



透空式防波堤透浪的数值模拟

齐鲁尚

(中设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014)

摘要: 基于 FLUENT 求解器, 以 $N-S$ 方程为控制方程, 采用动量源方法及追踪自由面的 VOF 方法, 建立了同时具有造波和消波功能的数值波浪水槽。利用该数值水槽对透空堤的透浪、越浪问题进行数值模拟, 并与物理模型试验进行比较, 结果表明: 数值模拟能较好地复演防波堤越浪、透浪过程。

关键词: 数值波浪水槽; 透空式防波堤; 透浪系数

中图分类号: U 656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)01-0069-03

Numerical simulation of wave transmission of wave-permeable breakwater

QI Lu-shang

(China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China)

Abstract: Based on the $N-S$ equation, and the momentum source method, and the VOF method for tracking the free surface, a numerical wave flume is obtained, which can both generate and absorb waves. The wave transmission and wave overtopping of permeable breakwater are numerically simulated by the numerical wave flume. Compared with the experimental data available, the presented numerical wave flume can numerically simulate the wave transmission and wave overtopping of permeable breakwater.

Keywords: numerical wave flume; wave-permeable breakwater; wave transmission coefficient

透空式防波堤利用波能主要集中在水体表面的特点来设计防波堤结构以实现消波挡浪的功能。在透空式防波堤的应用中, 透空堤的挡浪效果主要是依据透浪系数判别, 除依据经验公式计算外, 透空堤的透浪系数一般要进行物理模型试验, 而物理模型试验费用较高, 且研究结果宜受模型比尺的限制。随着计算机技术的发展, 利用 CFD 技术建立数值波浪水槽, 采用数学模型来研究波浪和结构物相互作用的方法理论日趋成熟, 并已经被应用到实际工程中。高学平^[1]利用 MAC 法直接求解连续方程和 $N-S$ 方程模拟了数值波浪水槽的造波和消波; 李凌^[2]利用 $N-S$ 方程为控制方程, 采用 VOF 方法追踪自由表面, 通过在动量方程中添加附加源项的方法, 发展了黏性流数值造波和

消波的方法。

本文基于 Fluent 软件平台, 对规则波在透空式防波堤上的越浪、透浪过程进行了数值模拟, 并与物理模型试验规则波试验结果进行对比, 结果吻合良好。

1 数值模型

1.1 控制方程

控制方程为不可压缩黏性流体的连续性方程和动量方程:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

收稿日期: 2016-05-19

作者简介: 齐鲁尚 (1981—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口及航道工程设计。

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} - \rho g + S_y \quad (3)$$

式中： u 、 v 分别为 x 、 y 方向上的速度量； ρ 为流体密度； g 为重力加速度； μ 为流体的动力黏性系数； S_x 和 S_y 分别为 x 和 y 方向的附加动量源项。

为了追踪自由面的波动，采用 VOF 方法，即自由表面追踪法。

1.2 数值波浪水槽的建立

有限长度的数值波浪水槽会产生尾端壁面的反射波，在设置了建筑物的数值波浪水槽中，还会产生由于结构物的存在而产生的反射波在前端壁面处的二次反射。因此，为了消除尾端壁面及前端壁面的反射波，数值波浪水槽在具有数值造波功能的同时需具有数值消波的功能。数值波浪水槽从前往后依次分为造波区、前端消波区、工作区和尾端消波区。

图 1 为数值水槽， FJ 为静水面，静水面以上为空气、以下为水。

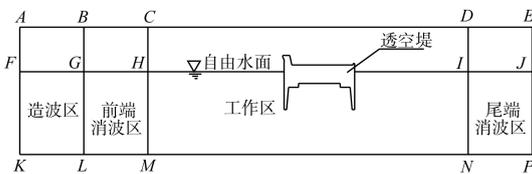


图 1 数值波浪水槽设置

以 $N-S$ 方程(式(1))为控制方程，采用在动量方程中加入附加动量源项的方法。有关这两个附加动量源项在造波区、前段消波区、尾端消波区中具体表达形式见文献[2]。

在造波区与消波区，引入解析松弛方法^[3-5]，即流速和压力的数值更新关系。

动量源项采用 UDF 程序表示，并应用 FLUENT 软件中的 UDF 接口写入动量方程中，即可达到数值波浪水槽中造波的同时具有消除反射波的功能。

边界条件的设置如下： EP 和 KP 均采用固壁边界条件， AK 采用对称边界条件， AE 采用压力出口边界条件。流场中的初始速度取为 0。

2 物模试验

物理模型试验^[6]在长 75 m、宽 1.0 m、高 1.5 m 的水槽中进行，水槽一端装有生波机。为减少生波机推板对波浪的反射影响，距推板 35 m 处及以后，把水槽分隔成各 0.5 m 宽的两条，一条放置模型，模型宽度为 0.5 m，模型距推板 40 m；另一条不放置模型。遵循物理模型相似理论，依重力相似准则设计正态模型采用模型几何比尺 1:30。透空堤结构断面见图 2。

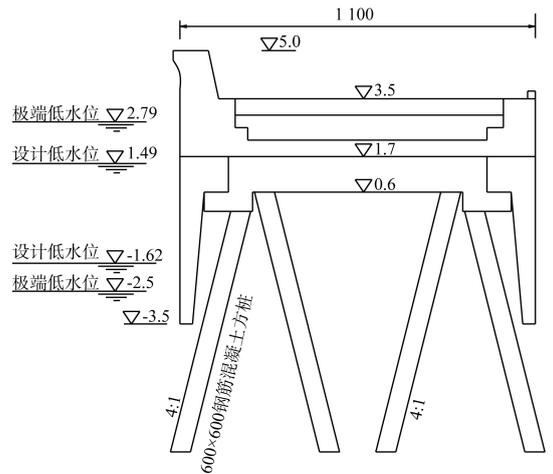


图 2 透空堤结构断面 (高程: m; 尺寸: mm)

试验水位采用了极端高水位、设计高水位、设计低水位、极端低水位共 4 种不同的水深，试验波浪采用不同水深下有效波高 (H_s) 对应的规则波，见表 1。

表 1 100 a 一遇防波堤设计波要素

试验水位/m	平均水深/m	波向	H_s /m	\bar{H} /m	L /m	\bar{T} /s
极端高水位 2.79 (100 a 一遇)	17.79	NW	2.75	1.76	53.4	5.94
设计高水位 1.49	16.49	NW	2.58	1.65	50.1	5.75
设计低水位 -1.62	13.38	NW	2.18	1.39	42.1	5.29
极端低水位 -2.50 (100a 一遇)	12.50	NW	2.04	1.32	39.8	5.14

在胸墙顶布置一个水位传感器，量测高水压时的越浪高度。在透空堤后，离堤实际距离 25、50、75、100 m 处各布置 1 个水位传感器，量测规则波堤后波高沿程分布，传感器的布置及编号见图 3，由此确定透空堤透浪系数 K 。规则波透浪系

数为堤后波高与入射波波高 (H_s) 之比。用式 (4) 表示透浪系数:

$$K = \text{入射波高} / \text{堤后波高} \quad (4)$$

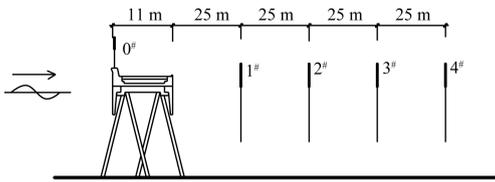


图 3 浪高仪测点布置

表 2 波浪作用下透空堤透浪系数试验与数模结果的比较

水位/m	入射波波高 H_s /m	试验类型	胸墙顶水舌厚度/m	K				平均 \bar{K}
				1#	2#	3#	4#	
极端高水位 2.79	2.75	物模	0.33	0.18	0.21	0.21	0.21	0.20
		数模	0.25	0.17	0.17	0.18	0.17	0.175
设计高水位 1.49	2.58	物模	0.02	0.25	0.25	0.25	0.24	0.25
		数模	0.00	0.23	0.23	0.23	0.22	0.23
设计低水位 -1.62	2.18	物模	0.00	0.38	0.36	0.34	0.34	0.36
		数模	0.00	0.41	0.39	0.40	0.37	0.39
极端低水位 -2.50	2.04	物模	0.00	0.44	0.42	0.41	0.41	0.42
		数模	0.00	0.48	0.47	0.46	0.44	0.46

极端高水位及设计高水位时,数值模拟计算的透浪系数及水舌厚度均小于物模试验结果,分析原因为:水深较大时,透空堤顶发生越浪现象,堤后波浪大小受堤顶波浪越浪量的影响较大,物理模型使用规则波进行时在反复使用一个固定的波列时会产生一定的增大效应,同时数值模型受堤顶附近模型网格尺寸的影响,对越浪未能较准确的模拟,从而导致数模结果均小于物模结果。

设计低水位及极端低水位时,数值模拟计算的透浪系数大于物模试验结果,分析原因为:水深较小时,透空堤堤顶不发生越浪现象,堤后波浪大小受堤底透浪的影响,由于物理模型考虑了透空堤的桩基,桩基对入射波浪具有一定的阻挡效果,而数值模型未考虑透空堤桩基,因此,水深较小时,数模结果略大于物模结果。

4 结论

1) 基于 FLUENT 求解器,以 $N-S$ 方程为控制方程,采用动量源方法,结合 VOF 方法建立的同时具有造波和消除反射波功能的数值波浪水槽

3 结果比较

本文将物理模型试验结果与数值计算结果进行比较,表 2 为规则波作用下透空堤透浪系数试验与数模结果的比较。

分析表 2 知,比较不同水位情况下,数值模拟的透浪系数、越浪量的变化趋势与物理模型试验结果基本一致,透浪系数 K 随水位不断下降基本呈增大的趋势。

成功地模拟了透空堤的透浪、越浪特性。

2) 数值模型得到的透浪系数与物理模型试验结果接近,透浪系数随水深的变化趋势与物模试验结果一致。

参考文献:

- [1] 高学平,曾广东,张亚.不规则波浪数值水槽的造波和阻尼消波[J].海洋学报,2003(3):127-132.
- [2] 李凌,林兆伟,尤云祥,等.基于动量源方法的黏性流数值波浪水槽[J].水动力学研究与进展,2007(1):76-82.
- [3] MADSEN P A, BINGHAM H B, Liu H. A new Boussinesq method for fully nonlinear waves from shallow to deep water [J]. J fluid mech, 2002, 462: 1-30.
- [4] 王本龙,刘桦.一种适用于非均匀地形的高阶 Boussinesq 水波模型[J].应用数学和力学,2005,26(6):714-721.
- [5] 周勤俊,王本龙,兰雅梅,等.海堤越浪的数值模拟[J].力学季刊,2005,26(4):629-633.
- [6] 黄蕙,卢无疆.浙江省舟山市定海区小园山西防波堤断面模型试验报告[R].南京:河海大学,2008.