范围。对此, 本文基于 Fluent 软件, 建立数值波浪水槽和双侧挡浪板透空式防波堤模型进行规则波作用下的数值模型试验, 并结合理论分析和物理模型试验综合研究 $d/H > 5$ 、 $d/L < 0.25$ 条件下, 双侧挡浪板透空式防波堤的透浪特性。试验依据重力相似准则采用正态模型, 模型比例

1:29。透空式防波堤堤前波要素见表 1。

表 1 南防波堤断面模型试验堤前设计波要素

水位 h/m		水深 d/m		设计波要素(模型值)		
原型	模型	原型	模型	波高 H/m	周期 T/s	波长 L/m
5.53	0.191	17.03	0.59	0.10	1.25	2.26
2.40	0.083	13.90	0.48	0.08	1.14	1.87
-1.25	-0.043	10.25	0.35	0.06	1.01	1.46

1 数学模型与数值水槽

1.1 控制方程

在二维直角坐标系下，对于不可压缩且黏性系数为常数的流体，其连续性方程为：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中： u 为 x 方向的速度分量； w 为 z 方向的速度分量。

Navier-Stokes 方程：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial y} = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad (3)$$

式中： ρ 是流体的密度； p 是流体的压力； ν 是流体的运动学黏性系数。

VOF 输运方程：

$$\begin{cases} \frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \frac{\partial (u\alpha_q)}{\partial x} + \frac{\partial (w\alpha_q)}{\partial z} = 0 \\ \alpha_1 + \alpha_2 = 1 \quad q = 1, 2 \end{cases} \quad (4)$$

式中：体积分函数 α_q 定义为单元内第 q 相流体所占有体积与该单元的体积之比。

1.2 数值水槽的验证

采用推板式动边界造波法，应用 Fluent 中的 UDF 宏 DEFINE_CG_MOTION 编程来定义动边界的速度，就相当于在水槽的一侧边界处安装了活塞式造波机，由造波机的推板运动产生沿水槽方向的重力波。为了简化问题，取推板做谐波运动，所产生的波浪的波面方程 $\eta(x,t)$ 为：

$$\eta(x,t) = \frac{S w^2 \sinh(2kd)}{kg[2kd + \sinh(2kd)]} \cos(kx - wt) \quad (5)$$

式中： S 为造波板冲程； t 为时间； $w = \frac{2\pi}{T}$ 为圆频率； d 为水深； k 为波数^[3]。

消波方法采用动量源消波法，在水槽末端大于 1 倍波长范围内添加消波段，使用 Fluent 软件中的 UDF 宏 DEFINE_SOURCE 编程定义动量源的方法来实现消波^[4]。在消波段内，动量方程为：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \mu u \quad (6)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial y} = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \mu w \quad (7)$$

式中： ρ 为流体的密度； μ 为消波系数，沿波浪传播方向取线性分布 $\mu = \mu(x)$ 。

$$\mu(x) = \frac{\alpha(x - x_1)}{L_c} \quad (8)$$

式中： α 为阻尼系数内的经验参数； x_1 为消波区的起始坐标； L_c 为消波区的长度^[5]。

数值水槽见图 4，水槽长度为 12 m，其中工作区 9 m、消波区 3 m，水槽高度为 0.8 m。当水槽水位为 0.59 m、入射波波高为 0.10 m、周期 1.25 s 时，通过数值波浪模拟得到的在水槽监测面 4# 位置上不同时刻的波高值对比理论波形 $\eta(x,t) = \frac{H}{2} \cos(kx - wt)$ 不同时刻的波高值(图 5)，可以看出基于 Fluent 软件进行的波浪数值模拟产生的波形经过 5~6 个周期后即可达到稳态，与理论波形吻合较好。由于非线性作用的影响，波浪在传播过程中，出现了明显的波峰较尖、波谷较平坦的非正弦波特征，这符合实际的水波现象。

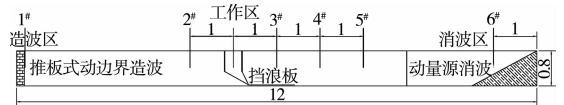


图 4 透空式防波堤数值波浪水槽模型 (单位: m)

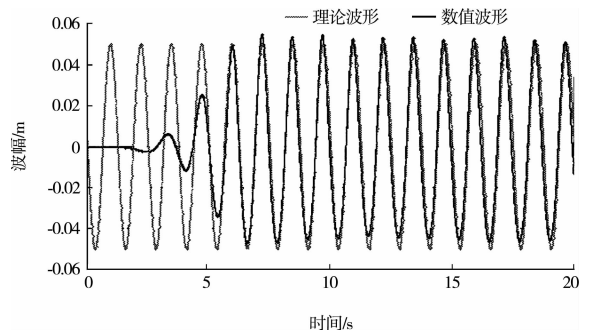


图 5 数值与理论波形波面历时曲线比较

2 波浪数值模型试验及与波浪物理模型试验验证

上海芦潮港渔港工程透空式防波堤波浪断面模型试验^[6]分别采用规则波和不规则波与水深组合, 得到了不同波高、挡浪板入水深度条件下防

波堤透浪系数的数据。本文对物理模型试验南堤部分相应组次进行对比验证, 试验中各组次参数选择以及计算结果的比对见表2, 透空堤的透浪特性由透浪系数 K_t 量化表示。

表2 数值模拟试验与物理模型试验的透浪系数结果对比

水位 h/m	挡浪板入水底 高程/m	挡浪板相对入 水深度 t/d	入射波高 H/m	堤后测点波高 平均值 H'/m	K_t		误差/%
					数模	物模	
0.191	-0.069	0.44	0.10	0.029 6	0.30	0.29	3
	-0.083	0.47	0.10	0.025 1	0.25	0.28	10
	-0.110	0.51	0.10	0.018 7	0.19	0.22	13
0.083	-0.069	0.32	0.08	0.049 1	0.61	0.56	9
	-0.083	0.35	0.08	0.046 7	0.58	0.53	9
	-0.110	0.40	0.08	0.041 2	0.52	0.47	10
-0.043	-0.069	0.07	0.06	0.053 2	0.89	0.84	6
	-0.083	0.11	0.06	0.050 5	0.84	0.82	2
	-0.110	0.19	0.06	0.042 6	0.71	0.69	3

从表2 可以看到, 数模计算的透浪系数平均值与物模试验透浪系数平均值误差大部分组次在10%以内, 变化现象也较为一致, 透浪系数随着水位的降低而增大, 并随着挡浪板相对入水深度增大而减小。由波浪模型试验规程^[7]可知, 本文建立的数值波浪水槽可以满足透空式防波堤透浪系数研究的精度要求, 可用于深入计算分析透空堤透浪特性。



注: 水位 0.191 m, 挡浪板底高程均为 -0.069 m, $t = 20$ s。

图6 数值波浪水槽波面

3 透空堤尺度参数与入射波波要素对透浪特性影响

采用波浪数模试验水槽, 在挡浪板入水深度 $t/d = 0.3 \sim 0.5$ 、 $t/d = 0.07 \sim 0.19$ 范围内, 计算分析了挡浪板入水深度对芦潮港渔港双侧挡浪板透空式防波堤透浪系数的影响。计算表明, 在 $t/d = 0.07 \sim 0.4$ 范围内, 物模与数模计算的渔港堤后水域有效波高大于 1.0 m, 不满足渔船避台风锚泊使用要求; 水深在 10.25 ~ 17.03 m 时, 相对波高 $H/d = 0.17 \sim 0.18$, 波能沿水深分布衰减缓慢, 低水位是影响透浪系数 K_t 的控制水位。

本文数值模拟以低水位 -1.25 m (水深 10.25 m) 为准, 通过改变透空堤堤身尺度参数与入射波波要素, 研究其对透浪系数的影响。数值模型试验共进行 108 组, 为分析数值模型试验透浪系数的规律, 取其中几组进行比较研究。

表3 不同挡浪板入水深度时数值模型试验透浪系数

双侧挡浪板 间距 B/m	波高 H/m	周期 T/s	挡浪板底 高程/m	相对入水 深度 t/d	波高平均 值 H'/m	K_t
0.41	0.06	1.01	-0.069	0.07	0.053 2	0.89
0.41	0.06	1.01	-0.083	0.11	0.050 5	0.84
0.41	0.06	1.01	-0.110	0.19	0.042 6	0.71

表4 不同挡浪板间距时数值模型试验透浪系数

挡浪板底 高程/m	波高 H/m	周期 T/s	双侧挡浪板 间距 B/m	相对板距 B/L	波高平均 值 H'/m	K_t
-0.110	0.06	1.01	0.34	0.23	0.046 5	0.77
-0.110	0.06	1.01	0.41	0.28	0.042 6	0.71
-0.110	0.06	1.01	0.48	0.33	0.046 7	0.78
-0.110	0.06	1.01	0.55	0.38	0.049 8	0.83

表5 不同波高时数值模型试验透浪系数

挡浪板底 高程/m	双侧挡浪板 间距 B/m	周期 T/s	入射波高 H/m	相对波高 H/d	波高平均 值 H'/m	K_t
-0.110	0.41	1.01	0.06	0.17	0.0426	0.71
-0.110	0.41	1.01	0.07	0.20	0.0497	0.71
-0.110	0.41	1.01	0.08	0.23	0.0573	0.72

表6 不同周期时数值模型试验透浪系数

挡浪板底 高程/m	波高 H/m	双侧挡浪板 间距 B/m	周期 T/s	相对水深 d/L	波高平均 值 H'/m	K_t
-0.110	0.06	0.41	1.01	0.24	0.042 6	0.71
-0.110	0.06	0.41	1.08	0.22	0.044 3	0.74
-0.110	0.06	0.41	1.14	0.20	0.047 6	0.79

比较数值模型试验可以得到透空堤参数与波要素对透浪系数影响的规律:

1) 随着挡浪板的相对入水深度 ($0.07 \leq t/d \leq 0.19$) 的增加, 加大了挡浪板的挡浪面积, 透射的波能减少, 透浪系数明显降低。

2) 随着挡浪板的相对板距 ($0.23 \leq B/L \leq 0.38$) 的增加, 能量耗散的程度加大, 导致透浪系数减小, 随着两板间距的继续增大, 两板对波浪的约束作用减小, 能量耗散的程度也随之减小, 导致透浪系数增大。

3) 随着入射波相对波高 ($0.07 \leq H/d \leq 0.19$) 的增加, 透过挡浪板的能量随之增大, 而能量的耗散略小于增加的透射能量, 导致透浪系数略微增加。

4) 随着入射波周期的增加, 波长随之增加, 相对水深 ($0.20 \leq d/L \leq 0.24$) 减小, 当水深保持不变、波长增大时, 透过挡浪板的能量会增大, 堤后波高也会相应增大, 导致透浪系数明显增加。

4 双侧挡浪板透空堤透浪系数公式拟合

4.1 公式拟合

本节以 Wiegel 单侧挡浪板透空堤透浪系数公式为基础, 拟合双侧挡浪板透空堤透浪系数公式。首先对于公式拟合做出以下假设: 1) 假设透空式防波堤的外侧挡浪板与内侧挡浪板对波浪的消浪效果彼此相互独立, 则双侧挡浪板透空式防波堤的透浪系数由外侧挡浪板的透浪系数与内侧挡浪板的透浪系数的乘积得到; 2) 针对 Wiegel 公式未考虑波能传递因素的情况, 加入反映波能传递情况的波能修正因子 ζ , 对公式进行修正^[8]。

Wiegel 公式以微幅波理论为基础, 从水波传播过程中能量的输送的角度得到透浪系数 K_t 的表达式^[9]:

$$K_t = \frac{H'}{H} = \frac{\sqrt{\sinh[2k(d-t)] + 2k(d-t)}}{\sinh(2kd) + 2kd} \quad (9)$$

则外侧挡浪板的透浪系数 K_{t_1} 为:

$$K_{t_1} = \frac{H'}{H} = \frac{\sqrt{\sinh[2k(d-t_1)] + 2k(d-t_1)}}{\sinh(2kd) + 2kd} \quad (10)$$

内侧挡浪板的透浪系数 K_{t_2} 为:

$$K_{t_2} = \frac{H'}{H} = \frac{\sqrt{\sinh[2k(d-t_2)] + 2k(d-t_2)}}{\sinh(2kd) + 2kd} \quad (11)$$

双侧挡浪板透浪系数 K_t 为:

$$K_t = \sqrt{\zeta K_{t_1}^2 K_{t_2}^2} \quad (12)$$

式中: k 为波数; d 为堤前水深; t_1 为外侧挡浪板入水深度; t_2 为内侧挡浪板入水深度。

波能修正因子 ζ 的确定考虑波能传递的影响因素, 根据上节的讨论主要有: 挡浪板相对入水深度 t/d , 挡浪板相对板距 B/L 和相对水深 d/L 。为方便计算, 采用挡浪板入水深度与挡浪板下部水深的比值 $t/(d-t)$ 代替挡浪板相对入水深度 t/d ; 采用波数与挡浪板板距的乘积 kB 代替挡浪板相对板距 B/L ; 采用波数与水深的乘积 kd 代替相对水深 d/L 。即能量因子修正形式为:

$$\zeta = f\left(\frac{t_1}{d-t_1}, \frac{t_2}{d-t_2}, kB, kd\right) \quad (13)$$

假定透浪系数的计算公式结构如下:

$$\zeta = \exp\left(\frac{t_1}{d-t_1} + \frac{t_2}{d-t_2}\right) \cdot [k_1 kB + k_2 \tanh(kd) + k_3] \quad (14)$$

将入射波高 $h = 0.06$ m 时通过数值模型试验所得的数据代入公式, 进行拟合, 求解结果为 $k_1 = 0.31$, $k_2 = -0.43$, $k_3 = 0.77$ 。将上述系数代入公式, 得到双侧挡浪板透空式防波堤透浪系数的计算公式为:

$$K_t = \frac{\sinh[2k(d-t)] + 2k(d-t)}{\sinh(2kd) + 2kd} \cdot \sqrt{\exp\left(\frac{2t}{d-t}\right) \cdot [0.31kB - 0.43 \tanh(kd) + 0.77]} \quad (15)$$

该公式的适用范围为 $0.07 \leq t/d \leq 0.19$ 、 $0.23 \leq B/L \leq 0.38$ 、 $0.20 \leq d/L \leq 0.24$ 。

4.2 公式验证

应用双侧挡浪板透空式防波堤透浪公式计算

透浪系数, 并与数值模型试验得到的透浪系数进行对比, 对比结果见表 7。

表 7 公式方法与数值模型试验方法所得透浪系数对比

相对水深 d/L	挡浪板相 对板距 B/L	挡浪板相对入水深度 0.07			挡浪板相对入水深度 0.11			挡浪板相对入水深度 0.19		
		数模计算	推导公式	误差/%	数模计算	推导公式	误差/%	数模计算	推导公式	误差/%
0.24	0.28	0.89	0.87	3	0.84	0.82	2	0.71	0.74	4
	0.33	0.94	0.91	3	0.90	0.86	4	0.78	0.79	1
	0.38	0.95	0.95	0	0.92	0.91	2	0.83	0.83	0
0.22	0.28	0.90	0.89	1	0.85	0.85	0	0.74	0.77	4
	0.33	0.94	0.93	1	0.93	0.89	4	0.81	0.83	2
	0.38	0.95	0.98	3	0.94	0.93	1	0.86	0.87	1
0.20	0.28	0.93	0.91	2	0.88	0.88	0	0.79	0.82	4
	0.33	0.94	0.95	1	0.93	0.92	1	0.84	0.87	3
	0.38	0.95	1.00	5	0.94	0.96	2	0.89	0.91	2

将公式所得透浪系数与数值模型试验所得的透浪系数绘成点状图进行对比, 对比结果见图 7。

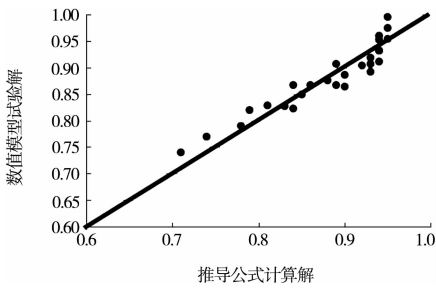


图 7 公式方法与数值模型试验方法所得透浪系数对比

根据表 7、图 7 可知, 拟合公式计算得到的透浪系数与数值模型试验值的变化趋势一致, 误差控制在 5% 以内。因此, 拟合公式在 $0.07 \leq t/d \leq 0.19$ 、 $0.23 \leq B/L \leq 0.38$ 、 $0.20 \leq d/L \leq 0.38$ 、 $0.20 \leq d/L \leq 0.24$ 条件下, 可以作为求解双侧挡浪板透空式防波堤的透浪系数的参考。

5 结论

1) 基于 Fluent 软件建立的数值波浪水槽模型计算的透浪结果与物模试验结果比较一致, 误差在 10% 以内, 满足波浪模型试验规程的要求。

2) 在 $d/H > 5$ 、 $t/d = 0.07 \sim 0.4$ 范围内, 物模与数模计算的渔港堤后水域有效波高大于 1.0 m, 不满足渔船避台风锚泊使用要求。增加波浪数值模型试验组次研究透空式防波堤参数与入射波波要素对透浪系数的影响, 发现挡浪板相对入水深度、挡浪板相对板距、相对水深是透浪系数的 3 个重要

影响因素, 而相对波高影响较小。

3) 根据大量的数值计算结果, 以 Wiegell 公式为基础, 拟合出双侧挡浪板透空式防波堤透浪系数的计算公式, 在 $0.07 \leq t/d \leq 0.19$ 、 $0.23 \leq B/L \leq 0.38$ 、 $0.20 \leq d/L \leq 0.24$ 条件下, 计算结果与数值计算值吻合较好。根据实际工程水域对波高值的具体要求, 可为类似条件透空堤结构尺度优化设计提供经验。

参考文献:

- [1] 陈德春, 茆福文, 沈丽宁, 等. 桩基挡板式透空堤透浪系数计算及试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2012(5): 83-87.
- [2] 范骏, 王宇楠, 杨斯汉, 等. 双挡板透空堤透浪与反射系数试验研究[J]. 海洋工程, 2011(4): 60-67.
- [3] 杨森华. 造波机理论计算方法[M] // 国外舰船技术(船舶力学类). 北京: 中国造船工程学会编辑部, 1980.
- [4] 辛颖. Fluent UDF 方法在数值波浪水槽中的应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013: 34-36.
- [5] 顾挺锋. 海洋工程水池波浪生成的数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012: 45-50.
- [6] 陈德春. 上海芦潮港渔港迁建改造工程透空式防波堤波浪断面模型试验研究[R]. 南京: 河海大学, 2013: 6-22.
- [7] JTJ/T 234—2001 波浪模型试验规程[S].
- [8] 俞聿修. 随机波浪及其工程应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2003.
- [9] Wiegell R L. Transmission of waves past a rigid vertical thin barrier[J]. Journal of the Waterways and Harbors Division, 1960, 86(1): 1-12.