

# 海啸波对近岸结构物冲击作用数值模拟

魏学森<sup>1</sup>, 戴孟祎<sup>1</sup>, 周岱<sup>1,2,3\*</sup>, 韩兆龙<sup>1,3</sup>, 包艳<sup>1</sup>, 赵永生<sup>1</sup>

(1.上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海, 200240;

2.上海交通大学水动力学教育部重点实验室, 上海, 200240;

3.上海交通大学海洋工程国家重点实验室, 上海, 200240;

Email: [xuesen-wei@sjtu.edu.cn](mailto:xuesen-wei@sjtu.edu.cn), [zhoudai@sjtu.edu.cn](mailto:zhoudai@sjtu.edu.cn))

**摘要:** 沿海结构物设计中一般都会考虑大波的作用, 例如: 海啸波。其中, 波浪力是沿海结构物设计中的一个重要参数。本文研究海啸波对近岸垂直墙的冲击作用, 基于光滑粒子流体动力学方法, 模拟了海啸波的传播过程以及对垂直墙的冲击作用力。采用 Goring 法计算得到造波板位移时程数据, 生成海啸波。测量海啸波的沿程高度变化, 并与已有实验数据进行对比, 验证了本文数值模型的可靠性。针对不同波高的大小和不同静水深度下海啸波对垂直墙的冲击作用进行了数值模拟, 结果表明: 该模型能够准确模拟海啸波的传播过程, 离岸波面抬升和近岸波面抬升的计算结果与实验数据吻合较好。本研究数值模型与计算结果可为沿海结构物的优化设计提供指导。

**关键词:** 海啸波; 垂直墙; 波面抬升; 波浪力; 光滑粒子流体动力学方法

## 1 引言

海啸是一种灾难性的海浪, 是具有强大破坏力的海洋灾害之一, 通常由海底大规模的、突然的上下变动, 包括海底火山喷发、海底或海岸滑坡、滑塌、崩塌、陨星或彗星的撞击以及海底地震等原因引发<sup>[1]</sup>。当海啸波传播至近岸时, 其波长和波速逐渐减小, 波高和波陡迅速增大。海啸波破碎产生的巨大能量会对近岸结构物(包括桥梁、房屋和其它基础设施)造成严重的破坏。因此, 研究海啸波对近岸结构物的冲击作用至关重要。

国外学者对海啸波冲击近岸结构物进行了大量的实验研究。Roberson 等<sup>[2]</sup>通过实验研究了海啸波对垂直墙的冲击作用力, 提出了预测海啸波浪力的经验公式。Oshnack 等<sup>[3]</sup>进行了一系列的大尺度实验, 研究了海啸波对刚性垂直墙的冲击作用力, 分析了海堤对海啸波的消减规律。Thomas and Cox<sup>[4]</sup>研究了海啸波对有海堤保护的垂直墙的冲击作用力, 指出海堤的位置和高度对海啸波的消减作用有一定的影响。

为了进一步研究海啸波对近岸结构物的冲击作用特性,并验证用 SPH 方法数值模拟海啸波与结构物的相互作用的适用性与可靠性。本研究在 Linton 等<sup>[5]</sup>的实验基础上,运用 SPH 方法建立数值水槽,根据 Goring 法<sup>[6]</sup>计算得到造波板的位移时程数据,模拟了海啸波对近岸垂直墙的冲击作用过程,分析了不同波高大小和不同静水深度条件下海啸波的传播特性及其对垂直墙的冲击作用。

## 2 数值方法

光滑粒子流体动力学 (Smoothed Particle Hydrodynamics) 方法是一种拉格朗日无网格计算方法,其基本思想是将连续的流体(或固体)用粒子组进行离散,每个粒子点都承载各种物理量,包括位置、密度、速度和压力等。通过求解每个粒子点处的 Navier-Stokes 方程,计算更新各时间步粒子的物理特性,从而实现粒子间的相互作用。

在整个 SPH 模拟过程中,必须满足动量守恒和质量守恒,其控制方程如下:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \mathbf{g} + \mathbf{\Gamma} \quad (1)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho\nabla\mathbf{v} \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{v}$  是速度,  $t$  是时间,  $\rho$  是密度,  $P$  是压力,  $\mathbf{g}$  是重力加速度,  $\mathbf{\Gamma}$  是扩散项。

在 SPH 方法中,流体被看作是弱可压缩的,通常用状态方程来表示流体压力与粒子密度之间的关系:

$$P = b \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (3)$$

其中,  $b = c_0^2 \rho_0 / \gamma$  且  $\gamma = 7$ ,  $\rho_0 = 1000 \text{kg/m}^3$  是参考密度,  $c_0 = \sqrt{(\partial P / \partial \rho)}|_{\rho_0}$  是当粒子密度为参考密度时的声速。

SPH 数值模型的精度与核函数的选取有关。本文采取 Quintic 核函数<sup>[7]</sup>进行模拟,其表达式如下:

$$W(r, h) = \alpha_D \left(1 - \frac{q}{2}\right)^4 (2q + 1) \quad 0 \leq q \leq 2 \quad (4)$$

其中,  $q = r/h$ ,  $r = r_a - r_b$ ,  $\alpha_D$  为常数: 二维情况下取  $7/4\pi h^2$ ; 三维情况下取  $21/16\pi h^3$ 。

### 3 数值模型的建立与验证

为了验证本文数值模型的适用性，对 Linton 等<sup>[5]</sup>的物理实验进行模拟，模型尺寸与实验完全一致。图 1 给出了数值水槽的示意图，近岸结构物简化为一个高 2.44m 的垂直墙，放置在离推波板 61.3m 处，波面抬升测点 Wave Gauge 2 和 Ultrasonic Wave Gauge 3 (WG2 和 USWG3) 分别放置在离推波板 28.6m 和 58.07m 处，分别测量离岸波面抬升和在岸波面抬升。本文研究不同波高大小和不同静水深度对海啸波传播特性的影响规律，无量纲化波高  $H/d$  分别设置为 0.1, 0.2 和 0.3，静水深度  $d$  分别设置为 2.38 m, 2.68 m 和 2.98m。

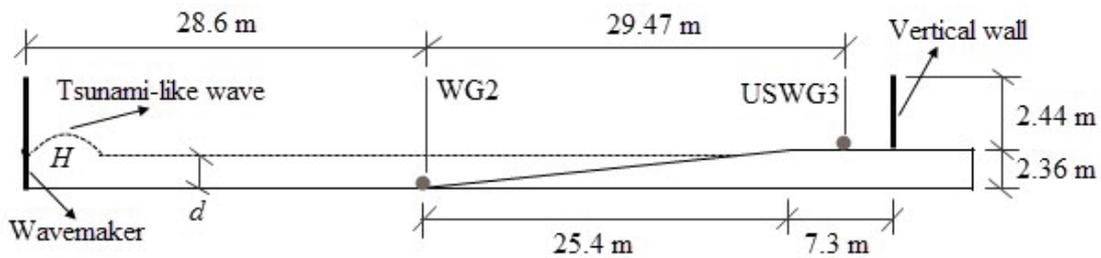


图 1 数值水槽示意图

图 2 为工况  $H/d=0.1$ ,  $d=2.38$  m 时，波面抬升测点 WG2 和 USWG3 处测得的离岸波面抬升和在岸波面抬升与实验数据的对比。图 2 中， $x$  坐标为时间， $y$  坐标为波面抬升，虚线为数值模拟结果，点线为实验数据。可以发现，数值模拟结果与实验数据吻合良好。离岸波面抬升与实验数据一致说明本文的造波方法正确，海啸波形与实验数据一致。在岸波面抬升与实验数据变化趋势一致，入射波峰值和反射波峰值都与实验数据吻合良好，数值模拟结果在 18~22 s 有一个下降趋势，而实验数据相对变化不大，本文仅考虑海啸波峰值的影响，因此这部分差异可以忽略不计。

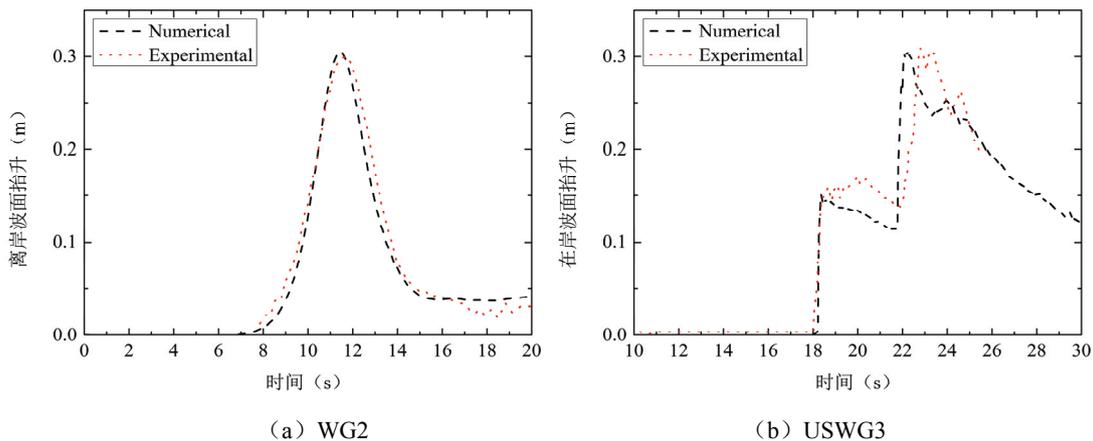


图 2 数值模拟结果与实验数据对比

## 4 结果分析

### 4.1 波高大小对海啸波传播特性的影响

图3为工况  $d=2.38\text{ m}$ ,  $H/d=0.1, 0.2$  和  $0.3$  时, 波面抬升测点 WG2 和 USWG3 处测得的离岸波面抬升和在岸波面抬升变化规律。可以看出, 随着无量纲化波高增大, 离岸波面抬升逐渐增大; 海啸波传播至测点 WG2 和 USWG3 处的速度加快; 在岸波面抬升也逐渐增大, 入射波峰值略微增大, 反射波峰值约为离岸波面抬升峰值的两倍。

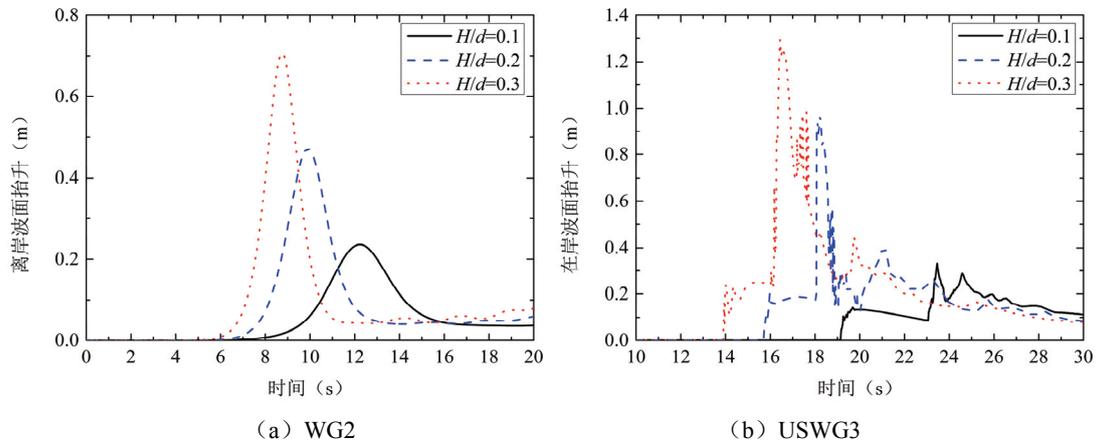


图3. 不同波高大小对海啸波传播特性的影响

### 4.2 静水深度对海啸波传播特性的影响

图4为工况  $H/d=0.1$ ,  $d=2.38\text{ m}$ ,  $2.68\text{ m}$  和  $2.98\text{ m}$  时, 波面抬升测点 WG2 和 USWG3 处测得的离岸波面抬升和在岸波面抬升变化规律。可以看出, 随着静水深度的增大, 离岸波面抬升逐渐增大; 海啸波传播至测点 WG2 处的速度略微加快, 而传播至测点 USWG3 处的速度明显加快; 在岸波面抬升也有增大趋势, 入射波峰值和反射波峰值均明显增大。值得注意的是  $d=2.98\text{ m}$  工况下的反射波峰值反而比  $d=2.68\text{ m}$  工况下的反射波峰值小, 这是由于此时静水深度比斜坡高度 ( $2.36\text{ m}$ ) 大  $0.62\text{ m}$ , 超过海啸波高 ( $0.298\text{ m}$ ) 的两倍, 浅水效应的作用减弱, 因此反射波峰值略微变小。

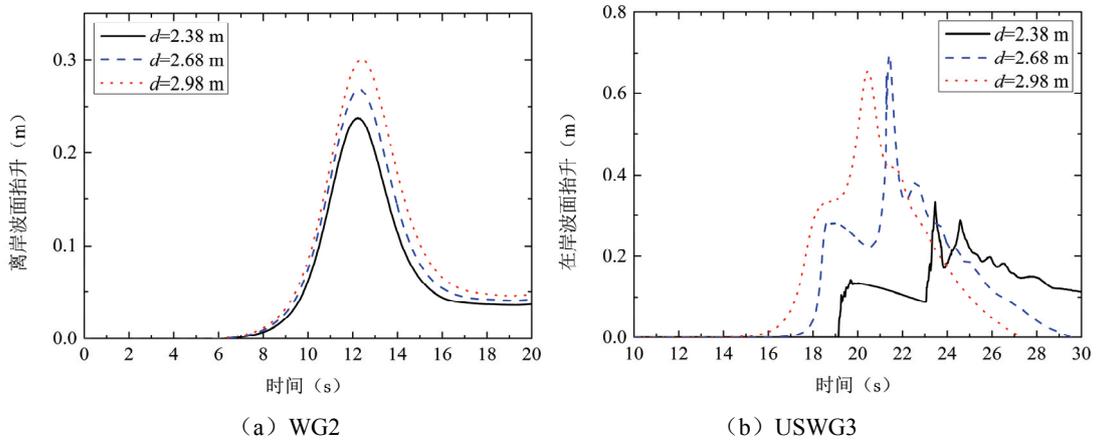


图4 不同静水深度对海啸波的影响

#### 4.3 海啸波对垂直墙的冲击作用

图5给出了不同波高大小和不同静水深度下，海啸波对近岸垂直墙的水平冲击力变化规律。图5(a)为工况  $d=2.38\text{ m}$ ， $H/d=0.1, 0.2$  和  $0.3$  时，海啸波对垂直墙的水平冲击力变化规律。可以看出，随着无量纲化波高增大，海啸波对垂直墙的水平冲击力逐渐增大，3种工况下的水平冲击力峰值分别为  $1.72\text{ kN}$ ， $5.79\text{ kN}$  和  $11.00\text{ kN}$ 。图5(b)为工况  $H/d=0.1$ ， $d=2.38\text{ m}$ ， $2.68\text{ m}$  和  $2.98\text{ m}$  时，海啸波对垂直墙的水平冲击力变化规律。可以看出，随着静水深度增大，海啸波对垂直墙的水平冲击力逐渐增大，当静水深度超过斜坡高度后，垂直墙将受到静水压力的作用，工况  $2.68\text{ m}$  和工况  $2.98\text{ m}$  对应的静水压力分别为  $0.52\text{ kN}$  和  $1.88\text{ kN}$ ，水平冲击力峰值分别为  $5.66\text{ kN}$  和  $8.55\text{ kN}$ 。值得注意的是，当静水深度为  $2.98\text{ m}$  时，海啸波对垂直墙的水平冲击力曲线与孤立波波形状一致，说明此时浅水效应基本消失，海啸波保持初始波形状态冲击到垂直墙上。

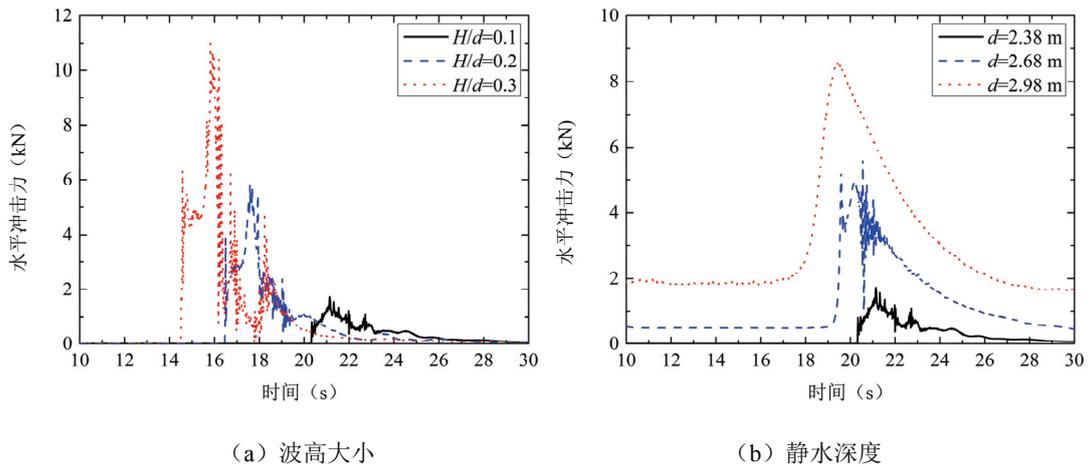


图5 海啸波对垂直墙的水平冲击力变化示意图

## 5 结论

(1) 随着无量纲化波高增大, 离岸波面抬升逐渐增大, 在岸波面抬升也逐渐增大, 入射波峰值略微增大, 反射波峰值约为离岸波面抬升峰值的两倍。

(2) 随着静水深度的增大, 离岸波面抬升逐渐增大, 在岸波面抬升也有增大趋势, 入射波峰值和反射波峰值均明显增大。

(3) 随着无量纲化波高增大, 海啸波对垂直墙的水平冲击力逐渐增大; 随着静水深度增大, 海啸波对垂直墙的水平冲击力也逐渐增大。

## 参 考 文 献

- 1 陈运泰, 杨智娴, 许力生. 海啸, 地震海啸与海啸地震[J]. 物理, 2005, 34(12).
- 2 Robertson I N, Riggs H R, Mohamed A. Experimental results of tsunami bore forces on structures[C]//27th Int. Conf. Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2008, 135(2): 021601.
- 3 Oshnack M E, van de Lindt J, Gupta R, et al. Effectiveness of small onshore seawall in reducing forces induced by Tsunami bore: large scale experimental study[J]. 2009.
- 4 Thomas S, Cox D. Influence of finite-length seawalls for tsunami loading on coastal structures[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2011, 138(3): 203-214.
- 5 Linton D, Gupta R, Cox D, et al. Evaluation of tsunami loads on wood-frame walls at full scale[J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 139(8): 1318-1325.
- 6 Goring D G. Tsunamis--the propagation of long waves onto a shelf[D]. 1978.
- 7 Wendland H. Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree[J]. Advances in computational Mathematics, 1995, 4(1): 389-396.

## Numerical modeling of tsunami-like wave impact on nearshore structures

WEI Xue-sen, DAIMeng-yi, ZHOU Dai, HAN Zhao-long, BAO Yan, ZHAO Yong-sheng

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240

Email: [xuesen-wei@sjtu.edu.cn](mailto:xuesen-wei@sjtu.edu.cn); [zhoudai@sjtu.edu.cn](mailto:zhoudai@sjtu.edu.cn))

**Abstract:** Coastal structures are commonly designed to protect against large waves, such as tsunamis. The hydrodynamic forces are essential for the design of coastal buildings, bridges and other onshore structures. In this study, the interactions between tsunami wave and vertical wall

are investigated using smoothed particle hydrodynamics method. The tsunami-like waves are generated by the numerical paddle wave-maker with Goring's method, which is similar to the method used in the experiments. Numerical wave gauges are positioned to measure the surface elevation, which is used to validate the numerical model by comparing with the experimental data. Different wave heights and different still water depths have been simulated. The numerical results show good agreement with the experimental data. Results of this study are helpful in optimizing the design of structures under tsunami loads.

**Key words:** Tsunami-like wave, Vertical wall, Surface elevation, Tsunami forces, Smoothed particle hydrodynamics method