

· 综合 ·



## 三维数值波浪水槽及其数值模拟验证

龙俞辰, 印宇轩

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

**摘要:** 波浪水槽能够模拟波浪的产生、传播以及与结构物的相互作用, 提供直观、可靠的数据支持。随着计算机技术和数值方法的快速发展, 三维数值波浪水槽逐渐成为港口工程领域的研究热点。利用数值模拟软件 FLUENT 生成三维数值波浪水槽, 并结合 ANSYS-FSI 模块建立三维有限元与有限体积分耦合模型, 可以精确模拟波浪作用于斜坡堤等结构上的整个过程。为验证数值模型的准确性, 以在波浪作用下斜坡堤顶胸墙的稳定性为例, 比较数值模型与理论公式的计算结果。结果表明, 数值模型与理论公式的计算结果基本一致, 此三维数值波浪水槽模型可靠。在实际工程应用中, 可以利用此数值波浪水槽进行方案比选, 提升工作效率, 同时与物理模型试验结合, 共同为港口工程的设计、施工提供有力支持。

**关键词:** FLUENT; 三维数值波浪水槽; 胸墙

中图分类号: TP391.9; U653.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0006-04

### 3D numerical wave flume and simulation verification

LONG Yuchen, YIN Yuxuan

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

**Abstract:** The wave flume can be simulated wave generation, propagation, and interaction with structures, providing intuitive and reliable data support. With the rapid development of computer technology and numerical methods, three-dimensional numerical wave flume gradually becomes a research hotspot in the field of port engineering. In this paper, the three-dimensional numerical wave flume is generated by using the numerical simulation software FLUENT, and the coupling model of three-dimensional finite element and finite volume element is built by combining ANSYS-FSI module, which can accurately simulate the whole process of wave acting on the mounted breakwater and other structures. To verify the accuracy of the numerical model, the stability of the top crown wall of the mounted breakwater under the action of waves is taken as an example, and the results of the numerical model are compared with those of the theoretical formula. The results show that the results of the numerical model and the theoretical formula are basically consistent, which proves that the three-dimensional numerical wave flume model is reliable. In practical engineering application, the numerical wave flume can be used for scheme comparison to improve work efficiency, and combined with physical model test to provide strong support for the design and construction of port engineering.

**Keywords:** FLUENT; 3D numerical wave flume; crown wall

#### 1 三维数值波浪水槽模型建立步骤

三维数值波浪水槽<sup>[1]</sup>是一种利用数值模拟技术模拟波浪在水槽中运动的工具, 它的构建主要基于势流理论<sup>[2]</sup>和边界元方法<sup>[3]</sup>。通过设定适当

的边界条件和初始条件, 可以模拟出不同波浪条件下的水槽内波浪的产生、传播、反射和相互作用等过程。同时, 还可以结合不同的数值方法, 如有限差分法、有限元法等, 提高模拟的精度和

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 龙俞辰 (1989—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事港口与航道研究设计工作。

效率。三维数值波浪水槽在海洋工程、水利工程、环境工程等领域都有着广泛的应用。

为了准确评估波浪对斜坡堤的作用及其对堤顶胸墙产生的波浪力, 本文采用流体力学模拟软件 FLUENT 建立一个三维数值波浪水槽模型。该模型不仅复现了波浪在水槽中的产生、传播和与斜坡堤的相互作用过程, 还通过精细的数值计算, 得出堤顶胸墙所受波浪力的具体数值。

### 1.1 边界条件

边界条件的合理性是模型求解成功与否的关键所在。本文的数值波浪水槽边界条件的定义为水槽底部  $S_B$  处的流固边界条件和自由水面  $S_F$  处的气液边界条件。

#### 1.1.1 水槽底部 $S_B$ 处的流固边界条件

本文研究对象为不可压缩的黏性流体, 当这种不可压缩的黏性流体处于水槽底部  $S_B$  表面时, 它与水槽之间的接触是紧密的, 没有产生任何形式的滑移或分离线型, 即:

$$v_w = v_B \quad (1)$$

式中:  $v_w$ 、 $v_B$  分别为计算流体速度、水槽底面运动速度。即水槽底面附近某一点的流体速度与水槽底部运动速度相等且均为 0。

#### 1.1.2 自由水面 $S_F$ 处的边界条件

在流体动力学中, 自由面边界条件分为自由面运动学条件以及自由面动力学条件。这些条件描述水面与空气交界处的动态行为。

设自由面方程为:

$$F(x, y, z, t) = 0 \quad (2)$$

假定在自由面上的流体质点始终保持在自由面上, 则流体质点在自由面上一点的法向速度, 应该等于自由面本身在这一点上的法向速度, 在运动过程中,  $F$  的随体导数为 0。根据水波问题的基本方程和定解条件, 得到自由面的运动学边界条件为:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla F = 0 \quad (3)$$

式中:  $t$  为时间,  $\mathbf{v}$  为速度场。

设大气压为  $p_1$ , 自由面上流体的压力为  $p_2$ ,

将其代入自由面的运动学边界条件, 通过推导<sup>[4]</sup>, 得到:

$$p_2 = p_1 = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (4)$$

式中:  $\sigma$  为张力系数;  $R_1$ 、 $R_2$  为液面在两个垂直方向上的曲率半径, 其倒数称为法曲率。式(4)为自由面的动力学边界条件。

### 1.2 湍流模型

考虑到波浪运动为非完全湍流<sup>[5]</sup>, 不能忽略分子黏性的影响, 且满足高雷诺数流动与时均应变率较高的情况, 因此本文中采用广泛应用的湍流模型即重整化的  $k-\varepsilon$  (动能-动能耗散率) 模型进行计算, 它特别适用于高雷诺数流动<sup>[6]</sup> 和具有中等复杂度的流动结构。

### 1.3 网格划分

本文对主要单元采用六面体主导法划分, 部分过渡区域采用四面体实体单元划分。需要在确保入射波在传播过程中能量不被耗散的同时, 精细地构建自由水面, 并且在这个过程中还要尽量减轻计算机的计算负担。这样既能保证波浪模拟的准确性, 又能提高计算效率, 使模拟过程更为高效和经济。波浪水槽不同工作区的划分见图 1, 本文在造波区、工作区和消波区内  $x$  方向单元长度约取波长的 1%。竖直方向的网格划分应该按照离自由面越远越大的方式, 按 1% 的扩散率进行划分。在自由面附近,  $y$  方向单元长度取波高的 5% 左右。

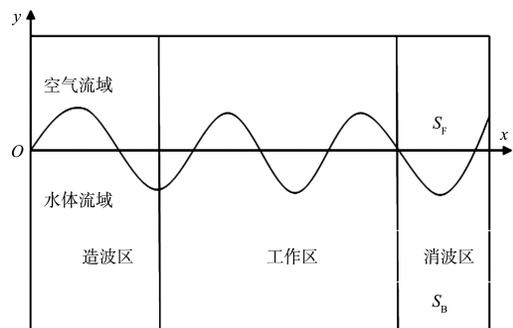


图 1 波浪水槽不同工作区划分

### 1.4 自由表面追踪

在多相流中, 不同相之间的界面动态变化复杂, 给计算流体力学提出了巨大挑战。为了准确

捕捉这些界面的细微变化，研究者们开发了多种自由表面追踪技术。此次利用 VOF<sup>[7]</sup> 即流体体积模型模拟波浪流动所属水、气两相流，它通过实时求解单独的动量方程和处理穿越区域的每一流体的体积分数模拟水与空气这两种互不相融的流体，进而形成两相流界面。本文考虑的是空气与水所形成的两相流模型，因此在 VOF 模型中将相的数量设为 2，其中第 1 相设置为空气，第 2 相设置为水。将自由表面的位置定义为 VOF 值为 1，用 Patch 选项将计算区域划分为水和气两个界面，以此确定自由表面的形状。两相流初始状态见图 2，上部为空气，下部为水。

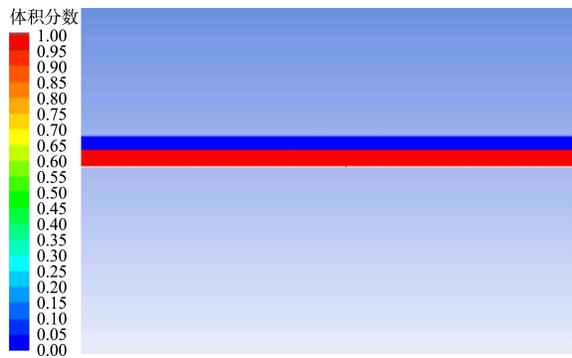


图 2 初始状态的二相流

### 1.5 造波及动网格生成

本文所建三维数值波浪水槽模型总长 70 m、高 2 m、宽 2 m，水槽中水深 1 m。采用推板造波法模拟线性规则波，所以波浪的输入参数分别为水深  $d$ 、周期  $T$ 、波高  $H$ 、波长  $L$  以及波数  $k$ 。波长  $L$  可根据有限水深区域中的波长计算公式用迭代求解的方法求出，进而求出波数。然后利用动网格技术<sup>[8]</sup>，调入 UDF 造波程序对水槽模型左边界进行定义，调入 UDF 消波程序对水槽模型右边界进行定义。

### 1.6 波浪模拟结果与分析

计算采用 PISO 三步数值算法<sup>[9]</sup>求解离散后的控制方程组。为了避免在计算中出现负体积的情况，取计算时间步长足够小，为 0.005 s。模型计算完后的造波情况见图 3。计算稳定后，在同一波浪要素下，数值造波结果和造波机实测数据比较见图 4。

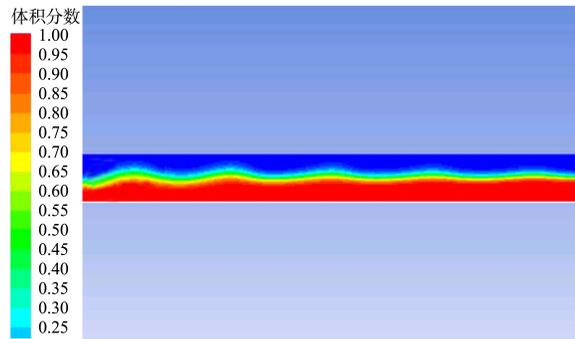


图 3 稳定状态的二相流

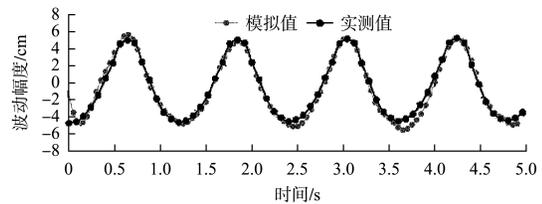


图 4 数值波浪结果与实测数据比较

由图 4 可看出，数值计算结果与实测结果接近，说明数值造波试验得到的造波结果符合要求，可以应用于耦合试验。

## 2 斜坡堤模型建立

### 2.1 多孔介质模型

本文研究波浪作用下斜坡式防波堤顶胸墙的稳定情况，因此必须考虑到胸墙前护面块体的影响。最好的数值模拟方法应将护面块体按离散元模型建立，采用离散元与有限元相结合的方法进行模拟。由于本文所考虑的重点是斜坡式堤顶胸墙的受力情况，而不是护面块体的受力或者运动形式，因此只考虑护面块体对波浪的削减作用即可。所以在此模型中，将护面层假想为一层连续的均匀的多孔介质，采用多孔介质模型简化计算过程，同时达到模拟护面块体削减波浪作用的目的。多孔介质模型通过设定模型区域内的孔隙度和流体的流动阻力与惯性阻力系数达到模拟实际多孔介质的情况<sup>[10]</sup>。

### 2.2 斜坡堤模型

本文所用的斜坡堤模型见图 5。防波堤模型护面块体与块石垫层部分采用多孔介质模拟，设定孔隙率为 0.6；堤心石与胸墙部分采用不透水介质模拟，材料为 C25 混凝土，相应参数：轴心抗压

强度标准值、设计值分别为 17.0、12.5 MPa, 轴心抗拉强度标准值、设计值分别为 1.75、1.30 MPa, 弹性模量为 28 GPa, 泊松比为 0.167, 密度为 2 450 kg/m<sup>3</sup>。胸墙底部与斜坡堤主体接触方式为摩擦接触, 取胸墙底部摩擦系数为 0.6。斜坡堤底部为固定连接。

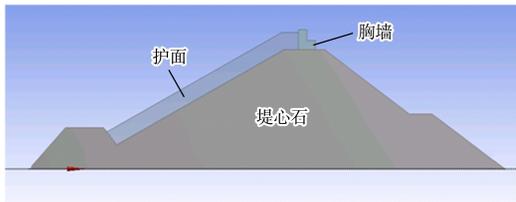
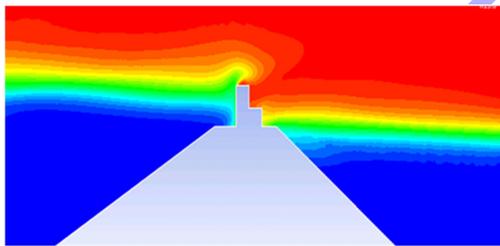


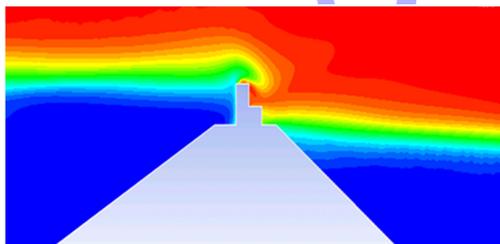
图 5 斜坡堤模型

### 3 三维数值波浪水槽应用验证

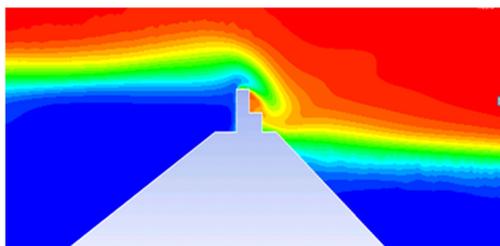
将防波堤模型放入建立好的数值波浪水槽中, 并开始造波。随着波浪的传播, 波浪从造波区逐步抵达斜坡堤区域, 与斜坡堤发生相互作用, 波浪在斜坡堤上的运动过程见图 6。



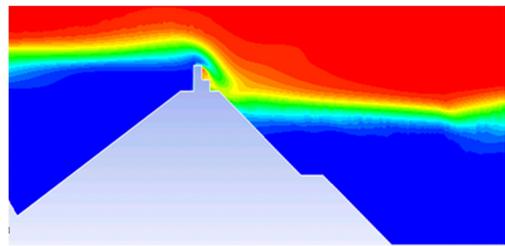
a) 波浪抵达堤前



b) 开始越浪



c) 越浪中



d) 越浪结束

图 6 波浪在斜坡堤上的运动过程

防波堤胸墙的稳定性的主要有抗滑动稳定性和抗倾覆稳定性两种。为了验证此模型的可靠性, 利用 *The Rock Manual: The Use of Rock in Hydraulic Engineering*<sup>[11]</sup> 推荐的 Peterson 公式计算不同波浪周期条件下胸墙的稳定情况, 将公式与模型计算结果进行对比, 结果见表 1。

表 1 理论计算与数模试验结果对比

周期/s	Peterson 法		数值模拟	
	抗滑动稳定性	抗倾覆稳定性	抗滑动稳定性	抗倾覆稳定性
5	稳定	稳定	稳定	稳定
8	不稳定	稳定	不稳定	稳定
10	不稳定	不稳定	不稳定	不稳定
13	不稳定	不稳定	不稳定	不稳定
16	不稳定	不稳定	不稳定	不稳定

注: 水深 20 m, 波高 4 m, 摩擦系数  $f=0.6$ 。

由表 1 可知, 数值模拟与理论计算的结果相吻合。因此, 在工程设计的初期阶段, 采用数值模型能够高效验证所选模型的适用性, 并预测潜在的强度失效和失稳风险。此外, 数值模型的结果还能为物理模型试验提供有价值的反馈, 有助于减少试验时间和成本, 从而提升整体工作效率。

### 4 结论

- 1) 数值模拟与理论计算的结果相吻合, 证明三维数值波浪水槽模型是可靠的。
- 2) 数值模型可以高效验证工程设计的适用性, 预测潜在风险。
- 3) 数值模型的结果能为物理模型试验提供反馈, 减少试验时间和成本, 提升工作效率。

(下转第 16 页)