

人工神经网络在潮汐预报中的应用

白龙虎¹, 徐航¹, 李忆菲², 朱佳伟², 林陈昊², 叶明杰²

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240,

Email:hangxu@sjtu.edu.cn;

2. 上海市闵行中学, 上海 200240)

摘要: 精准的潮汐预报对于沿海地区的人类活动是一项重要且有意义的工作, 它关系到海洋环境中的结构物安装和沿海地区的港口运营等活动。传统的调和分析通常用来分析潮汐分量和预测潮汐水平, 由于调和分析是一种针对天文因素的静态模型, 所以需要大量的观测数据记录, 但是调和分析并未考虑气压风力等非天文因素, 故预测精度有限。本文提出用两种不同的神经网络算法对潮汐的高度进行预报, 与传统的调和分析不同, 人工神经网络善于发掘数据中隐含的规律, 可以较好地预测潮汐水平, 且需要少量的数据即可进行短期的预报, 美国缅因州波特兰的实测潮汐数据被用来测试两种方法的预报能力, 算法的结果表明, 这两种方法都可以用短期的潮汐记录对每小时的潮汐值进行精准的预测。

关键词: 潮汐; 调和分析; 人工神经网络; 预报

1 引言

潮汐所引起的水位变化影响着人类的活动和海洋的建设开发, 准确的潮汐预报不仅能对港口和码头的作业提供安全保障, 而且对海洋资源的开发以及气象灾害的预防也有着极为重要的意义。

为了描述和研究公海内的潮汐, Darwin^[1]提出了平衡潮理论, 但是该理论并未考虑在近海地区复杂海底地形的潮汐水平。Doodson^[2,3]提出最小二乘法用来处理潮汐中的参数, 但是该方法的缺点是需要大量的潮汐记录进行分析。为了解决这个问题, 后来卡尔曼提出了卡尔曼滤波方法用来计算调和参数, 该方法相比于最小二乘法, 不需要大量的潮汐记录, Yen^[4]利用协方差矩阵对卡尔曼滤波方法进行求解, 进而与对潮汐水平进行预测。经过不断的发展, 调和分析法可以有效的预测潮汐。

但是调和分析法也有一定的缺点, 不可忽略的是非天文因素例如气压、风力和复杂的海底地形也会对潮汐水平产生很大的影响, 由于只考虑天文潮的影响, 所以当非天文因素作用时, 仅仅使用调和分析法对潮汐进行预测会有很大的误差, 而由于环境因素的复杂性, 很难建立合适的模型。

近些年由于机器学习的发展, 人工神经网络为潮汐预测提供了许多解决方案, 很多学

者将许多机器学习算法应用于海洋方面难以解决的问题,例如 French 等^[5]利用人工神经网络预测降雨的强度,他们的结果表明,人工神经网络可以学习降雨过程中时空演变的复杂关系。Tsai 和 Lee^[6]在不确定调和参数的前提下,利用 BP 神经网络对台中港的潮汐值进行短期的预报,后来 Tsai 又将 BP 神经网络应用于混合潮和风暴潮的预测,并且开发了调和与分析神经网络相结合的长期潮汐预报系统,国内的学者柳成和尹建川^[7]利用 SVM 方法对潮汐进行模块化处理,也取得了很好的预测结果。本文提出用级联相关神经网络和径向基函数神经网络两种方法对潮汐进行预测,采用美国缅因州波特兰的数据进行训练与测试,测试结果显示,这两种方法在预测精度上明显优于调和方法。

2 人工神经网络介绍

2.1 级联相关神经网络

级联相关神经网络相比于 BP 神经网络而言,初始训练并没有隐藏单元,进行训练时,如果性能达到要求的话就停止训练,如果没达到要求,一次添加一个隐藏单元,再次训练,直到达到要求,这个训练的目标是最大化 S, S 为隐藏单元输出值与输出端误差的相关程度的总和^[8],定义 S 为:

$$S = \sum_o \left| \sum_p (V_p - \bar{V})(E_{p,o} - \bar{E}_o) \right| \quad (1)$$

其中, o 为隐含层单元, p 是训练模式, V_p 为隐含层在 p 训练模式下的平均值, $\bar{V}$ 为在全部训练模式下的平均值, $E_{p,o}$ 为第 o 个隐含单元在 p 训练模式下的残差, $\bar{E}_o$ 为在全部训练模式下的平均值。

为了最大化 S, 求出偏导数如下:

$$\frac{\partial S}{\partial \omega_i} = \sum_{p,o} \sigma_o (E_{p,o} - \bar{E}_o) f'_p I_{i,p} \quad (2)$$

其中, σ_o 是隐藏单元输出值与输出端误差相关性的符号, f'_p 是隐含单元的激活函数对输入之和的导数, $I_{i,p}$ 是第 i 个隐含单元在 p 训练模式下的输出。级联相关算法的结构示意图见图 1 和图 2。

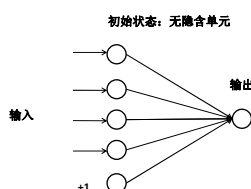


图 1 初始状态的级联结构

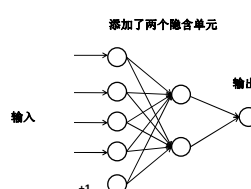


图 2 添加两个隐含单元的级联结构

2.2 径向基函数神经网络

径向基函数神经网络被广泛应用于一些数据的逼近,通常需要的维数比较少,适合在输入维数比较小的条件下逼近实值映射,与 BP 神经网络不同的是,径向基函数神经网络的激活函数不是 S 型函数,而是一种线性组合。径向基函数神经网络的网络结构并不复杂,前一层的非线性函数为 *radbas*,后一层的非线性函数为 *purelin*。两层都有偏差。该神经网络的结构示意图见图 3。

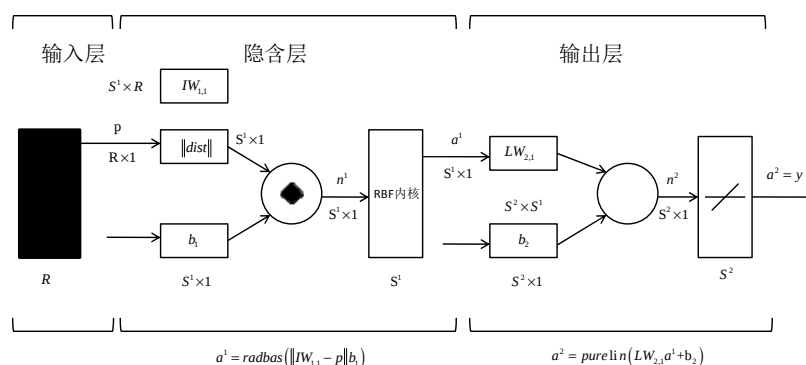


图 3 径向基神经网络结构示意图

3 模型训练与测试

3.1 研究区域

为了测试算法预测的精度,用美国缅因州波特兰的潮汐数据作为实验数据,潮汐数据跨度从 2019.01.01-2019.01.31,选取每隔一小时的潮汐记录,潮汐的格式为 MLLW,全部的数据来自于: <https://co-ops.nos.noaa.gov/>。该潮汐站的地理位置为 $43^{\circ}39.5'N$, $70^{\circ}14.7'W$ 。

3.2 实验结果

首先对比调和法预测与实际值的曲线可以知道,调和法大多数数据较为准确,但是在最高点和最低点精度较差,说明调和法并未考虑环境因素的影响,用级联相关法实验,设置参数为:两个隐含层单元,训练函数为 *trainlm*。经过反复自相关实验,每一时刻的潮汐值与前 3 个时刻的潮汐值关联最大,从而确定输入维数为 3,输出维数为 1,选取 1d 的数据作为训练,对 2d 以及 15d 的潮汐值进行预测,预测的结果用实线表示,实际值用实心点表示,其中虚线是训练过程中拟合的数据。对于径向基神经网络, *spread* 设置为 200,预测结果见图 4 和图 9。

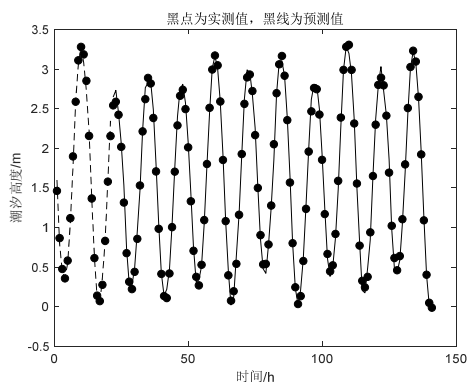


图4 级联相关法训练 1d 预测 5d 结果

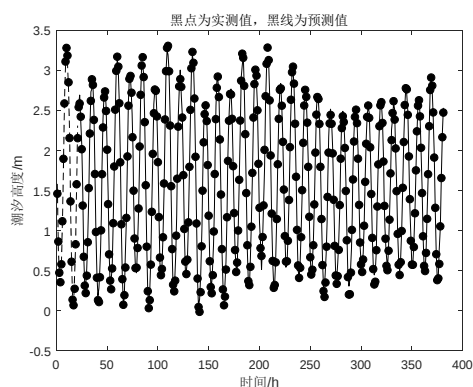


图5 级联相关法训练 1d 预测 15d 结果

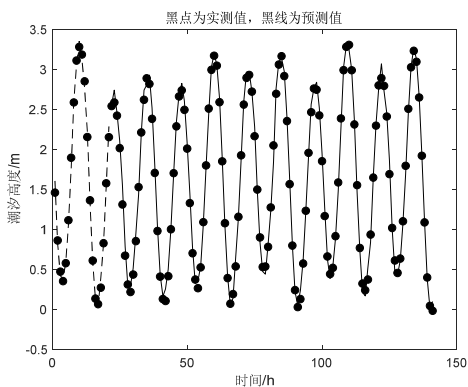


图6 径向基网络训练 1d 预测 5d 结果

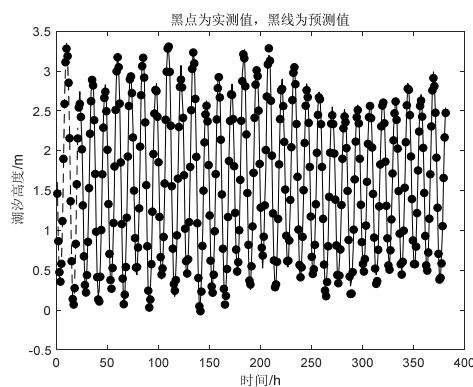


图7 径向基网络训练 1d 预测 15d 结果

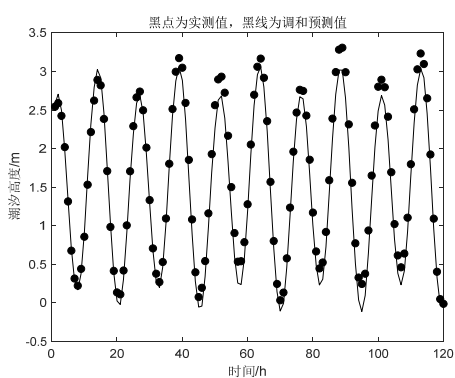


图8 调和分析预测 5d 结果

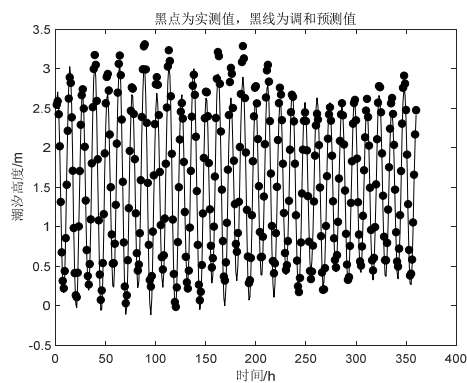


图9 调和分析预测 15d 结果

将人工神经网络与调和分析预测的数据进行对比，为了评估对测试地点的潮汐预测结果，用相关系数 (CC) 和均方根误差(RMSE)作为指标，对比可知，两种人工神经网络的

算法均显现出较好的性能，相关系数高于调和法，均方差有着极大的减小，并且仅根据短期的历史潮汐值即可达到比调和分析还高的精度(表 1)。

表 1 三种方法预测结果对比

项目	5d		15d	
	CC	RMSE	CC	RMSE
调和分析	0.9934	0.1837	0.9882	0.1820
级联相关	0.9980	0.0722	0.9975	0.0700
径向基函数	0.9974	0.0771	0.9970	0.0783

4 结论

本文用两种神经网络对美国缅因州波特兰的潮汐值进行预测，与传统的调和法比较，这两种算法精度高，需要历史潮汐值少，相比于传统的方法而言，不需要长期的潮汐记录，而且计算量较小，考虑了压力、风力等非天文因素，故而精度提高了很多，但是不足之处是本次实验只是短期的预测，对于长期的预测，由于各种因素过于复杂，所以精度会随着预报步长的增长而降低，这是未来主要的研究方向。总之，本文提出的两种方法在潮汐的短期预测中性能优于传统的调和分析，具有一定的应用意义。

参考文献

- 1 Darwin, G.. (1892). On an Apparatus for Facilitating the Reduction of Tidal Observations. Proceedings of The Royal Society of London. 52. 345-389. 10. 1098/rspl. 1892. 0082.
- 2 Doodson, A. T . The Analysis of Tidal Observations[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences, 1928, 227(647-658): 223-279.
- 3 Doodson A T . The analysis and predictions of tides in shallow water[J]. International Hydrographic Review, 1957, 33(1): 85-126.
- 4 Mandal, S, Chandramohan, et al. Application of Kalman filter to short-term tide level. [J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 1998.
- 5 French M N , Krajewski W F , Cuykendall R R . Rainfall forecasting in space time using a neural network[J]. Journal of Hydrology, 1992, 137(1-4): 1-31.
- 6 Tsai, Ching-Piao, Lee, et al. Back-Propagation Neural Network in Tidal-Level Forecasting.[J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 1999.
- 7 柳成, 尹建川. 一种高精度的短期潮汐预报模型[J]. 上海海事大学学报, 2016, 037(003): 74-80.
- 8 Fahlman S E , Lebiere C . The Cascade-Correlation Learning Architecture[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 1989, 2(6): 524-532.

Application of artificial neural network in tide forecast

BAI Long-hu¹, XU Hang¹, LI Yi-fei², ZHU Jia-wei², LIN Chen-hao², YE Ming-jie²

(1. State Key Lab of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240.

Email: hangxu@sjtu.edu.cn;

2. Shanghai Min Hang High School, 200240)

Abstract: The variation and prediction of tides is an important task in determining constructions and human activities in coastal and oceanic areas, which is related to the installation of structures in the marine environment and port operation in coastal areas. The traditional harmonic analysis is usually used to analyze the tidal components and predict the tidal level. Because the harmonic analysis is a static model for astronomical factors, it requires a large number of observed data records. However, the harmonic analysis does not take into account non-astronomical factors such as air pressure and wind force, so the prediction accuracy is limited. In this paper, artificial neural network is proposed to predict tide. Different from traditional harmonic analysis, artificial neural network has good nonlinear mapping ability, which can predict tidal level with high precision, and short-term sea level registrations need be collected and analyzed. Sea level records from the Portland, Maine are used to implement this method. The results of the methodology test show that short-term sea level registrations can be efficiently employed to produce accurate tidal prediction.

Key words: Tide; Harmonic analysis; Artificial neural network; Prediction

孤立波直墙反射的数值模拟

邹丽^{1,2,*}, 李永刚¹, 胡英杰¹, 王振³, 于宗冰¹

(1.大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室船舶工程学院, 辽宁大连 116024;

2.高技术船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240;

3.大连理工大学数学科学学院, 辽宁大连: E-mail: zoulidut@126.com)

摘要:基于势流理论, 根据三阶孤立波理论给定初始孤立波波形和波速, 应用边界元法模拟了非线性孤立波的传播与直墙反射。波形演变过程显示, 直墙反射后, 波高略有减小并出现尾波。在不同的无量纲波高下, 分析了最大爬高、直墙滞留时间和直墙所受瞬时压力等数值解。数值模拟结果与已发表的理论解和实验进行了比较, 验证了相关结果。

关键词:孤立波; 直墙反射; 边界元法; 压力

1 引言

海啸是发生频率较低却具有强大破坏力的海洋灾害, 为了方便有效地研究海啸波, 可将其近似为只有一个波峰周期无限大的孤立波。研究孤立波在直墙上的爬高, 有利于深入认识海啸的成灾机理, 对海洋工程和海岸工程的设计也至关重要。

当不考虑流体黏性时, 孤立波直墙反射等同于等高孤立波直面碰撞^[1]。Su & Mirie^[2-3]利用摄动展开法以及数值方法得到了表面孤立波直面碰撞的三阶解。Cooker 等^[4]应用边界元法(BEM)对孤立波直墙反射进行了研究, 并推导出滞留时间的三阶表达式。Chambarel 等^[5]发现大振幅孤立波碰撞会出现残余下落射流现象。Chen 等^[6]通过实验揭示出孤立波直面碰撞为非线性过程。Chen 等^[7]研究表明, 文献[2]的三阶结果与其实验结果最为接近。Chen 等^[8]利用实验探究了孤立波直墙反射过程中直墙上的压力分布。

本文根据三阶孤立波理论给定初始孤立波波形和波速, 应用边界元法模拟了非线性孤立波的传播与直墙反射。揭示了波型演变过程, 探究了最大爬高、直墙滞留时间和直墙所受瞬时压力与不同的无量纲波高的关系。本文的数值解与已发表的理论解和实验进行了比较, 验证了相关结果。

2 数学描述

2.1 数学方程

假设流体为无黏无旋不可压缩的理想流体，利用势流理论进行求解。计算域如图 1 所示， x 轴位于静水面上， z 轴垂直向上，其中 h 和 $\eta(x,t)$ 分别代表水深和波面。控制方程如下：

$$\nabla^2 \phi = 0, \quad -h < z < \eta(x,t) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \quad z = \eta(x,t) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(\nabla \phi)^2 + g\eta = 0, \quad z = \eta(x,t) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0, \quad S1 \cup S2 \cup S3 \quad (4)$$

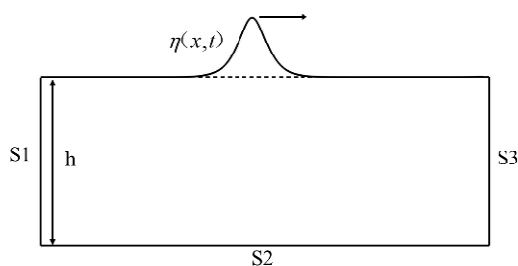


图 1 计算域

其中， ϕ 为速度势， $S1$ 、 $S2$ 和 $S3$ 分别表示两端和底部边界，均为不可渗透边界。根据伯努利方程，直墙上压力分布为

$$P(z) = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho (\nabla \phi)^2 - g\rho z \quad (5)$$

对压力进行积分，则直墙所受瞬时压力为

$$F_w = \int_{-h}^{\eta} P(z) dz \quad (6)$$

2.2 初始条件

本文以 Grimshaw 三阶孤立波解作为初始条件^[9]。波面公式为

$$\frac{\eta}{h} = \frac{a}{h} \operatorname{sh}^2 \left[1 - \frac{3a}{4h} th^2 + \left(\frac{a}{h} \right)^2 \left(\frac{5}{8} th^2 - \frac{101}{80} \operatorname{sh}^2 th^2 \right) \right] \quad (7)$$

其中, a 为孤立波波高, k 为波数, sh 表示 $\operatorname{sech}[k(x-x_1)]$, th 表示 $\tanh[k(x-x_1)]$ 。初始速度为

$$c = \sqrt{gh} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{a}{h} \right) - \frac{3}{20} \left(\frac{a}{h} \right)^2 + \frac{3}{56} \left(\frac{a}{h} \right)^3 \right] \quad (8)$$

根据三阶孤立波解给定的波形, 波面速度势的初始法向导数可表示为

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -\frac{c\eta_x}{\sqrt{1+\eta_x^2}} \quad (9)$$

2.3 时间步更新

自由表面处速度势更新公式为

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{2} |\nabla \phi|^2 - g\eta \quad (10)$$

波面更新公式为

$$\frac{d\mathbf{r}}{dx} = \nabla \phi \quad (11)$$

自由表面处速度势和波面采用四阶龙格库塔法进行更新。

关于 BEM 的详细描述可以参阅文献[10]和文献[11], 本文中当网格采用 $\Delta x/h = 0.04$, 时间步长采用 $\Delta t = 0.01s$ 可以得到稳定的孤立波解。

3 结果与讨论

3.1 直墙反射过程

图 2 为孤立波无量纲化波高 $a/h = 0.4$ 的直墙反射波面变化图, 由图 2 可知, 当孤立波逐渐靠近墙时, 波高逐渐增加, 当最大波高达到大约初始波高的两倍后逐渐回落。

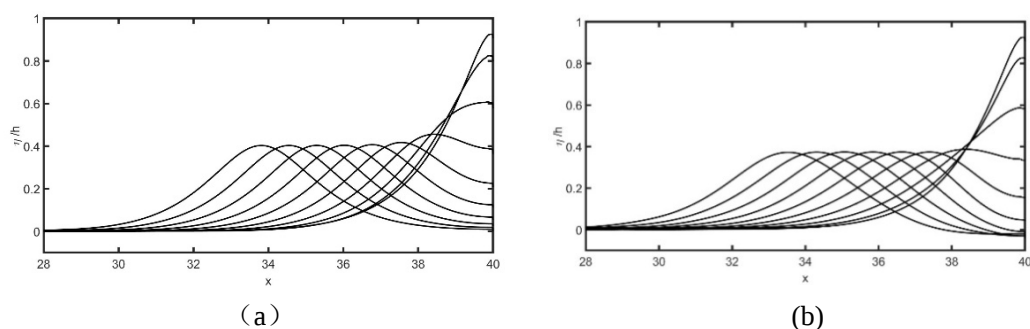


图 2 孤立波直墙反射过程

图 3 为直墙反射前后波形对比图, 由图 3 可知, 在直墙反射后波高略有降低, 并且存在尾波。

Su & Mirie^[2]推导出了尾波的公式

$$\eta_1 = \gamma S S' - \frac{4}{9} \gamma S' \quad (12)$$

其中 $\gamma = 9 \left(\frac{a_1}{h} \right)^{3/2} \left(\frac{a_2}{h} \right)^{1/2}$, $S = \sec h^2 \left(\frac{1}{2} \xi_0 \right)$, $\xi_0 = \left(\frac{a}{h} \right)^{1/2} k(x - c_R t)$ 。图 4 为两等高 $\frac{a_1}{h} = \frac{a_2}{h} = 0.4$ 孤立波直面碰撞后尾波的对比图 ($\tau = \sqrt{h/g}$), 由图 4 可知, BEM 数值结果左行波产生的尾波与实验吻合较好, 而理论解要高于本文数值结果和实验值。本文数值结果的两个尾波第一个波谷与实验结果吻合较好, 而理论结果波长较短。

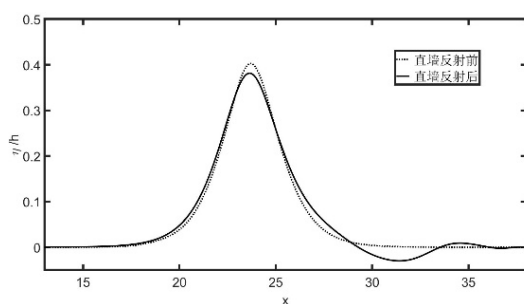


图 3 孤立波直墙反射前后波型对比

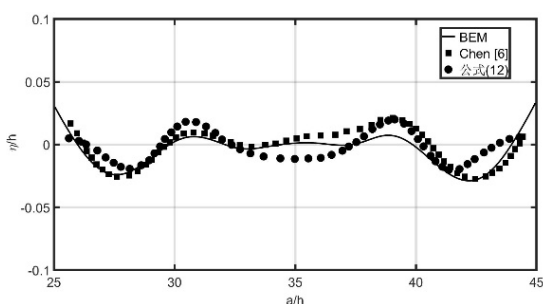


图 4 $t/\tau=12.27s$ 尾波对比

3.2 最大爬高

最大爬高为孤立波直墙反射的重要特征量, 约为孤立波波高的两倍。Su & Mirie^[2]给出了孤立波直墙反射最大爬高的三阶结果

$$\frac{R}{h} = 2 \frac{a}{h} + \frac{1}{2} \left(\frac{a}{h} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{a}{h} \right)^3 \quad (13)$$

图 5 为孤立波在直墙上最大爬高与来波波高的关系, 在图 6 中对比了 Su & Mirie^[2]理论解、本文边界元解法、Chambarel^[5]边界元解法、Chen^[6]以及 Chen^[7]的实验结果。由图可知, 在 $\frac{a}{h} < 0.5$ 范围内, 各种结果吻合都较好, 在大振幅下, BEM 结果要大于理论结果。

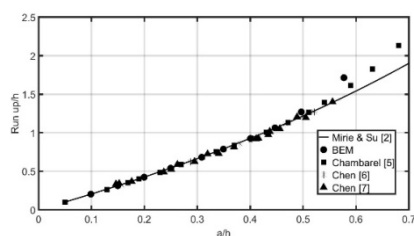


图 5 最大爬高与波幅的关系对比

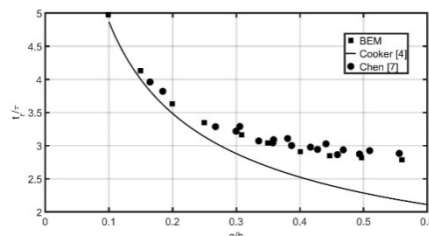


图 6 滞留时间对比图

3.3 滞留时间

孤立波直墙反射通常伴随着相位滞后，但是鉴于稳定相位滞后并不存在，Cooker^[4]提出滞留时间 t_r ，作为表征相位滞后的参数。根据 Su & Mirie^[2]的结果，Cooker^[4]推导出 t_r 的三阶表达式如下

$$\frac{t_r}{\tau} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\ln \left(\frac{\sqrt{3}+1}{\sqrt{3}-1} \right) \left(\frac{a}{h} \right)^{-1/2} + \frac{1}{8} \ln \left(\frac{\sqrt{3}+1}{\sqrt{3}-1} \right) \left(\frac{a}{h} \right)^{1/2} \right) \quad (14)$$

图 6 对公式 (14)、Chen^[7]实验结果和本文数值结果进行了对比。由图可知，当波高增加时，滞留时间逐渐减小，并趋于稳定。实验结果和本文数值结果吻合较好，公式 (14) 在较大波高时与实验和数值结果存在误差。

3.4 直墙所受瞬时压力

图 7 为直墙所受瞬时压力随时间变化图。由图可知，当波高较小时，瞬时压力只有一个峰值，出现在最大爬高时间 t_0 处。当波高较大时，如 $a/h = 0.56$ ，压力出现双峰，在达到最大波高之前，压力接近最大值，在接近最大波高的时刻出现局部最小值，且压力的第 2 个局部最大值略小于第 1 个局部最大值。这是由于当波高较大时，会出现残余下落射流，详细探讨可以参照[5]。本文数值结果与实验对比显示，当波高较小时，二者吻合较好，当波高如 $a/h = 0.56$ 时，数值结果比实验结果要宽。从图 6 可知，这是由于当波高较大时，数值结果的滞留时间要比实验结果偏小，因此波与墙的作用时间偏小。

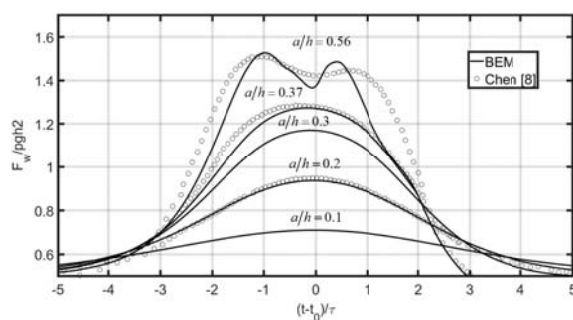


图 7 直墙所受瞬时压力随时间变化

4 结论

本文应用边界元法模拟了非线性孤立波的传播与直墙反射。波形演变过程显示，直墙反射后，波高略有减小并出现尾波。最大爬高约为波高的两倍；直墙滞留时间随波高的增加而减小；直墙所受瞬时压力在波高较小时呈现单峰，在波高较大时，呈现双峰。数值解与已发表的理论解和实验进行了比较，验证了相关结果。

致谢

本论文由国家重点研发计划（2019YFC0312400）&（2017YFE0132000）、工业装备结构分析国家重点实验室自主研究课题（S18408）资助完成。

参考文献

1. Byatt-Smith J G B, The reflection of a solitary wave by a vertical wall, J. Fluid Mech, 1998, 197: 503-521.
2. Su C H, Mirie R M. On head-on collisions between two solitary waves. J. Fluid Mech., 1980, 98(3): 509-525.
3. Mirie R M, Su C H. Collisions between two solitary waves. Part 2. A numerical study. J. Fluid Mech., 1982, 115(1): 475-492.
4. Cooker M J, Weidman P D, Bale DS. Reflection of a high-amplitude solitary wave at a vertical wall. J. Fluid Mech., 1997, 342: 141-158.
5. Chambarel J, Kharif C, Touboul J. Head-on collision of two solitary waves and residual falling jet formation. Nonlin. Processes Geophy., 2009, 16(01): 111-122.
6. Chen Y, Yeh H. Laboratory experiments on counter-propagating collisions of solitary waves. Part 1. Wave interactions. J. Fluid Mech, 749 (2014): 577-596.
7. Chen YY, Kharif C, Yang J H., Hsu H C, et al. An experimental study of steep solitary wave reflection at a vertical wall. Eur. J. Mech. B/Fluids, 2015, 49: 20-28.
8. Chen Y Y, Li Y J, Hsu H C, et al. The pressure distribution beneath a solitary wave reflecting on a vertical wall. Eur. J. Mech. B/Fluids, 2019, 76: 66-72.
9. Grimshaw R. The solitary wave in water of variable depth part 2. J. Fluid Mech., 1971, 46: 611-622.
10. Liu H, Liu PFL. Nonlinear capillary-gravity waves produced by a vertically oscillating plate, China Ocean Eng, 1998, 12(2): 147-162.
11. Touboul, J, Giovanangeli, J. P, Kharif, C, and Pelinovsky, E. Freak waves under the action of wind: Experiments and simulations, Eur. J. Mech. B/Fluids., 2006, 25(5): 662-676.

Numerical simulation of solitary wave reflection at a vertical wall

ZOU li^{1,2,*}, LI Yong-gang¹, HU Ying-jie¹, WANG Zhen³, YU Zong-bing¹

(1.State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment, Dalian University of Technology, School of Ship Engineering, Dalian, 116024;

2. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240;

3. Dalian University of Technology, School of Mathematical Sciences, Dalian, 116024;

E-mail: zoulidut@126.com)

Abstract: Based on the potential flow theory, the initial solitary wave shape and wave velocity are given according to the third-order solitary wave theory. The boundary element method is used to simulate the propagation of a nonlinear solitary wave and the reflection at a vertical wall. The evolution of the waveform shows that after the reflection, the wave height slightly decreases with wave train trailing. Under different dimensionless amplitude ratios, numerical solutions such as the run up, the wall residence time, the instantaneous pressure force are analyzed. The numerical simulation results are compared with published theoretical solutions and experimental results, and consistent conclusions are reached.

Key words: Solitary wave, Reflection, Boundary element method, Pressure.

海底射流冲刷沙丘数值模拟

邹丽^{1,2,*}, 岳彩星¹, 孙哲¹, 王子维¹, 徐伟桐¹

(1.大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室 船舶工程学院, 辽宁 大连 116024;

2.高技术船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240; Email:zoulidut@126.com)

摘要: 本文基于 FLOW-3D 的泥沙冲刷模型对垂直射流冲刷效果进行数值模拟, 数值模拟结果与文献中的实验结果吻合良好, 验证了计算模型的可靠性。在此基础上, 针对非接触式海底挖沟机冲刷沙丘地形的问題, 研究了不同喷口速度对沙丘地形冲刷效果的影响规律。计算结果显示, 在喷口速度 6~10 m/s 范围内, 脊线位置冲刷断面的沟深和沟宽随喷口速度是线性变化的, 且无量纲化后的脊线位置处的冲刷断面体现出了很好的几何相似性, 为非接触式海底挖沟机的设计和施工提供了一定的参考依据。

关键词: 非接触式开沟机; 数值模拟; 沙丘冲刷; 冲刷断面

1 引言

海洋油气资源的开发对海底管道铺设的需求日益增加, 为避免海底管道受到破坏, 通常需要挖沟埋设。由于海床通常不是完全平坦的, 在海底管道埋藏过程中, 有时埋管路线经过一些地势起伏较大的地形, 比如沙丘, 不仅会对管道强度产生影响, 也会对挖沟作业造成不便, 影响施工效率。因此在铺管和开沟前需要对沙丘进行预处理, 开出一条相对平坦的通道为铺管和开沟作业提供便利。对于这种情况, 使用大口径的非接触式射流挖沟机是一种很好的解决措施^[1]。

国内外学者外针对射流冲刷问题进行了大量的研究。Aderibigb^[2]开展小比尺实验, 研究了冲刷距离对最大冲刷深度的影响。齐梅兰等^[3]对射流冲刷的平衡深度做了深入的研究, 建立了二维射流冲刷平衡状态冲坑最大深度计算公式。槐文信等^[4]提出了二维垂向射流冲刷的数学模型, 在计算和试验研究基础上给出了二维射流冲刷平衡时冲刷坑特征长度的半经验公式。Po-Hung Yeh^[5]在德州农工大学海恩斯近海实验室开展大尺度圆柱形淹没射流的固定和移动冲刷实验, 发现了冲刷断面具有自相似性, 提出了有关最大冲刷深度、冲刷半径、沙丘高度的函数来描述冲刷坑形态。河海大学倪福生等^[6-7]对二维射流的泥沙冲刷作用展开了一系列的试验。孟然^[8]对双喷嘴射流进行了冲刷试验, 发现双喷嘴冲刷断面也具有自相似性。

目前对于水平海床的射流冲刷研究较多，而对于沙丘的射流冲刷研究很少。本文对沙丘的冲刷进行数值模拟，研究喷嘴流速对冲坑形态的影响规律，可以为非接触式挖沟机的设计和施工提供一定的参考。

2 泥沙冲刷模型

泥沙冲刷模型（Sediment Scour Model）假定具有不同性质的多种非黏性泥沙物质，包括粒径，质量密度，临界剪切应力，休止角以及夹带和运输参数等^[9]。该模型通过考虑泥沙运动中：①悬浮质输移；②重力作用下的泥沙沉降运动；③床面剪切应力和流动扰动所引起的泥沙的夹带运动；④推移质输移造成的泥沙颗粒沿床面滚动、跳跃和滑动。

预测泥沙的冲蚀、平流和沉积来估计泥沙整体的运动状态。在 FLOW-3D 中，将泥沙颗粒分为悬浮和沉积两种存在状态来计算。悬浮泥沙通常浓度较低，随流体流动而平流输送。沉积泥沙存在于用户可以定义的临界沉积分数的沉积泥沙区域（默认值为 0.64）。仅沉积的泥沙薄层表面（厚度为几个泥沙颗粒直径）上的泥沙颗粒可以在床面上以推移质输送的形式进行移动^[10]。

本文应用文献[4]中 Po-Hung Ye 的三维圆柱射流泥沙冲刷试验进行了数值计算模型有效性验证。试验中圆形喷嘴直径 0.127 m，射流速度 2.05 m/s，靶距 0.76 m，底沙为非黏性沙，其中值粒径为 0.258 mm。数值计算中的射流参数和泥沙参数与试验中的一致。计算模型如上图 1 所示，计算域长和宽均为 6 m，高 1.66 m，网格总量为 140 万。顶部为速度进口，底部为无滑移壁面，四周为连续边界条件，采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型。冲刷坑的特征长度的定义示意图如图 1 所示。其中 ε_m 是冲刷坑的最大深度， r_1 是冲刷坑在初始沙床平面上的半径， r_2 是冲刷坑在堆积沙丘处的半径， Δ 是堆积沙丘的高度。

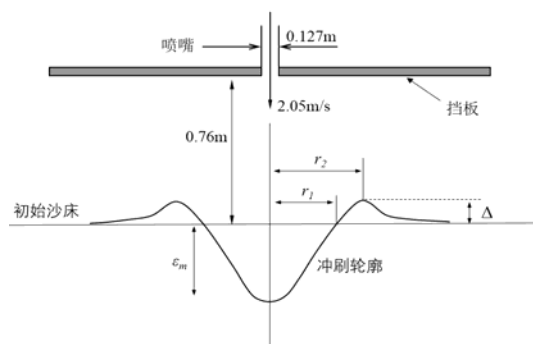


图 1 射流冲刷示意图

在图 2 中将数值模拟的最终达到平衡状态的冲刷断面沟型与试验进行对比，可以看到

数值模拟的冲刷剖面与试验基本是吻合的,冲刷达到平衡状态的冲刷坑两侧都出现了沙丘,产生这一现象的原因是泥沙在水流的作用下被夹带,在坑的两侧泥沙沉降,堆积成沙丘。数值模拟的冲刷坑是对称的,试验中的冲刷坑整体也呈现对称性,但堆积的沙丘是不对称的,造成这一现象的原因可能是试验在放水后进行测量的,且测量过程可能存在误差。数值模拟的冲刷坑的特征长度 ε_m , r_1 , r_2 , Δ 均比试验值略低,但误差很小。通过对比验证,说明 FLOW-3D 的数值计算模型对于三维泥沙冲刷的模拟符合真实的物理情况。

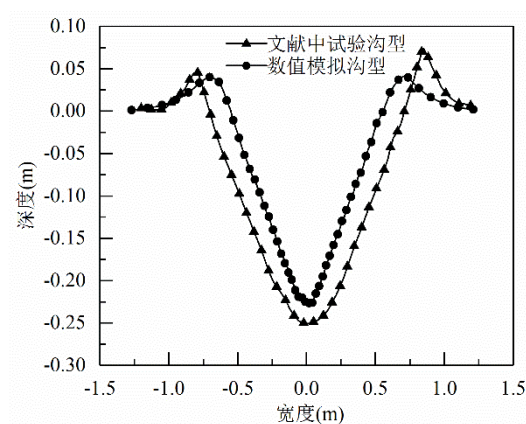


图 2 平衡状态冲刷坑形态对比

3 数值模拟

本文所采用的射流冲刷沙脊示意图如图 3 所示,垂直向下的圆形喷口以移动速度 u 从左至右冲刷沙丘,沙丘高 3 m,边坡角为 40° ,喷口直径 0.9 m,喷口距水平海床面 3.2 m,喷口移动速度 u 为 288 m/h。射流速度是影响泥沙冲刷的一个关键因素,通过改变喷口流出速度,进行数值模拟,研究喷口速度对冲刷效果的影响,具体工况如下表 1 所示。

表 1 单喷口工况

喷口直径 D (m)	移动速度 u (m/s)	靶距 h (m)	喷口流速 v (m/s)
0.9	0.08	0.2	6,7,8,9,10

数值计算的几何模型由泥沙底质、带挡板的圆形喷口两部分组成,泥沙底质模型如图 3 所示,导入几何模型后对网格进行划分,网格尺寸 0.08 m,对喷口附近的网格进行加密,生成网格总量 140 万左右。由于上部是一块被喷口贯通的挡板,流体被阻止之后只能从通孔进入到喷口区,上部为速度进口边界,底部为壁面,四周为连续边界。

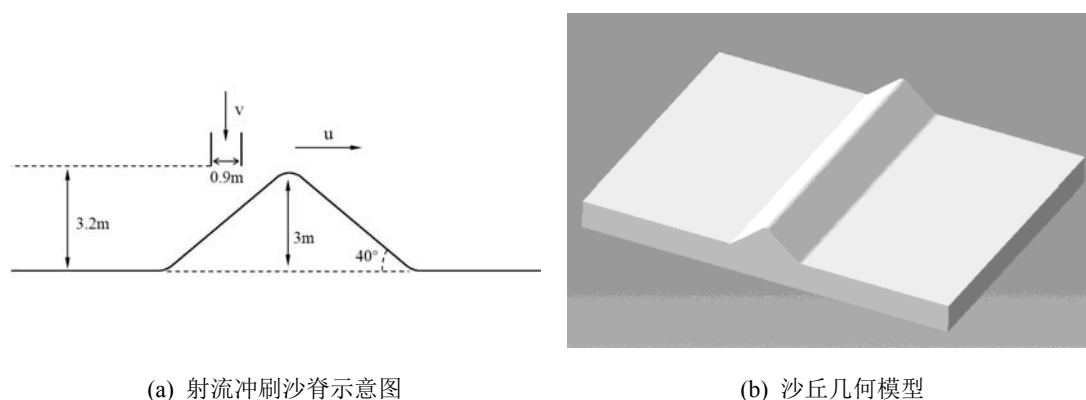


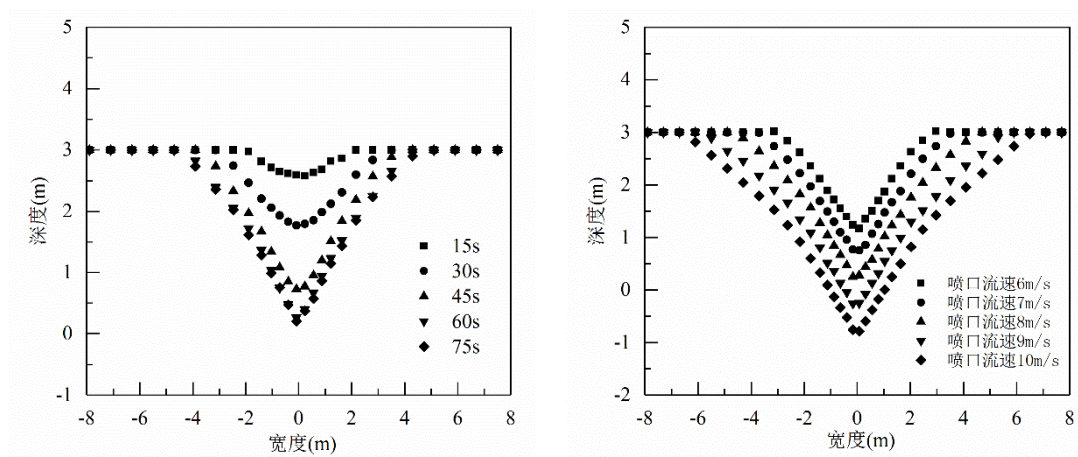
图 3 数值模拟几何模型

由于泥沙冲刷过程涉及泥沙颗粒的起动以及沉降，因此需要激活重力模型，重力方向为设置为 z 方向，大小为 -9.81 m/s^2 。激活湍流模型，选择 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型。本文为移动冲刷，需要定义喷口的运动，指定喷口运动方向为 x 方向，值的大小为 0.08 m/s 。

沉积物冲刷模型即泥沙模型，CFD 软件中，泥沙模型设置的参数有：泥沙中值粒径 0.001 m ，泥沙密度 2650 kg/m^3 ，夹带系数 0.018 ，推移质系数 8 ，泥沙临界体积分数为默认值 0.64 ，几何模型中沙丘的休止角为 40° ，这里泥沙水下休止角也设置为 40° 。冲刷过程从脊线左侧 3 m 处开始至脊线右侧 3 m 处结束，冲刷总行程 6 m ，计算物理时间 75 s 。

4 结果与分析

图 4 为当喷口流速为 0.08 m/s 时，沙脊脊线位置处的沟型随时间变化。从图 4 中可以看出，从喷口接近到远离脊线这一时间段内，冲刷沟逐渐变大，沟深增长的速度是先增大后减小的，在前 45 s 沟深变化较快，在 65 s 之后，沟型基本达到了稳定状态。沟型是左右对称的，近似呈倒三角形，但斜边有两个明显不同的倾斜角度，下部的倾斜角度较大，为 39.8° ，泥沙底质的休止角为 40° ，二者基本相等。上部的倾斜角度较小，为 23.2° 。在冲击区，射流冲击沙坑底部，在驻点处时流线急剧弯曲，主流方向改变，流速迅速减小，主流分成两股沿着于沙床的约束作用，射流主体在到达沙坑底部水沙交界面向冲刷坑之外运动。产生这一现象的原因可能是由于水射流在沟的下部和上部形成了两个旋涡，使泥沙处于悬浮状态，进而被水流夹带，流场如图 5 所示。下部的旋涡水流速较大能量高，所以坡度比较陡，而上部的旋涡水流速较小能力低，所以坡度比较缓。



(a) 沟型历时变化

(b) 不同喷口速度沟型对比

图 4 数值模拟沟型

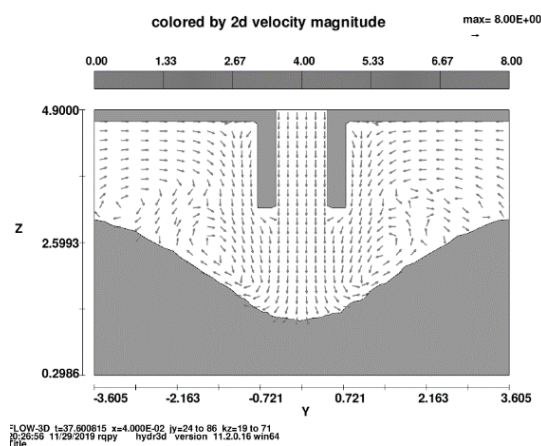


图 5 冲刷流场

图 4b 中为不同喷口速度沙脊脊线位置处的沟型图,可以看到不同喷口速度在这一位置处的冲沟形状都是相似的,大致呈倒三角形。相邻两条线是平行的,且间距相等。以喷口速度为横坐标,分别以沟深和沟宽为纵坐标,绘制沟深随喷口速度变化曲线和沟宽随喷口速度变化曲线如图 6 所示。明显可以看到,在喷口流速 6~10 m/s 范围内,冲刷深度随喷口速度是线性增长的,冲刷宽度随喷口速度也是线性增长的。本文从图中的直线上选取了沟深为 3 m 的一点,其对应的速度为 8.36 m/s,对喷口速度 8.36 m/s 的冲刷效果进行数值模拟,沙脊脊线位置处的沟深为 2.9887 m,宽度为 10.2 m。因此可以预测 6~10 m/s 范围内,某一喷口速度下的冲沟深度和宽度,也可以根据想要得到的沟深和沟宽选取相应喷口速度。

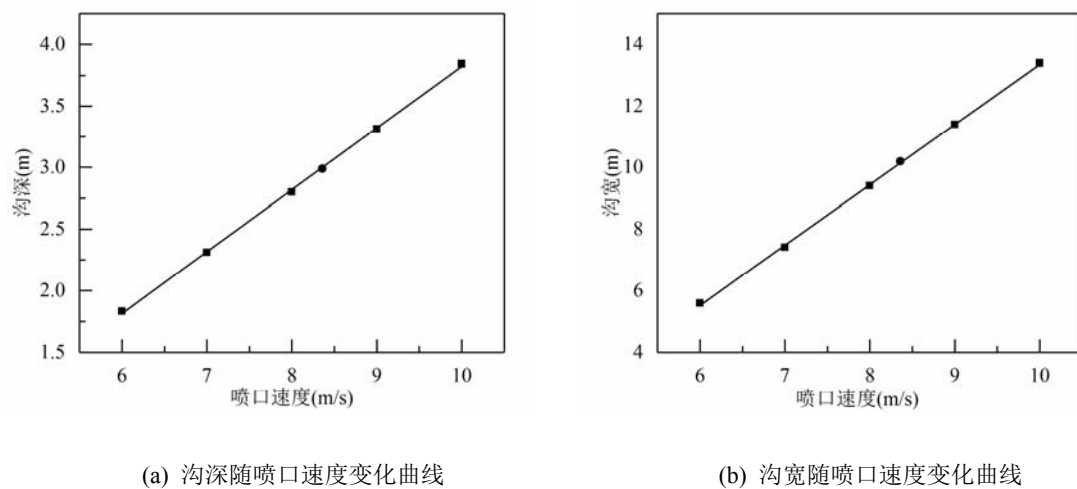
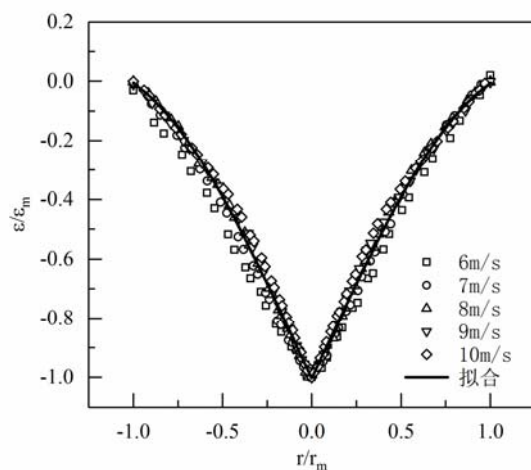


图 6 沟型参数变化曲线

从图 6 中可以看出, 不同喷口速度的冲刷剖面之间似乎存在一定的几何相似性, 冲刷坑的几何相似性是指冲刷坑剖面的纵横坐标经过无量纲化处理后, 可以叠加在一起。为了检验其几何相似性, 将冲刷坑的和将各冲刷断面无量纲化, 以测深与最大测深之比 $\varepsilon/\varepsilon_m$ 为纵坐标, 水平距离 r 与泥面处的冲刷半径之比 r/r_m 为横坐标, 无量纲化后的平衡状态冲刷断面体现出了很好的几何相似性 (图 7)。



并且满足如下表达式:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} = -2.11 \sin\left(\frac{r}{r_m} - \pi\right) + 0.0409\left(\frac{r}{r_m} - 10\right)^2 - 5.094 \quad \frac{r}{r_m} > 0$$

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} = 2.11 \sin\left(\frac{r}{r_m} + \pi\right) + 0.0409\left(\frac{r}{r_m} + 10\right)^2 - 5.094 \quad \frac{r}{r_m} \leq 0$$

5 结论

本文利用 FLOW-3D 的泥沙冲刷模型对三维圆柱形喷嘴对泥沙的冲刷进行了数值模拟, 模拟结果与试验较为吻合, 在此基础上进行了三维圆形射流对沙丘地形的移动冲刷效果的数值模拟, 并对不同射流速度的冲刷效果进行了对比研究, 结果表明: ①在射流速度 6~10 m/s 范围内, 脊线位置冲刷剖面的最大深度和最大宽度随射流速度是线性变化的, 据此可以预测 6~10 m/s 范围内某一射流速度下的冲沟深度和宽度。②脊线位置处冲刷剖面大致呈倒三角形, 不同射流速度冲刷后沙丘剖面沟型具有很好的几何相似性, 其无量纲化后的剖面形态可以用一条曲线来描述, 并给出了描述这一剖面形态的表达式。

致谢

本论文由国家重点研发计划(2019YFC0312400) & (2017YFE0132000)、工业装备结构分析国家重点实验室自主研究课题(S18408)资助完成。

参考文献

- 1 顾天宝, 郭智慧, 汤炳然. 浅谈深水非接触式挖沟机的研究与应用[J]. 化工管理, 2018(13): 151-153.
- 2 Aderibigbe OO, Rajaratnam N. Erosion of loose beds by submerged circular impinging vertical turbulent jets. journal of hydraulic research. 1996, 34: 19-33.
- 3 齐梅兰, 陈稚聪, 府仁寿. 射流冲沙研究[J]. 水利学报, 2003(12): 71-75.
- 4 槐文信, 王增武, 钱忠东, 韩雅琼. 二维垂向射流沙质河床冲刷的数值模拟[J]. 中国科学: 技术科学, 2012, 42(01): 72-81.
- 5 Yeh P, Chang K, Henriksen J, et al. Large-scale laboratory experiment on erosion of sand beds by moving circular vertical jets[J]. Ocean Engineering. 2009, 36(3-4): 248-255.
- 6 张浩, 倪福生, 顾磊. 某靶距下射流垂直冲刷坑深的实验研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(02): 238-240.
- 7 顾磊, 倪雁, 黄佳丽, 倪福生. 平面淹没射流垂直冲刷泥沙试验研究[J]. 人民黄河, 2019, 41(06):

38-43.

- 8 孟然. 海底管道后挖沟技术实验研究及数值模拟[D]. 天津大学, 2012.
- 9 孙成宇. 水下射流冲刷的数值模拟[D]. 华中科技大学, 2018.
- 10 黄佳丽, 倪福生, 顾磊. 泥沙冲刷模拟的 FLOW-3D 数值方法研究[J]. 中国港湾建设, 2019, 39(10): 6-11.

Numerical simulation of seabed jet scouring sand dunes

ZOU Li^{1,2,*}, YUE Cai-xing¹, SUN Zhe¹, WANG Zi-wei¹, XU Wei-tong¹

(1.State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment, Dalian University of Technology,
School of Ship Engineering, Dalian, 116024;

2. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240,
E-mail: zoulidut@126.com)

Abstract: In this paper, based on the FLOW-3D sediment erosion model, the numerical simulation of the vertical jet erosion effect is carried out. The numerical simulation results are in good agreement with the experimental results in the literature, which verifies the reliability of the calculation model. On this basis, for the problem of non-contact submarine trencher scouring the dune terrain, the effect of different nozzle speeds on the erosion effect of dune terrain was studied. The calculation results show that in the range of nozzle speed 6m/s~10m/s, the groove depth and groove width of the erosion section of the ridge line varies linearly with the nozzle speed, and the dimensionless ridge line erosion section reflects A good geometric similarity is provided, which provides a certain reference for the design and construction of non-contact submarine trenchers.

Key words: Non-contact trencher, numerical simulation, sand dune erosion, erosion section.

岛礁海域波浪环境轮廓法的应用研究

刘小龙^{1,2}, 孙泽^{1,2}, 蔡志文^{1,2}, 陈文炜^{1,2}, 丁军², 叶永林^{1,2}

(1. 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江), 湛江 524025, Email: 13861734471@163.com;

2. 中国船舶科学研究中心, 无锡 214082)

摘要: 南海岛礁具有典型的珊瑚礁地形地貌特征, 由于地形地貌的复杂性, 波浪从深水区域传播到岛礁区域, 其波浪短期特征和长期分布特征都与深远海有很大差别。本研究以南海典型岛礁区域为对象, 基于岛礁潟湖外设定点位的长期后报数据, 采用 Bitner-Gregersen 模型获得波高周期联合分布特征, 并采用 IFORM 法评估得到不同重现期的波高和周期联合分布的环境轮廓线。本研究结果对南海岛礁海域长期波浪条件特征的精确描述奠定了初步基础。

关键词: 岛礁; Bitner-Gregersen 模型; IFORM 法; 环境轮廓线; 波高周期联合分布

1 引言

波浪是海洋工程结构物的最重要的环境载荷。由于其变化大, 随机性强, 海洋波浪采用随机过程来描述, 其中两个经典的数学工具就是波浪谱和波高周期联合分布。前者描述了波浪的短期能量特征(20min~3h), 后者描述了波浪的长期统计行为。本研究从两个方面来探讨岛礁海域的波浪长期特征问题, 一方面从波高周期联合分布特性, 得到波浪拟合参数; 另一方面从环境轮廓分布特征, 获得不同重现期的波高和周期组合。

关于波高周期联合分布的构型研究可以追溯到 20 世纪 70 年代。在窄谱假定下, Longuet-Higgins 首先提出与谱宽参量 ν 有关的波高与周期的联合分布相对于无因次周期 $t=1$ 具有对称性^[1]。1978 年 Goda 依观测资料绘出了窄谱条件下波高与周期的联合分布图, 结果表明波高与周期联合分布是不对称的^[2], 从而证明 1975 年 Longuet-Higgins 提出的分布模型不准确^[1]。1983 年 Longuet-Higgins 对其早期提出的模型进行了修正, 引入归一化因子对, 提出了波高与周期非对称的联合分布函数^[3]。1976 年 Cavanié 等也从理论上提出了非对称性的波高周期分布函数, 此时的分布函数与谱宽参数有关^[4]。Ochi 提出了二元对数正态分

基金项目: 湛江湾实验室自主项目 ZJW-2019-08; 工信部高技术船舶科研项目[2019]357; 江苏省青年基金项目(No.351510008K0708LA00)

布用于波高周期联合的构型, 以此作为海洋结构物长期载荷的预报^[5]。Bitner-Gregersen 认为波高概率服从 Rayleigh 分布或者韦布尔分布, 周期条件概率密度函数服从高斯分布或者对数正态分布^[6-7]。Soares 基于西班牙沿岸实测资料, 研究了具有风浪和涌浪双峰波浪谱特征的波高周期联合分布形式^[8]。

关于环境轮廓法 ECM (Environmental contour method) 的研究, 首先由 Winterstein 等人 1993 年提出, 采用 IFORM (the First-order reliability method) 方法评估不同极值变量的联合分布特性, 比如波高周期极值联合分布、风浪极值联合分布以及风浪流极值联合分布等^[9-10]。后续又有一些学者进行方法扩展, 比如 Cai 等人采用 ISORM (inverse second order reliability method) 方法获得了更为保守的极值联合分布特征^[11]。Haselsteiner 等人提出采用 HDC (highest density contour) 方法封闭给定概率密度的最高密度区域而获得环境轮廓^[12]。Lin 等人基于 Copula 函数分布研究波高周期联合分布, 然后采用 IFORM 方法获得北大西洋四季的波浪轮廓线^[13]。Aubrey 等提出采用 PCA (principal component analysis) 法改进得到波浪环境轮廓线^[14]。考虑到环境轮廓法在实际工程应用的重要性, 该方法已经编制在 DNV 规范中^[15]。

国内学者对波高周期联合分布也进行了大量研究。1987 年, 孙孚在线性海浪模式及波动的射线理论基础上推导出一种波高与周期的联合分布^[16]。此后的学者在上述理论的基础上开展了大量研究工作, 提出了一些改进的波高周期联合分布模型^[17]。与此同时, 有一些学者应用概率定理建立了波高与周期的联合分布经验函数, 并利用实测资料或者实验室资料进行验证^[18-19]。方钟圣对中国海与西北太平洋波浪进行了长期统计, 并基于 Ochi 的方法提出了波高和周期的联合分布修正型式^[20-21]。在南海开阔海域, 研究海浪波高和周期联合分布的成果较少。黄必桂等利用南海北部油气田区长达 1 年的海浪波高周期观测数据, 研究了南海北部海域波高周期联合分布关系^[22-23]。国内有些学者还开展过基于 Copula 函数分布研究波高周期联合分布与极端波浪的风险概率分析^[13, 24]。

综合国内外的研究来看, 目前尚未对南海岛礁的波浪长期特征和波浪环境轮廓分布特性进行过研究。南海近岛礁区域属于浅水区域, 其地形地貌特征以珊瑚礁为主。当波浪从深远海传播至近岛礁海域时, 由于海底地形的影响导致波浪破碎和底摩擦现象, 使波浪能量衰减, 因此该海域的波高周期联合分布特性与深远海有很大差别。以南海岛礁区域设定点位的后报数据为基础^[25-26], 应用 Bitner-Gregersen 构型方法拟合波高周期联合分布特征^[6-7], 采用 IFORM 方法获得波浪轮廓线^[9-10], 研究成果对岛礁海域极端波浪条件和长期波浪条件的评估提供重要支撑。

2 理论模型

2.1 Bitner-Gregersen 模型

Bitner-Gregersen 模型认为波高概率服从 Rayleigh 分布或者韦布尔分布, 周期条件概率密度函数服从高斯分布或者对数正态分布, 波高周期联合分布概率为波高概率和周期条件概率的乘积^[6-7]。

波高概率表达式如下

$$f(h) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{h-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{h-\gamma}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (1)$$

式(1)中, h 表示波高, α 、 β 和 γ 为分布参数。式(1)为三参数韦布尔分布, 若 $\gamma=0$, 则变为二参数韦布尔分布 (本文采用二参数韦布尔分布)。

周期条件概率密度表达式如下

$$f(t|h) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

式(2)中的 μ 和 σ , 需要通过实测数据资料得到, 其拟合式如下

$$\mu = E(\ln t) = a_0 + a_1 h^{a_2} \quad (3)$$

$$\sigma = std(\ln t) = b_0 + b_1 e^{b_2 h} \quad (4)$$

在式(3)和式(4)中, a_0, a_1, a_2, b_0, b_1 和 b_2 是拟合参数, 采用非线性最小二乘法曲线拟合得到。因此, 联合概率分布可以表示为

$$f(h, t) = f(t|h) \cdot f(h) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \cdot \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{h-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{h-\gamma}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (5)$$

2.2 IFORM 模型

Winterstein 首次提出采用 IFORM 方法来获得环境轮廓线。环境轮廓的概念可描述极端海况, 其思想是在环境参数空间中定义等高线分布 (通常是 H_S , T_p 或 T_Z), 沿该空间可给定不同重现期对应的等高线分布^[9]。

本研究以波高周期联合分布为算例, 运用该方法首先要确定其联合概率密度分布, 即式(5)。

然后将波高概率分布和周期条件概率分布分别转换为标准正态 U 参数空间

$$\phi(u_1) = F_{H_S}(h) \quad (6)$$

$$\phi(u_2) = F_{T_Z \text{ or } T_p | H_S}(h) \quad (7)$$

接着在 U 形参数空间中建立规定重现期的圆。以每 3 小时记录的观测值为例的话, 对应重现期 100 年等高线的圆半径为

$$\sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \beta = -\phi^{-1}\left(\frac{1}{100 \cdot 365 \cdot \frac{24}{3}}\right) = 4.5 \quad (8)$$

最后将圆形转换为环境参数空间对应的波高和周期轮廓线

$$h_s = F_{H_s}^{-1}(\phi(u_1)) \quad (9)$$

$$t_z \text{ or } t_p = F_{T_z \text{ or } T_p|H_s}^{-1}(\phi(u_2)) \quad (10)$$

3 岛礁海域的算例评估

岛礁海域选取某环礁潟湖外的 4 个设定点位,如图 1 所示,标记为 1~4,4 个点的水深在 100~200m 范围内,1 号和 2 号点位于环礁外东北侧,其波浪特征可以代表环礁外侧北向和东北向波浪特征。3 号和 4 号点位于环礁外西南侧,其波浪特征可以代表环礁外侧南向和西南向波浪特征。波浪数据采用 WAVEWATCH III (WW3)模型后报得到,对应的时间段为 20140101—20181223,数据样本时间间隔为 1h^[25-26]。

以 2 号点为例,波高拟合与后报结果的对比如图 2 (a)所示,结果表明拟合结果基本反映后报的波高分布趋势。给定波高下的周期条件概率分布的拟合参数结果如图 2 (b)和图 2 (c)所示。同样的方法可以得到 4 个点位的拟合参数结果(表 1)。由拟合参数可以进行各个波高下拟合周期条件概率密度分布与后报结果对比(图 3),结果表明拟合周期条件概率密度分布能够准确描述给定波高下的周期分布特性。由此可以得到拟合波高周期联合分布结果(图 4)。与后报波高周期联合分布比较结果表明拟合结果能准确描述后报波浪长期特征。

岛礁潟湖外 4 个点位的波浪环境轮廓线的评估结果如图 5 所示。图 5 给出了 10 年、25 年、50 年、100 年和 1000 年 H_s - T_z 轮廓线分布。提取不同重现期对应的最大有义波高,可以得到 4 个点位不同重现期最大有义波高随重现期的变化特征,如图 6 所示。图 6 中结果反映 1、2 号点的海况较 3、4 号点恶劣,海况恶劣程度排序为 2 号>1 号>4 号>3 号。

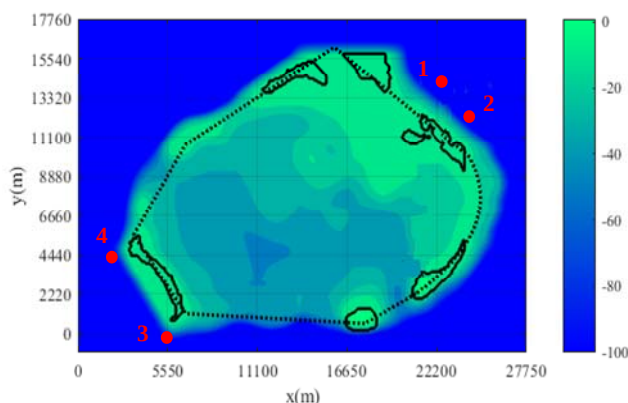


图 1 某环礁潟湖外设定点位

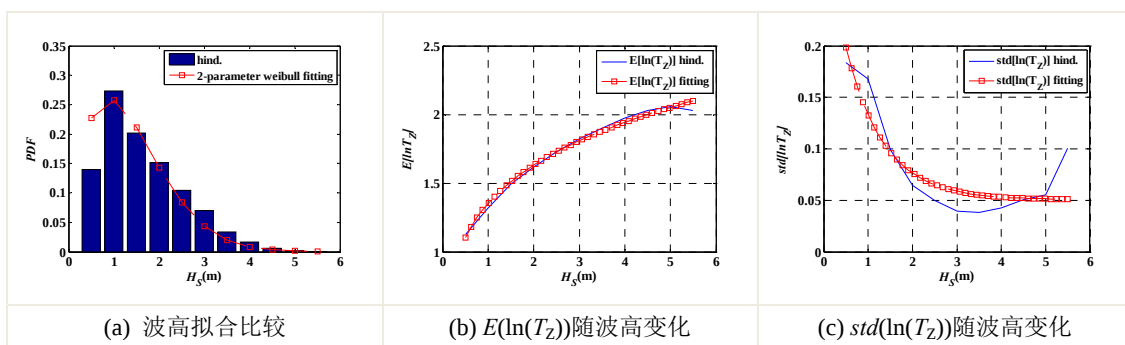


图2 波高和周期拟合结果

表1 拟合参数

点位	α	β	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2
1	0.7871	1.2160	-274.3505	275.9552	0.0013	8.3873	-8.0312	0.0070
2	1.5501	1.6544	-0.8783	2.2303	0.1695	44.4807	-44.3415	0.0004
3	0.6429	1.2558	0.4043	0.8702	0.4657	9.0466	-8.8648	0.0044
4	1.3351	1.6861	-0.8735	2.2313	0.1888	26.3375	-26.2046	0.0007

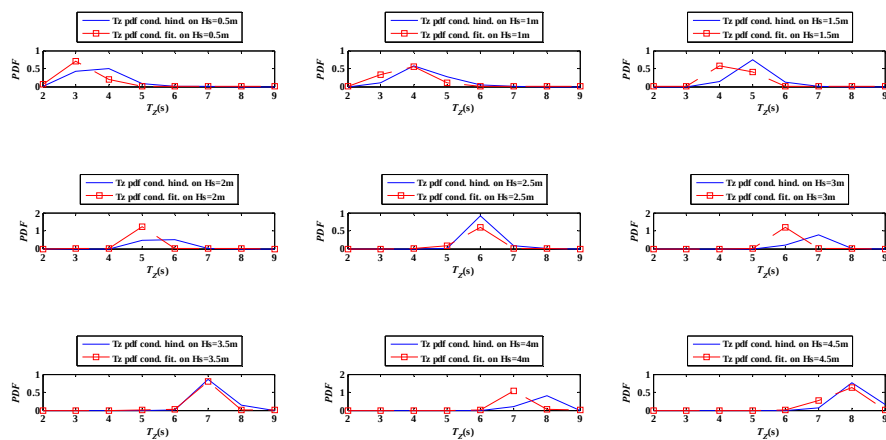


图3 各个波高对应的周期条件概率密度分布比较

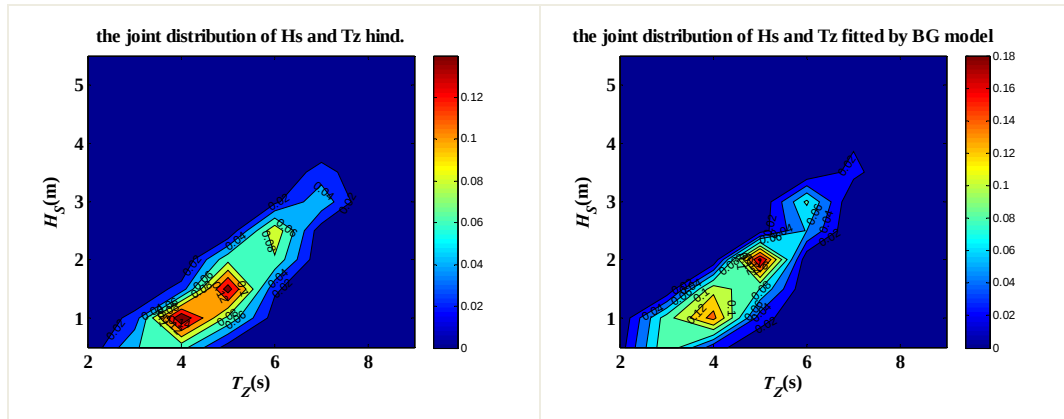


图4 后报和拟合波高周期联合分布比较

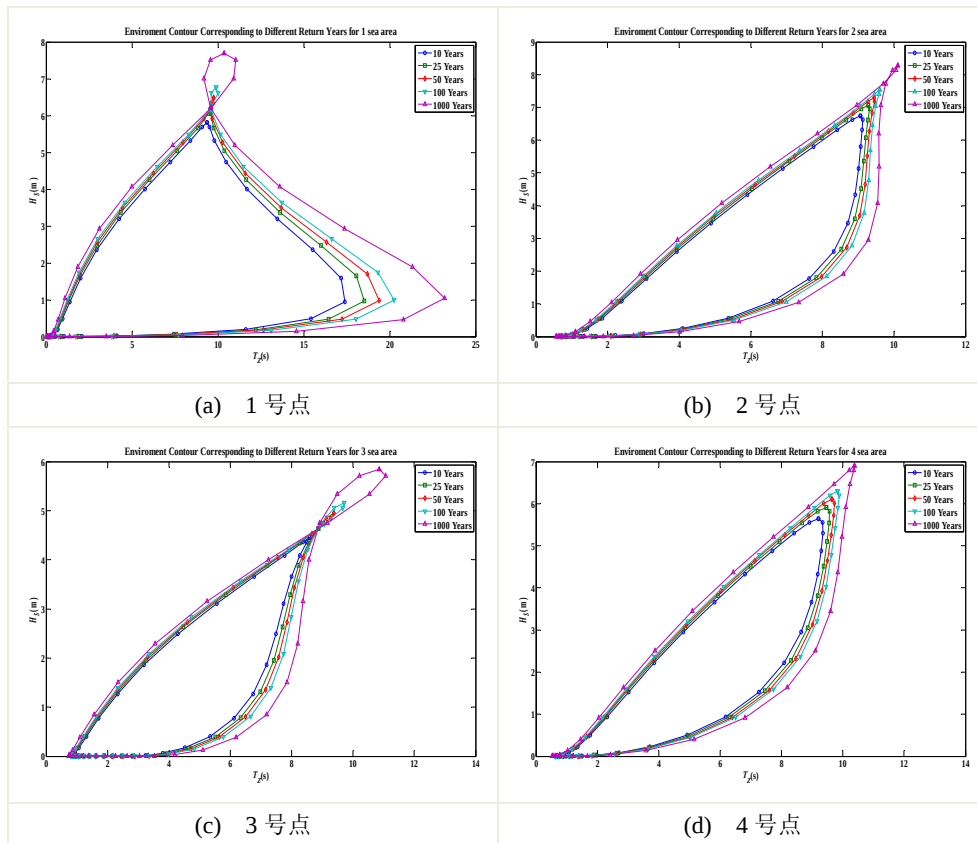


图5 1~4 号点位不同重现期的波浪轮廓线

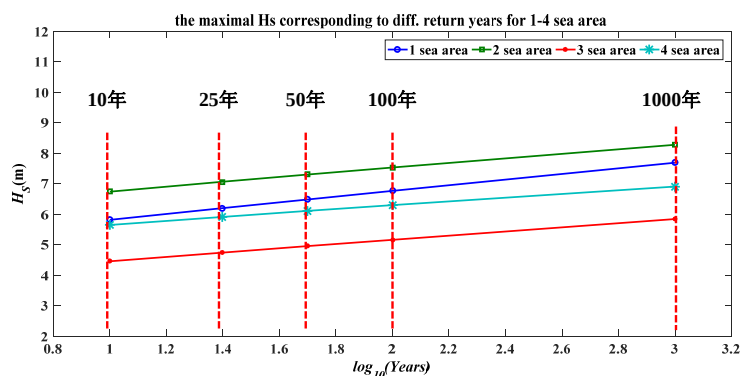


图6 1~4号点位不同重现期最大有义波高变化

4 结语

对岛礁工程和船舶及海洋工程的设计、建设及安全作业来说，波高周期联合分布和波浪轮廓线是重要的参考依据。针对南海岛礁泻湖外区域，本研究采用 Bitner-Gregersen 模型对波高周期联合分布进行拟合计算，采用 IFORM 模型对波浪轮廓线进行评估，结果表明：

(1) 拟合波高周期联合分布结果与后报结果总体趋势吻合良好，能够准确描述岛礁区域波浪长期分布特性。

(2) 波浪轮廓线不仅能够给出岛礁海域不同重现期的波高极值，还能精细描述不同重现期的波高和周期联合分布特征。

综上所述，Bitner-Gregersen 模型和 IFORM 波浪轮廓法适用于岛礁海域长期波浪条件的评估。本文研究成果为南海岛礁海域波高周期律联合分布特征的精确描述奠定了基础，对岛礁工程和船舶及海洋工程的设计、建设及安全作业具有一定的指导意义。

参考文献

- 1 LONGUET-HIGGINS M S. On the joint distribution of wave periods and amplitudes of sea waves. Journal of Geophysical Research, 1975, 80: 2688.
- 2 GODA, Y. The observed joint distribution of periods and heights of sea waves. Coastal Engineering Proceedings, 1978, 1(16), 11:227-246.
- 3 LONGUET-HIGGINS M S. On the joint distribution of wave periods and amplitudes in a random wave field. Proceedings of the Royal Society of London A, 1983, 389: 241.
- 4 CAVANIE A, ARHAN M, EZRATY R. Statistical relationship between individual heights and periods of storm waves [C]. Proc. Conf. on Behav. Offshore Struct., 1976, 2: 354.
- 5 OCHI, M K. Wave Statistics for the Design of Ships and Ocean Structures. Trans. SNAME, 1978, 86:47-76.

- 6 JAN MATHISEN, BITNER-GREGERSEN E M. Joint distributions for significant wave height and wave zero-up-crossing period. *Applied Ocean Research*, 1990, 12(2):93-103.
- 7 BITNER-GREGERSEN E M. Joint probabilistic description for combined seas. *ASME 2005 International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2005.
- 8 GUEDES SOARES C, CARVALHO A N. Probability distributions of wave heights and periods in combined sea-states measured off the Spanish coast. *Ocean Engineering*, 2015, 52:13.
- 9 S. Winterstein, T. Ude, C. Cornell, P. Bjerager, S. Haver. Environmental parameters for extreme response: inverse FORM with omission factors. *Proc. 6th International Conference on Structural Safety and Reliability*, 1993.
- 10 S. Haver, S. Winterstein. Environmental contour lines: a method for estimating long term extremes by a short term analysis. *Trans. Soc. Naval Archit. Mar. Eng.* 2009, 116:116-127.
- 11 W. Chai, B.J. Leira. Environmental contours based on inverse SORM. *Mar. Struct.* 2018, 60: 34–51.
- 12 A.F. Haselsteiner, J.-H. Ohlendorf, W. Wosniok, K.-D. Thoben. Deriving environmental contours from highest density regions. *Coast. Eng.* 2017, 123: 42-51.
- 13 LIN Y F, DONG S, TAO S S. Modeling long-term joint distribution of significant wave height and mean zero-crossing wave period using a copula mixture. *Ocean Engineering* 197 (2020) 106856.
- 14 Aubrey C. Eckert-Gallup, Cédric J. Sallaberry, Ann R. Dallman, and Vincent S. Neary. Modified Inverse First Order Reliability Method (I-FORM) for Predicting Extreme Sea States. SANDIA REPORT (SAND2014-17550), 2014.
- 15 DNV RP-C205, 2010. Environmental conditions and environmental loads. Høvik, Norway.
- 16 孙孚. 海浪周期与波高的联合分布. *海洋学报*, 1988, 10(1): 10.
- 17 ZHENG G, JIANG X, HAN S. The difference between the joint probability distributions of apparent wave heights and periods and individual wave heights and periods [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 23(3): 399.
- 18 吴秀杰, 郭洪梅, 赵炳来, 等. 浅水海浪周期与波高联合分布函数的确定. *海洋学报*, 1981, 3(4):517
- 19 葛明达. 连云港波高周期统计分布. *海洋工程*, 1984(1): 40
- 20 方钟圣, 戴顺孙, 金承仪. 海洋特征波高和周期的长期联合分布及其应用, *海洋学报*, 1989, 11(5):535-543.
- 21 方钟圣, 金承仪, 缪泉明. 中国海与西北太平洋波浪长期统计的导算方法, *中国造船*, 1994, 4: 21-35.
- 22 黄必桂, 石新刚, 谢波涛, 等. 基于实测资料的南海海浪周期关系研究. *海洋学研究*, 2016, 34(3):6.
- 23 黄必桂, 金嘉萌, 胡琴, 谢波涛. 基于实测资料的南海海浪波高和周期联合分布研究. *海洋工程装备与技术*, 2017, 4(4): 187-192.
- 24 陈子燊, 曹深西. 基于 Copula 函数的波高与周期长期联合分布, *海洋通报*, 2012, 31(6): 630-635.
- 25 Ze Sun, Xiaolong Liu, Zhiwen Cai, Jian-Guo Li, Wenwei Chen, Jun Ding, Chao Tian. A Comparison of WAVEWATCH III Grid Models for a Typical Reef Lagoon. *Proceedings of the Twenty-ninth (2019) International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE 2019)*, Honolulu, Hawaii, USA, June 16-21,

2019.

- 26 Sun Z, Zhang H C, Xu D L, Liu X L, Ding J. Assessment of wave power in the South China Sea based on 26-year high-resolution hindcast data. *Energy* 197 (2020) 117218.

Study on the application of wave environment contour method in the sea area near islands and reefs

LIU Xiao-long^{1, 2}, SUN Ze^{1, 2}, CAI Zhi-wen^{1, 2}, CHEN Wen-wei^{1, 2}, DING Jun², YE Yong-lin^{1, 2}

(1. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhanjiang), Zhanjiang 214082,

China, Email: 13861734471@163.com;

2. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

Abstract: Islands and reefs in the South China Sea (SCS) have typical characteristics of coral reef topography and geomorphology. Because of the complexity of topography and geomorphology, waves propagating from the deep water area to the islands and reefs area deform much. The short-term characteristics and long-term distribution characteristics of the waves are very different from the deep water sea. In this paper, based on the long-term hindcasting data of the set points outside the lagoon of the typical islands and reefs in the SCS, Bitner-Gregersen model is applied to obtain the joint distribution of wave heights and periods, and IFORM model is employed to evaluate the environmental contour profiles of joint distribution of wave heights and periods in different return periods. The results of this study lay a preliminary foundation for the accurate description of the characteristics of long-term wave conditions in the SCS.

Key words: Coral reef; Bitner-Gregersen model; IFORM model; Environmental contour method; Joint distribution of wave heights and periods.

北黄海筏式养殖海域潮流特征的数值模拟与分析

许慧, 康亚茹, 张明亮

(大连海洋大学, 海洋科技与环境学院, 辽宁大连 116023; Email: zhmliang_mail@126.com)

摘要: 随着我国近海养殖业的发展, 北黄海近岸海域的浮筏养殖逐渐形成规模。海域筏式养殖对所在水体的动力因子及水环境条件要求较高, 因此有必要对浮筏养殖海域的水动力特征和水交换能力进行分析。基于此, 本文以北黄海庄河近岸海域为研究区域, 采用 FVCOM (Finite-Volume Community Ocean Model) 环流模式对北黄海养殖海域浮筏养殖区域潮流特征变化进行数值模拟, 结果显示: 研究海域为规则半日潮, 涨急时主流方位为 SWNE 向, 落潮时主流方向相反, 为 NE-SW 向, 除了海峡区域, 研究区域具有明显的旋转流特征。在岛屿附近发生绕流, 近岸以及岛屿附近区域流速明显减小, 研究可对北黄海典型养殖浮筏的规划与布设提供科学指导和技术支撑。

关键词: 浮筏养殖; 庄河海域; 数值模拟; 水动力特性

1 引言

浮筏养殖一般位于浅海与潮间带之间, 水深 8~15m 的海域, 利用旧船、绳索、锚、竹竿或者塑料浮子等器材制成的平台式、延绳式等各种类型的筏架, 进行大型藻类、贝类及其他海产动物的养殖^[1]。庄河海域位于辽东半岛沿海, 东邻丹东, 西接大连, 是一片典型的开敞性海域, 该区域布设了大量的养殖浮筏, 是我国重要的海水养殖基地之一^[2]。海域的水体流动特征对海上养殖浮筏的布设有重要的影响, 海域的水流运动直接影响浮筏区的水流交换和养殖生物饵料的供应。就目前而言, 关于北黄海浮筏养殖海域的潮流运动特征等问题尚未得到充分的研究, 因此, 研究北黄海养殖海域的水动力特征对该海域养殖浮筏的选址具有重要的研究意义。

采用数值模拟方法研究海域的特征在时间上有连续性, 在空间上有广泛性, 并能够获取研究区域连续的模拟数据, 因此, 数值模型在河口及近岸海域的水动力问题研究上得到广泛应用, 并成功解决了众多的工程问题。海洋数值模式 FVCOM 是基于有限体积法, 采用三角形网格剖分计算域, 在模拟近岸海域动力、水环境等问题研究上具有一定的优势, 因此模型应用广泛^[3]。如于晓杰等^[4]基于 FVCOM 对渤海、黄海 M_2 分潮潮汐和潮流进行数值模拟, 采用不规则三角网格和干湿模块能较好地反映渤海及北黄海的潮流特征。齐继峰等^[5]基于 FVCOM 海洋模型对獐子岛附近海域进行计算, 模拟分析的潮流结果与实测值符合较好, 并系统分析了该海域的潮流特征, 研究结果有助于增加对该海域潮流特征的认知。Tian^[6]

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1407704); 国家自然科学基金(51879028)

通信作者: 张明亮, E-mail: zhmliang_mail@126.com

利用 FVCOM 模型对美国 Chesapeake 湾 Chester 水动力及河口盐度入侵进行了模拟，并对各种时间尺度下的控制因素进行了讨论分析。

庄河海域是我国北黄海重要的海水养殖基地，有多个浮筏养殖区域，但其浮筏养殖区的水动力特征研究较少，研究亟需开展。基于此，本文主要采用 FVCOM 三维水动力数值模型结合现场观测数据，对庄河筏式养殖海域 2016 年的水动力情况进行数值模拟，在验证潮位、潮流数据的基础上，对该浮筏养殖海域的潮流特征进行分析研究。

2 数学模型

FVCOM 模式是麻省理工大学陈长胜教授主导开发，模型采用有限体积法离散方程，并结合了有限元法的几何灵活优点，以及用于简单离散计算的有限差分法的优势。模型水平方向采用非结构化的三角形网格对计算域进行空间离散，空间分辨率灵活，能较好地拟合真实复杂岸线并进行局部加密^[3]。FVCOM 模式被广泛应用于大型湖泊、河口及区域海洋的数值研究工作，并取得了大量的研究成果^[3]。

2.1 模型区域和网格

研究区域为辽宁省庄河海域，此处海水水温适宜，水质肥沃，初级生产力较高，海域水质各项因子符合一类标准，海底地形较平坦，这为浮筏养殖提供了非常重要的客观条件。近些年来，随着海产品需求的增加，近海养殖产量的增加和规模扩大，庄河海域浮筏养殖逐渐形成规模。基于此，本文主要对庄河养殖海域开展数值模拟研究。模型计算域范围为 $121^{\circ}59'31.57''$ - $124^{\circ}37'48.33''$ N, $38^{\circ}13'48.24''$ - $39^{\circ}51'41.49''$ E。模型采用非结构化三角形网格，共计 17985 个节点，计 34958 个三角形单元。垂向采用 σ 坐标系，均分为 10 层。筏式养殖区域主要位于石城岛、大王家岛附近海域（图 1），该研究海域网格分辨率由外海向岸线方向依次加密，并且在石城岛、大王家岛等岛屿附近对网格进行加密。网格分辨率最高达 400m，主要分布于岛屿以及石城岛附近的庄河市岸线处；在外海最低分辨率为 5km，主要位于离岸线最远的开边界处。该研究区域的模型外海开边界为 W、S、E，计算区域地形和测点分布如图 2 所示。开边界处潮位由 MIKE 模型预报获得，以此潮位驱动 FVCOM 模型的运行。

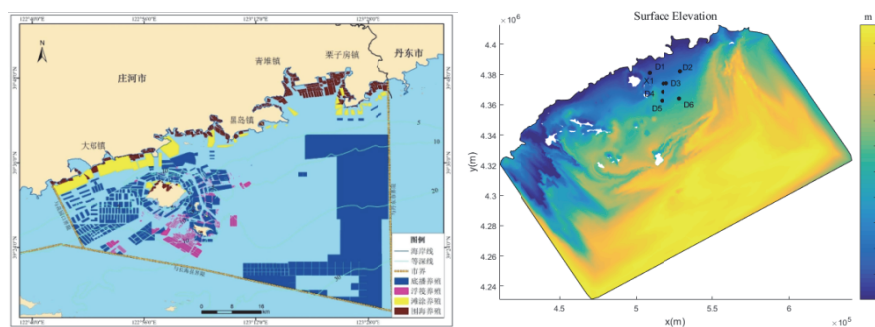


图 1 庄河海域养殖浮筏、计算区域地形及测站分布示意图

2.2 模型的验证与分析

水动力模拟时间段选择在 2016 年 9-10 月，从 9 月 15 日 0:00:00 至 10 月 23 日 0:00:00，

包括一个完整的大潮和小潮过程。选用 2016 年 10 月 14 日 1:00:00 至 2016 年 10 月 20 日 0:00:00 小长山岛处的潮汐数据对模型进行验证, 具体如图 3 所示。由图 3 可以看出, 长山岛潮位的实测值和计算值吻合较好, 该海域属于规则半日潮。为了进一步确定 FVCOM 模拟结果的准确性, 根据均方根误差以及可预测技能对模型模拟结果与实测数据之间的误差进行量化分析。结果显示: 均方根误差为 0.1096, 可预测技能值为 0.9992, 接近完全拟合值 1, 表示模型模拟的潮位结果较好。

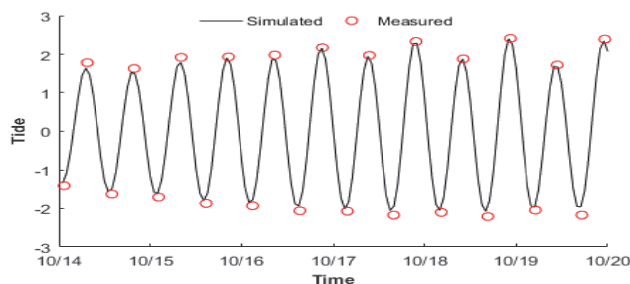


图 3 小长山岛潮位验证

选用 2016 年 10 月 17 日 9:00:00 至 10 月 18 日 10:00:00 六个测站实测的大潮数据和 2016 年 9 月 21 日 11:00:00 至 9 月 22 日 12:00:00 两个测站的小潮数据对模型模拟的流速和流向进行验证, 大潮验证结果如图 4 所示, 小潮验证结果如图 5 所示。该海域大潮期流速一般在 $0.3\sim 0.6\text{m/s}$ 之间, 小潮期流速一般在 $0.1\sim 0.3\text{m/s}$, 大潮平均流速大于小潮平均流速。在流速、流向验证过程中发现, 模拟流速的整体趋势与实测水流流速趋势吻合。本研究选取了 2016 年 10 月 17 日 9:00 至 2016 年 10 月 18 日 10:00 潮流模拟的表层、中层和底层的流速进行分析, 如表 1 所示。由表 1 中数据可以看出, 研究海域总体上表层流速>中层流速>底层流速, 六个测站点中 D4 站点表层、中层、底层平均流速均为最大, D3 站点表层、中层、底层平均流速均为最小值。由于受海底地形影响, 表层、中层潮流平均流速的差值约为 0.06m/s , 中层与底层平均流速差值约为 0.15m/s 。

表 1 测点表层、中层、底层流速比较

	D1	D2	D3	D4	D5	D6
表层	0.5978	0.5918	0.4992	0.7101	0.7034	0.6253
中层	0.5312	0.5236	0.4565	0.6345	0.6285	0.5586
底层	0.3835	0.3753	0.3359	0.4579	0.4540	0.4049
平均流速						
表层-中层	0.0666	0.0682	0.0427	0.0755	0.0749	0.0666
中层-底层	0.1477	0.1483	0.1206	0.1767	0.1745	0.1537

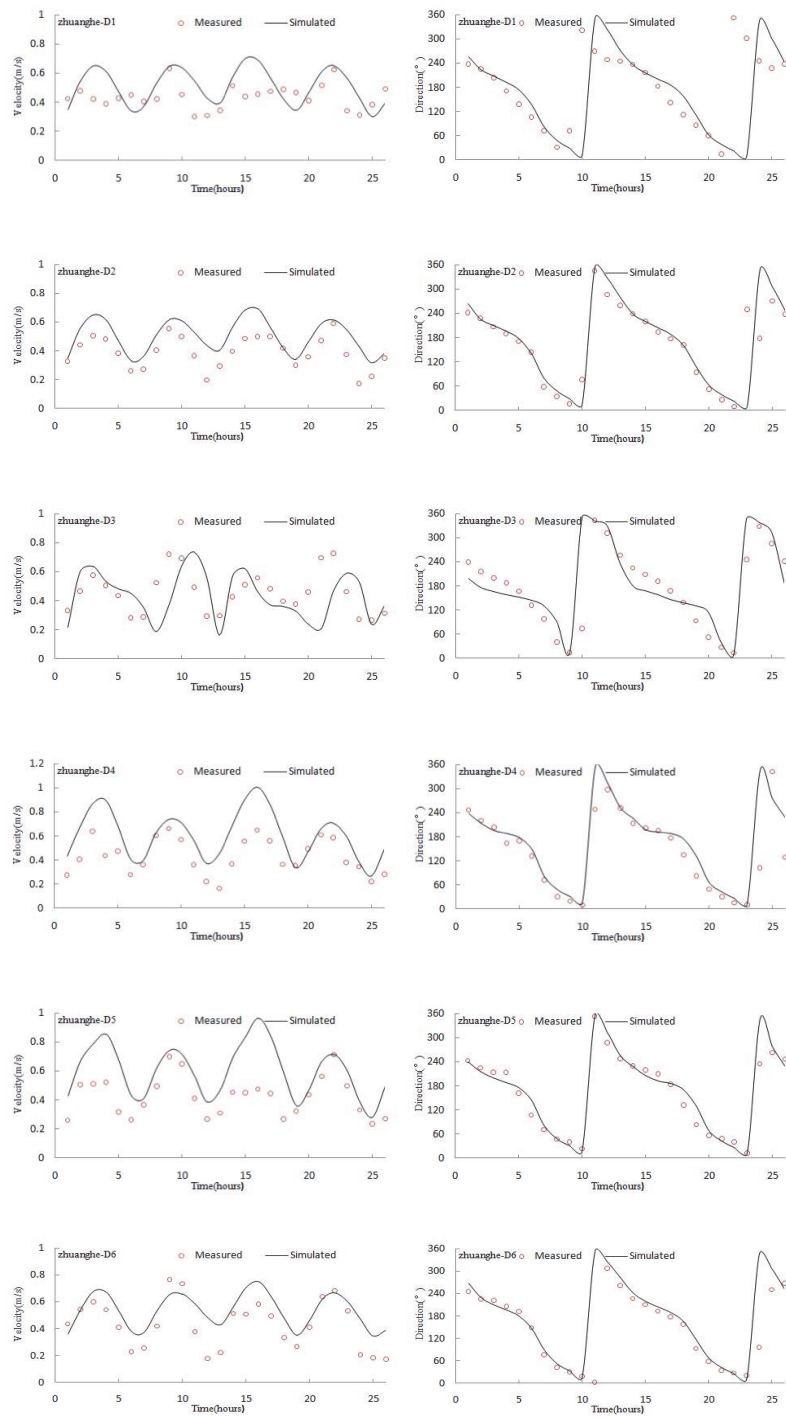


图4 测站点大潮流速、流向验证

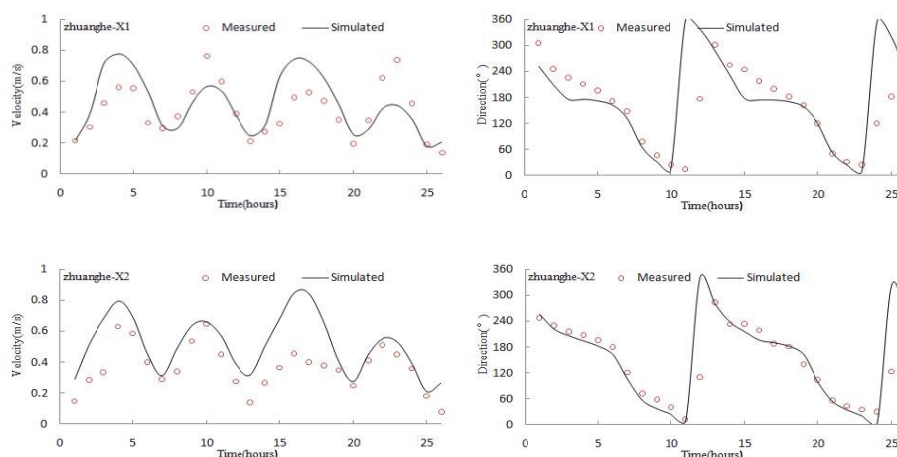
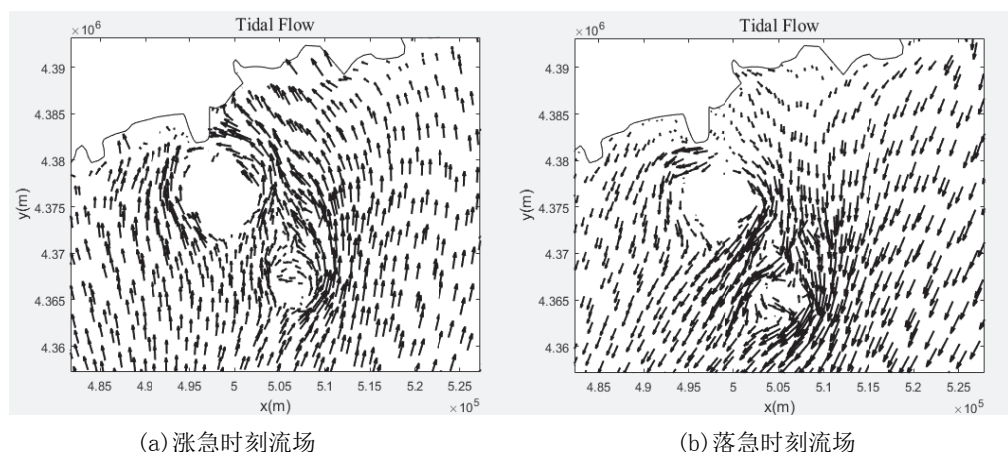


图5 测站点小潮流速、流向验证

通过 FVCOM 数值模拟计算得到庄河海域的流场特征,其中涨、落急时刻的流场特征具有典型的代表性,可对其进行分析研究。图 6(a)和(b)为庄河海域涨急与落急时刻的流场图,其中 6(a)图为涨急时刻流场图,6(b)图为落急时刻流场图。从图 6(a)中可以看出,在涨急时刻,潮流从开边界涌入,主流方向为 SWNE 向。在岛屿附近,潮流流速减小,一方面可能是由于岛屿的存在阻碍了潮流的流动,使得潮流方向发生改变,另一方面是水深减小导致潮流流速减小。整个区域潮流还具有明显的旋转流特征,在岛屿附近发生绕流,在岛屿或岸边附近区域受地形影响流速明显变小。最大流速出现在岛屿间的水道附近。在开阔水域,潮流流向较为稳定,与海域主流流向一致。庄河海域落急时刻为 2016 年 10 月 17 日 11:00:00,从图中可以看出,落急时刻主流流向为 NESW 向,与涨急时刻主流流向相反。类似的是在岛屿附近流速达到最大值。由东北方向往西南方向流动过程中,流速也随之减小。



(a) 涨急时刻流场

(b) 落急时刻流场

图6 石城岛周边海域涨、落急时刻流场

3 结论

本研究利用 FVCOM 模型对北黄海庄河海域潮流特征进行分析, 采用实测数据对模型进行验证, 验证结果表明模型模拟结果较好, 可以用于该海域的潮流特征模拟分析。计算结果表明: 该海域潮流具有驻波特性, 为规则半日潮潮型。此外, 大潮时期各站点表层、中层、深层潮流流速满足表层流速>中层流速>深层流速, 表层、中层潮流平均流速的差值约为 0.06m/s, 中层与底层平均流速差值约为 0.15m/s。在涨急时刻, 主流方向为 SWNE 向; 在落急时刻, 主流方向为 NESW 向, 在岛屿附近产生绕流, 潮流流向发生改变。研究结果对了解黄海北部养殖海域的水动力及水质输运过程具有重要意义, 可为该养殖海域水环境和生态系统的可持续发展提供技术支撑。

参考文献

1. 初佳兰, 邵光辉, 赵建华, 等. 高分一号的浮筏养殖信息提取方法[J]. 测绘科学, 2020, 45(1): 92-98.
2. 匡翠萍, 董智超, 顾杰, 等. 秦皇岛筏式养殖对水动力和污染物输运的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(7): 967-975.
3. Chen C S, Beardsley R C, Cowles G. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system[J]. Oceanography, 2006, 19(1): 78-89.
4. 齐继峰, 曹圣山, 郭可采, 等. 基于 FVCOM 的獐子岛附近海域三维潮汐潮流数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 2013, 6(44): 1469-1478.
5. 于晓杰, 娄安刚, 张学庆, 等. 基于 FVCOM 的渤、黄海 M₂ 分潮的数值模拟[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2010, S1: 157-161.
6. Tian R. Factors controlling saltwater intrusion across multi-time scales in estuaries, Chester River, Chesapeake Bay[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2019, 223: 61-73.

Numerical simulation and analysis of tidal current characteristics in raft culture area of North Yellow Sea

XU Hui, KANG Ya-ru, ZHANG Ming-liang

(Dalian Ocean University, School of Ocean Science and Environment, Dalian, Liaoning, 116023,
Email: zhmliang_mail@126.com)

Abstract: With the development of offshore aquaculture in China, the floating raft culture has gradually formed a scale in the North Yellow Sea coastal waters. It is necessary to analyze the hydrodynamic characteristics and water exchange capacity of raft culture area because raft culture requires high quality of dynamic factors and water environment conditions. Based on this, this paper uses FVCOM (finite volume community ocean model) to simulate the tidal current characteristics of the floating raft culture area in the North Yellow Sea. The results show that the tidal wave is regular semidiurnal tide in the study area. The direction of the main stream is

SW-NE when the tide is rising rapidly, and it is opposite to the direction of NE-SW at the ebb tide, there has obvious characteristics of rotational flow except for the channel area. The study can provide scientific guidance and technical support for the planning and layout of typical aquaculture rafts in the North Yellow Sea.

Key words: Floating raft culture; Zhuanghe sea area; Numerical simulation; Hydrodynamic characteristic

沉水及悬浮植被作用下植被区三维水动力的精细化数值模拟

杨颖宜¹, 马永顺¹, 詹泽荣¹, 房树林², 张明亮^{1*}

(1.大连海洋大学, 海洋科技与环境学院, 大连, 116023;

2. 大连海洋环境监测中心站, 大连 116023, E-mail: zhmliang_mail@126.com)

摘要: 沉水植被与漂浮植被均广泛存在于河流、湖泊及近海海域, 其对河道的过流能力、湖泊环流以及近岸海域的环流运动均有一定的影响。本文针对含有沉水、漂浮植被的明渠均匀流, 利用Fluent流体力学仿真软件, 对带有刚性植被作用下的明渠水流进行精细化模拟。考虑到植被区的植被分布复杂, 其流态变化剧烈, 因此对植被区域进行网格加密处理, 以保证获取高精度的计算结果。应用模型对沉水、漂浮植被影响下的水动力特征进行计算分析, 结果显示: 无论是沉水植被还是悬浮植被, 植被区流速均明显降低, 都对河道过流能力造成一定程度的不利影响, 悬浮与沉水植被作用下断面的紊动强度存在明显的差异, 植被冠层附近存在较强的湍流动能变化。研究结果可为河流防洪工程、河道浅滩整治及生态护岸等工程的实施提供科学与参考依据。

关键词: 植被作用; Fluent; 精细化模拟; 湍流动能

1 前言

大多数河流、湖泊及近海海域中都广泛分布着水生植被, 其中大致可以分为三类: 沉水植被、漂浮植被、悬浮植被。习见的沉水植被有狸藻、轮叶黑藻、狐尾藻等, 而在滩地上也生长着不同类型的沉水植被, 如矮草、矮灌木等。这些沉水植被虽然可以起到减缓水土流失、稳固河岸的作用, 但在一定程度上会改变水槽内部水体的流动情况。常见的漂浮植被有满江红、浮萍、水葫芦等, 它们在河道中会降低河道的过流能力。因此, 开展沉水及漂浮植被作用下植被区的水动力研究, 以及对沉水植被和漂浮植被存在的利弊分析是极为重要的工作。

数值模型在水利工程、海洋工程及海岸工程等方面得到了广泛的应用, 并取得了较好

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1407704); 国家自然科学基金(51879028)

*通信作者: 张明亮, 男, 黑龙江海林人, 博士, 教授, 近海环境水动力模拟、湿地生态修复及生态护岸工程

的研究效果。基于此,国内外许多学者应用数值模型对植被作用下的水体流动特征开展了研究工作。在国外,如Wilson等^[1]通过数值模型研究了不同的柔性植物对水流流动的影响。Ahmad等^[2]应用FLuent分析了植被明渠水流的纵向和横向流速的垂向分布特征,并给出了植物区内湍流强度的变化规律。在国内,如周睿等^[3]通过用浸没边界-格子Boltzmann方法并结合大涡模拟对含双层刚性植被的明渠水流特性进行了模拟分析。张明亮等^[4]建立了三维标准的 $k-\epsilon$ 双方程湍流数学模型,考虑到植物拖曳力对水流的影响,将植物阻力作为源项加入到动量方程和湍流方程,从而分析了植被作用下非对称复式渠道的水动力特性。丁锐等^[5]利用Mike21-FM模型对明渠交汇水流进行模拟,分析了明渠直角交汇水流在不同汇流比情况下以及在植被影响下的水流特性。对于沉水植被的研究,有黄胜等^[6]采用了模型试验,在弯曲复式河道滩地铺设模型草来模拟天然植被,通过改变上游入口的流量,研究了高密度滩地植被对主槽二次流涡团高度及涡团中心位置的影响。对于漂浮植被的研究,槐文信等^[7]研究了明渠漂浮植被水流内部能量损失与传递规律,结果表明在任意点和任意平面上,能量供应均等于能量损失与能量传递之和,断面上的能量损失主要集中在漂浮植被区。基于文献的分析发现,目前国内外涉及此类问题大多是通过水槽实验来研究植被存在对河道的影响,数值模拟主要是通过植物拖曳力将植被阻力进行简单量化,而对明渠水动力与植被交互作用的精细化模拟研究尚且不多见,相关研究工作须开展。

采用了计算流体动力学仿真软件Fluent,对滩地含有沉水刚性植被与悬浮刚性植被的明渠水流进行了精细化的数值模拟。首先通过相应的物理模型试验数据验证了模型的准确性,进而分析沉水植被和漂浮植被作用下的水动力分布特征,并对植物前、植物中间、植物后的纵向流速和紊动强度沿垂线的分布规律进行了探讨。

2 数学模型

2.1 数值求解方法

Fluent 软件采用有限体积法离散三维 N-S 方程,应用压力速度耦合方式(SIMPLE 算法)求解离散的方程组。在本研究中,采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型封闭 N-S 方程中的雷诺应力。收敛标准为当某一变量的残差小于 1×10^{-6} 。

2.2 边界条件设置

左侧入口边界设定为速度入口,下游出口边界为压力出口;计算域的底边界和两侧壁边界为无滑移的固壁条件;在水面,假设水面无剪切和滑移速度,当自由界面处理。

3 植被水流模拟

3.1 含沉水植被的水流精细化模拟

采用杨克君的物理模型试验作为模型的研究算例^[8]。该物理模型实验水槽长 16 m,实验水槽断面为复式断面,水槽坡度 $s=0.125\%$,实验的入口流量为 17.72l/s。该实验在距水槽槽首 8.2~11.2m 的滩地上设置植被带。植物的直径为 0.6cm,植物和植物之间的行距是

3cm, 株距是 2cm。该实验测量断面位于距离槽首 9.6 m 处, 在断面上选取四个测点沿深度方向进行速度测量, 4 个测点的横坐标依次为 8 cm、13 cm、22 cm、26 cm。在数值模拟中, 应用 Meshing 对计算域的网格进行结构化网格划分, 由于植被的存在导致流态变化复杂, 因此对植被区域的网格加密, 以保证获得较高精度的模拟结果, 网格总数为 7486965, 最大网格的边长为 0.6667cm, 最小网格的边长为 0.150cm。图 1 给出了各测点主流速度沿水深方向计算值和实测值的对比, 其横纵坐标均被无量纲化, 由该图可以看出, 测点 1 由于植物存在, 植被区内主流流速沿水深方向变化幅度较小, 在植被冠层附近速度变化的梯度较大, 测点 2 位于滩槽交界处, 水流速度呈现弱 S 形分布, 但计算值和测量值略有不同, 主要原因是模型植被为刚性, 没有考虑植物在水流作用下受到形变的影响^[5]。测点 3 和测点 4 远离植物区, 其纵向流速沿水深方向均符合对数分布。图 2 为含沉水植物的复式河道的横断面流速等值线图, 由于植物的阻碍作用使经过植物的水体流速明显减小, 而主槽内的水体流速显著增大, 由此可得, 滩地沉水植物的存在会增加主槽的过流流量的负担。

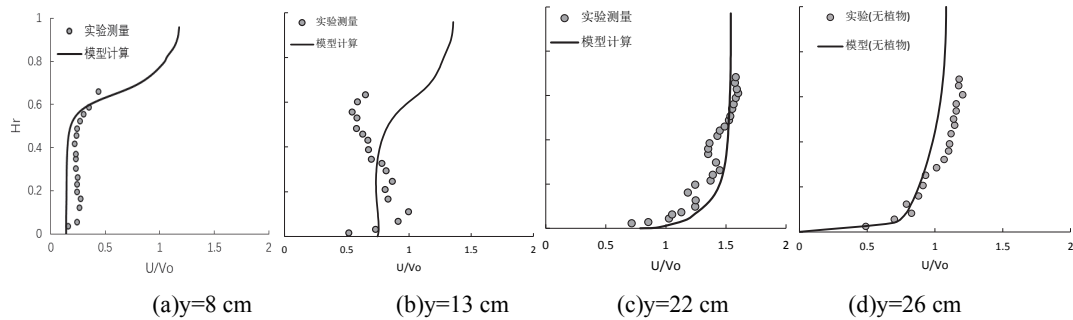


图 1 复式河道计算速度和测量值的对比

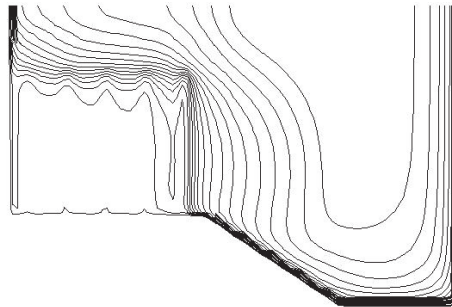


图 2 含沉水植物的复式河道的横断面流速等值线

在验证算例的基础上, 通过改变入口的流量 (10.95 L/s、17.72 L/s、22.21 L/s) 研究入流变化对植被水流速度的影响。图 3 给出了不同入流条件下各测点主流速度的对比, 结果显示: 在其他条件不变的情况下, 入口流速越大, 不同位置的主流速度也相应地增大。图 4 为不同入口条件下湍流动能的对比结果, 由图 4(a)可看出, 在 $Hr \approx 0.6$ 的位置是沉水植物

的顶层与水的接触面, 植被冠层以下区域湍流动能随入口流速的变化不明显, 植被冠层以上区域的湍流动能随入口流量的增大而增大。图 4(b)的测点位于滩槽交界处, 随着入口流速的增大, 湍流动能值也相应的增大, 且总体的变化趋势一致。图 4(c)、图 4(d)的测点位于主槽, 其湍流动能的最大值均位于水槽底部, 逐渐减小后趋于平稳。

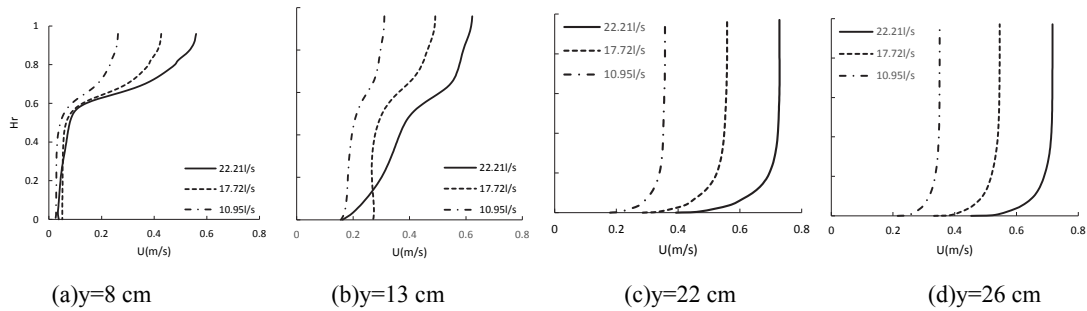


图 3 不同入口流速的条件下主流速度的对比

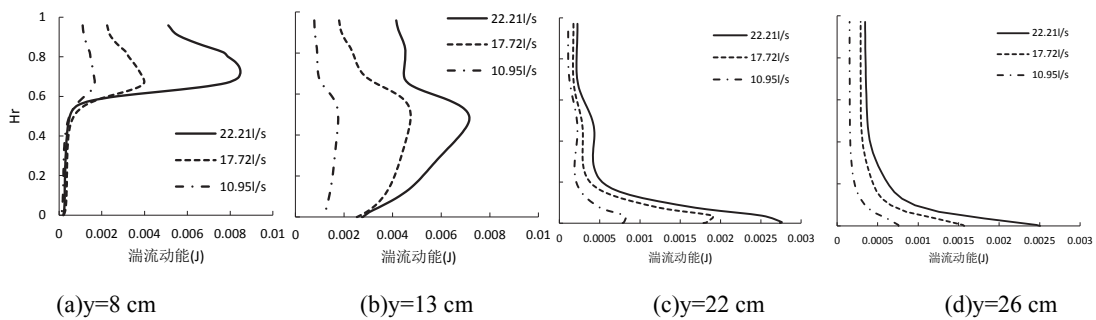


图 4 不同入口流速的条件下湍流动能的对比

2.2 含悬浮植被的水流精细化模拟

采用 Tseung 的试验作为含悬浮植被水流对比的验证算例^[9], 明渠的总长度为 15m, 植物的直径是 1cm, 每单位体积内的投影冠层面积为 2.469m^2 , 植物布设在距水槽槽首的 3~4.08m 的范围内, 共有 163 棵。入流边界的水体流速为 0.1m/s。网格划分方法同 2.1 的算例相同, 网格总数为 10048414, 最小网格边长为 0.2cm, 最大网格边长为 25cm。图 5 为悬浮植被被明渠水流各测点速度计算值和实测值的对比, 其横纵坐标均被无量纲化, 由图 5 可看出, 计算结果与测量值符合较好。由于植物的存在会对水流产生阻碍的作用, 测点的 u 、 v 、 w 速度均在 $x/108 \approx 0.2$ 处出现最大值, 沿水流运动方向, 速度呈现下降趋势。植被前端区域的湍流动能较小, 沿水流运动方向, 湍流动能不断增大, 直至离开植被区域时达到最大值。在明渠 $y/2$ 处, 选取植物前、植物中、植物后 3 个位置, 对纵向流速与湍流动能的垂线分布的进行对比分析(图 6 和图 7)。从图 6 可以看出, 在漂浮植物区的前端的纵向速度最大, 植物后的纵向流速最小, 说明植物后存在小范围流速较低的区域。在漂浮植物以下区域的纵向速度均大于植被区的纵向速度, 说明漂浮植被的存在也会影响河道的过流能力

和流速的断面分布。从图 7 可以看出, 植被带后的植物底端与水流交界面处湍流动能最大, 说明在植被与水流的交界位置出现较大的动能交换。

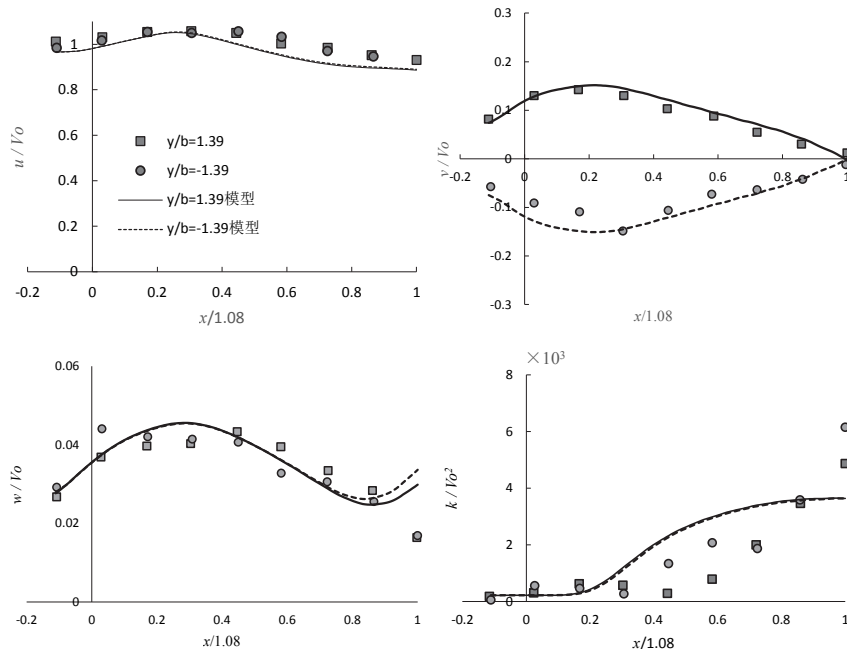


图 5 明渠 u 、 v 、 w 速度和湍流动能的计算值和测量值的对比

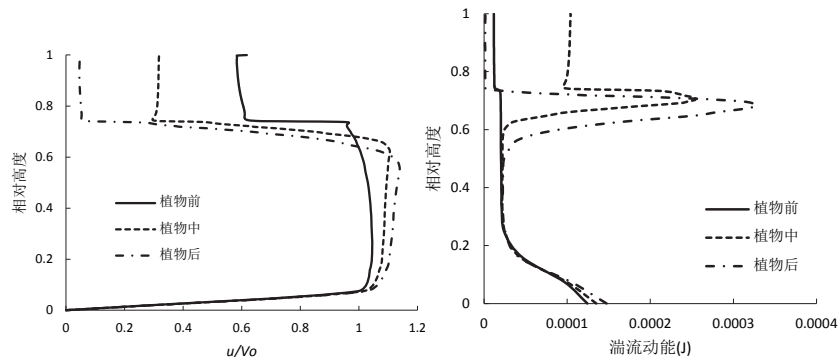


图 6 明渠植物前、中、后的纵向流速比较 图 7 明渠植物前、中、后的湍流动能比较

4 结论

本文采用 Fluent 软件中对含沉水植被的复式河道和含漂浮植被的明渠进行精细化的数值模拟, 分析了滩地植被及漂浮植被对明渠水流水动力特性的影响。通过对比的结果可以看出, 计算值和测量值符合的较好。通过对计算结果的分析得出以下结论: ①复式河道的滩地沉水植被会使主流转移到主槽内, 增加主槽的过流负担; 而明渠的漂浮植被会使主流

分散在植物两侧，但也同样会对其过流能力产生一定的不利影响。②对于含沉水植被的复式河道来说，在其他条件不变的情况下随着入口流量的增大，不同测点的流速也相应增大，湍流动能总体的变化趋势一致。③对于含漂浮植被的明渠来说，植物前端区域的湍流动能较小，沿着水流的方向，湍流动能不断增大；而植物中和植物后的紊动强度沿垂线的分布规律相似，在植物与水流交界处出现峰值，说明在交界处存在较大的能量交换。

参考文献

- 1 Wilson C A M E. Flow resistance models for flexible submerged vegetation[J]. J. Hydrol., 2007, 342(3-4): 213-222.
- 2 Ahmad M. Numerical investigation of the flow characteristics through discontinuous and layered vegetation patches of finite width in an open channel[J]. Environ. Fluid Mech., 2019, 19(6): 1469-1495.
- 3 周睿, 程永光, 吴家阳,等. 用浸没边界-格子 Boltzmann 方法模拟双层刚性植被明渠水流特性[J]. 水动力学研究与进展(a 辑), 2019, 34(4): 503-511.
- 4 张明亮, 沈永明. 植被作用下复式渠道的三维湍流数值模拟[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(3): 402-411.
- 5 丁锐, 李坤芳, 黄尔,等. 植被作用下明渠交汇水流特性数值模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2019, 8: 105-109,115.
- 6 黄胜, 刘超, 刘兴年. 滩地植被对弯曲漫滩河道主槽二次流发展的影响研究[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(1): 158-164.
- 7 槐文信, 钟娅, 杨中华. 明渠漂浮植被水流内部能量损失和传递规律研究[J]. 水利学报, 2018, 49(4):5-11+26.
- 8 杨克君. 复式河槽水流阻力及泥沙输移特性研究[D]. 四川: 四川大学, 2006
- 9 Tseung H L, Kikkert G A, Plew D. Hydrodynamics of suspended canopies with limited length and width[J]. Environ. Fluid Mech., 2016, 16(1): 145-166.

Fine numerical simulation of three-dimensional hydrodynamics in vegetation area under submerged and floating vegetation

YANG Ying-yi¹, MA Yong-shun¹, ZHAN Ze-rong¹, FANG Shu-Lin², ZHANG Ming-Liang^{1*}

(1. Dalian Ocean University, School of Ocean Science and Environment, Dalian, Liaoning, 116023;

2. Dalian Marine Environmental Monitoring Center Station, Dalian 116023, China, E-mail:

zhmliang_mail@126.com)

Abstract: Both submerged vegetation and floating vegetation exist widely in rivers, lakes and coastal waters, and they have certain effects on the flow capacity of river channels, the circulation movement of lakes and bays. In this study, for the uniform flow of open channels with submerged and floating vegetation, the software of Fluent was used to carry out fine simulation of flow hydrodynamics in open channels with rigid vegetation. Considering the complex distribution of vegetation and complex flow pattern in the plant area, the grid encryption processing was carried out in the vegetation area to ensure the high-precision calculation results. This model was applied to calculate and analyze the influence of hydrodynamic characteristics under condition of the submerged and suspended vegetation, the results showed that both cases for submerged vegetation and suspended vegetation, the velocities in the vegetation domain significantly reduced, which caused a certain degree of adverse effects for the river ability. In the cross section of vegetation domain, there were significant differences in the turbulence intensity and Reynolds stress, under the suspended and submerged vegetation, the turbulent kinetic energy had max value near vegetation canopy. The research results can provide scientific and reference basis for the implementation of river flood control engineering, river shoal regulation and ecological bank revetment.

Key words: Vegetation effect; Fluent; Fine simulation; Turbulence energy

上游堰坡对淹没式矮堰浑水冲刷深度振荡频率的影响研究

马立^{1,2}, 王路^{1,2*}, 聂锐华^{1,2}, 马旭东^{1,2}, 刘兴年^{1,2}

(1. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 淹没式矮堰是一种常见的河道整治建筑物, 常用于改善通航条件和防止河道下切。淹没式矮堰的存在会改变其周围的水流结构, 产生基础冲刷, 威胁其结构安全。在浑水冲刷条件下, 即水流强度大于泥沙临界启动条件时, 矮堰上游的泥沙会以沙波形式向下游运动, 与水流产生的冲刷坑交互影响, 使冲刷过程变得更为复杂。本研究在一条长 12m, 宽 0.44m, 深 0.58m 的水沙自循环水槽里开展了平衡输沙条件下的淹没式矮堰浑水冲刷试验, 测量了淹没式矮堰上游和下游瞬时冲刷深度以及上游瞬时床面高度的变化过程, 分析了上游沙波频率与淹没式矮堰浑水冲刷深度振荡频率之间的响应关系。通过对比矩形淹没式矮堰和带上游堰坡的淹没式矮堰试验结果, 分析了上游堰坡对“沙波频率—浑水冲刷深度振荡频率”关系的影响。试验结果显示上游堰坡虽然能有效减少矮堰上游浑水冲刷深度, 但不影响上游浑水冲刷深度的振荡频率; 上游堰坡能增加下游浑水冲刷深度的振荡频率。

关键词: 淹没式矮堰; 浑水冲刷; 振荡频率; 上游堰坡

1 引言

淹没式矮堰(如拦沙坝、潜坝等)是常见的水工建筑物。因其能提高上游水位, 减少局部流速, 故常用于增加通航水深、防止河床过度下切、保护岸坡稳定^[1]。当水流经过淹没式矮堰时, 会在其基础周围产生冲刷坑, 威胁其自身结构的稳定。此外, 淹没式矮堰的损毁会使上游河床侵蚀基面突降, 导致河道迅速下切和岸坡失稳, 引发一系列灾害问题。因此, 为了结构安全设计与上游河道稳定, 有必要研究淹没式矮堰的基础冲刷机理。

基于上游的泥沙运动状态, 可以将淹没式矮堰的基础冲刷分为两类, 即清水冲刷与浑水冲刷。在清水冲刷条件下, 水流强度小于泥沙启动临界条件, 上游无明显泥沙运动; 此

时淹没式矮堰的基础冲刷完全由局部水流引发，冲刷坑发展过程中无上游泥沙补给影响。在浑水冲刷条件下，水流强度大于泥沙临界启动条件，上游出现明显泥沙输移并伴随沙波运动，引发淹没式矮堰的基础冲刷并产生周期性“冲刷-填充”过程^[2]，造成冲刷深度的振荡。

过去几十年，国内外学者基于物理模型试验对淹没式矮堰的基础冲刷机理进行了广泛的研究^[1-14]。虽然淹没式矮堰的冲刷损毁通常发生在洪水季节（多为浑水冲刷条件），但现有研究多关注清水冲刷，对浑水冲刷的研究相对较少。Guan 等^[2,6]开展了输沙平衡条件下的冲刷试验，研究了水流强度、床沙粒径、水深、堰高等对淹没式矮堰清水、浑水冲刷深度的影响。Wang 等^[9-10]开展了平衡输沙条件下的带坡淹没式矮堰的冲刷试验研究，发现在浑水冲刷条件下，上游堰坡能显著减少上游冲刷深度，并略微减少下游冲刷深度。图 1 为带上游堰坡的淹没式矮堰浑水冲刷过程示意图^[9]，其中 z =堰高； h_0 =上游水深； h_a =床沙淤积高度； h_t =尾水深； H_d =堰上、下游水位差； d_{us} =上游冲刷深度； d_s =下游冲刷深度； α =上游堰面与水平面的弧度。

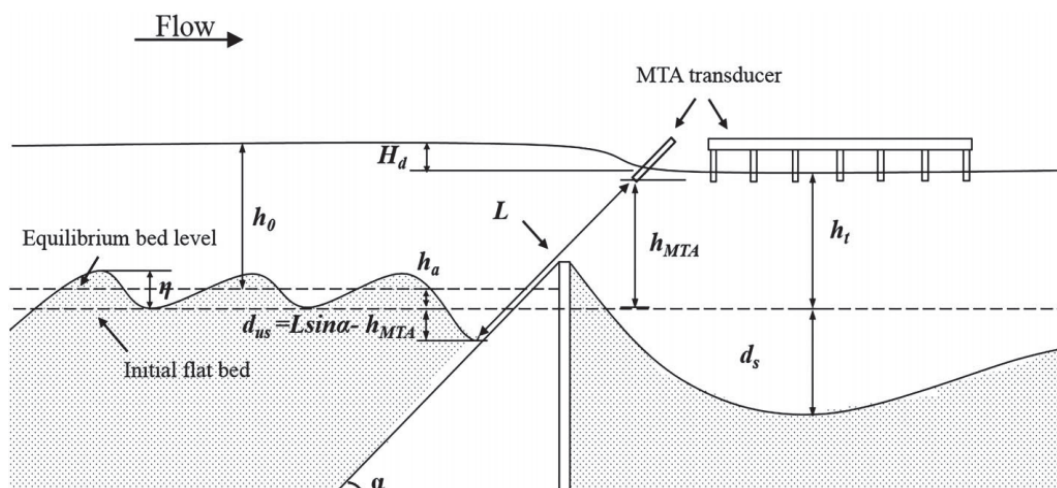


图 1 带上游堰坡的淹没式矮堰浑水冲刷过程示意图^[9]

Guan 等^[1-2,6-7]和 Wang 等^[3,8-11]基于水槽试验数据分析，指出在浑水冲刷条件下，沙波运动会造成淹没式矮堰上、下游冲刷深度发生振荡。Wang 等^[9]虽然分析了上游堰坡对淹没式矮堰平衡冲刷深度的影响，但并未定量分析淹没式矮堰上游堰坡对浑水冲刷深度振荡频率的影响，没有揭示其浑水冲刷机理。为了填补这一研究空白，揭示带坡矮堰的浑水冲刷机理，基于 Guan 等^[2]和 Wang 等^[9]中的冲刷试验数据，研究了带上游堰坡的淹没式矮堰浑水冲刷深度振荡频率特征。

2 研究方法

2.1 数据来源

本研究采用 18 组水槽试验结果, 包含上游床面高度 (upstream bed elevation, 缩写 UBE) 和淹没式矮堰浑水冲刷深度的时间序列数据, 分析淹没式矮堰上、下游瞬时冲刷深度以及上游瞬时床面高度的振荡频率。所有试验均在一条长 12m, 宽 0.44m, 深 0.58m 的水沙自循环水槽中开展, 使用均匀粗沙 (中值粒径 $d_{50}=0.85\text{mm}$, 几何均方差 $\sigma_g=1.3$, 泥沙启动剪切力 $u_{*c}=0.027\text{m/s}$), 尾水深度控制为 $h_t=150\text{mm}$ 。每组试验采用高频率超声波水下测距仪 (Seatek) 进行地形数据采集。试验数据显示 18 组浑水冲刷试验在矮堰上游均产生了充分发育的沙波。试验数据总结如表 1 所示, 其中 Q =流量; U_0 =平均流速; U_c =泥沙启动临界流速; U_0/U_c =无量纲水流强度。

表 1 本研究使用试验数据总结

数据来源	试验组数	α (rad)	Q (m^3/s)	z (mm)	H_d (mm)	h_t (mm)	h_0 (mm)	h_a (mm)	U_0/U_c	S (‰)
Guan(2015)	12	$\pi/2$	0.034-0.081	30	5-32	150	152-172	2-11	1.37-2.88	1.2-5.4
Wang(2018)	6	$\pi/4$	0.034-0.080	30	5-24	150	153-169	0-5	1.38-2.89	0.7-6.0

2.2 研究方法

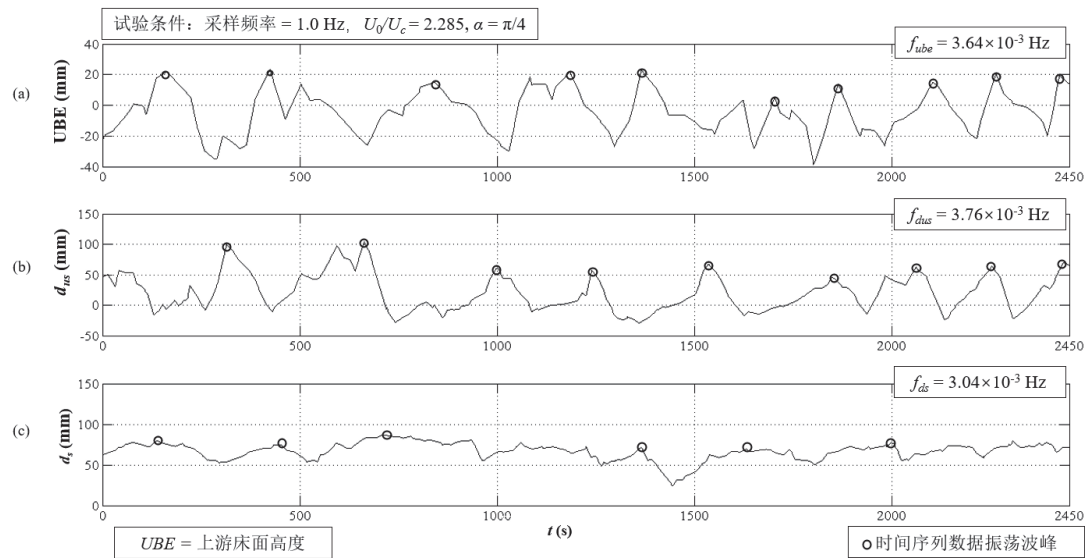


图 2 同时段(a) UBE(t)、(b)上游冲刷深度 $d_{us}(t)$ 和(c)下游冲刷深度 $d_{ds}(t)$ 的时间序列数据及其时均振荡频率

如图 2 所示, 本研究对上游瞬时床面高度和淹没式矮堰上、下游瞬时冲刷深度数据序列进行振荡频率分析。单个振荡周期定义为相邻两个波峰 (图中小圆圈) 的时间差, 取连续数个振荡周期的平均值可以得到上游床面高度振荡频率 (f_{ube})、淹没式矮堰上游冲刷深度振荡频率 (f_{dus}) 和下游冲刷深度振荡频率 (f_{ds})。

3 试验结果

图 3 展示了矩形 ($\alpha = \pi/2$)、带上游坡 ($\alpha = \pi/4$) 淹没式矮堰的浑水冲刷振荡频率 $f(u_*c/d_{50})$ 与水流强度 (U_0/U_c) 的关系。图中可以看出, 两种淹没式矮堰的上游床面高度振荡频率 (f_{ube})、上下游冲刷深度振荡频率 (f_{dus}, f_{ds}) 均随水流强度的增加而增加; 上游床面高度振荡频率 (f_{ube}) 与上游冲刷深度振荡频率 (f_{dus}) 几乎相等; 下游冲刷深度振荡频率 (f_{ds}) 均小于上游冲刷深度振荡频率 (f_{dus})。此外, 图 3 还显示上游堰坡 α 对上游床面高度振荡频率 (f_{ube}) 影响不大, 但能够增加下游冲刷深度振荡频率 (f_{ds})。

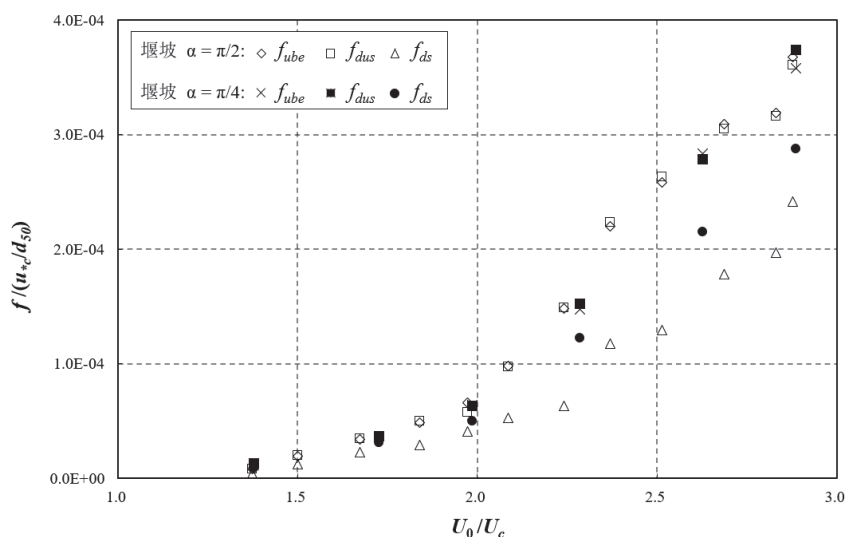


图 3 淹没式矮堰不同上游堰坡浑水冲刷振荡频率与水流强度的关系

4 讨论

试验观察表明。当上游沙波波谷运动至淹没式矮堰上游表面时, 上游浑水冲刷深度达到峰值; 当上游沙波波峰运动至淹没式矮堰上游表面时, 上游浑水冲刷深度达到最小值。随着水流强度的增加, 沙波波速相应提高, 导致淹没式矮堰上游冲刷坑中振荡频率也相应增大。该冲刷机制可以解释图 3 中上游河床高度和上游冲刷深度之间振荡频率的关系。

根据图 4 可知, 虽然上游堰坡变缓导致上游平均冲刷深度显著减少, 但上游堰坡变缓对上游冲刷深度振荡频率影响甚微。由于上游堰坡变缓, 沙波波谷运动至上游冲刷坑时, 下切水流引发的漩涡强度变弱, 减少冲刷坑内的泥沙输移强度, 从而导致上游平均冲刷深度减小。但该流态改变并不影响沙波经过矮堰时的形态与动力参数, 故不影响沙波与上游冲刷深度振荡的响应关系。

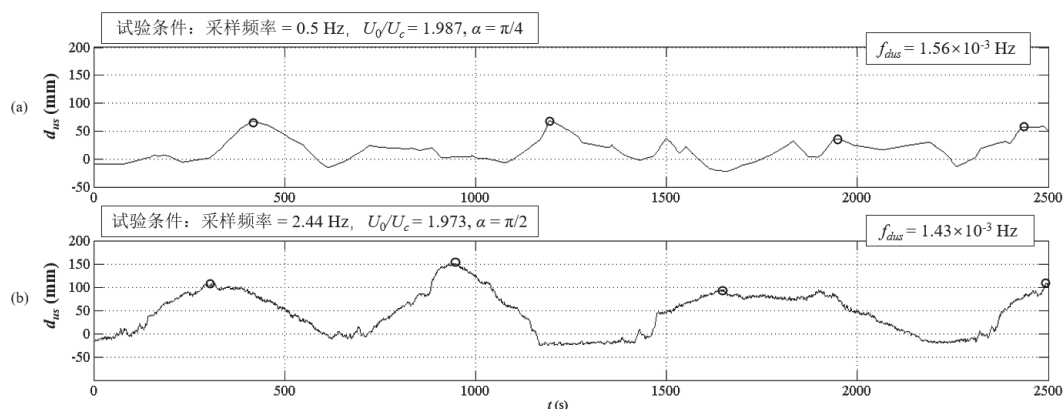


图 4 上游浑水冲刷深度历时变化比较 (a 图 $\alpha=\pi/4$; b 图 $\alpha=\pi/2$)

图 5 显示, 随着上游堰坡变缓, 下游冲刷深度振荡频率较矩形淹没式矮堰明显增加。主要原因是矮堰上游堰坡变缓能减少下游冲刷深度, 使得下游水深更小。因此, 对于带上游坡的淹没式矮堰, 沙波在通过下游冲刷坑时产生的变形较矩形淹没式矮堰更小, 使得下游冲刷坑内沙波的振荡频率更接近上游床面振荡频率 f_{ube} 。

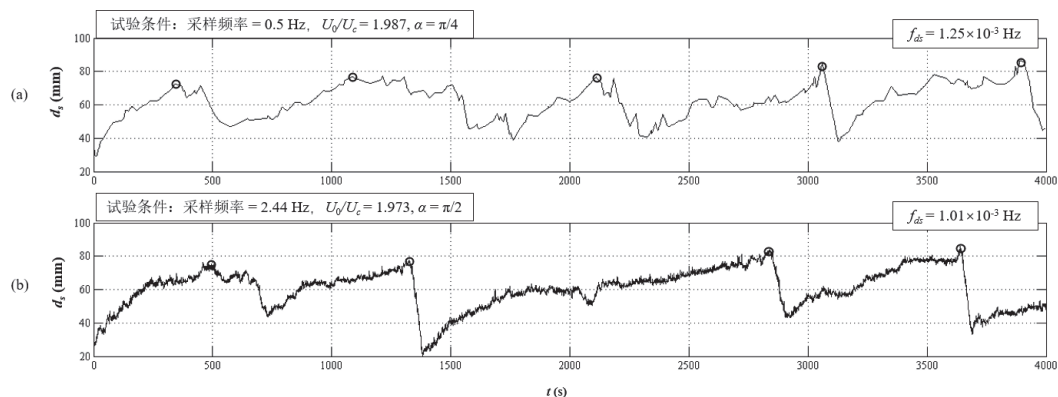


图 5 下游浑水冲刷深度历时变化比较 (a 图 $\alpha=\pi/4$; b 图 $\alpha=\pi/2$)

5 结论

基于平衡输沙条件下的淹没式矮堰浑水冲刷试验数据, 分析了带上游堰坡淹没式矮堰上游沙波频率与浑水冲刷深度振荡频率之间的响应关系。研究结果显示, 上游堰坡 α 虽然能明显减少上游平均浑水冲刷深度, 改变局部流态, 但并不影响上游床面高度振荡频率 (f_{ube})。研究结果还表明, 上游堰坡能明显增加下游浑水冲刷深度振荡频率 (f_{ds})。

参考文献

- 1 GuanD, MelvilleB, Friedrich H. Flow patterns and turbulence structures in a scour hole downstream of a submerged weir. *J. Hydraul. Eng.*, 2014, 140(1): 68-76.
- 2 GuanD, MelvilleB, Friedrich H. Live-bed scour at submerged weirs. *J. Hydraul. Eng.*, 2015, 141(2), 04014071.
- 3 WangL, Melville B W, Shamseldin A Y, Nie R. Impacts of bridge piers on scour at downstream river training structures: Submerged weir as an example. 2020a, Water Resources Research, n/a(n/a), e2019WR026720.
- 4 Ben MeftahM, Mossa M. Scour holes downstream of bed sills in low-gradient channels. *J. Hydraul. Res.*, 2006, 44(4): 497-509.
- 5 Bormann NE, Julien PY. Scour downstream of grade-control structures. *J. Hydraul. Eng.*, 1991, 117(5): 579-594.
- 6 Guan D, Melville B, Friedrich H. Local scour at submerged weirs in sand-bed channels. *J. Hydraul. Res.*, 2016, 54(2), 172-184.
- 7 Guan D, Liu J, Chiew YM, Zhou Y. Scour evolution downstream of submerged weirs in clear water scour conditions. *Water*, 2019, 11(9): 1746.
- 8 Wang L. "Local scour at submerged weirs." PhD Thesis, The University of Auckland, Auckland, New Zealand. 2018.
- 9 Wang L, Melville B, Guan D. Effects of upstream weir slope on local scour at submerged weirs. *J. Hydraul. Eng.*, 2018a, 144(3): 04018002.
- 10 Wang L, Melville B, Guan D, Whittaker CN. Local scour at downstream sloped submerged weirs. *J. Hydraul. Eng.*, 2018b, 144(8): 04018044.
- 11 Wang L, Melville B W, Whittaker C N, Guan D. Scour estimation downstream of submerged weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 145(12), 06019016.
- 12 Marion A, Tregnaghi M, Tait S. Sediment supply and local scouring at bed sills in high-gradient streams. *Water Resour. Res.*, 2006, 42(6): W06416.
- 13 Tregnaghi M, Marion A, Coleman S, Tait S. Effect of flood recession on scouring at bed sills. *J. Hydraul. Eng.*, 2010, 136(4): 204-213.

14 Tregnaghi M, Marion A, Coleman S. Scouring at bed sills as a response to flash floods. J. Hydraul. Eng., 2009, 135(6): 466–475.

Impacts of upstream weir slope on fluctuating frequency of live bed scour depth around submerged weirs

MA Li^{1,2}, WANG Lu^{1,2*}, NIE Rui-hua^{1,2}, MA Xu-dong^{1,2}, LIU Xing-nian^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan, 610065. Email: wanglu@scu.edu.cn

2. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065)

Abstract: Submerged weirs are river training structures, which span the full width of the channel, for raising upstream water level, maintaining navigation water depth, and limiting excessive bed degradation. However, the flow over such structures can lead to local scour, causing structure damage or ultimately failure. The fast evolution of underwater mobile topographies and propagating bedforms increase the complexities of the scour process at the submerged weir under live-bed scour conditions. Experiments were carried out in a 12-m-long, 0.38-m-deep, 0.44-m-wide glass-walled recirculating flume with adjustable slope, measure topographic time-series data. This study aims to investigate the relationships between fluctuating frequencies of the approaching bedforms and live bed scour depths around the submerged weir. By comparing the test results of rectangular submerged weir with different upstream weir slope, the influence of upstream weir slope on the relationship between fluctuating frequencies of the approaching bedforms and live bed scour depths is analysed. The results show that upstream weir slope can effectively reduce the upstream scour depth, but it does not affect the fluctuating frequencies of the upstream scour depth in live-bed scour condition; The upstream weir slope can considerably increase the fluctuating frequencies of the scouring depth of the downstream.

Key words: Submerged weirs; Live-bed scour; fluctuating frequencies; upstream weir slope

有植被河道沿程流速横向分布计算模型

严春浩, 单钰淇, 刘超, 刘兴年

1. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室 四川 成都 610065;
2. 四川大学 灾后重建与管理学院, 四川 成都 610065

摘要: 本文给出了在有植被河道中沿程流速横向分布的计算模型。由动量方程和水流连续方程推导控制方程, 加入植被拖曳力, 在同一个横断面内, 在植被区域内部和植被区域外部分别引入了无量纲系数 K_1 和 K_2 来表示对流交换, 进而得到控制方程解析解。 K_1 由植被区域断面平均流速确定, K_2 由无植被区域断面平均流速确定。开展系列水槽试验详细测量了有植被河道沿程各断面的流速横向分布。采用水槽试验的数据资料对该模型计算结果进行验证, 结果表明, 各个横断面的实测值与该模型的预测值吻合较好。

关键词: 植被河道; 横向分布; 计算模型

1 引言

植被常以形成群落的方式生长在天然河流中并扮演着十分重要的角色, 不仅能够改变其周围的流场还会影响其附近泥沙的沉积。水流和河床表面的泥沙之间的相互作用会在植被群落内部和外部产生不同的效果^[1,2]。在植被群落内部的水流充分发展区域, 水流流速低, 紊动弱, 因此含有有机物质的悬移质会在此区域发生沉积^[3-4], 而沉积的泥沙又会反过来促进植被的生长。在植被群落外部, 当水流流向植被群落时, 水流会因植被群落的出现所产生的阻流作用而发生横向偏转, 使得植被群落外部的流速会增大, 会对植被群落外部的河床产生冲刷^[5-6]。因为植被群落内外部的流速与床面形态变化(沉积和冲刷)紧密相关, 所以了解植被群落内部和外部的流速分布, 即横向分布是非常重要的。

本文主要对在有植被群落水槽中水流流速沿程的横向分布进行了研究, 给出了一个能够对在有植被群落水槽中纵向流速沿程的横向分布进行准确预测的计算模型。

2 试验方法

本文所有试验均是在四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室中进行的, 试验水槽长 23 m, 宽 2 m, 高 0.5 m。通过对水槽前段三角堰读数得到进入试验水槽的实际

流量。在水槽中心处布置了可前后滑动的测针，可以读出水槽沿程的水深。水槽尾部设有平板闸门，通过调节闸门开度可以控制水位，从而获得均匀流。水槽导轨上安置有多普勒声速三维流速仪 (ADV) 测量支架，本次试验采用 Sontek 公司生产的 ADV (探头向下) 来采集流速数据，在每一个测点位置的采样频率和采样时间分别为 50 Hz 和 150 s。因此，每个测点至少有 7500 个瞬时流速数据，并用 Goring and Nikora^[7]的方法将原始数据中相关性小于 70% 和信噪比 (SNR) 小于 15 db 的过滤掉。剩余的瞬时流速再通过 Matlab 程序进行处理，最终得到时均流速。此次试验的所有工况的水深 (H) 均为 18 cm，水槽断面平均流速 (U_0) 均为 18 cm/s。

本文选用刚性的细长杆件来模拟刚性植被，因其形状、性质与芦苇、香蒲草和红树林根部的形状和性质相近似^[8-10]。在天然河道的滩地和湿地上观察到的植被直径 (d) 范围在 0.1~1 cm，因此本文选用直径为 0.8 cm 的木棒作为刚性模型植被。将其插在设计有交错孔位的 PVC 板上 (曼宁系数 $n_c = 0.013$) 形成刚性植被群落，并将布置好的植被群落放在水槽中间。细长杆件的长度 (30 cm) 大于水深 (18 cm)，因此本文中所有的模拟植被均为非淹没刚性植被群落。植被群落的固体体积分数， $\phi (= \frac{\pi}{4}nd^2) = 0.015$ ，位于天然河道滩地和湿地中所观测到真实植被的范围内 ($\phi = 0.001 \sim 0.04$)^[11-12]。植被密度 (n) 为 0.03 cm^{-2} ；产生正面投影阻流面积， $a = (nd) = 0.024 \text{ cm}^{-1}$ 。植被群落的长度 (L) 为 3 m，宽度 ($2b$) 为 80 cm。试验参数见表 1。

表 1 试验参数

工况	d (cm)	f	n (cm^{-2})	a (cm^{-1})	ϕ	L (cm)	b (cm)	$RMSE$ (cm/s)	$RMSE/U_0$ (%)
B1	0.8	0.025	0.03	0.024	0.015	450	40	1.9	10.6

本试验中的水流方向，横向和垂向分别为 x 、 y 和 z 。其中 $x = 0 \text{ cm}$ 为植被群落的上游边界且水流方向为正方向； $y = 0 \text{ cm}$ 为植被群落和水槽的中心线且水平向右边为正方向； $z = 0 \text{ cm}$ 为河床表面且垂直向上为正方向。在植被群落内部和外部，分别测试了纵向流速的垂线分布，发现纵向流速的垂线平均流速 (U_d) 与在一半水深位置的纵向流速 (U) 仅相差 3%。因此本文将一半水深位置测得的纵向流速 U 作为纵向垂线平均流速 U_d 。本次试验对工况 B1 ($x = 50 \text{ cm}$ 、 100 cm 、 150 cm 、 200 cm 、 250 cm 、 300 cm 、 400 cm 和 420 cm) 的 8 个横断面的纵向流速进行了测量，在每个横断面内相邻测点的间隔为 10 cm。需要指出的是，在植被群落内部，为了降低水流空间各向异性的影响，每一个测点的位置均与周围细长杆件的距离保持严格一致。

为了评判此计算模型的可靠性，用均方根误差 ($RMSE$) 来计算此模型的计算流速和试验测试的流速的差别，其表达式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_{d(m)} - U_{d(p)})^2} \quad (1)$$

其中, N 为测点的个数, $U_{d(m)}$ 为测量的纵向流速, $U_{d(p)}$ 为计算的纵向流速。

3 试验结果

以植被群落内部水流充分发展区域 (B1: $x = 420$ cm) 的流速横向分布测试结果为例, 如图 1 所示。①从测试结果中可以得知流速的横向分布是关于水槽和植被群落中心线 ($y/b = 0$) 对称分布的, 因此只需对半边水槽的实测结果进行讨论即可, 本文后续部分只针右半边水槽 ($y/b \geq 0$) 纵向流速的实测结果进行讨论。②本文对右半边水槽 ($2.5 \geq y/b \geq 0$, 图一右边部分) 进行了分区, 有植被覆盖的部分为植被区域 ($1 \geq y/b \geq 0$); 无植被覆盖的部分为无植被区域 ($2.5 \geq y/b \geq 1$)。植被区域和无植被区域的平均流速分别为 $U_{veg} (= \frac{1}{b} \int_0^b U_d dy)$ 和 $U_{bare} (= \frac{1}{B-b} \int_b^B U_d dy)$, 在图中用黑色的虚线表示。植被区域的平均流速 U_{veg} 与植被区域中心线 ($y/b = 0$) 的纵向流速 U_d 大致相同, 从图 1 中可见, U_{veg} 比在中心线的流速 U_d 仅大 4%, 因此本文将植被区域中心线测得的纵向流速 U_d 作为植被区域内部的平均流速 U_{veg} 。

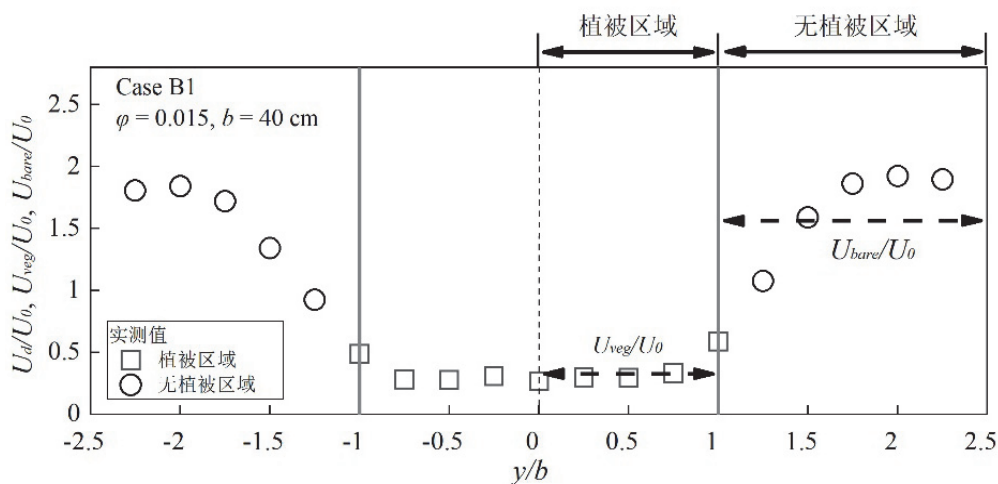


图 1 工况 B1 在横断面 $x = 420$ cm 内的纵向流速无量纲化处理后的横向分布

4 理论分析

在有植被群落水槽中, 单位体积水体沿水流方向的动量方程联立水流连续方程, 并将由植被引起的沿水流方向拖曳力 $f_x (= \frac{1}{2} C_d a U^2)$ 作为阻力项引入其中后, 可得到控制方程:

$$-\frac{1}{2}\rho C_d a U^2 + \rho g S + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial UV}{\partial y} + \frac{\partial UW}{\partial z} \right) \quad (2)$$

式中： ρ 为液体密度； U 、 V 和 W 分别为 x 、 y 和 z 方向上的时均流速； x 、 y 和 z 分别为水流流向，横向和垂向； τ 为雷诺剪切力； C_d 是拖曳力系数； $a=(nd)$ 是正面投影阻流面积； n 是植被群落密度； d 是植被直径。

基于 Shiono & Knight^[13]的研究成果，对式 (2) 沿水深 (H) 积分得到水深平均的动量控制方程：

$$-\frac{1}{2}\rho C_d a H U^2 + \rho g S H + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \lambda H^2 \sqrt{\frac{f}{8}} U_d \frac{\partial U_d}{\partial y}) - \rho \frac{f}{8} U_d^2 = \rho H \frac{\partial UV}{\partial y} \quad (3)$$

令式 (3) 中位于等号右边的二次流项 $\frac{\partial UV}{\partial y}$ 为 K ，因此 (3) 可以化简为下式：

$$\frac{1}{2}\rho \lambda H^2 \sqrt{\frac{f}{8}} \frac{\partial^2 U_d^2}{\partial y^2} - \left(\frac{1}{2}\rho C_d a H + \rho \frac{f}{8} \right) U_d^2 = \rho H (K - gS) \quad (4)$$

令 K 在植被区域内为 K_1 ，在无植被区域内为 K_2 。在无植被区域其解析解如下：

$$U_{bare} = \sqrt{A_1 e^{r_1 y} + A_2 e^{r_2 y} + \frac{8H(gS - K_2)}{f}} \quad (5)$$

式中： $r_{1,2} = \pm \frac{1}{2H} \sqrt{\frac{1}{\lambda \sqrt{\frac{f}{8}}}} f$ ， A_1 和 A_2 为积分常数。

在植被区域内部，式 (4) 的解析解如下：

$$U_{veg} = \sqrt{A_3 e^{r_3 y} + A_4 e^{r_4 y} + \frac{8H(gS - K_1)}{4C_d a H + f}} \quad (6)$$

式中： $r_{3,4} = \pm \frac{1}{2H} \sqrt{\frac{1}{\lambda \sqrt{\frac{f}{8}}}} (4C_d a H + f)$ ， A_3 和 A_4 为积分常数。

为求解式 (5) 和式 (6) 中的积分常数，需要选取 4 个合理的边界条件。首先，在植被区域和无植被区域的交界处水流流速连续和水流梯度连续，因此

$U_{veg} = U_{bare}$, $\frac{\partial U_{veg}}{\partial y} = \frac{\partial U_{bare}}{\partial y}$ 。另外, 在植被群落内部流速梯度为 0, $\frac{\partial U_{veg}}{\partial y} = 0$; 在无植被群落区域模型计算值与实际测试值相等, $U_{bare} = U_d$ 。

5 计算参数

f 、 λ 、 K_1 和 K_2 是影响计算结果的 4 个重要参数, 它们的取值需要分别讨论。

达西阻力系数 f 反映床面粗糙程度对水流的影响, 在这里用达西公式与曼宁公式建立关系^[14-15]: $f = 8gn_c^2 / R^{1/3}$, 式中: n_c 为曼宁系数; R 为水利半径。

对于无量纲涡黏系数 λ , 根据前人研究^[16-17]发现可通过 $\kappa/6$ 来计算得到, 其中 $\kappa(=0.4)$ 为卡门系数。在这里根据此关系计算出 $\lambda = 0.067$ 。

K_1 和 K_2 分别为在植被区域和无植被区域表示对流交换的无量纲系数, 并通过试算法确定。调整 K_1 值, 使模型在植被区域内部的计算流速与实测的植被区域内部流速 U_{veg} 相等时, 此时的 K_1 值即为最终确定的值。类似的, 调整 K_2 的值, 使得模型在无植被区域的计算流速与实测的无植被区域的流速 U_{bare} 的值相等时, 此时的 K_2 值即为最终确定的值。

6 计算结果及分析

采用前文提及的水槽试验实测资料对本文模型进行验证, 工况 B1 中各个横断面 ($x = 50 \text{ cm}$ 、 100 cm 、 150 cm 、 200 cm 、 250 cm 、 300 cm 、 400 cm 和 420 cm) 纵向流速的横向分布见图 2, 可以看出各个横断面内的计算值与实测值吻合较好。在植被区域内部的无量纲系数 K_1 值沿 x 方向逐渐增大, 而在无植被区域的无量纲系数 K_2 值沿 x 方向逐渐减小, 呈现出相反的趋势。并均在水流充分发展区域保持稳定不在变化。

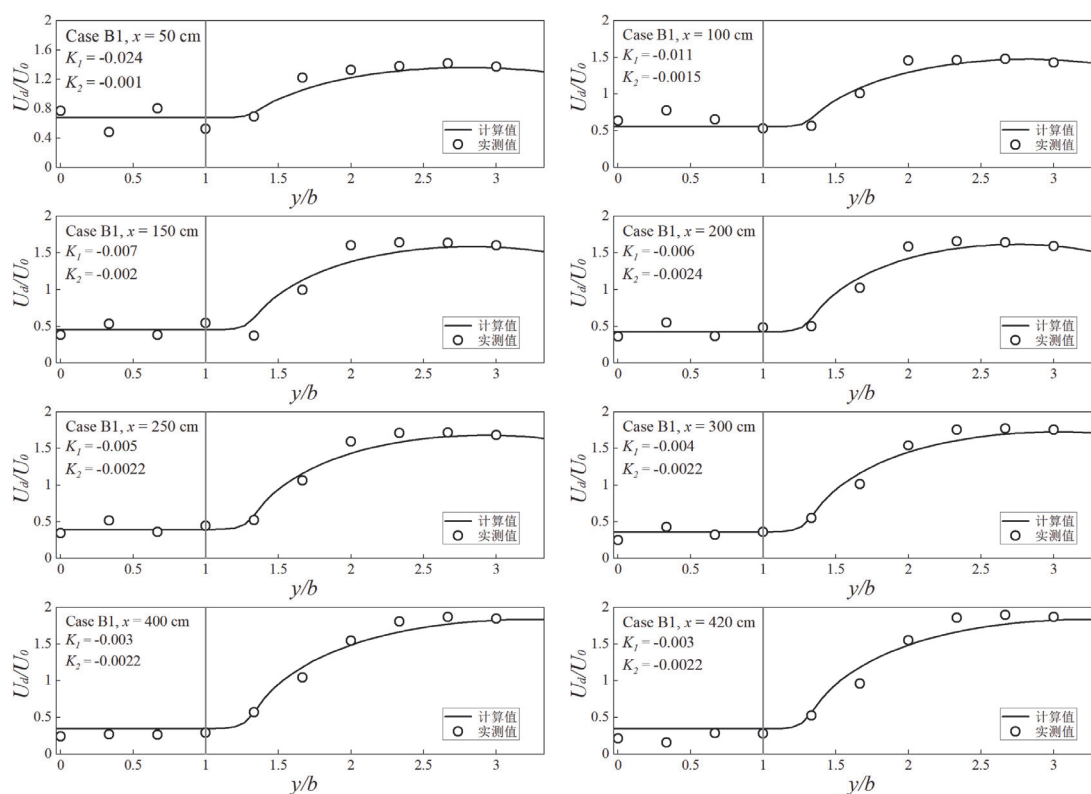


图2 工况 B1 各个横断面内模型计算流速与实测流速无量纲化处理后的横向分布

7 结论

在有植被群落的河道中, 给出了一个能够计算沿程流速横向分布的计算模型。将横断面划分为植被区域和无植被区域两个区域, 并分别给出了对应的解析解, 该解析解包含了在植被区域 (K_1) 和无植被区域 (K_2) 的两个无量纲系数。采用水槽试验实测资料对本文模型进行验证, 根据植被区域断面平均流速 (U_{veg}) 和无植被区域断面平均流速 (U_{bare}) 来确定 K_1 和 K_2 的值, 发现模型计算流速与实测流速吻合较好, 能够很好的对有植被群落水槽中的沿程流速横向分布进行计算。通过比较沿 x 方向各个横断面内的 K 值发现, 在植被区域内部的无量纲系数 K_1 沿 x 方向逐渐增大, 而在无植被区域的无量纲系数 K_2 沿 x 方向逐渐减小, 并在水流充分发展区域保持稳定不在变化。

致谢

本文是由四川大学创新火花库资助项目 (2018SCUH0020) 和 2018-其他-水利部 库区和坝下游重点河段航道治理措施研究所资助的。在此表示感谢。

参考文献

- 1 Sand-Jensen K, Pedersen ML. (2008). Streamlining of plant patches in streams. *Freshwater Biol.* 53 (4), 714–726. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2007.01928.x>
- 2 Cornacchia L, Van De Koppel J, Van Der Wal D, Wharton G, Puijalon S, Bouma TJ. (2018). Landscapes of facilitation: how self-organized patchiness of aquatic macrophytes promotes diversity in streams. *Ecology* 99 (4), 832–847. <https://doi.org/10.1002/ecy.2177>.
- 3 Widdows J, Pope ND, Brinsley MD. (2008). Effect of *Spartina anglica* stems on near-bed hydrodynamics, sediment erodability and morphological changes on an intertidal mudflat. *Marine Ecology Progress Series*, 362, 45-57. <https://doi.org/10.3354/meps07448>.
- 4 Malmon, DV, Dunne T, Reneau SL. (2002). Predicting the fate of sediment and pollutants in river floodplains. *Environmental Science & Technology*, 36(9), 2026-2032. <https://doi.org/10.1021/es010509>.
- 5 Bouma TJ, Duren LAV, Temmerman S, Claverie T, Blanco-Garcia A, Ysebaert T, Herman PMJ. (2007). Spatial flow and sedimentation patterns within patches of epibenthic structures: combining field, flume and modelling experiments. *Cont. Shelf Res.* 27 (8), 1020–1045. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2005.12.019>.
- 6 Gu J, Shan Y, Liu C, Liu X. (2019). Feedbacks of flow and bed morphology from a submerged dense vegetation patch without upstream sediment supply. *Environ. Fluid Mech.* 19 (2), 475–493. <https://doi.org/10.1007/s10652-018-9633-5>.
- 7 Goring and Nikora (2002). Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128:117-126. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:\(117\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:(117)).
- 8 Lightbody AF, Nepf H. (2006). Prediction of velocity profiles and longitudinal dispersion in salt marsh vegetation. *Limnology and Oceanography*, 51(1), 218-228. <https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.1.0218>.
- 9 Yang K, Cao S, Knight DW. (2007). Flow patterns in compound channels with vegetated floodplains. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(2), 148-159. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:2\(148\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:2(148))
- 10 Shan Y., Chao, L., Nepf, H. (2019). Comparison of drag and velocity in model mangrove forests with random and in-line tree distributions. *J. Hydrology*, 568: 735-746.. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.077>
- 11 Grace JB, Harrison JS. (1986). The biology of Canadian weeds. 73. *Typha latifolia* L., *Typha angustifolia* L. and *Typha x glauca* Godr. *Canadian Journal of Plant Science*. 66: 361-379.. <https://doi.org/10.4141/cjps86-051>
- 12 Coon WF, Bernard JM, Seischab FK. (2000). Effects of a cattail wetland on water quality of irondequoit creek near rochester, New York (No. 2000-4032). US Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/wri004032>.
- 13 Shiono K, Knight D W. Turbulent open channel flows with variable depth across the channel. *J Fluid Mech*, 1991, 222(1):617–646.
- 14 Knight DW, Omran M, Tang X. (2007). Modeling Depth-Averaged Velocity and Boundary Shear in Trapezoidal Channels with Secondary Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(1), 39-47. [https://doi.org/10.1016/\(asce\)0733-9429\(2017\)133:1\(39\)](https://doi.org/10.1016/(asce)0733-9429(2017)133:1(39)).

- 15 Huai W, Xu Z, Yang Z, Zeng Y. (2008). Two dimensional analytical solution for a partially vegetated compound channel flow. *Applied Mathematics and Mechanics*, 29(8), 1077–1084. <https://doi.org/10.1007/s10483-008-0811-y>.
- 16 Abril, J. B., & Knight, D. W. Stage-discharge prediction for rivers in flood applying a depth-averaged model. *Journal of Hydraulic Research*, 2004, 42(6), 616–629.
- 17 Tang, X., & Knight, D. W. Lateral Depth-Averaged Velocity Distributions and Bed Shear in Rectangular Compound Channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 134(9), 1337–1342.

An analytical model for the distribution of transverse velocity along the open channel with a model vegetation patch

YAN Chun-hao, SHAN Yu-qi, LIU Chao, LIU Xing-nian

1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065
2. Institute for Disaster Management and Reconstruction, Sichuan University, Chengdu 610065

Abstract: This paper proposes an analytical model for the distribution of transverse velocity along the open channel with a model vegetation patch. The governing equation was derived from the momentum equation and flow continuity equation and the drag force of vegetation was considered. To obtain the analytical solution of governing equation, two dimensionless coefficients K_1 and K_2 are introduced to represent the flow exchange in the vegetation region and non-vegetation region, respectively, in the same cross section. K_1 is determined by the average velocity of vegetation region. Similarly, K_2 is determined by that of non-vegetation region. A series of experiments were carried out in the open channel with a model vegetation patch and the distribution of transverse velocity along the channel were measured in detail. The experimental data are used to verify the analytical model. The measured values of each cross-section are in good agreement with the calculated values from the analytical model.

Key words: vegetation channel; distribution of transverse velocity; analytical model.

流量变化条件下宽级配河床推移质输沙率 试验研究

王奇¹, 单钰淇², 刘超^{1*}, 刘兴年¹

(1.四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;

2.四川大学 灾后重建与管理学院, 四川 成都 610065 Email: 599953159@qq.com)

摘要: 长江上游水库群蓄水后清水下泄, 水库下游河道将发生一系列变化和调整。本文开展流量大小交替变化的清水冲刷河床粗化试验, 探究水库下泄流量变化下宽级配河床的推移质输移特性。试验结果表明: 河床粗化层在大小流量交替作用下, 每阶段第一次极值流量是粗化层进一步冲刷粗化、破坏的主要驱动因素; 在不破坏粗化层的条件下, 更大的极值流量不一定产生更大的推移质输沙率, 河床粗化的速度变缓。

关键词: 粗化层; 推移质输沙率; 清水冲刷

1 引言

近年来, 长江上游一批大中型水库的修建, 深刻改变了水库下游河道的水沙特性, 对水库下游河道水沙运动、河道演变、内河航运等产生了重大影响¹。水库的蓄水运用除调节径流外, 还发挥了巨大的拦沙效益, 水库下游河道将在下泄清水的作用下发生长距离的冲刷、粗化和河道调整⁵。深入研究水库泄流变化对下游河道河床粗化过程的影响, 对流域水利、水运、水电工程的发展意义重大⁶。

关于清水冲刷河床粗化的研究, 主要包括河床粗化机理、粗化过程中推移质输沙率、粗化层破坏临界条件等。秦荣昱等⁷将河床粗化分为能够形成稳定抗冲粗化层的卵石夹沙粗化和只能形成沙波的沙质河床粗化; 陆永军和张华庆⁸研究了清水冲刷宽级配河床粗化机理, 将河床粗化分为平整床面粗化与沙波床面粗化。刘兴年和陈远信⁹在非均匀沙运动中引入暴露高度的概念, 推求泥沙起动概率、冲刷交换时间, 得到非均匀推移质输沙公式; 孙志林和孙志锋¹⁰基于随机模型, 推导出粗化过程输沙率随时间呈指数衰减变化的计算公式; Yang等¹¹的试验表明粗化过程中的输沙率先按指数递增, 到达峰值后, 再按指数衰减。王强¹²及王涛等¹³进行了流量逐级增大的清水冲刷粗化层研究, 认为只有床面切应力超过河床粗化层形成时的床面切应力的1.2倍, 粗化层才会破坏。

水库下游河道的冲刷粗化与水库泄流过程密切相关。长江上游某些电站(如, 向家坝)

属于日调节电站，一般在用电低谷时段蓄水，用电高峰时段放水发电，下泄流量随之同步变化¹⁴。水库泄流变化对河床的粗化作用与恒定泄流相比有所差异¹⁵。本文基于向家坝水电站的泄流过程设计概化水槽试验，开展清水冲刷河床粗化试验，探究水库泄流变化对河床推移质输沙率的影响。

2 试验概况

本文以长江上游向家坝水电站的下泄流量过程作为试验设计依据。分析发现向家坝站 2013—2018 年每日流量过程总是存在一个大流量时段与一个小流量时段，两时段的流量平均值定义为 Q_1 与 Q_2 。例如，2018 年 1 月 4 日向家坝下泄流量过程可划分为大流量时段 9:00 - 21:00（平均流量为 Q_1 ）与小流量时段 0:00—7:00（平均流量为 Q_2 ），如图 1 所示。 Q_1 与 Q_2 随上游来流变化而变化，考虑 2013—2018 年每年除汛期（7—10 月）外每日 Q_1 与 Q_2 ，得到 Q_1/Q_2 的比值范围为 1~2.3。试验采用流量条件为 $Q_1/Q_2=1.1$ （对应累积百分比为 30%），详细试验参数见表 1。

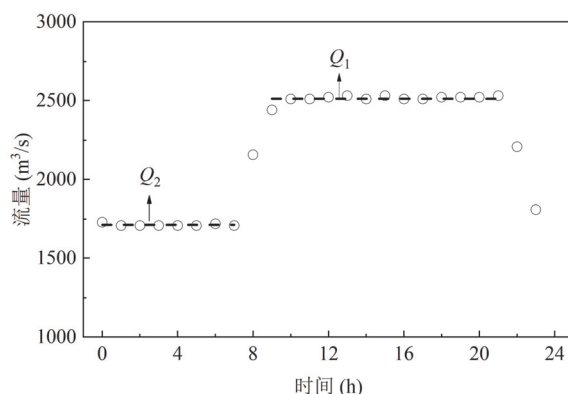


图 1 向家坝水电站 2018 年 1 月 4 日的流量过程

试验在长 37 m，宽 1 m 和高 0.6 m 的顺直水槽中开展。水槽上游为 7m 长的砾石过渡段，砾石粒径为 15-25mm，不会被试验最大水流冲刷粗化。水槽中段为 21m 长的试验段，其中前 12.3m 为玻璃观测段，方便测量试验数据和观察试验现象。过渡段与试验段的初始坡降均为 5‰。试验段尾部设置推移质输沙率自动测量系统，该系统可实时测量通过试验末端断面的推移质输沙率，采样时间间隔为 1 s。

试验沙采用粒径为 1~16 mm 的宽级配沙 ($d_{50}=4.3$ mm)，级配曲线如图 3 所示。通过以下步骤使试验河床平整、密实：首先将筛分好的试验沙混合均匀，按照 5‰的坡度铺设在试验段水槽中；然后关闭尾门，释放一个小流量（小于 10L/s）水流，让水槽蓄水至高水位（20cm）1 h；最后打开尾门缓慢排水，水排干后用刮沙板将床面刮平。正式试验前，

表 1 试验参数

工况	Q_1 (L/s)	Q_2 (L/s)	H (cm)	S (‰)	U (m/s)	τ (Pa)	τ/τ_0	$\langle Q_s \rangle \pm SD$ (g/m/s)
1	55	-	8.1	6.25	0.677	4.29	1.00	1.2 ± 1.3
2	-	50	7.7	6.25	0.646	4.11	0.96	0.1 ± 0.1
3	55	-	8.1	6.25	0.679	4.27	1.00	0.1 ± 0.1
4	-	55	8.1	6.25	0.677	4.28	1.00	0.2 ± 0.1
5	60.5	-	8.6	6.25	0.703	4.50	1.05	0.5 ± 0.2
6	-	55	8.1	6.25	0.682	4.26	1.00	0.1 ± 0.1
7	60.5	-	8.6	6.28	0.702	4.53	1.06	0.5 ± 0.2
8	-	60	8.7	6.28	0.694	4.54	1.06	0.3 ± 0.1
9	66	-	9.2	6.28	0.719	4.78	1.12	0.9 ± 0.4
10	-	60	8.6	6.35	0.699	4.56	1.07	0.2 ± 0.1
11	66	-	9.1	6.35	0.725	4.80	1.12	0.4 ± 0.2
12	-	65	9.1	6.35	0.713	4.80	1.12	0.3 ± 0.1
13	71.5	-	9.7	6.4	0.738	5.10	1.19	0.9 ± 0.3
14	-	65	9.1	6.4	0.714	4.83	1.13	0.2 ± 0.1
15	71.5	-	9.6	6.4	0.743	5.07	1.19	0.5 ± 0.2

注: Q_1 、 Q_2 分别为试验中大流量与小流量; H 为水槽平均水深; S 为水槽床面坡度; U 为水槽平均流速; τ 为床面切应力; τ_0 为工况 1 河床粗化时对应的床面切应力; $\langle Q_s \rangle$ 为每个工况的平均推移质输沙率; SD 为平均推移质输沙率不确定变化范围。

需先释放一个小流量并关闭尾门让水槽蓄水至较高水位,接着调节进水阀,同时打开尾水闸门,保证水流流速较缓、流态平稳。达到设定流量时,水槽水流为均匀流,同时启动推移质自动测量系统。调节水槽末端的尾门可调控水位,但不会影响推移质输沙率的测量结果。床沙覆盖层足够厚,河床在试验流量条件下不暴露,没有调控水槽侵蚀基准面。试验过程中,在距离槽首 17 m、19 m、21 m、23 m 和 25 m 的过流断面测量水深。由于水位波动,共测三次水深,每隔 1~2 h 测一次,取三次所测水深的平均值为对应流量下的水深 H 。

根据水槽条件,试验最小流量 Q_2 设定为 50L/s,首先在铺好试验沙的河床上开展工况 1 ($Q_1=55$ L/s) 直至形成粗化层;然后开展工况 2 ($Q_2=50$ L/s) 和工况 3 ($Q_1=55$ L/s);最后依次增大流量 Q_1 、 Q_2 开展工况 4-15,其中工况 4-7、8-11、12-15 的流量 Q_1 、 Q_2 分别为工况 1-3 对应 Q_1 、 Q_2 的 1.1 倍、1.2 倍、1.3 倍。在初始流量 $Q_1 = 55$ L/s 冲刷下,河床开始粗化,推移质输沙率迅速增大至峰值,然后逐渐减小。经过 24 h 左右,推移质输沙率稳定在 (0.2 ± 0.1) g/ (m/s),与测量系统精度相同,认为此时河床已经完全粗化。除了工况 1,其余工况的冲刷时间设定为 400~600 min (约 7~10 h)。

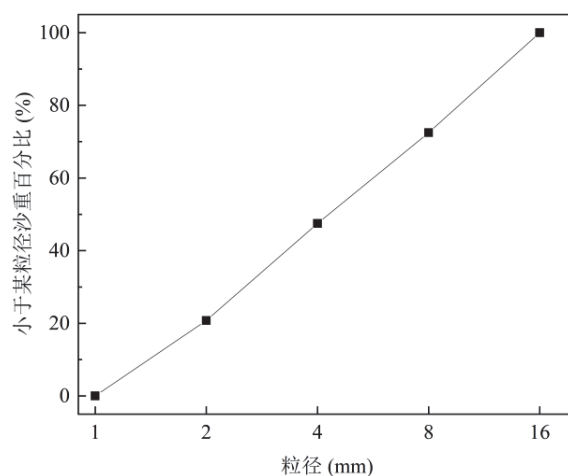


图2 初始床沙级配

3 流量变化下推移质输沙率

图3表示第1组推移质输沙率随流量和时间的变化规律。第1组试验分为4个阶段，对应工况依次为工况1-3（阶段1）、4-7（阶段2）、8-11（阶段3）、12-15（阶段4），图中按竖虚线划分。对各阶段而言， Q_1 是 Q_2 的1.1倍。可以看出，工况2-3的推移质输沙率（0.1-0.2 g/m/s）小于测量系统精度（0.2 g/m/s），表明工况1形成的粗化层保持相对稳定，当前流量小于粗化流量时，输沙率很小。随着阶段2-4流量的增加，推移质输沙率有所增加，当流量从 Q_2 变为 Q_1 时，推移质输沙率 Q_s 显著增大。比如，工况7中 Q_1 （60.5 L/s）对应 $\langle Q_s \rangle$ （0.5 g/m/s）为工况6中 Q_2 （55 L/s）对应 $\langle Q_s \rangle$ （0.1 g/m/s）的5倍。流量更大的水流挟沙能力更强，所以相对于 Q_2 ， Q_1 总是能起动并输送更多的泥沙。但值得注意的是，试验最大推移质输沙率出现在工况9（ $Q_1=66$ L/s），峰值为1.8 g/m/s，平均值 $\langle Q_s \rangle$ 为 0.9 ± 0.4 g/m/s；而工况13（对应最大流量71.5 L/s）的峰值输沙率为1.6 g/m/s，平均输沙率 $\langle Q_s \rangle$ 为 0.9 ± 0.4 g/m/s。显然，工况13的流量比工况9的流量更大，但两者输沙率平均值相当，甚至后者输沙率峰值略大于前者，随着流量增加，输沙率呈现轻微的衰减趋势。其原因可能是河床受到各阶段流量的持续冲刷，床面可动床沙逐渐减少，在不破坏河床粗化层的条件下，即使增大流量，输沙率也不会一直增长。

我们可以从图4更直观地看出， Q_1 对应的 $\langle Q_s \rangle$ 远远大于 Q_2 对应的 $\langle Q_s \rangle$ ，说明 Q_1 是河床继续冲刷粗化的控制性因素。但是两次相同的 Q_1 对应的 $\langle Q_s \rangle$ 不同。我们统计了2-4阶段试验第二次 Q_1 与第一次 Q_1 对应的 $\langle Q_s \rangle$ 比值（图5），发现该比值均 ≤ 1 ，即第一次 Q_1 对应的 $\langle Q_s \rangle$ 总是大于或等于第二次 Q_1 对应的 $\langle Q_s \rangle$ 。比如， $Q_1=66$ L/s时， $\langle Q_s \rangle=0.9$ 和 0.4 g/m/s（工况9、11），两者相差一倍以上。结合前文关于最大推移质输沙率的论述可知，每阶段第一次 Q_1 具有更明显的河床粗化作用；在不破坏粗化层的条件下，随着 Q_1 的增大，河床

继续粗化的速度有变缓的趋势。

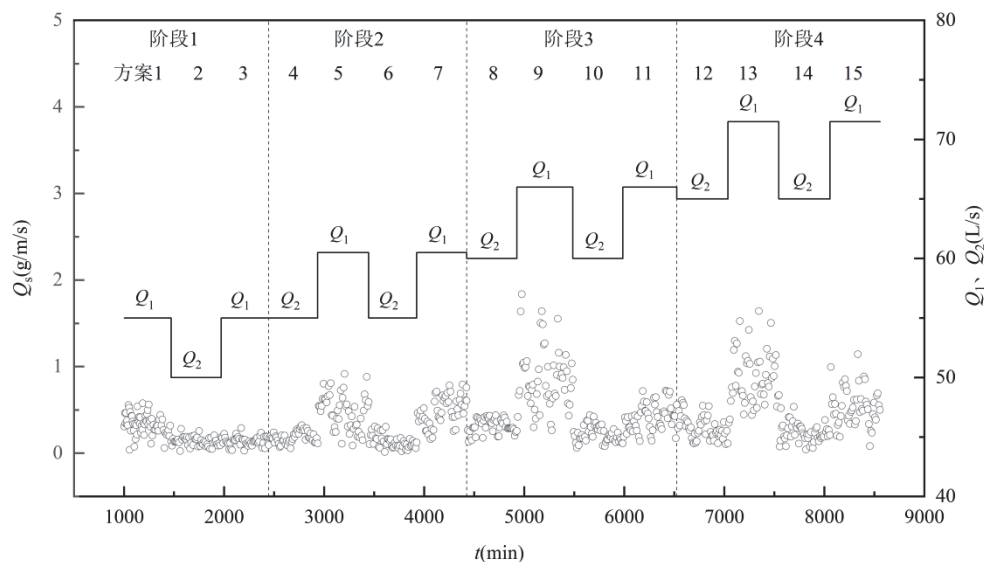


图3 第1组试验中推移质输沙率 Q_s 与流量 Q_1 、 Q_2 随时间 t 的变化曲线

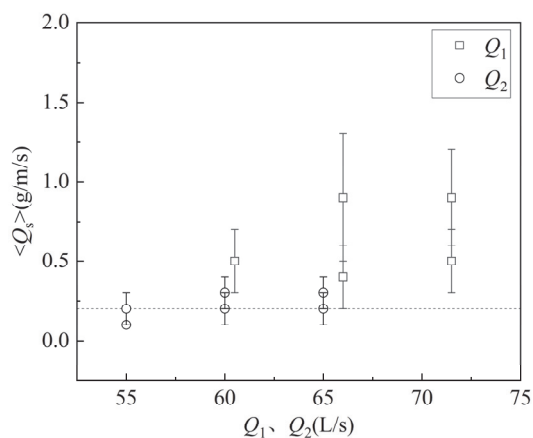


图4 Q_1 与 Q_2 对应的平均推移质输沙率 $\langle Q_s \rangle$ (虚线为仪器测量精度 0.2 g/m/s)

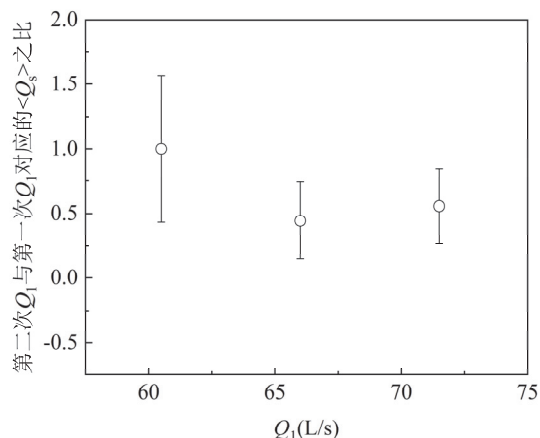


图5 阶段2-4中(工况4-15和19-30)第二次 Q_1 与第一次 Q_1 对应的 $\langle Q_s \rangle$ 之比

4 结论与展望

通过开展流量交替变化的清水冲刷河床粗化试验, 得出以下结论: 河床在初始流量作用下迅速粗化, 粗化层受到变化流量的持续冲刷, 每阶段第一次极值流量 Q_1 产生的推移质输沙率总是大于小流量或第二次极值流量产生的推移质输沙率, 是河床表层进一步粗化、甚至破坏的主要驱动因子; 在不破坏粗化层的条件下, 更大的极值流量 Q_1 不一定产生更大

的推移质输沙率,河床粗化的速度有变缓的趋势。限于试验条件,今后可在本文试验的基础上,进一步增大 Q_1/Q_2 比值开展系列水槽试验,综合考虑床面切应力 τ 、河床地形、粗化层床沙级配等因素的变化,深入研究河床粗化过程中的推移质输沙特性及粗化后床面结构的失稳破坏特征。

参考文献

- 1 李福建,黄胜,谢玉妹,等.顺直型展宽航槽沿程水沙运动规律试验研究[J].工程科学与技术,2018,50(04):96-103.
- 2 Liu Chao, Shan Yuqi, Liu Xingnian, et al. Method for assessing discharge in meandering compound channels[J]. Proceedings of ICE- Water Management, 2016, 169(1): 17-29.
- 3 Shan Yuqi, Liu Xingnian, Yang Kejun, et al. Analytical model for stage-discharge estimation in meandering compound channels with submerged flexible vegetation[J]. Advances in Water Resources, 2017, 108, 170-183.
- 4 Shan Yuqi, Huang Sheng, Liu Chao, et al. Prediction of the depth-averaged two-dimensional flow direction along a meander in compound channels[J], Journal of Hydrology, 2018, 565, 318-330.
- 5 李文萍,曹叔尤,刘兴年.河床冲刷粗化特征与粗化程度 [J].四川大学学报(工程科学版),2009,41(5):24—29.
- 6 杨文俊,孟震,朱帅.清水冲刷下河床粗化试验研究评述[J].泥沙研究,2019,44(03):73-80.
- 7 秦荣昱,胡春宏,梁志勇.沙质河床清水冲刷粗化的研究[J].水利水电技术,1997(06):8-13.
- 8 陆永军,张华庆.清水冲刷宽级配河床粗化机理试验研究[J].泥沙研究,1994(01):68-77.
- 9 刘兴年,陈远信.非均匀推移质输沙率[J].成都科技大学学报,1987(02):29-36.
- 10 孙志林,孙志锋.粗化过程中的推移质输沙率[J].浙江大学学报(理学版),2000(04):449-453.
- 11 Yang F, Liu X, Cao S, et al. Bed load transport rates during scouring and armoring processes[J]. Journal of Mountain Science,2010,7(3):215—225.
- 12 王强.山区河流河床粗化层稳定性研究[D].四川大学,2017.
- 13 王涛,刘兴年,黄尔,等.卵石河床清水冲刷粗化层破坏临界条件试验研究[J].四川大学学报(工程科学版),2008(04):36-40.
- 14 李秋圆.向家坝电站运行对长江泸州河段通航条件的影响研究[D].重庆交通大学,2016.
- 15 郭志学,黄尔,刘兴年,等.电站下游非恒定流清水冲刷水沙运动特性研究[J].中国科技论文在线,2010,5(07):549-556+562.
- 16 Liu Chao, Shan Yuqi, Sun Wei, et al. An open channel with an emergent vegetation patch: Predicting the longitudinal profiles of velocities based on exponential decay[J]. Journal of Hydrology,2020,582(C). 29

Experimental study on bed-load transport rate of bed material with wide size-distribution under discharges variation

WANG Qi ¹, SHAN Yu-qi ², LIU Chao ^{1*}, LIU Xing-nian ¹

(1. State Key Lab. of Hydraulic and Mountain River Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;

2. Institute for Disaster Management and Reconstruction, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China.

Email: 599953159@qq.com)

Abstract: Flume experiments of bed armoring by clear water (no upstream sediment supply) were carried out to study the influence of discharge variation on bed load transport rate of bed material with wide size-distribution. The results showed that the maximum discharge at the first time was the control factor for the formation and destruction of armoring layer for armored riverbed with alternating discharges' scouring; Under the condition of not destroying the armoring layer, the higher extreme discharge didn't necessarily lead to the higher bed load transport rate, and the process of bed armoring slowed down.

Key words: Armoring layer; Bed-load sediment transport; Clear-water scouring

规则波环境中网衣水动力特性研究¹

苗玉基^{1,2,4}, 丁军¹, 田超^{1,4}, 郭晓宇³

(1. 中国船舶科学研究中心, 无锡 214082; 2. 陆军工程大学 野战工程学院, 南京 210007; 3. 上海交通大学 船舶与建筑工程学院, 上海, 200240; 4. 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江), 广东 湛江 524000. Emai: miaoyuji@cssrc.com.cn)

摘要: 网衣作为渔业平台的重要组成部分, 其水动力特性的计算分析对渔业平台设计及安全使用至关重要。网衣一般由网线纵横编制而成, 往往具有大量网目, 本研究采用平面模型对网衣进行等效处理, 建立了网衣水动力载荷计算模型, 采用该数值计算模型对不同密度的网衣在规则波作用下的水动力载荷进行了计算, 并采用水槽试验对数值计算模型进行了验证。继而采用该数值模型计算了不同周期、波高的规则波作用下网衣受到的水动力载荷。计算结果表明: 网衣密度是网衣遭受水动力载荷最为重要的影响因素之一; 网衣受到的水动力载荷随着波浪周期或波高的增大而增大。

关键词: 网衣; 养殖工程; 阻力; 数值模拟; 模型试验

1 引言

网衣是渔业养殖装备的重要组成部分, 是发挥渔业养殖装备使用功能的重要部件, 因此需要对其在波浪中的受力特性进行详细研究¹。近年来粮食危机日益严峻, 这更加迫使人开发利用海洋空间, 渔业养殖装备已经从内河、沿海向深远海发展, 半潜式深海渔场“海洋渔场1号”和“深蓝1号”已投产使用。

对于由金属或高分子材料编织而成的网衣, 通常采用数值计算或水池试验对其水动力特性进行研究。用于计算网衣流体载荷的主要数值计算方法有集中质量法^[2-3]、莫里森公式^[4]、多孔介质法^[5-6]及平面模型等^[7-9]。Løland 在其博士论文中详细介绍了 Screen 模型在网箱水流载荷计算上的应用方法, 1993 年其采用该方法计算了多个相邻网箱受到的水流载荷^[7]。Kristiansen 和 Faltinsen⁹改进了 Screen 模型, 提高了其计算精度。Zhan^[8]和 Lader^[10]分别采用试验对不同的网衣进行了研究, 探讨了水流或波浪参数对网衣水动力载荷的影响, Don^[11]对不同材料的网衣进行了水槽试验, 分析了网衣受力对环境参数的敏感度。网衣试

¹基金项目: 工信部高性能船舶科研资助项目(工业和信息化部[2019]357号文); 中国船舶科学研究中心青年创新基金项目(J1872); 江苏省青年基金项目(351510008K0708LA00)

验研究^[11]表明网衣受到的水平力要明显大于竖向力，阻力明显大于惯性力。

为了研究网衣在波浪作用下的水动力特性，采用平面模型对不同密实度的网衣进行了数值计算，同时采用水槽试验对数值计算模型进行了验证，对比分析了线性波和斯托克斯二阶波理论得到的网衣水动力载荷。继而采用该数值模型计算了不同波浪参数下网衣受到的水动力载荷，分析了密实度、波高及波浪周期对网衣受力的影响。

2 基本原理

2.1 规则波简介

假定流体是无黏、不可压缩流体，流场的运动是无旋的，波幅相对于波长和水深是一个小量，取入射波的波陡为小参数 ε ，即 $\varepsilon = a_w / \lambda \ll 1$ ，其中 a_w 为入射波波幅， λ 为波长。从而可应用摄动理论将流体速度势 ϕ 和自由面位移 ζ 展开为 ε 的幂级数^[12]：

$$\phi(X, Y, Z, t; \varepsilon) = \varepsilon \phi^{(1)}(X, Y, Z; t) + \varepsilon^2 \phi^{(2)}(X, Y, Z; t) + \dots \quad (1)$$

$$\zeta(X, Y, t; \varepsilon) = \varepsilon \zeta^{(1)}(X, Y; t) + \varepsilon^2 \zeta^{(2)}(X, Y; t) + \dots \quad (2)$$

式中， $\phi^{(j)}$ 为速度势 j 阶近似， $\zeta^{(j)}$ 为自由面位移 j 阶近似，幂级数式 (1) 和式 (2) 是在 $\varepsilon=0$ 附近展开的， ε 越小，这种近似就越精确。

当摄动展开保留到一阶量时，则可得到最简单的规则波即 Airy 波，其速度势可表示为：

$$\phi(X, Y, Z, t) = -\frac{iga_w \cosh[k(Z+d)]}{\omega \cosh(kd)} e^{i[-\omega t + k(X \cos \chi + Y \sin \chi) + \alpha]} \quad (3)$$

式中， g 为重力加速度， ω 为波浪圆频率， k 为波数， d 为水深， (X, Y, Z) 为整体坐标系下坐标， χ 表示浪向角， α 为初始相位角， i 为虚数单位， t 为时间，通过速度势可以得到流体质点速度和加速度。

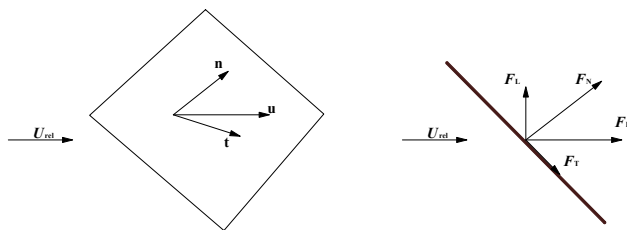
对于有限水深条件下，特别是浅水条件下，速度势摄动展开保留到 2 阶近似更加精确，此时可采用二阶斯托克斯波，其对应的速度势需要考虑二阶小量：

$$\begin{aligned} \phi(X, Y, Z, t) &= \phi^{(1)} + \phi^{(2)} \\ &= -\frac{iga_w \cosh[k(Z+d)]}{\omega \cosh(kd)} e^{i(-\omega t + kX' + \alpha)} - i\frac{3}{8}\omega a_w^2 \frac{\cosh[2k(Z+d)]}{\sinh^4(kd)} e^{i(-2\omega t + 2kX' + 2\alpha)} \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 网衣载荷计算

网衣由网线编制而成，有成百上千、几十万甚至几百万的网孔。网衣的特征参数采用密实度描述，密实度由网线直径 d_w 和网线间中心距 l_w 通过式 (5) 计算得到。本文采用平面模型对网衣进行简化处理，在计算中不考虑网线的粗糙度。该模型中网衣的受力可分为阻力和升力，网衣受力示意图如图 1 所示，图中 $\mathbf{n}$ 为网衣法向量， $\mathbf{t}$ 为网衣切向量。

$$Sn = \frac{2d_w}{l_w} - \left(\frac{d_w}{l_w} \right)^2 \quad (5)$$



(a) 网衣受力三维示意图 (b) 网衣受力二维示意图

图1 网衣受力示意图

由图1可知,网衣受到的作用力可分解为沿流体运动方向的阻力 F_D 和垂直于流体运动方向的升力 F_L ,也可以分解为沿网衣法向的法向力 F_N 和沿网衣切向的切向力 F_T ,这两种分解方式均能完整地描述网衣的受力情况。网衣受到的阻力 F_D 和升力 F_L :

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A |U_{rel}|^2 n_D \quad (6)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L A |U_{rel}|^2 n_L \quad (7)$$

式中, C_D 为阻力系数, C_L 为升力系数,上述两个系数由网衣密度、雷诺数及网衣与流体质点速度间的夹角共同决定, $C_D = C_D(Sn, Rn, \theta)$, $C_L = C_L(Sn, Rn, \theta)$ ⁹; A 为网衣等效面积, U_{rel} 为网衣和流体质点相对运动速度, n_D 和 n_L 为阻力和升力的方向向量,其中阻力平行于流向,升力垂直于流向,方向向量可由下式确定:

$$n_D = \frac{U_{rel}}{|U_{rel}|} \quad (8)$$

$$n_L = \frac{(U_{rel} \times n_{en}) \times U_{rel}}{|(U_{rel} \times n_{en}) \times U_{rel}|} \quad (9)$$

式中, n_{en} 为网衣单元的法向量,在数值计算中需求解每一时间步下网衣与流体质点间的相对速度,以及网衣法向量与流体质点间的夹角,进而求解法向力和切向力方向向量。

3 计算结果和讨论

为了验证平面模型的计算结果,采用该方法对网线直径 $d_w=3\text{mm}$, 网线间中心距 $l_w=23\text{mm}$ ($Sn=0.24$) 的网衣进行了数值计算,并与水槽试验结果进行了对比(图2),数值计算中分别采用线性波和斯托克斯二阶波计算了波面升高、流体质点速度和加速度,用于

计算网衣受到的流体的载荷。由图 2 可知,数值计算结果与试验结果变化趋势一致,水平力幅值基本一致。图 3 对比了不同波浪周期下数值计算得到的水平力峰值及谷值与试验结果,由图可知随着波浪周期的增大二阶波能更好地预报网衣受到的波浪水平力峰值,但谷值则是线性波的预报结果更接近试验值,采用线性波理论计算得到的网衣水平力峰值误差为 14%~23%,二阶波理论得到网衣水平力峰值误差为 7%~19%。这是因为二阶波波峰更陡、波谷更平缓,致使其计算得到的波浪水平力峰值变大、谷值变小。

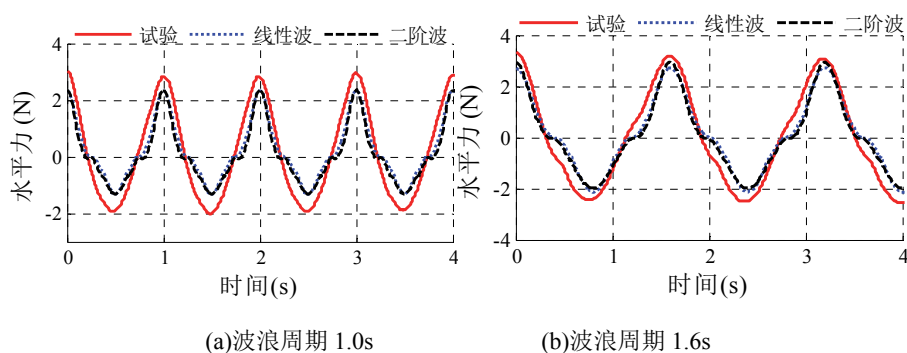


图 2 波浪作用下网衣受到的水平力随时间变化曲线 (波高 0.09m, $Sn=0.24$)

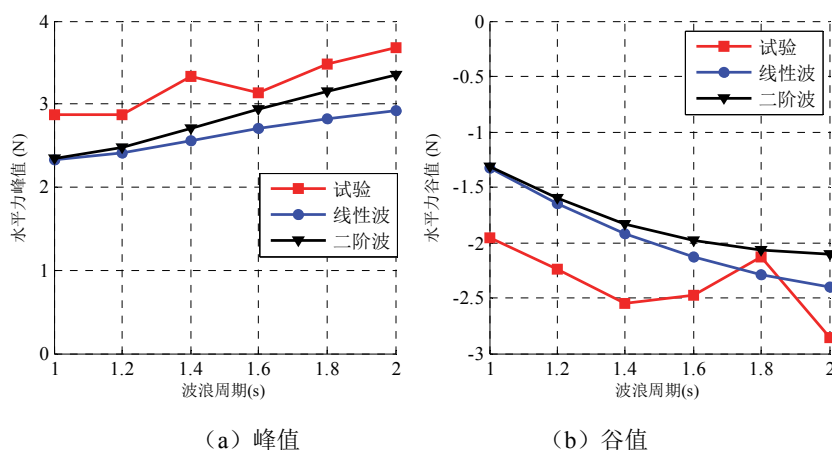


图 3 波高为 0.09m 时不同波浪理论计算的网衣水平力峰谷值对比 ($Sn=0.24$)

图 4 对比了不同密实度的网衣受到的水平力时程曲线,图中展示的三种网衣的网线直径和网目尺寸分别为: $d_w=3\text{mm}$, $l_w=16\text{mm}(Sn=0.34)$; $d_w=3\text{mm}$, $l_w=24\text{mm}(Sn=0.24)$; $d_w=5\text{mm}$, $l_w=76\text{mm}(Sn=0.13)$ 。由图可知在相同的波浪作用下,网衣受到的水平力随着网衣密实度增大而增大。图 5 对比了相同波浪条件下不同密实度网衣受到的波浪水平力峰值和谷值,由图可知在波浪条件一致时密实度越大,网衣受到的波浪水平力峰值越大、谷值越小;密实度相同的网衣,其受到的波浪水平力随着波浪周期的增大而增大。

图 6 对比了不同波高条件网衣受到的水平力峰值和谷值,由图可知网衣受到的水平力随着波高的增大而增大,在波高较小时网衣受到的水平力峰值及谷值与波浪周期呈正相关,

但波高超过 0.15m 后该正相关现象仅在长周期下呈现。这是由于当波高为 0.15m 和 0.20m 时，周期为 1.0s 时的波陡分别为 0.098 和 0.130，已经临近极限波陡，该波浪作用下，网衣水平力非线性更为明显，这时该周期下的网衣水平力相对较大。此外，由图可知网衣受到的水平力与波高的平方正相关，这是由于波浪能量与波高平方正相关，波浪能量越大致使网衣受到的波浪载荷也越大。

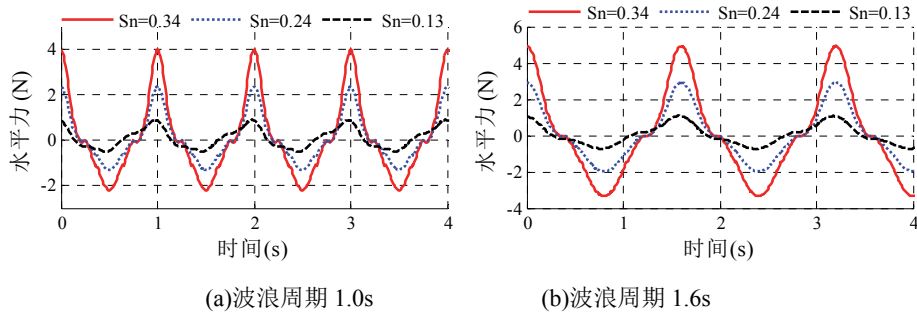


图 4 波高为 0.09m 时不同密度网衣的水平力时程曲线

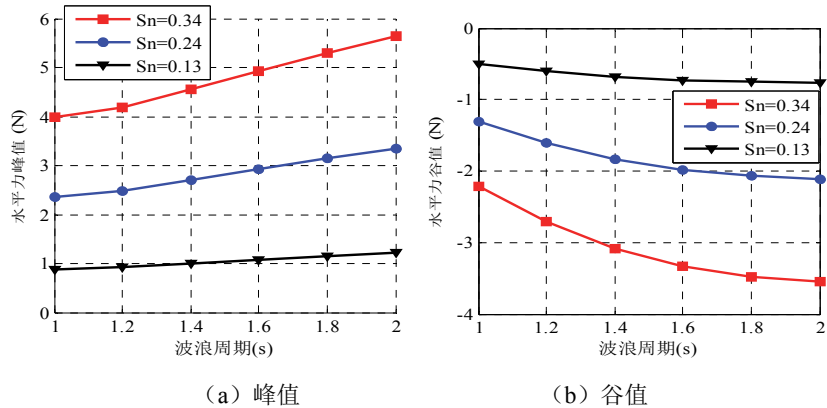


图 5 波高为 0.09m 时不同密度网衣的水平力峰谷值对比

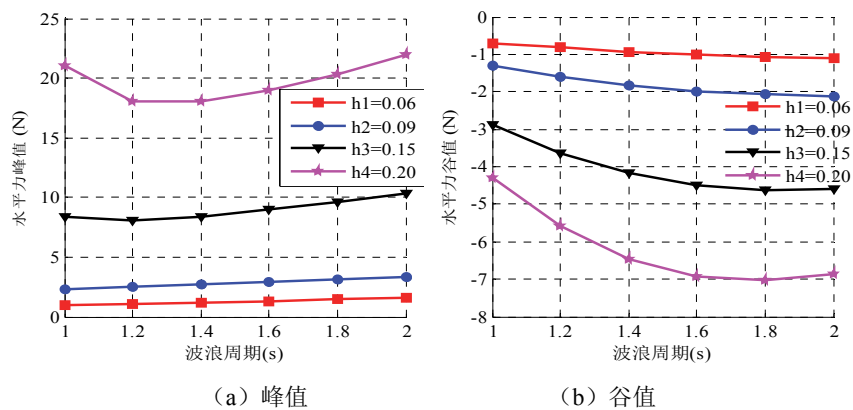


图 6 不同波高下网衣的水平力峰谷值对比 ($Sn=0.24$)

4 结论

采用平面模型对网衣进行等效处理,建立了网衣水动力载荷计算模型,该数值计算模型简化了网衣的建模,提高了计算效率。通过网衣的波浪水槽试验验证了该数值模型,并采用该数值计算模型对不同密实度的网衣在规则波作用下的水动力载荷进行了计算,对比分析了波浪参数、网衣密实度、波浪模型等对数值计算结果的影响。通过分析计算结果,得到如下主要结论:斯托克斯二阶波能够较好地预报网衣受到的水平力峰值,但估值误差会增大;网衣密实度是网衣遭受水动力载荷最为重要的影响因素之一;网衣水平力随波浪周期增大而增大,但波陡较大时网衣可在较小波浪周期下遭受更大的波浪载荷;网衣水平力随着波浪能量增大而增大。

参考文献

- 1 Klebert P, Pål Lader, Gansel L, et al. Hydrodynamic interactions on net panel and aquaculture fish cages: A review[J]. Ocean Engineering, 2013, 58(4): 260-274.
- 2 Li Y C, Zhao Y P, Gui F K, et al. Numerical analysis of the effects of sinker weight on the hydrodynamics behaviour of gravity cage net in uniform flow[J]. Journal of Hydrodynamics. Series B, 2006, 18(3-suppl-S): 77-83.
- 3 桂福坤, 陈天华, 赵云鹏, 等. 固定方式对桩柱式围网网片波浪力学特性影响研究[J]. 大连理工大学学报, 2017, 57(3): 285-292.
- 4 Cifuentes C, Kim M H. Hydrodynamic response of a cage system under waves and currents using a Morison-force model[J]. Ocean Engineering, 2017, 141:283-294.
- 5 赵云鹏, 毕春伟, 董国海, 等. 平面网衣周围流场的三维数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2011, 26(5): 606-613.
- 6 Chen H, Christensen E D. Investigations on the porous resistance coefficients for fishing net structures [J]. Journal of Fluids & Structures, 2016, 65:76-107.
- 7 Løland G. Current forces on, and water flow through and around, floating fish farms [J]. Aquaculture International, 1993, 1(1):72-89.
- 8 Zhan J M, Jia X P, Li Y S, et al. Analytical and experimental investigation of drag on nets of fish cages [J]. Aquacultural Engineering, 2006, 35(1):91-101.
- 9 Kristiansen T, Faltinsen O M. Modelling of current loads on aquaculture net cages [J]. Journal of Fluids and Structures, 2012, 34(Complete):218-235.
- 10 Lader P, Jensen A, Sveen J K, et al. Experimental investigation of wave forces on net structures [J]. Applied Ocean Research, 2007, 29(3): 112-127.
- 11 Dong G H, Tang M F, Xu T J, et al. Experimental analysis of the hydrodynamic force on the net panel in wave[J]. Applied Ocean Research, 2019, 87: 233-246.

12 莫兰.海洋工程水动力学[M].北京:国防工业出版社,2012.

Research of hydrodynamic properties on the net structure under regular wave

MIAO Yu-ji^{1,2,4}, DING Jun¹, TIAN Chao^{1,4}, GUO Xiao-yu³

(1. China Ship Scientific Research Center, Wuxi, 214082; 2. Field Engineering College, PLA Army Engineering University, Nanjing, 210007; 3. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 4. Southern Marine Science and engineering Guangdong Laboratory (Zhanjiang), Guangdong Zhanjiang 524000. Email: miaoyuji@cssrc.com.cn)

Abstract: The net is the main structural element of the fish cage, and the analysis of hydrodynamic properties of it is so important for the design and safety of offshore fish platform. The net is made of lines, and it always consist of a lot of net meshes. The screen model is used to simplify the net structure in this paper, and the numerical calculation model is built by Fortran codes. The wave hydrodynamic responses of net with different solidity are calculated under regular waves by using above numerical calculation model. Besides, the model tests were carried out in the wave flume, and the numerical results were verified by the measured data. Then the wave forces of net structure were calculated under different wave conditions of different wave periods and wave heights by using this numerical model. The comparison results show that the net solidity is one of main factors on the wave forces of net structures; and the horizontal force of the net structure increase with the increasing of wave period and wave height, but the horizontal force will become bigger at the big wave steepness.

Key words: net structure; aquacultural engineering; drag force; numerical simulation; model test.

汶川震后“8.20”暴雨山洪灾害特征分析

邓志远, 王以逵, 闫旭峰, 王协康*

(四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都, 610065)

摘要:2008年汶川大地震对汶川县造成极为严重的地表破坏,产生了大量松散堆积体。近年来,受强降雨作用,汶川县频繁发生山洪水沙灾害。本文从 Strahler 面积高程分析法出发,利用数字高程模型(DEM)分析流域地貌特征,结合2019年“8.20”暴雨山洪灾害区调查,采用 KW-GIUH 水文模型分析寿溪河、渔子溪等流域洪水过程,拟探讨山洪灾害易发区与流域地貌、洪水特征的关系,为山洪水沙灾害防治研究提供依据。

关键词:汶川县;地貌特征;8.20暴雨;山洪灾害

1 引言

汶川县地处中国西部山区,境内沟谷纵横,海拔较高,属于山体滑坡和山洪泥石流灾害多发区。汶川地震后,由于强震作用,汶川县境内地表破碎更为剧烈,再加上地处山区,坡度较大,震后产生了大量的松散堆积体,这成为山洪灾害的一大物源,为以后的山洪灾害埋下隐患。崔鹏等^[1]认为这些泥石流沟会在今后较长一段时间内处于活跃期,活跃期将维持20~30年。泥沙与暴雨的共同作用会加剧沟床局部淤堵调整,水沙耦合致灾常造成重大人员伤亡和财产损失^[2]。2019年8月19日2时开始汶川县发生持续降雨,至22日14时基本结束,暴雨引发多地洪涝、地质等自然灾害。经过调查,在三江、水磨、耿达、绵虬、卧龙、银杏等6个乡镇发生人员死亡和失联,给汶川带来巨大人员和财产损失(图1)。地表特征可以反应地表的发育情况,基于DEM数据可以分析流域地表特征,结合模拟的洪水过程线,可以分析不同地貌特征下的洪水特征。

基金项目:四川省科技计划资助(2019YJ0145);国家重点研发计划(2017YFC1502504);国家自然科学基金重点项目(51639007)。

作者简介:邓志远(1996-),男,硕士研究生,研究方向:水力学及河流动力学。

*通信作者:王协康, E-mail: wangxiakang@scu.edu.cn



图1 “8.20”暴雨灾害

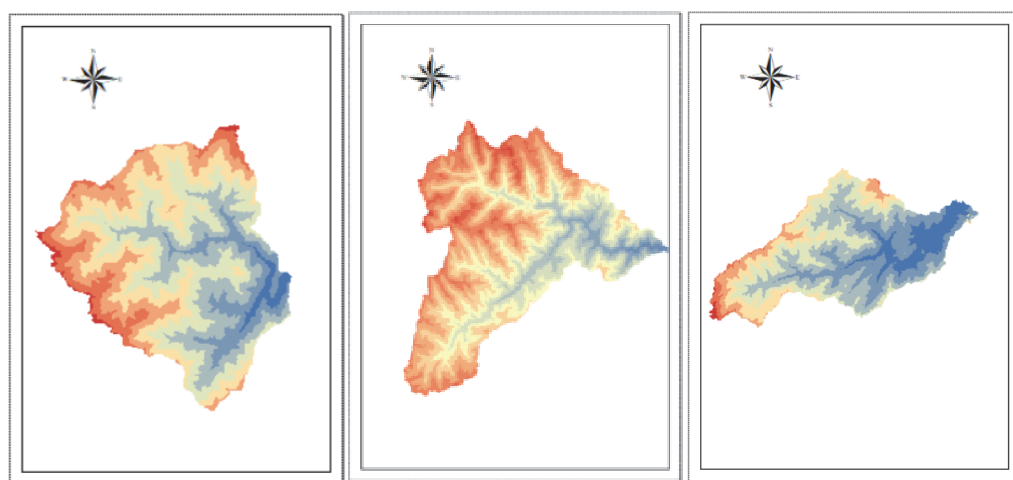
2 地貌特征

19世纪末，美国地质学家W.M. Davis提出侵蚀循环学说，认为地貌的发育过程是内外营力和时间的共同函数。根据函数变量的不同，地貌发育阶段可以分为幼年期、壮年期和老年期，这是对地貌发育的定量分析。1952年Strahler^[3]以此为基础，提出高程分析法，开始了地貌的定量化分析阶段。其原理是以集水盆地的相对高度比(h/H)为纵轴，相对面积比(a/A)为横轴，可以作出该集水盆地的面积高程曲线，曲线下方与坐标轴所围面积为面积高程积分(Hypsometric integral, HI)。HI值大于0.60时，为幼年期，这时流域侵蚀强烈，峡谷在此时发育。HI值小于0.60且大于0.35时，处于壮年期，这是流域侵蚀堆积最为旺盛的时期。HI小于0.35时，为老年期，流域侵蚀减弱，地表较为破碎，有大量堆积体，易发生灾害。中国学者也在流域地貌演变方面做了大量的工作，如艾南山^[4]在面积高程积分的基础上提出了侵蚀流域系统的地貌信息熵。下面以汶川县为例，分析境内草坡、渔子溪，寿溪流域的地貌发育阶段。

3 面积高程积分

基于流域的DEM数据，利用ArcGis10.6软件对高程进行分级处理，可以得到不同高程的区域统计图（图2）。

利用其分区统计功能，可以对不同分区的垂直投影面积进行统计，得到草坡河（表1）、寿溪（表2）、渔子溪（表3）的面积高程曲线统计表。表中面积为不同高程区间之间的面积统计，根据表中数据，可以绘制面积高程曲线图，求HI值。



(a) 草坡河

(b) 渔子溪

(c) 寿溪

图2 DEM 分级图

表1 草坡河流域面积高程曲线统计

编号	高程 /m	面积 /km ²	a/A	h/H
1	1135	0	1	0
2	1600	11.24	0.98	0.11
3	2100	47.23	0.89	0.23
4	2600	99.31	0.70	0.36
5	3100	128.47	0.46	0.48
6	3600	117.04	0.24	0.61
7	4100	81.06	0.08	0.73
8	4600	36.85	0.01	0.85
9	5202	6.65	0	1

表2 寿溪流域面积高程曲线统计

编号	高程 /m	面积 /km ²	a/A	h/H
1	804	0	1	0
2	1300	63.42	0.89	0.12
3	1800	128.52	0.68	0.24
4	2300	157.54	0.42	0.36
5	2800	123.10	0.21	0.48
6	3300	78.79	0.08	0.60
7	3800	37.14	0.02	0.72
8	4300	10.13	0.01	0.84
9	4951	2.96	0	1

由表1和表2中数据，可以作出面积-高程积分曲线。经过计算，草坡河流域 $HI=0.47$ 。属于地貌发育中的壮年期。渔子溪 $HI=0.52$ 。属于地貌发育中的壮年期。寿溪流域 $HI=0.34$ 。属于地貌发育中的老年期。

4 KW-GIUN 模型

运动波—地貌瞬时单位历线 (kinematic-wave-based geomorphologic instantaneous unit hydrograph, KW-GIUH)模型以运动波理论为基础,考虑集水地区地文特性和降雨强度对径流运行时间的影响,将子流域视作v形坡地简化计算,雨滴运动经历坡地流与渠流阶段,以解析方式,直接求解径流运行时间^[5]。其优点是结构简单,程序计算快,可适用于水文记录较少之地区。

在ArcGis10.6中利用DEM数据求得模型输入所需的地形因子,包括河网分级,流域坡度,河网坡度等。降雨信息因缺乏“8.20”暴雨资料,采用1964年“7.19”暴雨资料,并依据总雨量采用同倍比法得到“8.20”暴雨的降雨过程。模拟得到渔子溪与寿溪流域的降雨过程与累计降雨量图(图5)。

表3 渔子溪流域面积高程曲线统计

编号	高程 /m	面积 /km ²	a/A	h/H
1	829	0	1	0
2	1400	11.41	0.99	0.11
3	1900	47.72	0.97	0.21
4	2400	134.86	0.89	0.30
5	2900	228.45	0.76	0.40
6	3400	284.28	0.59	0.49
7	3900	347.12	0.39	0.59
8	4400	348.73	0.19	0.68
9	4900	267.40	0.04	0.78
10	5400	62.84	0.01	0.88
11	6052	4.08	0	1

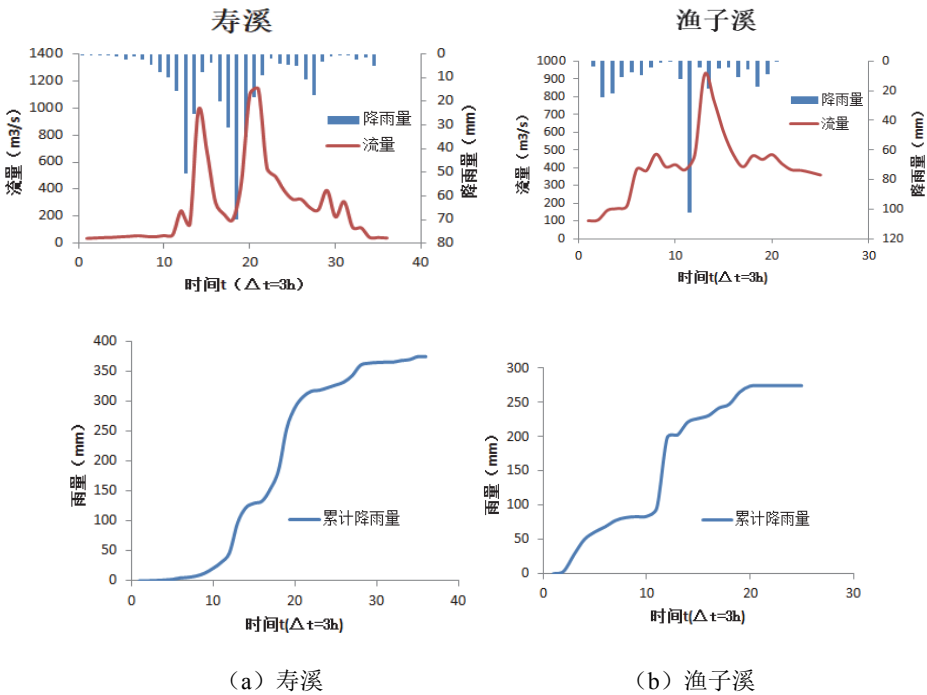


图 5 不同流域洪水过程线与累计雨量

5 结论与讨论

经查阅汶川县境内地质灾害资料,在ArcGis中绘制汶川县灾害点分布图(图6)。据此分布图,依次计算草坡河、渔子溪、寿溪3个流域内的灾害点密度分别为 $0.023 \text{ 点}/\text{km}^2$ 、 $0.019 \text{ 点}/\text{km}^2$ 、 $0.075 \text{ 点}/\text{km}^2$ 。点绘流域HI值和灾害点密度关系(图7)。

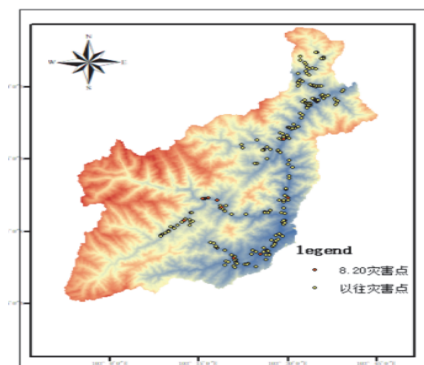


图6 汶川县灾害点分布与密度

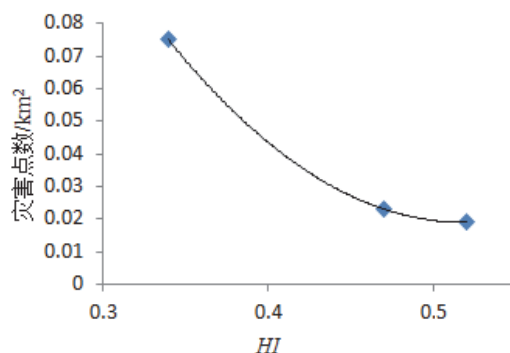


图7 汶川县灾害点分布与密度

可以发现,HI值减小,即地貌发育阶段进入老年期,地表更为破碎,有大量松散堆积物,理论上此地区更易发生滑坡山洪等灾害。分析汶川县内3个流域的灾害点密度与HI值的关系,发现符合这一规律,说明从地貌特征,即地貌发育阶段判别山洪灾害的易发点是可行的,后续可对地貌特征进行更多细致研究,如土壤类别、坡度等,以精准判别。

分析两个流域累计雨量与洪峰时刻的关系。寿溪流域内,洪峰与累计雨量曲线的拐点相差约15h,渔子溪洪峰与累计雨量拐点相差约21h,两者差距较大。寿溪流域降雨时段较为集中,雨水快速产汇流,形成较大洪峰,更容易引发山洪相关灾害。从灾害点看,寿溪流域灾害点明显偏多,地区更容易受山洪灾害威胁。依据洪水过程线与累计雨量图,寿溪洪峰一流量为 $984 \text{ m}^3/\text{s}$,这期间最大3h雨量为50.4mm,洪峰出现时刻较最大雨量出现点延后3h,降雨增加率对应流量增长的速率,经计算其降雨陡增强度为 16.8 mm/h ,流量陡涨率为 $280 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{h})$,洪峰二降雨陡增强度为 23.3 mm/h ,流量陡涨率为 $219.7 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{h})$,洪峰时刻较最大降雨量点延后3h。渔子溪洪峰流量为 $923 \text{ m}^3/\text{s}$,最大3h降雨量为102.2mm,降雨陡增强度为 34.0 mm/h ,流量陡涨率为 $150 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{h})$ 。分析两个流域的3次洪峰中降雨陡增率和流量陡涨率关系发现,3个洪峰都相对最大降雨延后大概3h,但是陡增陡涨率的关系不同,寿溪流域降雨陡增率小于渔子溪流域,但其流量陡涨率反而更大,其陡涨陡落的更加明显,这样也导致寿溪流域更容易成灾。根据前述灾害点密度,也可证明这一点。

参考文献

- 1 崔鹏,韦方强,何思明,等.5·12 汶川地震诱发的山地灾害及减灾措施[J].山地学报,2008(03):280-282.
- 2 王协康,刘兴年,周家文.泥沙补给突变下的山洪灾害研究构想和成果展望[J].工程科学与技术,2019,51(04):1-10.
- 3 Strahler AN. HYPSONETRIC (AREA-ALTITUDE) ANALYSIS OF EROSIONAL TOPOGRAPHY[J]. Geological Society of America Bulletin, 1952, 63(11): 1117-1142.
- 4 艾南山.侵蚀流域系统的信息熵[J].水土保持学报,1987(02):1-8.
- 5 Lee K T, Chang C H. Incorporating subsurface-flow mechanism into geomorphology-based IUH modeling[J]. Journal of Hydrology, 2005, 311(1-4): 91-105.

Analysis on the characteristics of "8.20" rainstorm flash flood disaster after Wenchuan earthquake

DENG Zhi-yuan, WANG Yi-kui, YAN Xu-feng, WANG Xie-kang^{*}

State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Sichuan University, Chengdu, 610065

Abstract: The 2008 Wenchuan earthquake caused extremely serious surface damage in Wenchuan County, resulting in a large number of loose deposits. In recent years, due to heavy rainfall, Wenchuan County frequently occurred flash flood and sand disasters. Based on Strahler area elevation analysis method, digital elevation model (DEM) is used to analyze the geomorphological characteristics of watersheds. Combined with the investigation of "8.20" rainstorm flood disaster area in 2019, KW-GIUH hydrological model is used to analyze the flood process of Shouxi River, Yuzi River and other watersheds. The relationship between the flood disaster prone area and the landform and flood characteristics of watersheds is proposed to provide the basis for the study of flash flood and sediment disaster prevention and control.

Key words: Wenchuan County; Geomorphological Characteristics; 8.20 Rainstorm; Flood Disaster

土壤含水量变化下白沙河流域山洪灾害 预警分析

晋恩泽¹, 叶晨², 孙桐¹, 王协康^{1*}

(1. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都, 610065;

2. 集美大学 港口与环境工程学院, 厦门, 361021)

摘要: 近年来, 由于气候变化, 山洪灾害变得更加的频发和严重, 已经威胁到公共安全和社会发展, 山洪灾害的高效预警变得尤为重要。本文使用较高分辨率 DEM 影像, 基于 ArcGIS 水文分析工具及暴雨洪水管理模型 (SWMM) 对白沙河流域山洪灾害进行分析。基于实测暴雨资料对 SWMM 模型进行率定和验证, 表明该模型对山区小流域洪水模拟具有一定的可靠性。以百年一遇设计降雨为例, 模拟了流域出口杨柳坪水位过程, 并分析了不同初始土壤含水量条件的水位及水位上涨速率的变化规律, 初步构建了基于土壤含水量动态监测的小流域山洪灾害实时预警模型, 可为该小流域山洪灾害实时预警提供支持。

关键词: 山洪灾害; 白沙河小流域; 初始土壤含水量; SWMM 模型; 水位预警

1 概述

白沙河流域地理位置界于 103°33'59"—103°43'18"E, 31°01'58"—31°22'10"N 之间。整个流域呈 NS 向狭长带状, 流域内水能资源丰富, 降雨充沛但在年内分布不均, 降雨是该流域山洪发生的主要诱发因素^[1]。因此山洪灾害的防治及预警指标的计算就显得尤为重要。本文以白沙河流域为研究对象, 探究降雨前流域土壤含水量变化下河段水位变化规律, 并在此基础上确定水位预警指标。

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC1502504); 国家自然科学基金项目 (41771543); 四川省科技计划资助 (2019YJ0145)。

*通信作者: 王协康, E-mail: wangxiakang@scu.edu.cn

2 水文模型构建

2.1 流域汇水单元划分

基于 DEM 影像, 通过 ArcGIS 水文分析工具, 在以分水岭为边界的基础上进行适当的人工调整, 将流域划分为大小不同的汇水单元 (图 1)。后通过暴雨洪水管理模型 SWMM 完成各个子流域下垫面参数的补充^[2], SWMM 中子流域划分及渠道见图 2。



图 1 白沙河流域面源汇水单元



图 2 SWMM 中白沙河流域子流域及沟渠分布

2.2 下渗模型

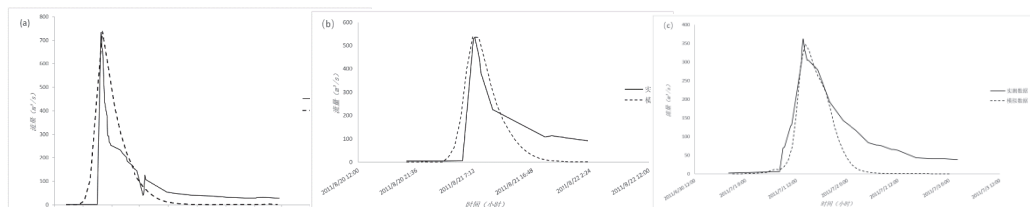
模拟过程中下渗采用格林安普特渗透模型^[3], 具体表示为:

$$f_t = K \left[\frac{1 + (\varphi - \theta_i) S_h}{F_t} \right] \quad (1)$$

式中: f_t 为下渗率, K 为饱和水力传导系数, $\varphi - \theta_i$ 为土壤水分亏缺量, S_h 为土壤湿润锋, F_t 为时间 t 内的累积损失。

2.3 模型较准及校正

选取杨柳坪水文站 2009 年 7 月 16 日和 2011 年 8 月 19 日发生的洪水过程作为校准的实测径流过程, 并以 2011 年 6 月 30 日的另一场洪水过程对模型进行验证 (图 3)。



(a) 2009 年 7 月 16 日校准洪水水文 (b) 2011 年 8 月 19 日校准洪水水文 (c) 2011 年 6 月 30 日验证洪水水文图

图 3 校准和验证过程的观测及模拟水文

由图 3 可知, SWMM 模型计算的洪峰流量与实测值较为接近, 且洪水过程趋势拟合较好, 说明该模型能够较为准确的模拟流域洪水过程。

3 初始土壤含水量变化下杨柳坪河段水位过程及变化规律研究

初始土壤含水量通过影响下渗率进而对地表产流的形成产生影响。根据式 (1), 土壤含水量是影响降雨径流的一个重要因素。已知壤土的土壤孔隙度 ϕ 为 0.463, 则初始土壤含水量 $\theta \in [0, \phi]$ 。

参考《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》和《四川省暴雨统计参数图集》, 选用皮尔逊 III 型曲线来推求设计暴雨。考虑最不利情况下, 即百年一遇的设计暴雨下流域土壤含水量变化时杨柳坪河段的水位过程及水位变化速率过程 (图 4 和图 5)。

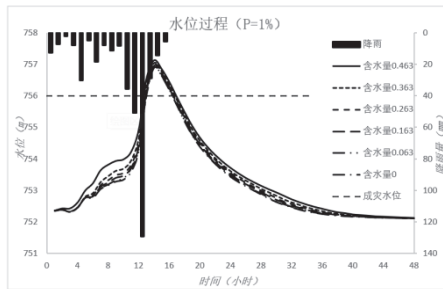


图 4 杨柳坪河段水位过程

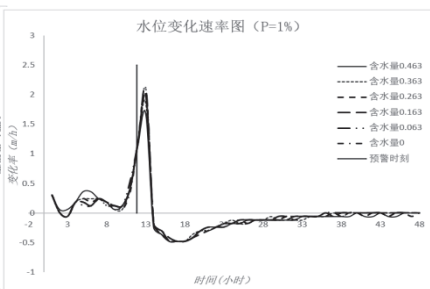


图 5 杨柳坪河段水位变化速率

由图 4 可知, 初始土壤含水量不同, 杨柳坪河段的水位过程相似。水位过程受土壤含水量影响最大的时段是 0~12h, 土壤含水量越高, 水位峰值越大。

由图 5 可知, 杨柳坪河段水位变化过程受初始土壤含水量影响较大的时段共两个, 即 4~7h 及 12~13.5h, 依次命名为时段 I 和时段 II。两个时段水位变化速率在初始土壤含水量变化下呈现相反的趋势。

时段 I 土壤含水量越高, 下渗越小, 地表径流量越大, 水位上升速率越大, 此时段水位上升速率随初始土壤含水量的增加而增加。时段 II 土壤含水量越高, 水位上升速率反而越小。分析应是在降雨量不断增大的情况下, 地表径流量愈来愈大, 进而在上游诸多河段产生水流漫上边坡的现象, 边坡坡度变缓, 过水断面面积变大, 所以纵使水位依然在上升, 但是上升速率相对于在渠道中较小。故由于汇流的累计效应, 在下游杨柳坪处河段的水位变化也呈现相似的规律。

为验证上文推测, 采取流域上游的关门山沟上游支流做研究。以百年一遇的设计降雨作为降雨过程, 设置土壤含水量分别为 0 (干燥) 和 0.463 (饱和), 作出河段断面图、水位过程图及水位变化速率图见图 6 (忽略河段高程)。

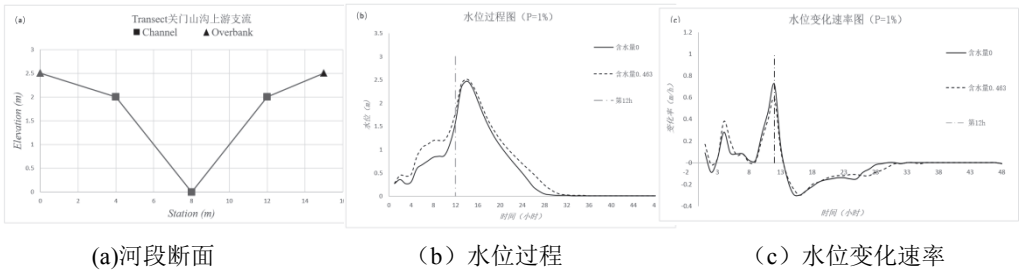


图 6. 关门山沟上游支流

由图可知，干燥土壤水位上升速率明显高于饱和土壤的时段集中在第 12h。对应水位图可知，正是在第 12h 里发生饱和土壤情况水流率先漫上边坡的现象。由此可说明杨柳坪河段不同初始土壤含水量情况下水位变化速率现象。

4 基于洪水水位上涨变化的山洪预警模型

依据山区小流域暴雨山洪水位上涨变化的水位预警法（王协康等人，专利申请号 2019101605606，专利申请公开号 No. CN109961613A，<http://epub.sipo.gov.cn/fullTran.action>）。基于白沙河流域杨柳坪河道洪水水位陡涨陡落特点^[4]，并参考《山洪灾害分析评价技术要求》对预警时长等要求以及白沙河流域成灾水位为 756m，确定杨柳坪河道水位陡涨阶段陡涨率预警阈值为 1.0m/h。并估计洪水水位到达成灾水位的时间 t

表 1 基于洪水水位上涨变化的预警指标（Z _i 为水位陡涨阶段初始水位）								
初始土壤含水量	准备转移时刻 T1(h)	T1 时刻水位 (m)	立即转移时刻 T2(h)	T2 时刻水位 (m)	T2 时刻水位变化率 (m/h)	成灾时刻 T3 (h)	预计转移时间 (h)	实际转移时间 (h)
0.463	11.9	754.84	12	754.94	1.16	12.72	1	0.72
0.363	11.85	754.52	12.1	754.78	1.48	12.83	1	0.73
0.263	11.85	754.38	12.17	754.71	1.62	12.88	1	0.71
0.163	11.88	754.29	12.37	754.94	1.71	12.93	1	0.56
0.063	11.88	754.19	12.38	754.85	1.73	12.97	1.05	0.59
0	11.88	754.14	12.38	754.8	1.72	13	1.08	0.62

表 2 基于洪水水位上涨变化的预警指标 (Z_i 为水位陡涨阶段现时水位)

初始土壤含水量	准备转移时刻 T1 (h)	T1 时刻水位(m)	立即转移时刻 T2 (h)	T2 时刻水位(m)	T2 时刻水位变化率 (m/h)	成灾时刻 T3 (h)	预计转移时间 (h)	实际转移时间 (h)
0.463	11.9	754.84	11.98	754.92	1.12	12.72	0.97	0.74
0.363	11.85	754.52	12.05	754.71	1.33	12.83	0.97	0.78
0.263	11.85	754.38	12.08	754.61	1.41	12.88	0.99	0.8
0.163	11.88	754.29	12.1	754.51	1.49	12.93	1	0.83
0.063	11.88	754.19	12.13	754.45	1.58	12.97	0.98	0.84
0	11.88	754.14	12.15	754.42	1.63	13	0.97	0.85

由表 1、表 2 对比可知, 采取初始水位预测成灾时刻并确定立即转移时刻存在较大误差, 尤其在流域初始土壤含水量较小的情况下。由表 1 的土壤含水量为 0.063 和 0 的情况下可以看到, 在到达水位陡涨阶段后的 30min 内, 预测距离到达成灾时刻仍大于 1h, 理论上是不需要发出立即转移信号, 但实际的转移时间已经接近 30min, 这是十分危险的。

5 结论

本文以杨柳坪河段为目标河段, 通过改变白沙河流域初始土壤含水量, 分析百年一遇降雨下目标河段水位变化过程及规律, 并以此作为参考进行山洪预警, 主要成果如下:

(1) 经实测资料率定后的 SWMM 模型能够较为准确地模拟山区小流域暴雨山洪的洪水过程, 且可查看流域中任意河道的水位、流量及下渗等过程, 具有一定的实用性。

(2) 流域初始土壤含水量不同, 水位过程相似。受初始土壤含水量影响较大的时段主要出现在 0-12h, 且土壤含水量越高, 水位峰值越大。

(3) 在降雨量较大时, 初始土壤含水量较高的情况下, 会出现水流率先漫上边坡的现象, 导致其水位上涨速率小于同时刻含水量较小的土壤。

(4) 基于洪水水位上涨变化的山洪预警法在应用于山区小流域时, 在水位陡涨阶段, 若水位上涨率持续上升, 采用水位陡涨阶段的现时水位参与计算预测水位成灾时刻并确定立即转移时刻较为准确。

(5) 初始土壤含水量对水位变化速率过程以及山洪水位预警法影响较大, 有必要在流域范围内实时监测土壤含水量, 便于更加准确的进行山洪预警, 进一步保障公共安全。

参考文献

- 1 李华威, 万庆. 小流域山洪灾害危险性分析之降雨指标选取的初步研究[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(03): 425-435.

- 2 龙凤华.暴雨管理模型 SWMM 应用于湿润的平原圩区排涝模型率定[J].建筑工程技术与设计,2015,22:1277-1278.
- 3Van Den Putte,An.;Govers, Gerard.;et al. Estimating the parameters of the Green-Ampt infiltration equation from rainfall simulation data: Why simpler is better.(Report) .[J].Journal of Hydrology, Jan 7, 2013, Vol.476, p.332(13).
- 4 崔伟财.TOPMODEL 模型在白沙河流域洪水预报中的应用研究[J].中国水运,2019, 9:167-169.

Study on early warning of flash flood disaster in Baisha River Small Watershed under the change of soil moisture

JIN En-ze¹, YE Chen², SUN Tong¹, WANG Xie-kang^{1*}

1.State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Sichuan University, Chengdu, 610065;

2.Port and Environmental Engineering college, Jimei University, Xiamen, 361021

Email: wangxielang@scu.edu.cn

Abstract: Climate change has caused mountain flood disasters to become more frequent and severe in recent years, which has threatened public security and social development. Therefore, efficient early warning of mountain flood disasters has become particularly important. Based on Arc GIS hydrological analysis tools and Storm Water Management Model (SWMM), this paper uses higher resolution DEM images to analyze the Baisha River Basin. After the SWMM model is calibrated and verified by the measured rainstorm data, it is shown that the model has an effective simulation effect on mountain areas. The kind of design rainfall that happens only once every 100 years was used to simulate the water level process curve and water level change rate process line of the Yangliuping section of the river, to explore the changes of water level and water level rise rate under different initial soil moisture in the watershed. A real-time early warning model of mountain flood disasters based on dynamic monitoring of soil moisture was developed to improve the accuracy of early warning.

Key words: mountain flood disaster; Baisha River watershed; initial soil moisture; SWMM model; water level warning.

岷江支流白沙河流域暴雨洪水模拟研究

张桎豪¹, 许泽星², 程凯², 王协康^{2*}

1.四川省成都水文水资源勘测局, 温江, 611130

2.四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都, 610065

摘要: 汶川“5·12”地震严重破坏了流域下垫面结构, 改变了流域洪水汇集过程。近年来, 白沙河流域的洪水量和洪灾事件显著增加。基于 DEM 影像和土壤特性等资料, 采用 GIS 技术推求流域水文参数, 将 SWAT 模型和 KW-GIUH 模型应用到白沙河流域, 对该流域历史洪水进行日径流模拟和场次洪水模拟, 分析评价 SWAT 模型和 KW-GIUH 模型在两个时间尺度上的模拟效果, 探讨了 SWAT 模型和 KW-GIUH 模型在西南山区暴雨洪水预报预警上的适用性和局限性, 为水文模型在类似区域的应用提供依据。

关键词: 白沙河流域; 洪水模拟; SWAT; KW-GIUH; 水文模型

1 引言

我国是一个山地丘陵居多的国家, 地形地貌复杂, 尤其近年来极端天气增多, 山洪灾害频繁发生^[1-2]。因山洪灾害成因机理的复杂性, 山洪的形成和演化过程的准确模拟仍处于技术探索阶段。尤其在山洪灾害预报预警技术上, 难以满足当前山洪灾害防御工作的实际需求。寻求能适宜山区流域的水文模型是山洪灾害防治的重要目标之一, 因此许多水文模型被应用于我国各山区流域, 并取得了一定成果。如罗睿^[3]应用 SWAT 模型对黄河中游三川河流域的径流过程进行了模拟, 且模拟效果理想; 穆艾塔尔·赛地等^[4]将 HEC-HMS 模型应用于乌鲁木齐山区流域, 各场次洪水模拟结果的不确定性系数在 0.67~0.87。白沙河流域为典型的西南山区小流域, 流域内山高坡陡, 谷窄沟深, 历史上曾多次暴发山洪灾害。尤其在“5·12”汶川特大地震发生后, 产生大量松散堆积体的同时破坏了原来地质环境的稳定性, 使得流域洪水发生的临界雨量明显降低, 洪水量和发生频率显著增加。2009 年 7 月 16 日至 17 日, 白沙河上游突发特大暴雨, 虹口乡雨量达到 220 mm, 引发坡体塌方和泥石流灾害, 附近公路和房屋毁坏严重, 河水高度浑浊, 严重影响成都市自来水供应; 2010 年 8 月 18 至 19 日, 汶川、都江堰地区遭遇大面积强降雨, 白沙河发生特大洪水, 流域河口杨柳坪水文站洪峰流量达到 2010 m³/s, 继而引发映秀镇、龙池镇、虹口镇大规模滑坡和泥

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1502504); 国家自然科学基金项目(41771543); 四川省科技计划资助(2019YJ0145)。

*通信作者: 王协康, E-mail: wangxiakang@scu.edu.cn

石流灾害,虹口乡道路垮塌,交通中断。本研究结合 GIS 技术推求流域水文参数,将 SWAT 模型和 KW-GIUH 模型应用到白沙河流域,分别对该流域不同年份进行日径流模拟和场次洪水模拟,分析评价 SWAT 模型和 KW-GIUH 模型在两个时间尺度上的模拟效果,探讨并总结 SWAT 模型和 KW-GIUH 模型在西南山区暴雨洪水预报预警上的适用性和局限性,为模型在类似区域的应用研究提供参考。

2 研究区概况

白沙河发源于都江堰虹口乡光山南麓,为岷江上游左岸的一级支流。流域地处 $103^{\circ}33'59''$ — $103^{\circ}43'18''$ E, $31^{\circ}01'58''$ — $31^{\circ}22'10''$ N,海拔 740~4600 m,相对高差 3860 m,流域面积约 364 km^2 。整个流域呈南北向狭长带状,地势北高南低,河道两岸支沟边坡陡峻,河床及沟床比降大,白沙河主流全长约 49.3 km,河道平均比降约 4.7%。全年气候温和,雨量丰沛,湿度大,年均降雨约为 1400~2000 mm,但降雨在时间上分布不均,5—9 月降雨量占全年的 80%,降雨是该流域山洪发生的主要诱发因素。流域内分布有 2 个雨量站和一个水文站,流域概况如图 1 所示。

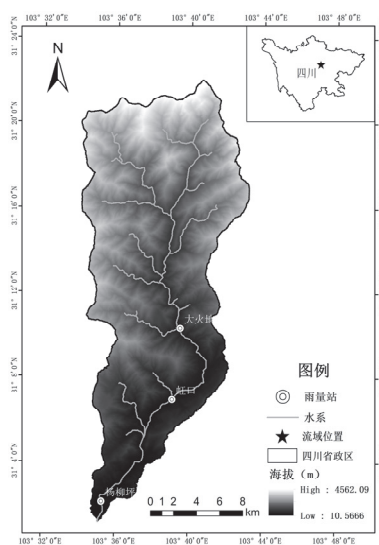


图 1 白沙河流域概况

3 模型构建

3.1 模型介绍

SWAT(Soil & Water Assessment Tool)模型是基于物理过程的长时间序列流域分布式水文模型,将研究区域分为若干个子流域,然后按不同土地利用方式和土壤类型在每个子流

域内进一步划分水文响应单元(Hydrologic Response Unit, HRU), 再在每一个水文响应单元上采用传统概念性模型来推求净雨, 并进行汇流演算, 最终求得出口断面流量^[5]。

KW-GIUH(Kinematic-wave-based geomorphologic instantaneous unit hydrograph)模型是一个基于地貌瞬时单位线理论的半分布式水文模型。模型源于 Rodriguez-Iturbe 和 Valdes^[6]于 1979 年提出的地貌瞬时单位线理论, 由李光敦等^[7]将运动波理论应用于径流时间的计算, 构建了现今的 KW-GIUH 模型。模型计算时仅需从数字高程模型中提取研究区域的地貌信息即可进行汇流计算, 不必过多依赖实测水文数据, 使其在缺资料地区具有较高的适用性。

3.2 参数率定

模型建立后需要对模型参数进行敏感性分析, 选定对模型模拟结果影响较大的参数进行校准。在径流模拟中影响 SWAT 模型产汇流过程的参数较多, 本文采用 SWAT-CUP 软件的 SUFI2 (Sequential Uncertainty Fitting) 算法进行敏感性分析并对选定参数进行校准。KW-GIUH 模型的敏感性参数较少, 仅需对坡地与河槽两个糙率系数进行率定。两模型的参数率定结果列于表 1。

表 1 参数敏感性分析及率定结果

模型名称	参数代码	参数含义	参数值域	最终取值
SWAT 模型	Cn2	SCS 径流曲线数	35~98	42.486
	Alpha_Bf	基流 α 系数	0~1	0.950
	Gw_Delay	地下水滞后系数	0~500	2.007
	Esco	土壤蒸发补偿系数	0~1	0.862
	Gw_Revap	地下水再蒸发系数	0.02~0.2	0.108
	Gwqmn	浅层地下水径流系数	0~5000	0.451
	Revapmn	浅层地下水再蒸发系数	0~500	368.850
	Ch_K2	主河道水力传导率	0.01~500	47.815
KW-GIUH 模型	n_0	坡地糙度系数	0~1	0.6
	n_c	河床糙度系数	0~0.5	0.08

4 结果与分析

白沙河流域采用上述方法确定模型参数后, 进行率定期与检验期的径流模拟。其中 SWAT 日降雨径流模拟选取 2009—2011 年为模型率定期, 选取 2012 年为模型检验期; KW-GIUH 小时径流模拟采用 2010—2011 年间的两场暴雨洪水数据对模型的参数进行率定, 选取 2012 年的 1 场暴雨洪水资料进行验证, 同时选取相关系数、纳什效率系数、洪峰流量误差对模型模拟精度进行评定。

4.1 日尺度模拟结果

日尺度径流模拟采用 SWAT 模型进行模拟，其率定期和验证期的模拟流量过程线见图 2。由图 2 可知，日径流的模拟效果较好，降雨径流情况基本相匹配，实测流量与模拟流量变化趋势基本相同，符合流域的实际情况。模拟结果显示峰现时间与实际峰现时间基本一致，但对于部分较大洪峰和复式洪峰，模拟结果不甚理想，其一在于小流域内有水库存在，土壤调蓄作用复杂，使得坡地汇流模拟不理想；其二由于山区降雨数据的监测记录可能出现偏差，虽然参数率定时满足评价标准，但未能得到最优结果。

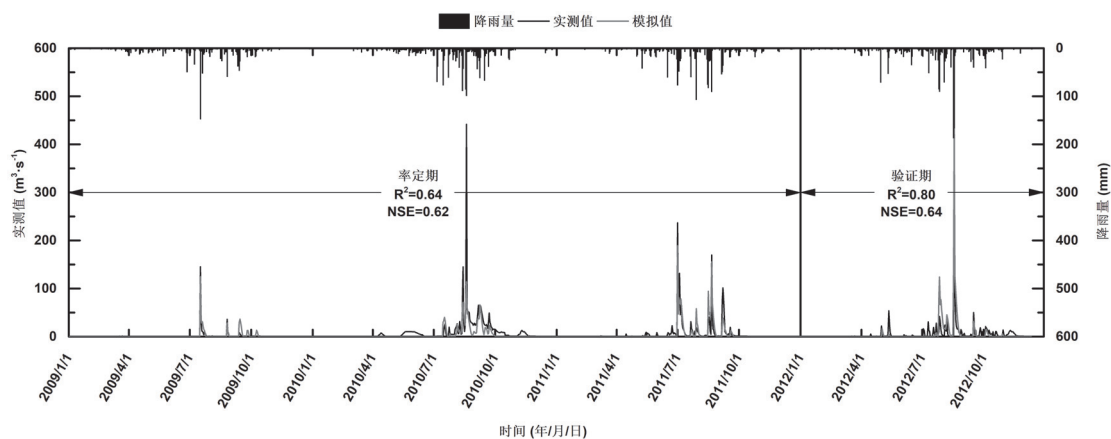


图 2 率定期和验证期的模拟流量过程线

4.2 小时尺度模拟结果

小时尺度径流模拟选取了 2010—2011 年间的两场暴雨洪水数据对 KW-GIUH 模型进行率定（图 3），选取 2012 年的 1 场暴雨洪水对率定结果进行验证（图 4），结果表明，计算得到的 2012 年山洪小时径流过程的模拟值和实测值较为吻合，经计算，相关系数 R^2 和洪峰流量误差 δ 的绝对值分别为 0.68 和 0.0025，拟合效果较好。

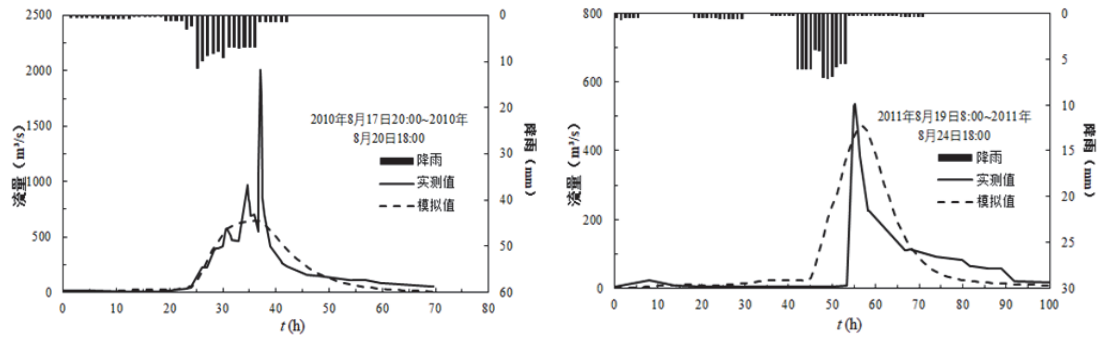


图3 KW-GIUH 模型率定期洪水模拟结果

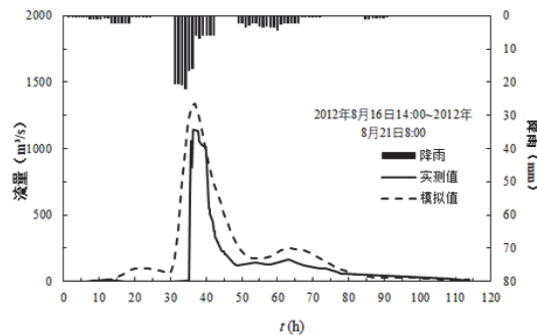


图4 KW-GIUH 模型验证期洪水模拟结果

5 结论

(1) 白沙河流域径流模拟和验证结果表明模型能够较为准确地模拟洪水期间的径流过程,证明 SWAT 水文模型和 KW-GIUH 模型对于白沙河小流域洪水计算具有较好的适用性。

(2) 在实际工作中可依据前期预报的日降雨资料,利用 SWAT 模型进行山洪洪水过程的日径流模拟,确定山洪发生的大致时间,提前做好监测和预报准备,并利用 KW-GIUH 模型进行短历时的山洪洪水预报,为山洪灾害预报预警提供一定依据。

参考文献

- 1 王协康, 刘兴年, 周家文. 泥沙补给突变下的山洪灾害研究构想和成果展望[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(04): 1-10.
- 2 张平仓, 丁文峰, 王协康. 山洪灾害监测预警关键技术与集成示范研究构想和成果展望[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(05): 1-11.
- 3 罗睿, 徐宗学, 程磊. SWAT 模型在三川河流域的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2008, (05): 28-33.

- 4 穆艾塔尔·赛地, 阿不都·沙拉木, 丁建丽, 崔春亮. HEC-HMS 水文模型在数据稀缺山区流域中的应用——以乌鲁木齐河流域为例[J]. 水土保持通报, 2015, 35(06): 140-143+148.
- 5 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究 [J]. 地理科学进展, 2003, (01): 79-86.
- 6 Rodriguez I. I. The geomorphologic structure of the hydrologic response [J]. Water Resources Research, 1979, 15(6): 1409-1420.
- 7 LEE K T, YEN B C. Geomorphology and Kinematic-Wave-Based Hydrograph Derivation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(1): 73-80.

Simulation study on storm flood process in Baisha River Basin, a Tributary of Minjiang River

ZHANG Zhi-hao¹, XU Ze-xing², CHENG Kai², WANG Xie-kang^{2*}

1. Chengdu Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Sichuan Province, Wenjiang, 611130

2. State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Sichuan University, Chengdu, 610065

Abstract: Wenchuan "5.12" earthquake seriously damaged the underlying surface structure of the basin and changed the flood collection process. In recent years, the flood volume and flood events in Baisha River Basin have increased significantly. Based on DEM and soil characteristics, GIS technology is used to derive the hydrological parameters of the basin, and the SWAT model and KW-GIUH model are applied to the Baisha River Basin. Daily runoff and flood process simulation are conducted on the historical floods in the basin, and the SWAT model and The simulation effect of KW-GIUH model on two time scales discusses the applicability and limitation of SWAT model and KW-GIUH model in the forecast and warning of storm floods in southwest mountainous areas, and the simulation effects of SWAT model and KW-GIUH model on two time scales are analyzed and evaluated. In addition, the applicability and limitations of SWAT model and KW-GIUH model in rainstorm flood forecast and early warning in southwest mountainous areas are discussed, which provides basis for the application of hydrological model in similar areas.

Key words: Baisha River Basin; Flood Simulation; SWAT; KW-GIUH; Hydrological Model.

汶川县簇头沟流域“7.10”山洪灾害预警方法可靠性分析

杨坡¹, 叶晨², 孙桐¹, 罗铭¹, 王协康^{1*}

(1 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都, 610065

2 集美大学港口与环境工程学院, 厦门, 361021)

摘要: 我国西南地区地形险峻, 地质构造复杂, 表层岩石风化破碎严重, 自“5.12”汶川地震后, 由地震引发的崩塌、滑坡等次生地质灾害为山洪形成提供了丰富的松散固体物质, 致使山洪水沙灾害问题突出。目前我国山洪灾害防治主要以山洪监测预警等非工程措施为主, 采用基于降雨-产流-水位关系的水文分析法计算预警指标, 常忽略大量来沙引发的沟床形态、河床冲淤及断面水位-流量关系急剧变化等问题对山洪预警指标可靠性的影响。为分析传统方法预警雨量能否在多沙流域发挥预期的预警效果, 以汶川县簇头沟流域“7.10”山洪灾害为例, 采用传统的水位流量反推法计算该流域的预警雨量, 再与成灾时的实测累积雨量进行对比, 结果表明: 传统方法计算的预警雨量为 126mm (约 100 年一遇), 而实际成灾时的累积雨量仅为 100mm (约 30 年一遇), 即在大量来沙作用下 30 年一遇的降雨形成了 100 年一遇的洪灾。由此表明, 忽略泥沙计算的预警雨量较实际成灾雨量偏大, 属于漏警, 显著降低了该地区山洪预警的可靠性。建议在山洪水沙灾害问题较为严重的地区应着重考虑洪水过程中的水沙运动、河床响应及水位变化等问题对预警指标的影响, 以期为此类地区的山洪灾害防治提供科学依据。

关键词: 山洪水沙灾害; 临界雨量; 水位流量反推法; 山洪预警

1 引言

我国位于世界两大地震带—环太平洋地震带与欧亚地震带的交汇部位, 受太平洋板块、印度板块和菲律宾板块的挤压, 地震断裂带十分发育, 强烈的构造运动导致地震及其滑坡崩塌等次生灾害频发, 严重破坏了山体的稳定性, 加速了松散固体物质的累积过程, 为山洪形成提供了丰富的固体物源, 尤其自汶川地震及芦山地震后, 山体滑坡形成的大量松散颗粒滞留于坡地与沟道, 在降雨侵蚀及径流冲刷作用下, 大量泥沙汇入下游河道, 致使下游河流来沙发生突变, 极大影响了山区河流的河床形态发展, 尤其对于行洪排沙能力较弱

资助项目: 四川省科技计划资助(2019YJ0145); 国家重点研发计划(2017YFC1502504); 国家自然科学基金重点项目(51639007)。

*通信作者: 王协康, E-mail: wangxiekan@scu.edu.cn

的宽窄相间型、河流交汇区及变坡陡比降等特殊形态河槽，洪水携带的大量泥沙极易在局部河段发生淤堵，进而抬升水位，引发更为严重的山洪水沙灾害^[1]。我国山洪灾害防治主要立足采用非工程措施为主的综合防御措施，以实现从注重灾后救助向灾前预防的重大转变，山洪预警预报是非工程措施的重要组成部分，主要以临界雨量为预警指标。计算临界雨量的方法主要包括基于数据统计的单站临界雨量法^[2]、内插法^[3]、实地调查法^[4]、灾害降雨同频法等^[5]，其主要通过统计山洪灾害系列数据与对应降雨关系以确定临界雨量，该方法虽然简单易行，对数据资料要求较低，但未考虑山洪致灾的物理机制，且所得临界雨量一般针对于有历史记录的大规模山洪灾害，而对于一般山洪灾害难以起到预警效果；其次是基于水文水力学的临界水位/流量反推法^[6]，该方法首先根据防灾对象历史灾情或现有水利工程的防洪标准确定临界流量，进而根据流域的降雨-径流关系推算临界雨量，是我国目前计算预警雨量最常用的方法，然而基于降雨-产流-水位关系的水位流量反推法并未充分考虑泥沙突增对预警指标的影响，所得临界雨量能否在构造复杂、岩层破碎、输沙严重的西南山区达到预期预警效果还需进一步探究。因此，以汶川县簇头沟流域“7.10”山洪灾害为例，采用水位流量反推法计算该流域的预警雨量，并与成灾时的实测累积雨量进行对比以分析该方法的预警可靠性。

2 研究区域概况

簇头沟为汶川县绵虬镇下游 2.5km 处岷江右岸一支沟，其中沟长 8.8km，平均比降 14.9‰，集水面积 29.8km²，沟口修有一条长 500m，宽 7m，高 3.5m 的排导槽以保护羌锋村沿河两岸居民(图 1)。流域内山高坡陡，沟道纵横，岩层破碎，极端降雨条件下，极易导致山洪灾害频发，2013 年 7 月 9 日汶川县境内发生持续性暴雨并诱发簇头沟特大山洪，洪水冲毁排导槽，淹没村落，导致 3 人死亡，1 人失踪，39 户房屋严重受损，给沿河居民带了巨大损失。此外，参考相关文献可知，此次山洪灾害发生于 7 月 10 日早上 5:10，而且由于绵虬镇雨量站资料缺失，仅以距簇头沟 10km 处的桃关雨量站资料来说明该流域降雨过程^[7](图 2)。

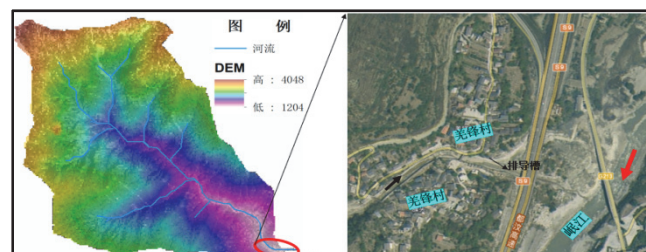


图 1 簇头沟流域示意图

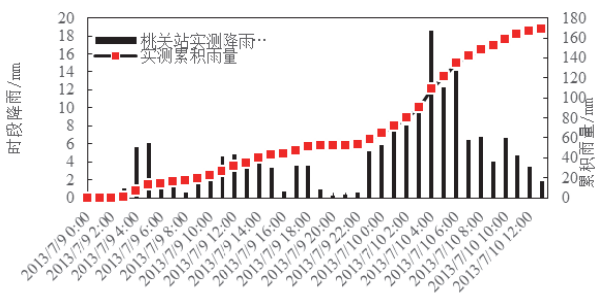


图2 桃关雨量站实测雨量过程

3 山洪灾害预警可靠性分析

传统水位流量反推法计算临界雨量时，首先根据防洪标准确定临界流量，再以临界流量同频率下的时段设计雨量作为山洪预警雨量。此次根据沟口羌锋村处的排导槽尺寸及沟道特征，采用曼宁公式计算的临界流量为 $361.41\text{m}^3/\text{s}$ ，在确定相应的临界雨量时，先假定一个设计频率，通过该地区《水文手册》查算该频率下的雨量值并按照概化雨型时程分配表进行雨量分配，再选取符合流域特征的产流模式进行产汇流计算，若计算的设计洪峰流量与临界流量相接近，则该频率下的设计暴雨雨量便为立即转移临界雨量，若两者差异较大，则需重新假定设计频率，反复进行试算，直至偏差值小于预定的允许误差为止。本次计算不同设计频率的洪峰流量列于表1，洪水过程见图2。

表1 不同设计频率洪峰流量

频率	100 年一遇	50 年一遇	20 年一遇	10 年一遇	5 年一遇
洪峰流量/(m^3/s)	364.56	307.04	248.37	178.33	116.61

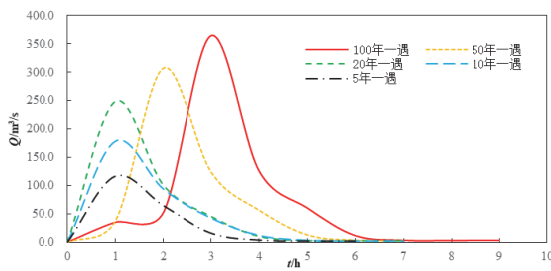


图2 不同设计频率洪水过程

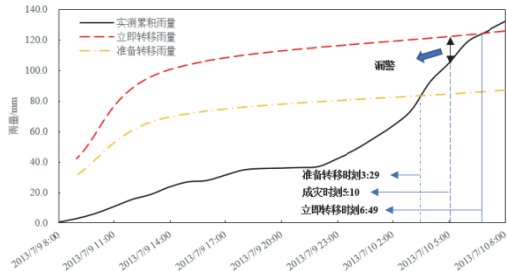


图3 临界雨量计算结果

由表1可知，100 年一遇的洪峰流量与临界流量接近，因此将该频率下的设计暴雨便为该地区的立即转移雨量，此外，对于准备转移临界雨量的计算，仅需在成灾流量洪水过程线中将峰现时间向前推 0.5h，所对应的流量即为准备转移流量，同理便可计算准备转移

雨量,由图2可知准备转移流量为 $217 \text{ m}^3/\text{s}$,设计频率约为15年一遇,由此可知准备转移雨量为15年一遇的设计暴雨(图3)。

为分析该方法计算的临界雨量是否具有预期的预警效果,将实测累积雨量过程绘于图3,由图3可知,累积降雨于7月10日3:29时达到准备转移雨量,此时可提醒相关工作人员准备发布转移指令,直到6:49实际累积雨量才达到立即转移雨量,而山洪灾害已于5:10发生,因此此次计算的临界雨量并未起到预警作用,属于漏警。此外,此次设定的临界流量是以洪水恰好漫过沟口排导槽时的流量为依据,然而实际的洪水规模远大于恰好漫滩时的洪水,由此表明实际的临界雨量应小于此次实测的成灾累积雨量,由传统水位流量反推法计算的临界雨量对此类地区难以取得良好的预警效果。

针对该方法在簇头沟流域“7.10”山洪灾害中预警可靠性差的原因分析如下:簇头沟流域位于龙门山地层分区与马尔康地层分区的接触带,受“5.12”汶川地震及“4.20”芦山地震影响,山体稳定性差,岩性破碎,降雨激发下极易造成崩塌滑坡等灾害,通过 TRIGRS (Transient Rainfall Infiltration and Grid based Regional Slope-stability Model)模型模拟本次降雨条件下簇头沟流域的滑坡情况可知,滑坡高风险区主要分布于沿河两岸(图4),在此次降雨驱动下大量滑坡体将直接进入河道,致使河道来沙条件发生突变,进而引发更为严重的水沙灾害问题,据野外调查及相关文献可知,此次山洪携带的大量泥沙在沿河两岸的弯道、公路桥涵及沟口等输沙能力较弱段大量淤积(图5)而引发灾害,具体表现为弯曲段凸岸淤沙,河道压缩,水流顶冲凹岸,致使沿河两岸房屋冲毁居民伤亡,其次桥涵设计净空不足,上游来沙淤堵后水流漫顶冲毁排导槽及两岸公路,并危及下游汶都公路跨江大桥;最后沟口处泥沙堆积扇阻断岷江,形成堰塞湖,压缩过水面积,进而导致两岸水位壅高,加大了山洪淹没范围。基于上述分析,此次山洪成灾模式可概括为暴雨诱发滑坡与沟道超量产沙,水沙相互作用引起的沟床冲淤突变致使局部河段水位陡增,原设计洪水的防洪安全区转变为成灾区。本次计算的排导槽可通过百年一遇的洪峰流量,然而实际成灾时的雨量仅为30年一遇,因此,仅仅通过降雨-产流-水位关系计算的水位流量反推法,由于忽略了来沙突变引发的沟床形态、河床冲淤及断面水位-流量关系急剧变化等诸多问题,进而导致计算的临界雨量较实际成灾雨量偏大,显著降低了山洪预警的可靠性。

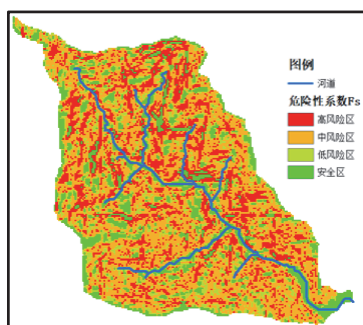


图4 簇头沟流域滑坡风险分析

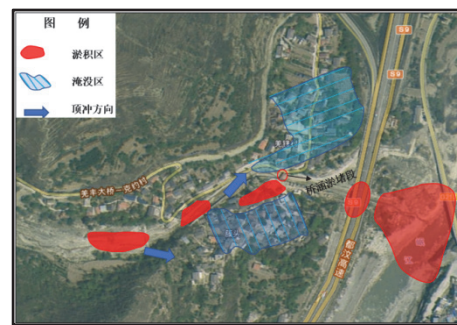


图5 簇头沟流域“7.10”山洪灾害淹没范围示意图

4 结论

以汶川县簇头沟流域“7.10”山洪灾害为例,采用传统的水位流量反推法计算该流域的临界雨量,并与成灾时的实测累积雨量进行对比,以分析该方法在此类地区山洪灾害预警中的可靠性,结果表明,由于该方法忽略了上游来沙突增对下游河道产生的影响,导致计算的临界雨量远大于实际成灾时的累积雨量,30年一遇的降雨形成百年一遇的洪灾,没有起到预警效果。因此,建议在流域产输沙问题严重、地质灾害多发的山区制定山洪预警预案时,需着重考虑大量来沙作用下沟床冲淤、洪水漫滩与流路改道的洪水位抬高对预警指标的影响,以期提高此类地区的山洪预警精度。

参考文献

- 1 王协康,刘兴年,周家文.泥沙补给突变下的山洪灾害研究构想和成果展望.工程科学与技术,2019,51(4):1-10.
- 2 喻宝龙,李超,刘亮,等.重庆跳石河雨洪关系和临界雨量预警指标分析.成都信息工程大学学报,2017,32(5):567-570.
- 3 王仁乔,周月华,王丽,等.湖北省山洪灾害临界雨量及降雨区划研究.高原气象,2006(2):330-334.
- 4 段生荣.典型小流域山洪灾害临界雨量计算分析—以黄河流域大通河支流为例.中国农村水利水电,2008(8):63-65+68.
- 5 白利平,孙佳丽,南赞.北京地区泥石流灾害临界雨量阈值分析.地质通报,2008(5):674-680.
- 6 魏炳乾,杨坡,罗小康,等.无资料中小流域山洪灾害分析与评价.自然灾害学报,2019,28(3):158-165.
- 7 严炎,葛永刚,张建强,等.四川省汶川县簇头沟“7.10”泥石流灾害成因与特征分析.灾害学,2014,29(3):229-234.

Reliability analysis of early warning method for “7.10” flash flood disaster in Cutou basin of Wenchuan County

YANG Po¹, YE Chen², SUN Tong, LUO Ming¹, WANG Xie-kang¹

1. State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Sichuan University, Chengdu, 610065

2. College of Harbour and Environmental Engineering, Jimei University, Xiamen, 361021

Abstract: Mountain area in southwest China often shows the characteristics of steep terrain, complex geological structure, broken surface. Since the "5.12" Wenchuan earthquake, the secondary geological disasters such as collapse and landslide have provided abundant loose solid

materials for the formation of flash flood, resulting in the prominent problem of the mountain flood and sediment movement coupling causes the disaster. At present, non-structural measures such as monitoring and early warning are mainly used in mountain flash flood disaster prevention and control in China. Hydrological analysis method based on rainfall-runoff-stage relationship is used to calculate early warning indexes. However, the influence of sudden change of sediment supply on the reliability of early warning of flash flood is ignored, such as bed morphology, riverbed erosion and deposition, and rapid change of section water level flow relationship. In order to analyze whether the early-warning rainfall calculated can play the expected effect in the muddy basin, taking the “7.10” mountain flash flood disaster in the Cutoubasin of Wenchuan County as an example, the critical rainfall was calculated by the traditional inversion on water level/flow, and then compared with the actual accumulated rainfall when the disaster occurred. The results show that the warning rainfall calculated by the traditional method is 126 mm (about 100 year return period), However, the accumulated rainfall during the actual disaster is only 100 mm (about 30 year return period), that is, under the coupling of mountain flood and sediment, the rainfall with 30-year return period forms the mountain flood with 100-year return period. Therefore, it is suggested that the early-warning rainfall ignoring sediment supply is larger than the actual disaster causing rainfall, which is a kind of missing alarm and significantly reduces the warning accuracy of mountain flood in this area. Influence of water and sediment coupling movement, riverbed response and water level change on early warning indexes should be considered in order to provide a scientific basis for the prevention and control of flash flood in such areas.

Key words: Coupling disaster of mountain flash flood and sediment movement; critical rainfall; inversion on water level/flow; mountain flood warning.

流溪河模型在岔巴沟流域洪水模拟中的应用

余海逖¹, 李兢², 周湘航¹, 王协康^{1*}

(1 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都, 610065;

2 黄河水利委员会榆林水文水资源勘测局, 榆林, 719000)

摘要: 陕西省子洲县的岔巴沟地处黄土高原丘陵沟壑区, 为大理河的支流。该流域地形破碎、植被稀少、水土流失严重、降雨历时短强度大, 极易形成山洪灾害。本研究利用 ARCGIS 对岔巴沟流域 DEM 地形、土地利用类型、土壤类型图进行数据处理, 并结合 Google Earth 对河道断面尺寸进行估测。将上述处理后的相关数据导入流溪河模型软件中, 选取 1970 年 8 月 1 日、1972 年 7 月 19 日、1978 年 7 月 27 日三场洪水为率定期, 1987 年 8 月 26 日一场洪水为验证期构建岔巴沟流域洪水预报小时模型。探讨流溪河模型在黄土高原地区暴雨洪水预报预警上的适用性和局限性, 为流溪河模型在相关地区上的应用研究提供参考。

关键词: 流溪河模型、Arcgis、洪水模拟、DEM、岔巴沟流域

1 引言

岔巴沟起源于榆林市子洲县李孝家河乡刘新窑村, 是黄河水系大理河下游的一级支流, 海拔约为 906~1179m, 面积约为 205km²。岔巴沟自西北沿东南向展开, 流经西庄、三川口乡, 在高家渠村汇入大理河, 流域基本对称呈现羽毛状 (图 1), 沟道比降 7.57‰, 实测最大流量 1520m³/s, 年平均径流总量为 1072 万 m³。主流长约为 27km。岔巴沟流域支沟主要包括麻地沟、刘家沟、蛇家沟、石盛沟、老阳沟、曹则沟、石门沟、书窑沟、罗沟等¹。流溪河模型³是一个流域洪水预报的分布式水文模型。模型将汇流分为边坡汇流、河道汇流、水库汇流 3 种, 采用运动波和扩散波法进行计算。为探讨流溪河模

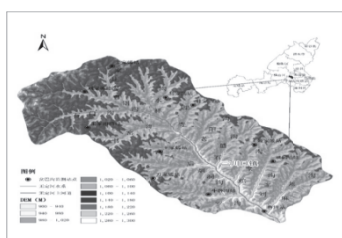


图 1 岔巴沟流域水系

型在黄土高原丘陵区岔巴沟小流域洪水预报的适用性, 本研究基于 18m×18m 的 DEM 数据及水文基础资料, 构建流域洪水预报模型。

资助项目: 国家重点研发计划(2017YFC1502504);水力学与山区河流开发保护国家重点实验室开放基金(SKHL1417).

*通信作者: 王协康, E-mail: wangxie kang@scu.edu.cn

2 岔巴沟流域洪水模拟流溪河模型构建

2.1 岔巴沟流域洪水资料

岔巴沟小流域有共计 11 个雨量站,水文年鉴可查 5 个雨量站及曹坪 1 个水文站,雨量站和水文站分布情况见表 1。流溪河模型中计算流域平均雨量的方法有反距离权重插值、克里格插值、多普勒雷达数据、泰森多边形插值法。计算采用泰森多边形插值法,结果见表 2。

表 1 雨量站及水文站分布情况

类别	站名	经度 (°)	纬度 (°)
雨量站	姬家塄	109.967	37.7
	刘家峁	109.832	37.728
	马虎嫣	109.9	37.733
	万家嫣	109.898	37.676
水文站	曹坪	109.976	37.645

表 2 各站控制面积权重

雨量站	雨量站控制面积	流域总面积	权重
姬家塄	44.91	205	0.225
刘家峁	51.6		0.259
马虎嫣	42.3		0.212
万家嫣	36.54		0.183
曹坪	24.01		0.12

通过查找水文年鉴《黄河流域水文资料-上游》的水文资料,选取了流域内较大 4 场降雨洪水为例开展分析,分别为 1970 年 8 月 1 日 0:00 至 3 日 24:00,1971 年 7 月 23 日 0:00 至 24 日 24:00,1972 年 7 月 19 日 8:00 至 20 日 15:00,1978 年 8 月 7 日 3:00 至 8 日 3:00。

2.2 流溪河模型构建

流溪河模型的数据库构建包括空间数据库和属性数据库两部分,因而所需数据由空间数据和属性数据组成⁶。空间数据包括 DEM、流向、累积流、坡度、土地利用、土壤类型图,后者包括径流数据、雨量站站点信息、土壤及土地利用属性、河道属性。相关数据来源见表 3 和图 2 至图 4。

流溪河水文模型所需要的流域特征信息,采用 Arcgis 水文分析模块来完成。由于 SRTM 数字地形高程数据,在黄土高原丘陵山地坡度较大的区域也有较好的效果,用于岔巴沟流域水文模型构建效果较好,故使用 18m×18m 的 SRTM 数字地形高程数据作为 DEM 数据。栅格大小为 18m×18m,栅格总数为 424389 个,流域控制面积为 205km²。

表 3 研究区基本数据及来源

数据类型	数据描述	数据来源	数据格式
地形数据 (DEM)	空间分辨率 18m×18m	山洪灾害实时动态预报预警关键技术项目组	栅格数据
土地利用数据	30m 分辨率的数据	山洪灾害实时动态预报预警关键技术项目组	栅格数据
土壤类型数据	基于世界土壤数据库 (HWSD) 的中国土壤数据集(v1.1)提供的 1:100 万土壤数据	世界土壤数据库	栅格数据
土壤属性数据	基于世界土壤数据库 (HWSD) 的中国土壤数据集(v1.1)包含的土壤属性数据表	世界土壤数据库	属性数据
降雨资料数据	1970 年 8 月 1-3 日, 1971 年 7 月 23-24 日, 1972 年 7 月 19-20 日, 1978 年 8 月 7-8 日, 1987 年雨量站观测降水数据	水文年鉴	属性数据
径流观测数据	1970 年, 1971 年, 1972 年, 1978 年, 1987 年雨量站观测降水数据	水文年鉴	属性数据

3 流溪河模型参数确定及参数调整

该模型有两类参数，可调参数和不可调参数，其中不可调参数包括流向和坡度，直接由 DEM 在 Arcgis 中处理再导入。可调参数包括与河道单元有关的参数河段糙率 n ；与土地利用类型相关的参数，蒸发系数 v 、边坡单元糙率 n ；与土壤属性相关的土壤层厚度 Z_s 、饱和含水率 $Cast$ 、田间持水率 Cfc 、凋萎系数 Wl 、土壤特性参数 b 。参数取值查文献确定初值(表 4 和表 5)。

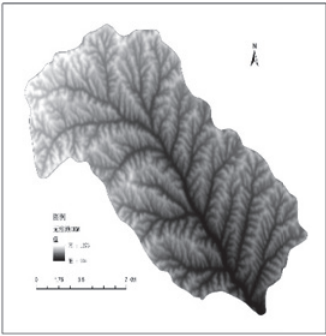


图 2 DEM 数据

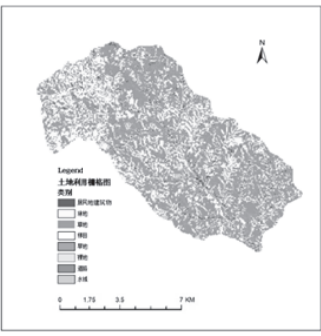


图 3 土地利用数据

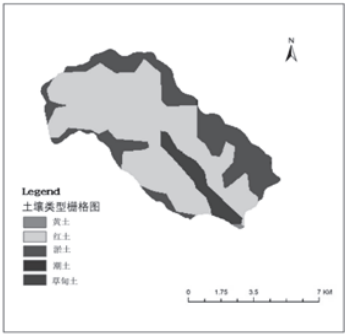


图 4 土壤属性数据

表 4 土地利用类型参数初值

土地利用类型	边坡单元糙率初值	蒸发系数初值
林地	0.4	0.7
草地	0.2	0.7
梯田	0.15	0.7
旱地	0.3	0.7
裸地	0.4	0.7
道路	0.02	0.7
水域	0.04	0.7

表 5 土壤类型参数初值表

土壤类型编号	土壤层厚度 (mm)	饱和含水率 (%)	田间持水率 (%)	饱和传导率 (mm/h)	土壤特性参数 b
50411	1000	45.6	28.7	12.75	2.5
50465	1000	44	20	34.55	2.5
50471	1000	44.2	20.6	33.09	2.5
50475	1000	45	24.6	22.73	2.5
50475	1000	44.6	15.7	60.6	2.5

参考相关文献 6 可知, 饱和含水率为高敏感参数, 田间持水率、饱和水力传导率、土壤层厚度、土壤特性参数 b、河道糙率、边坡糙率为敏感参数。因此采用控制变量法, 从饱和含水率到边坡糙率一次调整, 未调整的参数保持初值。即先调整饱和含水率, 以初值为中心取其 10%~200%, 观察模拟结果选取模拟效果理想的参数。选定饱和含水率参数之后, 在调整田间持水率, 依次进行。完成第一轮调整, 若效果不理想再用同样的方法进行下一轮调整。第二轮调整值见表 6。

表 6 参数二轮调整

参数	第二轮调整 (%)
饱和含水率	95
田间持水率	90
河道单元糙率	90
边坡单元糙率	40
饱和水力传导率	80
土壤层厚度	90
土壤特性参数 b	110

4 模拟结果

本文选取 1970 年 8 月 1 日，1971 年 7 月 23 日，1972 年 7 月 19 日 8:00 至 20 日 3 场洪水作为率定，1978 年 8 月 7 日一场洪水作为验证。将 4 场洪水的实测值和模拟值以及降雨量绘制成图 5 所示。采用统计学原理，应用相关性系数（R）和纳什系数 Ens 评估模拟值和实测值间的误差。通常，R2 接近 1，Ens 越接近于 1 模拟结果较好。模型评价如表 7 所示。

表 7 模拟评价系数结果

场次	R^2	E_{ns}	峰值误差 (%)	峰现差 (h)
19700801	0.99	0.93	0.13	0
19710723	0.97	0.91	0.18	0
19720719	0.99	0.92	0.17	0
19780807	0.92	0.89	0.09	0

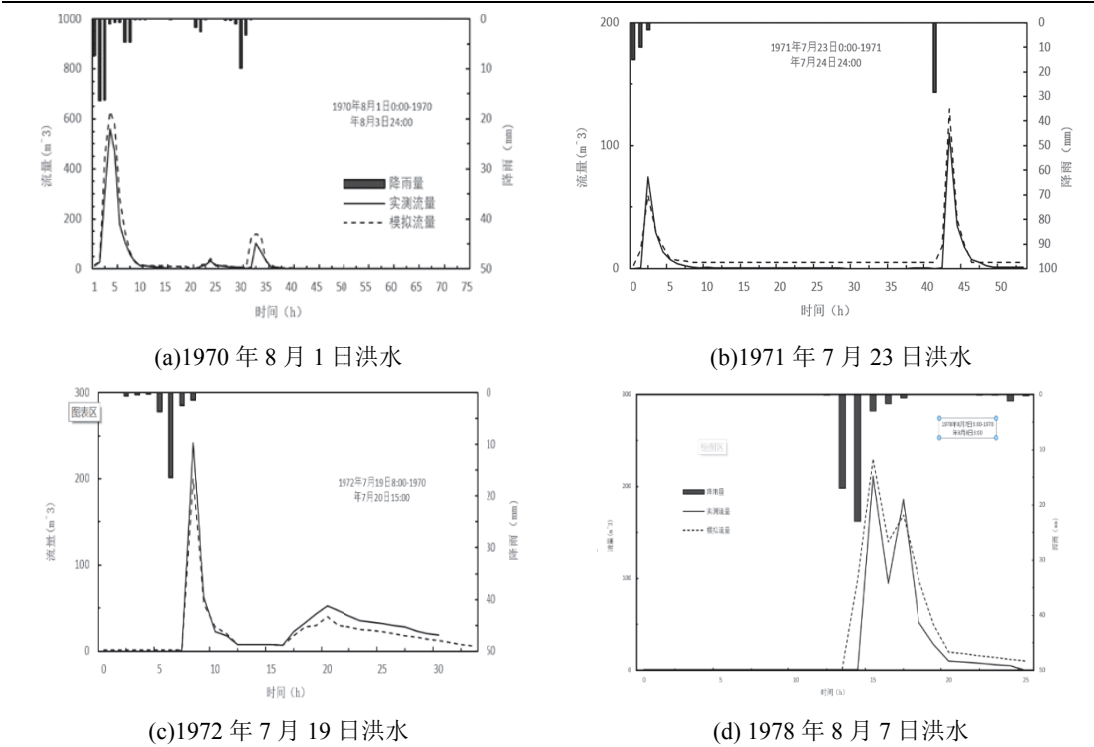


图 5 不同场次洪水模拟

5 小结

通过对图 5 的模型与实测值比较分析，峰现时间完全一致，洪峰流量稍有偏差。4 场洪水的洪峰峰现时差都为 0，说明流溪河模型对岔巴沟小流域的峰现时间上模拟是非常准

确,对实际洪水预报有重要价值。洪水过程模拟结果,4场洪水的相关性系数均在0.9以上,纳什系数1978年为0.89,其余均在0.9以上,说明模拟洪水过程和实测过程吻合程度较高。模拟总体效果较为理想,说明流溪河模型对岔巴沟流域具有较好的适用性。

参考文献

- 1 莫淑红,巩瑶,李洁,等.人类活动对岔巴沟流域洪水过程影响研究.应用基础与工程科学学报,2019,27(03):492-508.
- 2 闫丹丹.大理河流域植被变化对洪峰流量影响分析.西安理工大学,2018.
- 3 王幻宇,陈洋波,覃建明,等.基于流溪河模型的梅江流域洪水预报研究.中国农村水利水电,2017(11):124-128+133.
- 4 李国文,陈洋波,覃建明,等.基于流溪河模型的湘水流域洪水预报方案研究.江西水利科技,2017,43(05):335-341.
- 5 林博安,陈洋波,虞云飞,等.基于流溪河模型的连江流域洪水模拟.广东水利水电,2016(07):1-8.
- 6 陈洋波.流溪河模型.北京:科学出版社,2009:11-34.

Simulation of flood based on Liuxihe Model in Chabagou Basin

YU Hai-ti¹, LI Jing², ZHOU Xiang-hang¹, WANG Xie-kang^{1*}

1.State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Sichuan University, Chengdu, 610065;

2.Yulin Bureau of Hydrology and Water Resources, Yellow River Conservancy Commission, Yulin, 719000

Abstract: The Chaba Gully, a tributary of the Dali River, is located in the hilly and gully region of the Loess Plateau in Zizhou County, Shaanxi Province. The watershed is characterized by broken topography, scarce vegetation, severe water and soil erosion and short and exceptionally intense rainfalls, making it highly susceptible to mountain torrent disasters. In this paper, the ArcGIS software was used to process data pertaining to the DEM topography, land use types and soil type maps of the Chaba Gully watershed, and Google Earth was employed to estimate the sizes of river cross sections. The processed data was then fed into the Liuxihe Model software. The floods occurring on August 1, 1970 and July 27, 1978 were selected as the calibration period and the flood occurring on August 26, 1987 as the verification period to construct an hourly flood forecast model for the Chaba Gully watershed. The applicability of the Liuxihe model in cloudburst flood forecast and early warning across the Loess Plateau and its limitations are discussed, thus providing a reference for studies focusing on the application of the Liuxihe model in relevant regions.

Key words: Liu Xihe Model; Arcgis; Flood Simulation; DEM; Chabagou Basin.

限制航道内船过桥墩的定常与非定常水动力特性研究

杜鹏^{1,2*}, 胡海豹², 黄潇²

(1 西北工业大学深圳研究院, 深圳 51805;

2 西北工业大学航海学院, 西安 710072, Email: dupeng@nwpu.edu.cn)

摘要: 基于 OpenFOAM 模拟了限制航道内船体穿过桥墩的动态过程, 船体运动利用 AMI (Arbitrary Mesh Interface) 技术实现, 研究了水深、桥墩间距、吃水和航速等因素对船舶阻力、升沉、船行波的影响, 并通过拖曳水池实验进行了验证。研究发现, 在限制水域内, 航道对船体阻力的影响占主导地位, 桥墩的存在会极大影响船体的非定常水动力特性, 但对船过桥墩整个过程的平均水动力特性影响较小。基于多项式拟合方法对阻力和升沉进行了分析, 得到了限制航道内二者的预测公式。通过船行波的分析, 得到了 Kelvin 波形、波高等参数随航速、水深、桥墩间距的变化规律, 为揭示船体的受限机理奠定基础。

关键词: 限制航道; 桥墩; 水动力; 船行波

1 引言

当前, 船舶正朝着绿色化、智能化、大型化等方向不断发展, 相比之下, 航道规模普遍增长缓慢, 这一现状使得船舶安全、有效的操纵空间变得越来越局限, 现有的众多港口、河道相对变浅、变窄, 成为所谓的“限制水域”, 在限制航道中航行已成为现代船舶实际运营中无法回避的情形。除航道的限制外, 船舶在航行时也会与水中的多种结构产生相互作用^[1], 如船只、浮标、桥墩等, 其中, 桥梁是沟通江河两岸的交通要道, 桥墩作为支撑桥梁结构的重要部分, 需要牢固的树立在水中, 在船舶运输过程中, 必然会出现穿过桥墩的情况^[2-7], 不当的操作会引起碰撞, 带来损失。因此, 研究限制航道中船舶穿过桥墩的水动力特性对于船舶的航行安全和接近桥墩时的操纵策略极为重要。

2 数值模拟及实验方法

利用计算流体动力学 (CFD) 方法进行船舶限制效应的数值模拟^[8], 船模的拖曳水池试验如图 1 所示, 该实验在比利时列日大学 ANAST 实验室开展, 图中可见该船型为典型

的内河运输船，由两节货船和一节推船组成，货船无动力，仅负责装载货物，推进由推船负责。数值模拟和试验中均只考虑拖曳运动的情况，不计入桨和舵的作用，计算域仅选取一半，利用对称边界条件来减少计算量（图1），船舶运动通过滑移网格实现。试验和模拟的参数设置一致，具体的航道宽度、桥墩间距、吃水、水深、航速和数值模拟的网格参数如表1所示。

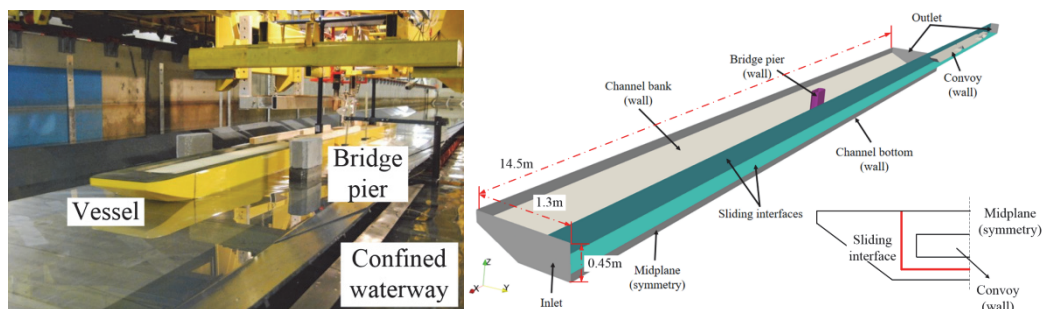


图1 船过桥墩的拖曳水池试验（左）和数值模拟（右）

表1 测试参数设计

算例	W_b	D_b	T_d	h_w	$V_{\max}$	$Fr_{h-\max}$	N_{mesh}
1	1.44	0.7	0.04	0.12	0.80	0.738	1284531
2				0.18	0.91	0.685	1423626
3				0.24	0.91	0.593	1426806
4				0.18	0.80	0.602	1340223
5				0.24	0.91	0.593	1437711
6		0.8	0.1	0.12	0.80	0.738	1278281
7				0.18	0.91	0.685	1419086
8				0.24	0.91	0.593	1534598
9				0.18	0.80	0.602	1331889
10				0.24	0.91	0.593	1471276

为研究船舶非定常水动力的变化规律，文中定义了船体与桥墩的相对位置参数(图2)：

$$\xi_{sb} = x_{sb} / L_m \quad (1)$$

其中， x_{sb} 为船舶与桥墩的轴向距离， $L_m = (L_s + L_b) / 2$ 为船舶与桥墩长度的平均值。当 $\xi_{sb} = -1$ 时，船舶与桥墩相遇； $\xi_{sb} = 0$ 时，船舶与桥墩的中心重合； $\xi_{sb} = 1$ ，船舶离开桥墩。因此， $-1 < \xi_{sb} < 1$ 是二者的交汇区，桥墩对船体的影响也最大。

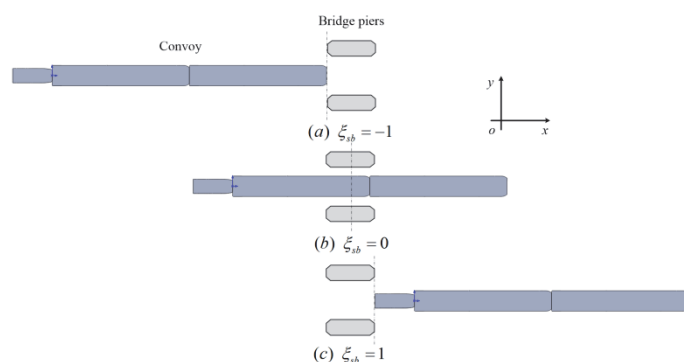


图2 船舶与桥墩的相对位置定义

3 限制航道内船过桥墩的水动力分析

船舶经过桥墩时的平均阻力如图3所示，这里的平均阻力为船体穿过桥墩整个过程中阻力的平均值。可见数值模拟与实验结果吻合较好，桥墩间距对整个过程中平均阻力的影响较小。

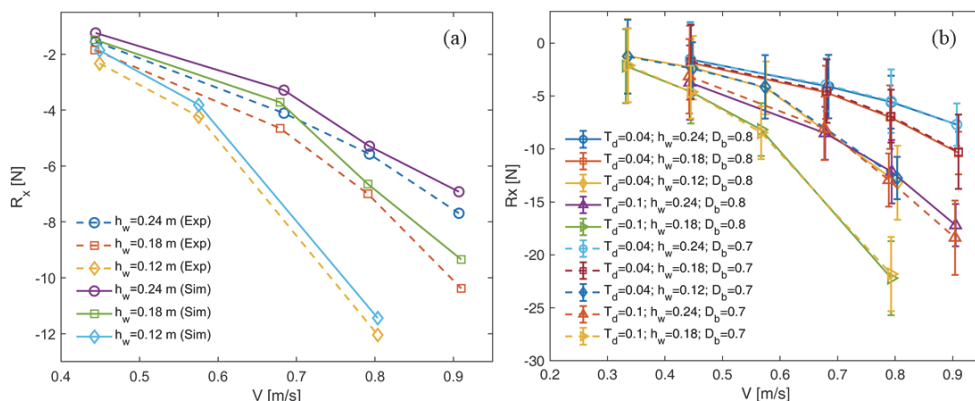


图3 试验与模拟的阻力对比

船舶穿过桥墩的非定常阻力变化如图4所示，可以看出，桥墩的存在对于整个过程的非定常水动力影响较大，在 $-1 < \xi_{sb} < 0$ 时，即船体遇到桥墩到中心重合的过程中，桥墩对于船体运动产生阻碍；在 $0 < \xi_{sb} < 1$ 时，桥墩在船体上的阻力为正，即有推力的作用，由于二者方向相反，造成了整个过程中的阻力平均值变化不明显，即桥墩对于非定常水动力影响较大，而对整个过程中的平均阻力影响较小。

船体产生的纵倾和下沉如图5和图6所示，这里的纵倾和下沉量均为平均值。可见航速越高、水深越浅、吃水越大，船舶的运动变化就越明显，与阻力的结论类似，桥墩间距对二者平均值的影响较小。

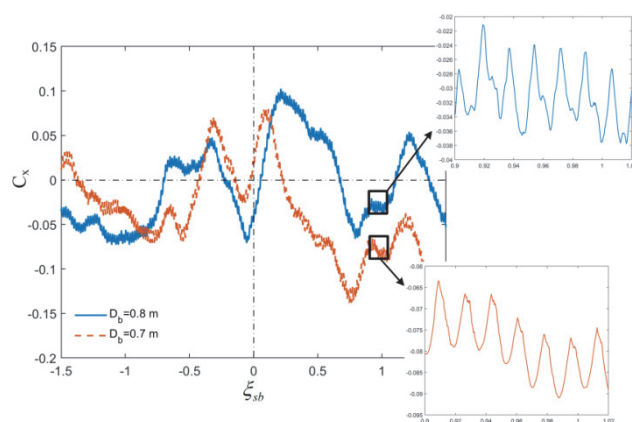


图4 船舶非定常阻力随相对位置的变化规律

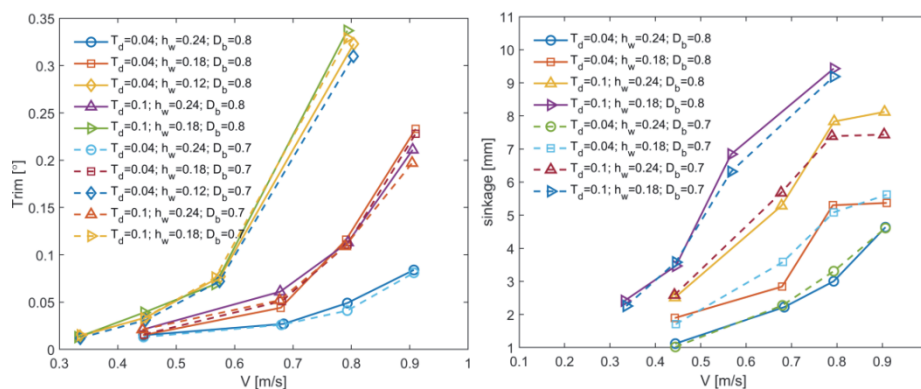


图5 试验与模拟的纵倾和下沉量对比

船行波的模拟结果如图6所示,可见文中的数值模拟能够准确捕捉船舶运动产生的水面兴波,船头和船尾处能观察到明显的 Kelvin 波形,由于限制航道的影响,波浪会在岸壁处产生反射,反射波与原本的波浪叠加形成了极为复杂的波形,增加了整个过程水动力变化的复杂程度。

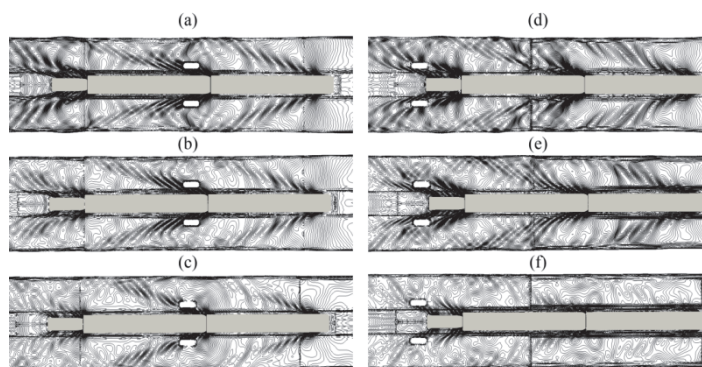


图6 船行波的数值模拟结果

参考文献

- 1 Khangaonkar, T., Nugraha, A., Wang, T., Hydrodynamic zone of influence due to a floating structure in a fjordal estuary-hood canal bridge impact assessment. Journal of Marine Science and Engineering 2018, 6,119.
- 2 Chu, L.M., Zhang, L.M., Centrifuge modeling of ship impact loads on bridge pile foundations. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 2010, 137, 405–420.
- 3 Dong, Hong-Cang and Ai, W.Z., Simulation study on ship passing the bridge, in: International Conference on Electrical Engineering and Mechanical Automation (ICEEMA), 2015, 805–809.
- 4 Fan, W., Liu, Y., Liu, B., Guo, W., Dynamic ship-impact load on bridge structures emphasizing shock spectrum approximation. Journal of Bridge Engineering 21, 04016057.2016.
- 5 Guo, J., Ai, W.Z., Wang, J.H., The minimum distance between navigation ship and bridge, in: Proceedings of the 2015 International Conference on Design, Manufacturing and Mechatronics (ICDMM2015), World Scientific. 2016, 1447–1453.
- 6 Hu, Z.Q., Gu, Y.N., Gao, Z., et al. Fast evaluation of ship-bridge collision force based on nonlinear numerical simulation. Journal of Marine Science and Application 2005, 4, 8–14.
- 7 Li, L., Yuan, Z.M., Ji, C., et al. Investigation on the unsteady hydrodynamic loads of ship passing by bridge piers by a 3-d boundary element method. Engineering Analysis with Boundary Elements 2018, 94, 122–133.
- 8 Du, P., Ouahsine, A., Hoarau, Y., Solid body motion prediction using a unit quaternion-based solver with actuator disk. Comptes Rendus Mécanique 2018, 346, 1136–1152.

Steady and unsteady hydrodynamic characteristics of inland vessel crossing bridge piers in restricted waterway

DU Peng^{1,2*}, HU Hai-bao², HUANG Xiao²

1 Research & Development Institute of Northwestern Polytechnical University in Shenzhen

2 School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University

Email: dupeng@nwpu.edu.cn

Abstract: The dynamic process of an inland vessel passing bridge piers in the restricted waterway is investigated based on OpenFOAM. The motion of the vessel is realized with AMI (Arbitrary Mesh Interface) technique. The influences of the water depth, distance between bridge piers, draught, speed, etc. are studied and validated with towing tank experiments. It is found that the influence of the restriction effect of the waterway is dominant for the ship resistance. This influence greatly affects the unsteady hydrodynamics during the passage, but not the steady

(averaged) hydrodynamics. Regression analyses are carried out for the resistance and the squat. Polynomial equations are proposed for their predictions. The Kelvin waves are also analyzed as functions of the vessel speed, water depth and pier distance, which lays foundation for revealing the restriction mechanism of this process.

Key words: Restricted waterway; Bridge pier; Hydrodynamics; Ship waves.

含刚性挺水植物群落水流的大涡模拟

李晗玫, 毛劲乔, 龚轶青, 戴杰

(河海大学水利水电学院, 南京, 210098, Email: 191302030004@hhu.edu.cn)

摘要: 自然界中水生植物一般以群落的形式生长在各种水域环境中, 通过与水体的相互作用, 改变了周围的水流结构。本文基于大涡模拟方法建立了含刚性挺水植物群落水流的数学模型, 将河道中的植物群落概化为圆形斑块, 斑块中的单株植物等效为挺水圆柱体, 通过精密的网格系统模拟了植株尺度和群落尺度的水流结构, 并使用水槽实验数据对数值模拟进行了验证。模拟结果表明水流可以从植物间隙直接穿过半透性斑块, 引起斑块尾流结构的变化, 与同尺度实体圆柱尾流特征存在显著差异; 在斑块内部, 不同位置植物周围的水流结构同样存在差异。

关键词: 刚性挺水植物群落; 大涡模拟; 固体体积分数; 尾流; 水流结构

1 引言

近年来, 修复河道生态环境和维持河流健康已是科学研究中的热点问题。人们逐渐重视河流中的多种生态环境问题, 合理运用水生植物来改善河流的生态环境。水生植物群落不仅能为动物提供养分与栖息地、吸纳水体中的营养盐、捕获河流中重金属和污染物, 还能有效防止河道淤积与侵蚀, 但水生植物的存在将阻碍水流的运动, 导致水流结构发生变化, 进而影响水体中的物质输运、河床演变等过程^[1]。因此, 开展植物群落与水流之间的机理研究, 着重分析水生植物群落的淹没状态、密度、种类等因素对水流流场的变化影响, 将为日常开展河道治理和管理提供有效的参考依据。

天然河流中常含有许多以斑块形式离散分布的水生植物群落, 挺水植物作为水生植物群落中的大类, 其浸没在水中的茎秆基本呈现圆柱形。大多数研究者根据上述水生植物群落的特征将河道中植物-水流问题类比于圆柱绕流问题, 采用物理实验和数值模拟等方式探究植物斑块对河流水动力特征的影响。Li 等^[2]将单株植物视为单个圆柱, 通过在明渠实验中布置不同密度和排列方式的圆柱群来模拟刚性植物对水流阻力的影响。Zong 等^[3]在水槽中进行刚性植物模拟实验, 发现不同体积分数的圆柱群的尾流形态与同尺度实体圆柱的尾流形态均存在差异, 并提出了尾流区内卡门涡街形成时的距离经验公式。此外, Nicolle 等^[4]则采用数值模拟的方式, 运用二维 DNS 模型发现了不同体积分数圆柱群的周围及单圆柱周

围的水流流场的不同变化。杨骥等^[5]采用 SST $k-\omega$ 模型耦合的自主研发计算程序 HydroFlow 来模拟含自由液面的三维刚性挺水植物群落流场，在无滑移边界条件下研究不同固体体积分数、水深下的尾流场、河床面剪切应力分布特征。

基于上述研究，本文采用大涡模拟方法建立含刚性挺水植物群落的数学模型，研究不同固体体积分数的刚性挺水植物群落所引起的流场中流速、涡量及涡旋结构的变化情况。

2 数值模型设定与验证

2.1 数值模型

为开展本文的大涡模拟工作，求解空间滤波后的三维不可压缩纳维-斯托克斯 (N-S) 方程组，包括连续性方程和动量方程，其无量纲形式如下所示：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re_D} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_i \quad (2)$$

其中， x_i 和 x_j 为不同方向的空间位置坐标，即 $x_i = x, y, z (i = 1, 2, 3)$ ， u_i 和 u_j 分别表示 x 方向， y 方向和 z 方向的速度分量， p 是压力项， $Re_D = UD/\nu$ 为雷诺数， U 为特征速度， D 为斑块直径， ν 为液体运动黏度系数， τ_{ij} 和分别是亚格子应力和外源作用力。亚格子应力模型选用WALE模型避免近壁面涡黏系数高估的问题，外源作用力主要来自植物引起的阻力和升力，使用浸没边界法进行处理。在数值方法上，方程组使用4阶中心差分格式进行空间离散，并使用3阶龙格-库塔显式格式进行时间积分。

2.2 工况设定

为便于对数值模型进行验证，本文中数值模拟计算域是根据 Zong 等^[3]的物理模型实验设定，以斑块直径 $D (=22\text{cm})$ 为特征长度进行无量纲化。数值模拟计算域的长度为 $36D$ ，宽度为 $5.4D$ ，水深为 $0.6D$ 。单株植物视为单个刚性圆柱体，其直径 d 为 $0.027D$ ，整个植物群落由若干柱状植物以交错排列形式组成，整体概化为刚性圆柱体构成的圆形半透性斑块。圆形斑块布置在计算域中心线上，以其距离计算域入口处 $16.5D$ 的迎水前缘作为坐标原点，即植物群落所在范围为 $0 < x/D < 1$ 。 x 、 y 、 z 轴分别表示流向、横向以及垂向(图 1)。

数值模型的入流为人工涡技术^[6]生成的充分发展湍流，入流平均流速 u_{bulk} 为 0.098m/s ，出口处采用对流边界条件，其余壁面均为无滑移边界。采用局部加密技术对植物斑块附近区域进行网格加密(图 2)，核心区域网格尺寸为 $0.009D$ ，总网格量约 3500 万，壁面 y^+ 为 42，使用壁面函数对边壁进行处理。

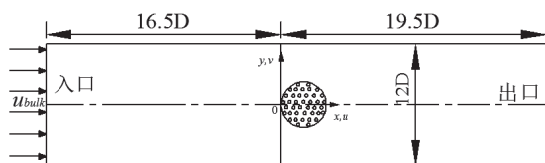


图1 数值水槽布置示意图

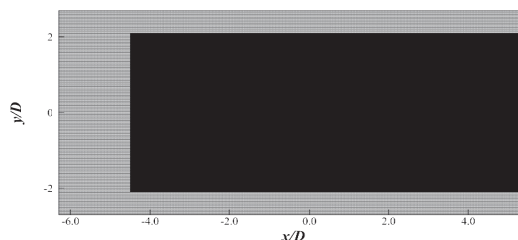


图2 圆形斑块局部加密网格布置示意图

本文中数值模拟两次工况中单株植物直径 d 与植物群落直径 D 均相同，进口流速一致，因此基于斑块直径 D 的雷诺数 Re_D 均为 21560，但固体体积分数分别为 $\varphi=0.1$ 和 $\varphi=0.03$ ，斑块内植株个数分别为 135 和 37。

2.3 数值模型验证

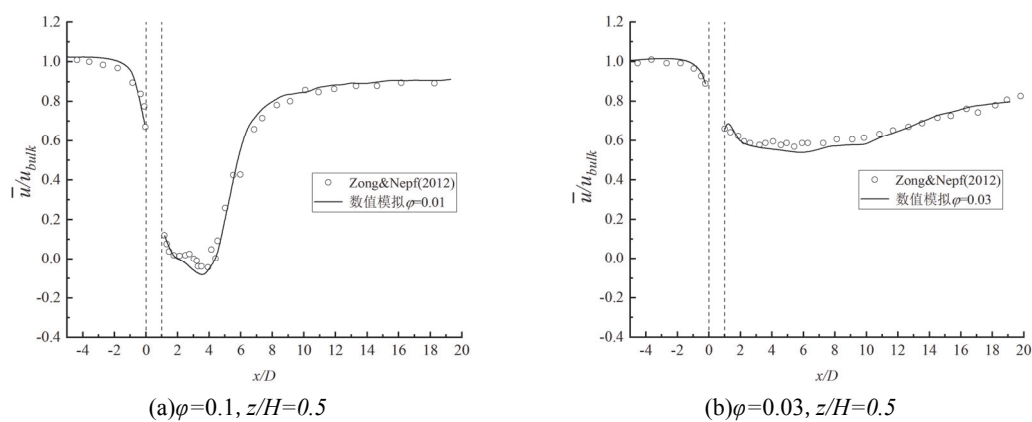
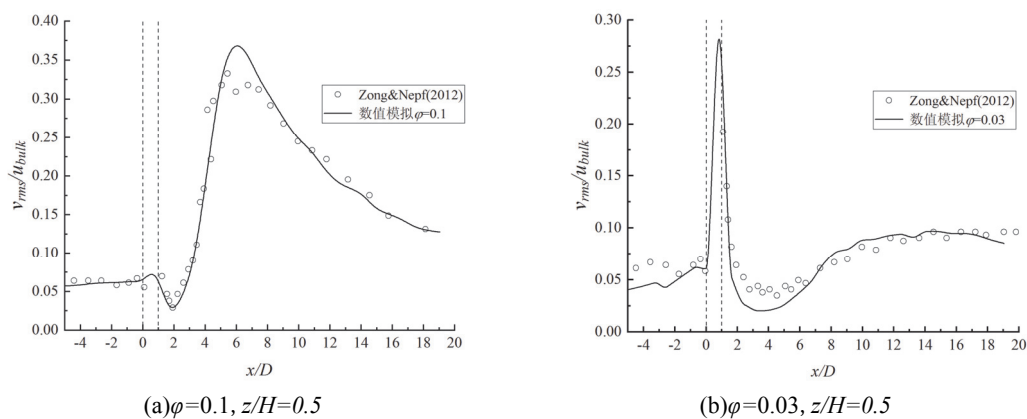
在两次模拟工况运行充分长时间后，提取于中层断面中心线上（ $z/H=0.5, y=0$ ）的流向时均流速 $\bar{u}$ 和横向湍流强度 v_{rms} ，与 Zong 等的实验数据进行对比分析。

图 3(a)和(b)所示为各工况下流向时均流速的实验值与数值模拟值的对比验证，结果表明：模拟所得的纵向时均流速值与物理实验值在数值结果和整体变化趋势上都吻合较好，各工况的数值误差也有效控制在 5%~10% 以内。

对比图 3(a)和(b)的两次模拟工况的结果，其变化趋势表明，流速在两次模拟工况的斑块前及内部均呈现降低发展，水流在斑块后继续发散，流速持续降低直至稳定。参考 Zong 等实验中定义的参数^[3]：稳定尾流长度 L_1 和尾迹流速恢复长度 L_2 。图 3(a)表明斑块下游 $2 < x/D < 4$ 的范围内，出现局部均匀流速区域和一段反向流动（ $\bar{u} < 0$ ）的回流区，之后流速呈现正增长变化，尾迹流速恢复长度 $L_2/D \approx 5$ ；图 3(b)在斑块下游 $2 < x/D < 7$ 的范围内，出现了均匀流速区即稳定尾迹，之后流速同样呈现正增长趋势，尾迹流速恢复长度 $L_2/D \geq 12$ 。因此，对比各工况可知斑块固体体积分数越大，流出斑块时的流速越小，稳定尾流长度越小，流速恢复至来流速度越快，其尾迹流速恢复长度进一步减小。

两次模拟工况中获得的横向湍流强度分布结果，可以表征斑块两侧的分流涡在中心轴线上的交互情况。因此，基于各工况的横向湍流强度结果可进一步验证模型的准确性，如下图 4 所示：数值模拟结果与物理实验值在整体变化趋势上趋于一致；(a)中数值吻合较好，(b)中除了群落局部范围内的验证结果存在一定差距，其余验证部分均吻合较好。

图 4 表明， $\varphi=0.1$ 时其横向湍流强度显著高于 $\varphi=0.03$ 时的结果，其最大值出现在 $x \approx 6D$ 处，即两侧脱落的涡旋交汇中心； $\varphi=0.03$ 时，其横向紊动在斑块内部最为剧烈，且斑块后的横向湍流强度出现骤降，表明在中心轴线上未出现分离涡交汇现象，水流产生横向紊动主要是由中心轴线上植物个体的尾涡所引起的。因此，随着斑块固体体积分数减小，横向湍流强度减弱，流速沿流向方向恢复速率变缓，即 L_2/D 数值逐渐增长。

图 3 $y=0$ 上纵向时均流速分布图图 4 $y=0$ 上湍流强度分布图

3 数值模拟结果分析

3.1 时均流场分析

为了更好地展示各工况下主流流速沿纵向方向的变化，将主流流速进行无量纲处理，并以此来表述水流流经植物群落的时均流场变化特征。下方图 5 分别展示了不同固体体积分数情况下，两个工况的时均流场分布。其中，流经植物群落的水流可以分为贯穿流动和群落两侧绕流。

从图 5 可看出，由于植物的阻流效果，水流在群落前的流速明显降低，且 ϕ 值较大的

密集植物群落的阻水作用更强。水流流经群落所在区域 ($0 < x/D < 1$) 后, 沿程水流流速在尾流区内持续降低至最小值, 维持一段时间后再逐渐恢复至来流流速大小。此外, φ 值较大时, 流动较为复杂, 其尾流区内产生一段回流区; φ 值较小时, 水流贯穿流动更强, 流动则越平顺, 且在尾流区内将保持一段长度的稳定流; φ 值越大, 增强的湍流强度加剧了尾流区域内的纵向流速的恢复。

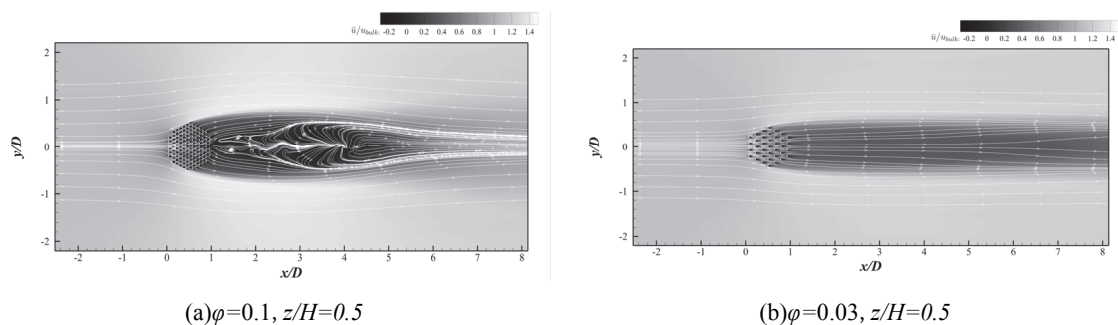


图 5 时均流场分布

3.2 紊流流场分析

水流流过斑块会在斑块边缘两端形成稳定的剪切层, 其宽度随水流方向逐步增大, 而涡旋的形成是和尾迹内的平均速度与剪切层内平均速度之差的大小有关。为了更好地观察涡旋的传播过程, 图 6 给出了不同固体体积分数下的瞬时垂向涡量分布图, 可知植物群落密度对流场中涡量的分布存在影响。

在 φ 值为 0.1 时, 水流贯穿流动较弱, 横向上的动量交换较为剧烈, 剪切层不稳定, 两侧脱落的涡旋结构在尾流区中心轴线上的某一位置处 ($4 < L_t/D < 6$) 交汇, 形成卡门涡街或不稳定的流动; φ 值为 0.03 时, 稀疏植物群落内的贯穿流动更强, 能明显看出两侧较为稳定的剪切层, 且脱落的涡旋结构基本未产生交互, 群落后方未出现卡门涡街。

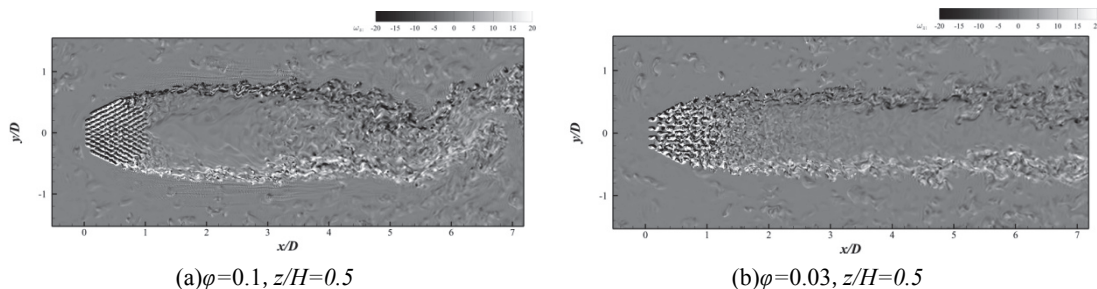


图 6 垂向涡量分布

为了剔除纯剪切流动对于判别流场涡旋运动的干扰, 采用 Q 准则等值面来描绘流场中的拟序结构, 并绘制出各工况的结果见图 7。根据图 7 所示, 涡旋结构按照尺度大小, 主要分为了斑块尺度的涡旋结构与植株尺度的涡旋结构。

图 7(a)所示斑块尺度的涡旋结构主要体现在斑块两侧的分流涡以及斑块上游近底面的马蹄涡,相比于同一位置处实体圆柱所产生的马蹄涡^[7], $\varphi=0.1$ 工况下马蹄涡结构的完整度与显著性都更薄弱。植株尺度的涡旋结构则主要体现在斑块的前半段,由较强不稳定性的各植株分离涡产生卡门涡街,其中在串联分布的植物外缘的分流涡,随着其强度的不断增大,产生了斑块尺度的分离涡。而斑块内部的分离涡处于不断减弱的状态,甚至在斑块后半段中心区域植物的周围并未出现分离涡。图 7(b)展示了 $\varphi=0.03$ 工况,相比于图 7(a),斑块上游未曾产生马蹄涡,且因贯穿流动强度较大,斑块两侧的分流涡较弱,产生尾迹涡脱落现象,而在斑块后半段则出现较强的分离涡。因此,植物群落的密度大小显著影响了瞬时流场下的涡旋结构。

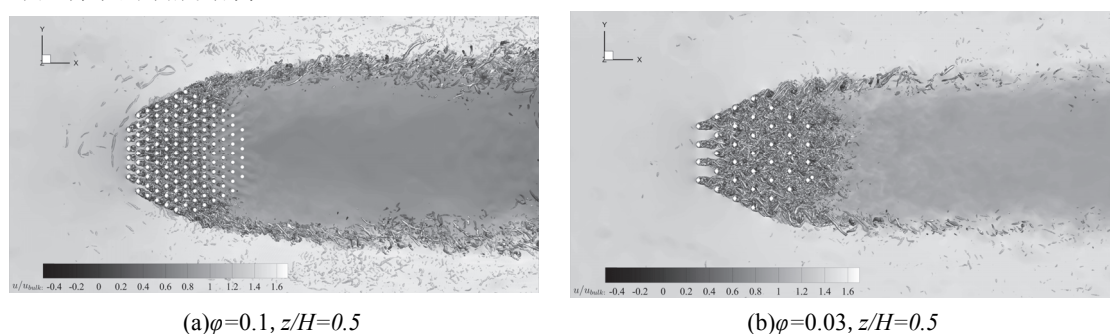


图 7Q 准则显示的 x - y 平面上涡旋结构

4 结语

本文对不同固体体积分数下的刚性挺水植物群落过流进行大涡模拟,将时均流速和湍流强度的模拟值和实验值进行对比,验证结果表明整体上吻合较好,说明了所建立的数值模型具有良好的精确度与可靠性。研究结果表明,水流能从植株间隙直接穿过整个半透性斑块,并引起斑块附近及尾流区的流速、涡量分布以及涡旋结构的变化,这与同尺度实体圆柱尾流特征存在显著差异。因此,不同密度的植物群落明显对水流的时均流场与瞬时流场的特征产生影响,该研究成果将为后续进一步研究植物阻力的时空变化等问题奠定基础。

参考文献

- 1 Kyoungsik Chang, George Constantinescu. Numerical investigation of flow and turbulence structure through and around a circular array of rigid cylinders. 2015, 776:161-199.
- 2 Li R M, Shen H W. Effect of tall vegetations on flow and sediment. Journal of the Hydraulics division,1973, 99(5): 793-814.
- 3ZongLijun, NepfH. Vortex development behind a finitoporous obstruction in a channel. Journal of FluidMechanics, 2012, 691: 368-391.
- 4Nicolle A, Eames I. Numerical study of flowthrough and around a circular array of cylinders.Journal of Fluid

Mechanics, 2011, 679: 1-31

- 5 杨骐, 梁东方, 张景新, 等. 刚性挺水植物群落三维尾流流场特征分析. 水动力学研究与进展(A辑), 2018, 33(04): 20-427.
- 6 N. Jarrin, S. Benhamadouche, D. Laurence, et al. A synthetic-eddy-method for generating inflow conditions for large-eddy simulations. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2006, 27(4).
- 7 Chang K, Constantinescu G. Numerical investigation of flow and turbulence structure through and around a circular array of rigid cylinders. Journal of Fluid Mechanics, 2015, 776: 161-199.

Large eddy simulation of flow through rigid emergent vegetation

LI Han-mei, MAO Jing-qiao, GONG Yi-qing, DAI Jie

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, 210098.

Email: 191302030004@hhu.edu.cn)

Abstract: Aquatic vegetation generally grows in the form of community in rivers and lakes. The flow structure around aquatic vegetation has altered through flow-vegetation interactions. In this paper, the LES is used to model the flow field with vegetation canopy. The vegetation canopy in the channel is generalized as a circular patch, while the stems in the patch are simulated by rigid circular cylinders. The stem-scale and patch-scale flow structure of vegetative flow are resolved with extremely fine grid system. The accuracy of the numerical model is thoroughly verified against experimental data obtained from flume experiments. The simulation results show that the flow can directly pass through the permeable patch from the gap, causing the change of flow structure in the wake region behind the patch, which is significantly different from the wake structure characteristics of a solid cylinder with the same scale as the patch. In addition, the stem-scale flow properties are also varied with the position of the stem within the patch.

Key words: Rigid emergent vegetation; Large eddy simulation; Solid volume fraction; Wake; Flow structure.

重力对桥墩绕流流场精度影响的数值模拟研究

戴杰, 毛劲乔, 龚轶青, 李晗玫

(河海大学水利水电学院, 南京, 210098, Email: dj145@hhu.edu.cn)

摘要: 为了研究重力对桥墩绕流流场精度的影响, 本研究以尖端形桥墩为例, 采用三维水动力数学模型, 分别以自由液面模型和刚盖假定处理计算域上表面边界, 根据水槽实验测量值对比两种液面处理方法下水动力参数的模拟精度。验证结果显示, 基于 VOF 方法的自由液面模型能较好地预测桥墩附近的液面变化状况, 模拟得到的流速分布相对刚盖假定的结果更加准确, 并且能够还原墩前测点中层流速局部降低的特征。值得注意的是, 刚盖假定与自由液面模型在水体表层紊动能的预测中存在定性差异: 前者模拟的表层水体紊动能随高度增加迅速衰减至 0, 而后的模拟值则随高度的提升缓慢增加, 与实验测量值更加吻合, 这表明在重力影响下桥墩周围的液面变化将直接影响所在区域的流场结构。

关键词: 自由液面; 刚盖假定; 桥墩; 数值模拟

1 引言

桥墩等水工建筑物周围的水流是相当复杂的, 在来流不断的剪切作用下会产生多个的涡旋系统, 如墩柱前侧的马蹄形涡及后侧尾涡, 这些涡旋的产生和发展会对桥墩周围的冲刷起着重要影响, 因此对桥墩周围流场的精准模拟具有着重要的理论意义和工程应用价值。

对于自由水面的追踪一直是桥墩绕流模拟的重点, 桥墩周围自由水面的数值模拟通常有两种模拟方法: ①自由液面模型和②刚盖假定。

张力等^[1]用 VOF 方法对不同自由液面高度下的圆柱绕流流场动力学特性及尾迹旋涡进行分析。杨万里等^[2]用 SST 紊流模型并利用 VOF 技术捕捉液面, 对典型桥墩三维绕流的水流力及流场的三维特性进行了精细化研究。岳永威等^[3]应用 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型及 VOF 法模拟均匀流场中的三维圆柱运动, 分析自由液面对圆柱尾迹以及圆柱表面水动力特征参数的影响。Chu 等^[4]采用 LES 紊流模型和 VOF 法, 研究了矩形桥墩对于自由液面的影响。

相对于自由液面, 刚盖假定是自由液面的一种简化, 即假定自由水面为一个规则的固

定面, 各变量在法向方向值为零, 在切向方向梯度值也为零, 因此其没有重力, 也就没有相应的水位波动。张芝永等^[5]采用标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型和刚盖假定对近床面水平圆柱局部冲刷问题进行研究, 通过物理模型实验进行验证, 研究结果表明计算结果与实验结果基本一致。喻鹏等^[6]采用刚盖假定对自由水面进行处理, 对串列双圆柱桥墩局部冲刷进行模拟, 揭示冲刷发展过程的流动特征及冲刷机理。Graf^[7]等发现刚盖假定适合进行低雷诺数的模拟, 并通过圆形桥墩物理实验得到了证实。

本研究以尖端形桥墩为例, 采用三维数值模拟的方法, 分别采用自由液面模型和刚盖假定处理自由水面, 进行水位验证、流速验证及紊动能验证, 以此来探讨重力对桥墩绕流场精度的影响。

2 数值模拟

2.1 数值模型

由于 $RNG\ k-\varepsilon$ 模型考虑了紊动涡旋, 通过修正紊动黏度来体现小尺度涡旋对紊流的影响, 能够更好地模拟结构物周围的紊动流态, 因此本研究采用 $RNG\ k-\varepsilon$ 模型来描述流体的紊动特性。

$$\text{连续性方程: } \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial p u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\text{动量方程式: } \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

$$\text{紊动能 } k \text{ 方程: } \frac{\partial (pk)}{\partial t} + \frac{\partial (pk u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\sigma_\varepsilon (\mu + \mu_t) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_k - p \varepsilon \quad (5)$$

$$\text{紊动能耗散率 } \varepsilon \text{ 方程: } \frac{\partial (p\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (p\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\sigma_\varepsilon (\mu + \mu_t) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{\varepsilon 1} \varepsilon}{k} G_k - G_{\varepsilon 2} p \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

式中: ρ 是体积分数的平均密度; u 、 v 、 w 是在 x 、 y 、 z 3 个方向上的流速分量; A_x 、 A_y 、 A_z 代表 x 、 y 、 z 3 个方向上可流动的面积分析; G_x 、 G_y 、 G_z 为 x 、 y 、 z 3 个方向上的重力加速度; f_x 、 f_y 、 f_z 是 3 个方向的黏滞力; V_F 是可流动的体积分数; p 是作用在流体微元上的压力; k

为紊动能, ε 为紊动能耗散率; μ 为运动黏性系数, μ_t 为紊动黏性系数, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, 其中 C_μ 为经验常数, $C_\mu=0.0845$; σ_k 、 σ_ε 分别为动能和耗散率所对应的 prandtl 数, 均为 1.39; G_k 为紊动能 K 的产生项, $G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$; $C_{\varepsilon 1}^* = C_{\varepsilon 1} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}$, $\eta = (2E_{ij}E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}$, $\eta_0=4.377$, $\beta=0.012$, $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 是经验常数, 分别为 1.42、1.68。

2.2 计算区域及网格划分

本节模拟以 Kahraman 的水槽实验^[8]为参考(图 1), 水槽长 10m、宽 0.6m、高 0.4m, 实验对象为尖端形桥墩。实验水流流量 Q 为 $0.035\text{m}^3/\text{s}$, 水深 H 为 0.133m, 雷诺数 Re 为 58349, 傅汝德数 Fr 为 0.421。

为了精准刻画桥墩附近的流场, 本研究采用局部加密的方式划分网格, 对桥墩附近的核心理动区域采用精细网格进行加密(网格尺寸为 0.25cm), 同时为了降低模型计算量, 对非计算核心区域采用粗化网格进行划分(网格尺寸为 0.5cm), 计算区域加密网格图如图 2 所示, 其中自由液面模型的总网格量为 7313712, 刚盖模型的总网格量为 5565560。

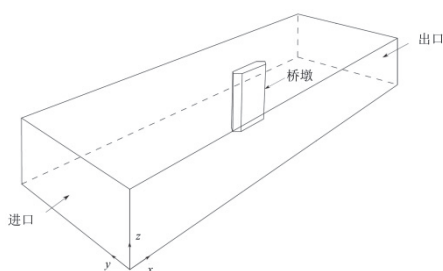


图 1 含尖端形桥墩水槽实验示意图

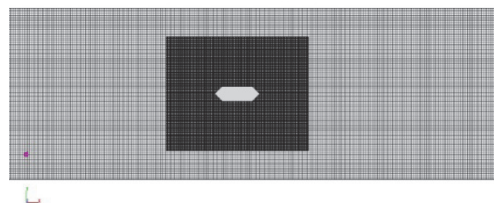


图 2 计算区域平面加密网格

2.3 边界条件

进出口均采用流速边界条件, 流速大小通过流量计算得到为 0.4386m/s , 底部为无滑移边界, 两侧为对称边界, 自由液面模型顶面为压强边界条件, 压强为一个大气压, 并预留足够的空间用于自由液面的发展, 计算域高度 H_1 为 0.4m; 刚盖模型顶面为自由滑移边界条件, 计算域高度与水深 H 同为 0.133m, 分别采用 VOF 自由液面模型和刚盖假定对液面进行处理。

3 结果分析

3.1 水位验证

VOF 的界面捕捉技术能够模拟桥墩引起的液面变化(图 3)，由于尖端形桥墩的存在，导致流速降低，并在墩前引起水位壅高，在墩尾形成了低速回流区及一定程度的水位降低。选取桥墩周围的 4 个测点进行水位验证，表 1 为测点液面变化的实测值和模拟值的对比，结果显示：尖端形桥墩阻水作用相对微弱，桥墩周围液面变化相对平缓，由于墩前壅水，P2 点水位液面上升最高，为 1.86mm，最大的液面降低出现在 P4 点，为-2.56mm，模拟值总体与实验值吻合良好，表明 VOF 模型能够较好的捕捉桥墩附近液面变化。

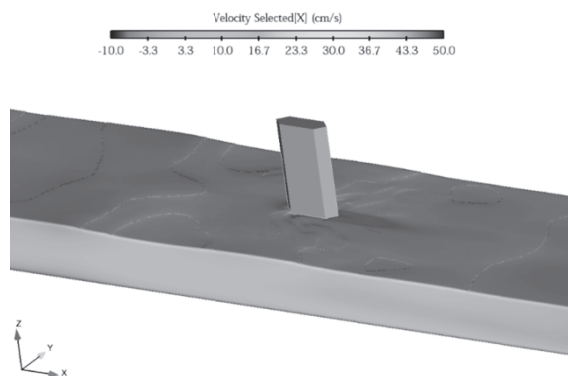


图 3 桥墩周围水面及流速分布图

表 1 测点液面高程验证对比

测点	实验值/mm	模拟值	相对误差/%
P1	-0.84	-0.69	16.67
P2	2.16	1.86	13.89
P3	1.13	-0.96	15.04
P4	-3.14	-2.56	18.47

3.1 流速验证

图 4 中标定了桥墩周围测点 P1~P4 的时均流向流速的实测垂向分布值，并分别给出了基于自由液面模型和刚盖模型的模拟结果，其中实线为自由液面模型模拟结果，虚线为刚盖模型模拟结果。结果表明：4 个测点的实验值与模拟值吻合较好，其中自由液面模型相对于刚盖模型的模拟精度更高。P1 点在 $1 < z/d < 1.5$ 高度范围内自由液面模型的模拟值相对

于实验值较高,其余高度范围内自由液面模型的模拟值和实验值吻合较好;在 P2 点甚至还还原了在 $z=0.9d$ 高度处局部流速降低的情形;P3 和 P4 点由于水面的沉降,在靠近水面处的自由液面模拟值显著降低,与实验值的变化趋势相吻合,刚盖的模拟结果相对于实验值偏大,但是刚盖模型的总体误差均在相对可控的范围内。

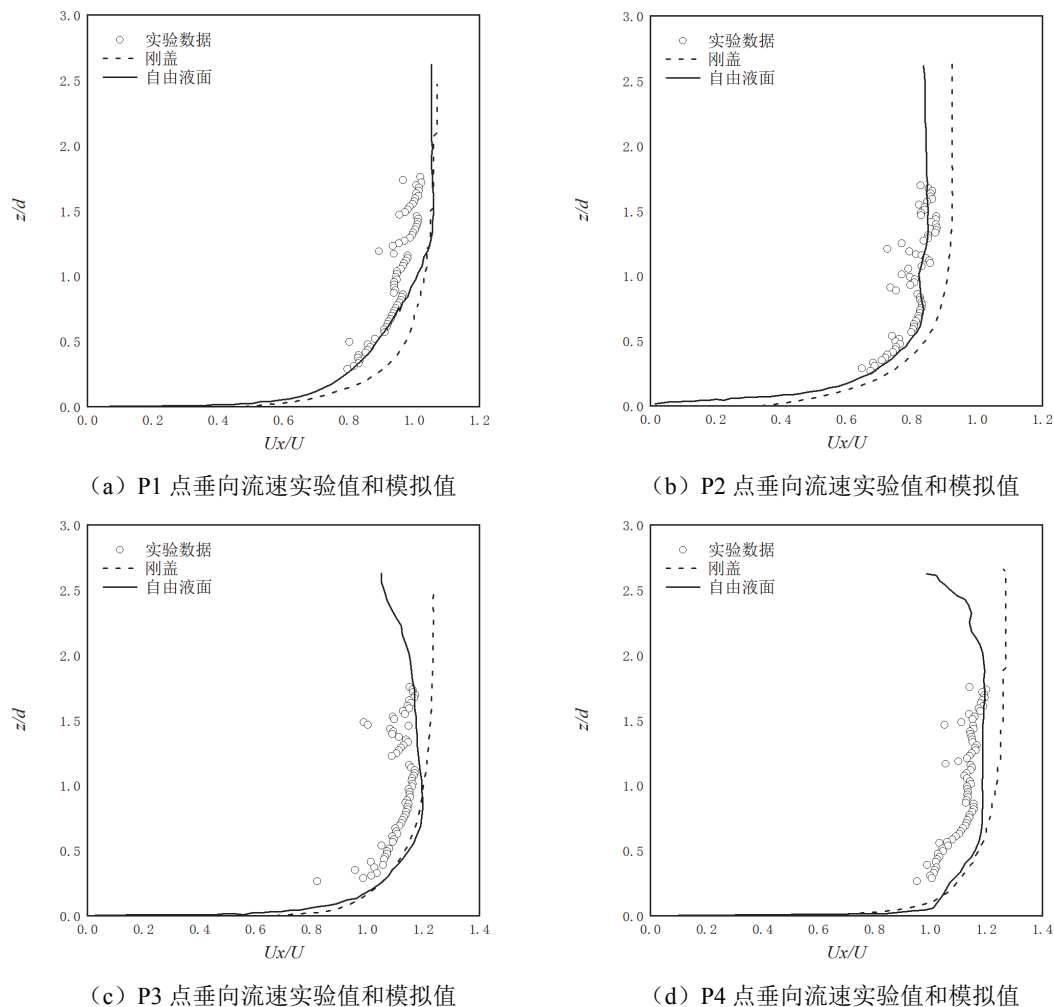


图4 测点垂向流速分布实验值和模拟值对比

3.2 紊动能验证

图5分别比较了P1~P4测点的实测紊动能数据及模拟紊动能数据的垂向分布,通过对比发现自由液面模型对于紊动能(TKE)的模型结果存在非常显著的影响。在刚盖模型中,表面的紊动能迅速衰减至0,而基于VOF模型的自由液面模拟结果则更加贴近于实测值,在 $z>1.0d$ 的范围内,随着高度的增加,紊动能值也不断增加。

尽管自由液面模型能够反映紊动能的变化趋势,但是无论刚盖模型还是自由液面模型

的紊动能数值均低于实测的紊动能数值, 仅在近底面处吻合较好。这表明所采用的 $RNGk-\epsilon$ 紊流模型对于壁面的紊动特征预测良好, 但是对于涡旋占主导地位的区域存在显著偏差, 对于紊动能以及相关雷诺应力的低估, 也将是影响对回流区尺度预测的重要原因。

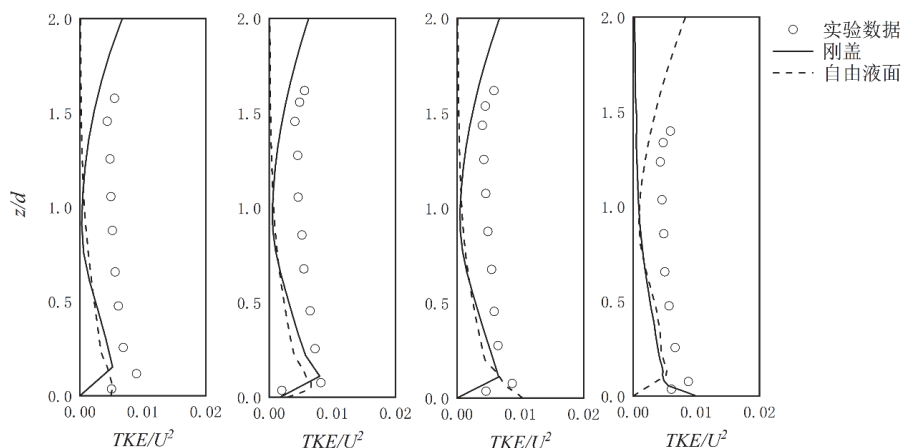


图 5P1~P4 紊动能实验值与模拟值垂向分布对比

4 结论

本文采用三维水动力学数学模型, 分别以自由液面模型和刚盖假定处理自由水面, 模拟尖端形桥墩绕流流场, 并结合水槽实验进行水位验证、流速验证及紊动能验证。验证结果显示, 自由液面模型相对于刚盖模型, 能够更好地与实验值吻合, 这表明重力影响下的桥墩液面变化会对所在区域流场结构造成显著影响。

参考文献

- 1 张力,毛心茹,丁林,等. 自由液面高度对圆柱绕流特性的影响. 工程热物理学报, 2016, 37 (02), 328-331.
- 2 杨万理,吴承伟,朱权龙,等. 桥梁墩柱三维绕流特性精细化研究. 西南交通大学学报, 2020, 55(01), 134-143.
- 3 岳永威,李梦阳,孙龙泉,等. 具有自由液面效应的圆柱绕流三维数值模拟. 船舶, 2012, 23 (04), 16-22.
- 4 Chu, C.-R., Chung, C.-H., Wu, T.-R., et al. Numerical Analysis of Free Surface Flow over a Submerged Rectangular Bridge Deck. J. Hydraul. Eng. 2016, 142 (12), 04016060.
- 5 张芝永,拾兵,范菲菲,等. 近床面水平圆柱局部冲刷二维数值模拟. 计算力学学报 2012, 29 (05),

- 759–764.
- 6 喻鹏,祝志文. 串列双圆柱桥墩局部冲刷精细化模拟.中国公路学报, 2019, 32(01), 107–116.
- 7 Graf, W. H., Yulistiyanto, B. Experiments on Flow around a Cylinder, the Velocity and Vorticity Fields. Journal of Hydraulic Research1998, 36 (4), 637–654.
- 8 Kahraman, R., Riella, M., Tabor, G. R., et al. Prediction of Flow around a Sharp-Nosed Bridge Pier: Influence of the Froude Number and Free-Surface Variation on the Flow Field. Journal of Hydraulic Research2019,1-12.

Numerical simulation of the influence of gravity on the precision of the flow field around the pier

DAI Jie, MAO Jing-qiao, GONG Yi-qing, LI Han-mei

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, 210098.

Email: dj145@hhu.edu.cn)

Abstract: In order to study the influence of gravity on the precision of the flow field around the pier, a 3D numerical model of a sharp-nosed pier was built, using the VOF model and the rigid-lid approximation to trace the free surface respectively, to compare the precision of hydrodynamic parameters according to the experiment. Results show that simulations using the VOF model are in better agreement with experimental data than those using the rigid-lid approximation. Moreover, VOF is able to reproduce the local slow down of approaching flow in front of the pier at mid layer. Importantly, the rigid-lid approximation and the VOF model are qualitatively different in turbulent kinetic energy (TKE): the simulated TKE of the former rapidly decreases to 0 with the increase of the height, while the latter increases slowly with the increase of height, which is more consistent with the experiment data. It indicates that the change in free-surface around the pier directly affects the flow field in the area under the influence of the gravity.

Key words: Free surface; Rigid lid; Pier; Numerical simulation

中国南海沿岸概率海啸风险评估

赵广生，张晓莹，牛小静

(清华大学 土木水利学院水利水电工程系，北京，100084, Email: nxj@tsinghua.edu.cn)

摘要：位于南海东部的马尼拉海沟地震活动频繁，学界普遍认为南海的海啸风险不可忽视。本文采用了一种概率海啸危险性评估(PTHA)方法，并将其应用于评估马尼拉海沟发生地震在大陆沿海产生的海啸危险性。通过对历史地震资料的分析，考虑震级、震源深度和震中位置等的随机性，形成了一套潜在的地震情景集，使用单位源波动叠加的方法模拟了大量的海啸情景，该方法基于深水海啸波的线性假设。目标位置的海啸波由单位点源水位扰动的线性叠加来模拟，可以在很大程度上减少大规模情景模拟的计算负担。基于大量情景的统计分析，结合各地震参数的概率分布，给出了目标区域特定波高的超越概率及重现期。研究发现，与从三亚市到厦门市的其他沿海地区相比，汕尾市对应的外海地区面临的来自马尼拉海沟的海啸风险更大。

关键词：概率海啸风险评估；马尼拉海沟；南海；超越概率

1 引言

南海位于环太平洋地震带，面临着越洋海啸的威胁。学界普遍认为马尼拉海沟是南海内部最可能产生大型地震海啸的潜在区域^[1-3]，近几十年该区域也发生多起局部地震海啸，给菲律宾造成巨大损失^[4]。研究表明，马尼拉海沟两侧的菲律宾海板块正以每年 56~91 mm 的速度向西边的巽他板块俯冲^[5]。这些累计应变可能在马尼拉海沟附近引起 8.8~9.2 级地震^[6]，进而在中国南海海域及其周边大陆沿岸引发灾害性的海啸事件。因此南海地震海啸风险不可忽视。

对于地震海啸风险评估，目前的研究重点分为确定性分析以及概率分析。确定性分析通常是最不利情况下的灾害评估，假定某潜在震源区发生最大可能地震，评估关注地区的海啸波高或淹没情况。这种方法通常会高估潜在风险。概率海啸风险评估 (Probabilistic Tsunami Hazard Analysis, 即 PTHA) 目标是准确量化风险，这有利于在实践中考虑安全与经济效益的协调平衡，可能是更合适的评估手段。

基金项目：水沙科学与水利水电工程国家重点实验室自主课题 (2018-KY-01)、国家重点研发计划课题 (2018YFC0407504)。

目前 PTHA 已经发展出很多较为成熟完善的方法,但是影响地震海啸的震源参数众多且具有很强的不确定性,为充分评估这些参数造成的风险需要大规模的算例情景。本研究采取一种简化方法,基于海啸波在深水区域的线性假设,采用单位水位扰动产生的波动叠加来给出海啸波过程,将数量庞大的地震海啸情景转化为有限的单位水位扰动的传播计算,从而很大程度地简化了海啸风险评估所需计算量^[7]。最终给出我国南海沿岸 100m 水深处在一定年限内可能遭遇潜在地震海啸的波高超越概率。

2 概率海啸风险评估

概率海啸风险评估 (PTHA) 从概率地震风险评估 (probabilistic seismic hazard assessment, PSHA) 这一概念发展演化而来,用于求取某一目标点 TP 在一定年限内所有潜在地震造成的海啸波高 H 超过某临界值 h_c 的概率。

对于某一目标区域 TP,一场地震海啸发生时海啸波高超越概率为:

$$p(H \geq h_c | TP) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N p_{ki} \cdot p(H \geq h_c | E_{ki}) \quad (1)$$

其中 K 表示目标区域受到 K 个潜在地震带的影响, N 表示在第 k 个地震带中可能的地震情景总数。由于中国南海主要受到来自马尼拉海沟一个地震带的影响,因此本研究中取 $K=1$ 。

p_{ki} 表示第 k 个地震带中第 i 个地震情景 E_{ki} 发生的概率,应满足 $\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N p_{ki} = 1$ 。 $p(H \geq h_c | E_{ki})$

为地震 E_{ki} 发生时在目标区域海啸波超过特定波高 h_c 的概率。假设所有震源参数相互独立,则有

$$p_{ki} = \prod_{j=1}^n p_{ki,j} \quad (2)$$

其中 n 为所有震源参数的数量, $p_{ki,j}$ 为地震 E_{ki} 第 j 个震源参数对应概率值。构成地震的震源参数主要有断层尺寸 (长度 L 、宽度 W) 和断层平均滑移量 S 、断裂机制 (断层走向角 ϕ 、倾角 δ 、滑移角 λ)、震级 M_w 、震源深度 D 和震源中心位置。

当把时间因素纳入考量,考虑地震发生符合泊松分布,即在 T 年内某地区发生海啸波高 $H \geq h_c$ 的概率:

$$P(H \geq h_c; TP, T) = 1 - \exp[-v_{M_w} \cdot p(H \geq h_c | TP) \cdot T] \quad (3)$$

其中, v_{M_w} 为地震年平均发生率,为某潜在地震带平均每年发生的大于等于震级 M_w 地震的度量。 v_{M_w} 与关注区域的地壳运动规律息息相关,可以通过历史地震数据统计、断层滑移速率及位移关系推算等方式得到。

3 研究区域和目标点选取

研究选取 (99.0° — 129.0° E, 5.0° — 29.0° N) 范围内的海域进行建模, 包含整个南海海域, 也包括了我国香港、广州、海南、台湾等重要沿海地区, 如图 1 所示。其中黑线示意了马尼拉海沟大致位置, 虚线框示意了研究关注的潜在地震可能发生区域 (117.0° - 123.0° E, 12.0° - 22.0° N)。本研究不考虑海啸波在近岸浅水区域的爬高及淹没过程, 因此评估的 12 个目标位置 (TP) 为我国南部沿海主要城市、港湾或岛屿沿离岸方向扩展到 100m 等水深处的点, 在图 1 中用黑点标记。

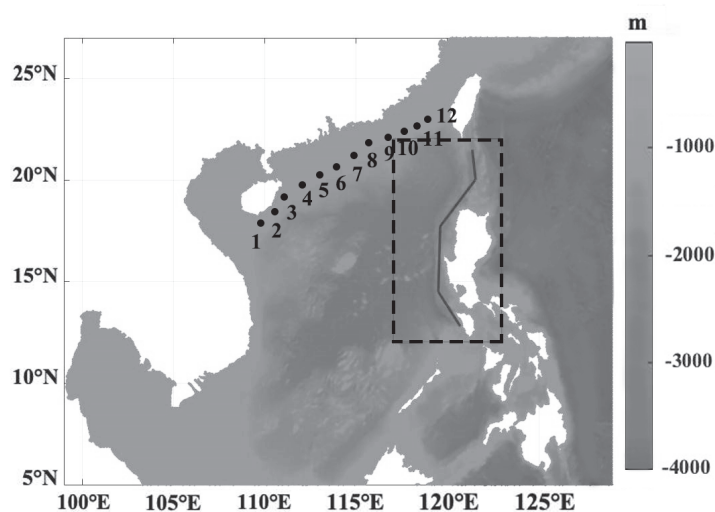


图 1 研究区域和目标点位置

本研究中的潜在震源区为马尼拉海沟区域 (117° — 123° E, 12° — 22° N), 参考美国哈佛大学的 GCMT 和美国地质调查局的 USGS 数据库, 对该区域历史地震数据进行了统计分析, 进而得到各震源参数的概率分布。其中, 采用震级频度概率分布拟合地震发生概率^[8], 根据 USGS 自 1900 年至今的全部地震记录, 得到了震级 7~9.2 级地震的发生概率, 共划分为 23 个震级情景。震源中心假设为均匀分布在震源区的间隔为 0.1° 的震源点, 每个震源点上地震发生概率由历史地震分布计算, 共 6000 个震源点。震源深度、断裂机制等参数假设为相互独立, 可通过历史数据统计得到的频率作为相应的发生概率, 震源深度贡献的情景数量为 10, 其他参数视为已知量。若针对全部情景进行模拟计算, 最终实现 PTHA 所需情景数为 $23 \times 6000 \times 10 = 1380000$ 个。

4 海啸传播的高效模拟方法

实际上,在南海这样的大区域内进行百万量级的水动力数值模拟相当费时,通过常规的直接计算显然不可行。本研究采用一种简化、高效的解决方案(Zhang & Niu, 2020),基于海啸波在深海区域的线性假设,将地震诱发的水面扰动与海啸波的传播演进模拟过程分离,通过单位水位扰动产生的波动叠加来给出海啸波过程,利用有限的单位水位扰动波的传播计算实现数量庞大的地震海啸情景分析。

本研究采用 Okada^[9]模型给出地震发生时造成的水面初始扰动。通常地震发生时,可认为海床表面产生的竖向位移近似等于海表的水面扰动。常用的 Okada 理论模型,基于半无限空间内的弹性理论,可在已知震源参数的条件下求得地表垂向位错。根据 Okada 模型,若要得到地表位移量需要的参数有震源深度、断层倾角、走向角、滑移角、滑块长度、宽度、滑移量。其中,滑块长度、宽度、滑移量可根据地震震级进行相应估算^[10]。

初始扰动的传播演进采用海洋水动力模型 FVCOM 来模拟,但这里不直接模拟地震引发的水面初始扰动的传播。海啸波在深水区域满足线性假设的前提下,可以将其视为由若干的单位波动叠加而成的过程。本研究中,在马尼拉海沟发生地震海啸初始水位扰动可能影响到的区域上(117°E-123°E, 12°N-22°N)均匀布设间隔为 0.1°的单位点源,每个点源上都产生相同二维高斯分布水位:

$$G_i(x, y) = h \cdot \exp\left\{-\left[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2\right]/2\mu^2\right\} \quad (4)$$

其中, (x_i, y_i) 为每个点源中心坐标, $h=1\text{m}$, μ 为高斯分布的标准差,通过参数率定最终取 $\mu=0.05^\circ$ 。每个初始水位扰动单位源在南海海域的传播演进过程,通过数值模拟计算给出,并形成数据库。随后通过式(5)将单位源上的水位进行线性叠加,得到海面初始扰动水位场 Z_{in} 的近似等效水位场 Z_{eq} :

$$Z_{eq} = \sum_{i=1}^n c_i G_i \quad (5)$$

其中 n 为用于求取等效水位场点源总数, G_i 为每个点源上的单位高斯分布, c_i 为每个点源对应的比例系数。从数据库中获取每个单位源传播到目标区域的水位时间过程,通过对单位源的水位过程按照比例系数 c_i 线性叠加,获得该目标区域的海啸波时间过程,进而分析海啸波高等特征参数。前期的研究表明,针对 100m 水深的近海位置,这一近似具有良好的可靠性。

考虑到发生在陆地范围内的潜在地震不构成海啸威胁,因此对单位源布设进行修正,最终共布设 5438 个单位源。与第 3 节中给出的全部潜在地震情景数量相比,已经极大地缩减了计算量。

5 海啸波高超越概率分析

海啸波在深海是典型的浅水波，但在向岸运动过程中，受到地形抬升的浅水作用能量迅速聚集波高急剧增大，线性叠加的方法不再适用，因此本研究没有对爬高淹没这一过程进行详细模拟计算。本研究评估了发生地震海啸时，我国南海沿岸各城市岸线向海 100m 等水深处遭受到的海啸波冲击，分别求取 $h_c=0.1$ 、0.3、0.5、0.7、1.0、1.3、1.5、1.7、2.0m 时的海啸波超越概率。以琼海市、香港对应的近海位置 TP3 和 TP7 为例，图 2 给出了两个 TP 在 50 年和 100 年间海啸波高的超越概率分布。

在已知海啸波高的超越概率时，由式(7)计算可得到给定海啸波高时某 TP 处的年超越概率：

$$P(H \geq h_c | TP) = \nu_{M_w} \cdot p(H \geq h_c | TP) \quad (7)$$

因此该 TP 处出现给定波高对应的重现期 T_r 为：

$$T_r = \frac{1}{P(H \geq h_c | TP)} \quad (8)$$

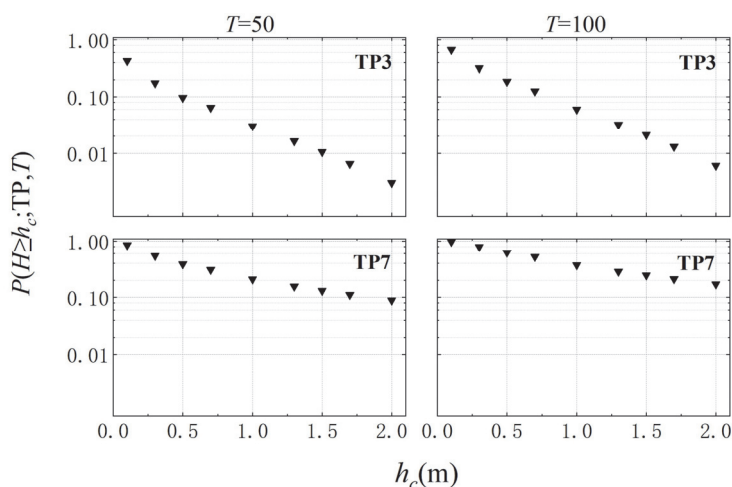


图 2 代表性 TP 海啸波高超越概率

表 1 给出了所有 TP 处海啸波高 $h_c=1.0\text{m}$ 和 $h_c=2.0\text{m}$ 时的超越概率和重现期。可以看到，中国南海沿岸不同位置处的海啸风险有较大差异。总体来讲，由西向东海啸风险逐渐增大。海南岛附近（TP1-TP4）未来的海啸风险要显著低于其他区域，同时靠近台湾的位置（TP11-TP12）面临的来自马尼拉海沟的海啸风险也较小。在南海沿岸向海 100m 等深线上

最危险的区域为 TP8 和 TP9，对应的沿岸地点为汕尾市，其未来 50 年间和未来 100 年间出现大海啸波高的概率最大，且大海啸波高的重现期短，1m 海啸波的重现期在 180 年左右，2m 海啸波的重现期为 400 年左右。因此，TP7-TP11 对应的香港到汕头市外海地区应更加重视来自马尼拉海沟的潜在海啸风险。

表 1 各目标点超越概率和重现期

TP	对应的 沿岸地点	$H \geq 1.0\text{m}$			$H \geq 2.0\text{m}$		
		50 年间 超越概率	100 年间 超越概率	重现期/年	50 年间 超越概率	100 年间 超越概率	重现期/年
1	三亚市	0.028	0.054	1786	0.003	0.006	15795
2	陵水湾	0.039	0.077	1254	0.007	0.015	6793
3	琼海市	0.031	0.060	1614	0.003	0.006	16408
4	茂名市	0.086	0.164	558	0.024	0.047	2074
5	阳江市	0.172	0.315	264	0.066	0.127	734
6	珠海市	0.098	0.187	482	0.030	0.059	1640
7	香港	0.207	0.371	215	0.089	0.170	538
8	汕尾市西部	0.239	0.421	182	0.118	0.223	396
9	汕尾市东部	0.243	0.427	179	0.111	0.210	424
10	揭阳市	0.199	0.358	225	0.091	0.174	521
11	漳州市	0.178	0.324	255	0.076	0.146	631
12	厦门岛	0.164	0.300	280	0.070	0.135	690

6 总结

PTHA 作为较为完善的风险评估方法已经被广泛应用，但是为充分评估某地区全部震源参数排列组合下所有可能地震造成的海啸风险，需要进行大体量的算例模拟。针对这一问题，采用一种基于海啸波在深海的线性特性的简化方法，极大程度地简化了评估所需计算量及耗时。在马尼拉海沟区域布设单位源，用线性拟合任意震源参数组合的地震产生的初始扰动水位场，并通过相同比例的线性叠加，得到目标点位置的水位波动序列。将该方法应用于我国南海，给出了南海沿岸 100m 水深处在一定年限内可能遭遇潜在地震海啸的波高超越概率及对应的重现期。结果表明，海南岛外海地区未来的海啸风险较小，东侧的香港、汕尾市对应的外海地区可能面临较大的海啸风险。

参考文献

- 1 Megawati, K., Shaw, F., Sieh, K., Huang, Z., Wu, T. R., Lin, Y., Tan S. K., Pan, T. C. (2009). Tsunami hazard from the subduction megathrust of the South China Sea: Part I. Source characterization and the resulting tsunami. *Journal of Asian Earth Sciences*, 36(1), 13-20.
- 2 Liu, Y., Santos, A., Wang, S. M., Shi, Y., Liu, H., Yuen, D. A. (2007). Tsunami hazards along Chinese coast from potential earthquakes in South China Sea. *Physics of the earth and planetary interiors*, 163(1-4), 233-244.
- 3 Ren, Y. F., Wen, R. Z., Song, Y. Y. (2014) Recent progress of tsunami hazard mitigation in China. *Episodes*, 37(4), 277-283.
- 4 Nguyen, P. H., Bui, Q. C., Vu, P. H., Pham, T. T. (2014). Scenario-based tsunami hazard assessment for the coast of Vietnam from the Manila Trench source. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 236, 95-108.
- 5 Hsu, Y.-J., Yu, S.-B., Song, T.-R. A., Bacolcol, T. (2012). Plate coupling along the Manila subduction zone between Taiwan and northern Luzon. *Journal of Asian Earth Sciences*, 51, 98-108.
- 6 Hsu, Y.-J., Yu, S.-B., Loveless, J. P., Bacolcol, T., Solidum, R., Luis, A., Pelicano A., Woessner, J. (2016). Interseismic deformation and moment deficit along the Manila subduction zone and the Philippine Fault system. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(10), 7639-7665.
- 7 Zhang X. X., Niu X. J. (2020). Probabilistic tsunami hazard assessment and its application to southeast coast of Hainan Island from Manila Trench. *Coastal Engineering*, 155.
- 8 Cosentino P, Ficarra V, Luzio D. (1977) Truncated exponential frequency-magnitude relationship in earthquake statistics. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 67(6): 1615-1623.
- 9 Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(4), 1136-1154.
- 10 Geller, R. J. (1976). Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66(5), 1501-1523.

Probabilistic tsunami hazard assessment and application to southern coastal areas in China

ZHAO Guang-sheng, ZHANG Xiao-xuan, NIU Xiao-jing

(State key laboratory of hydroscience and engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084.

Email: nxj@tsinghua.edu.cn)

Abstract: Manila trench in the eastern South China Sea is seismically active. It is generally believed that the tsunami risk in the South China Sea can not be ignored. In this paper, a probabilistic tsunami hazard assessment (PTHA) method is used to assess the tsunami risk caused by earthquakes in Manila trench. Through the analysis of historical earthquake data, considering

the randomness of magnitude, focal depth and epicenter location, a set of potential earthquake scenarios is established. A large number of tsunami scenarios are simulated by using the approximate method, which is based on the linear assumption of tsunami wave in deep water. The tsunami wave at the target location is simulated by the linear superposition of the water level disturbance of the unit point source, which can greatly reduce the computational cost of numerous scenario simulations. Based on the statistical analysis of the time series of water level in each scenario, combined with the probability distribution of seismic parameters, the exceeding probability and return period of specific wave height in the target area are given. The study found that the offshore area of Shanwei City has more risk of tsunami from Manila Trench, comparing with other regions along the coast from Sanya City to Xiamen City.

Key words: PTHA; Manila Trench; South China Sea; exceeding probability.

南海岛礁海域风浪流环境数据管理及应用

张燕¹, 刘小龙^{1,2}, 张昕¹, 韩璐阳¹

(1.中国船舶科学研究中心, 无锡 214082, Email: zhangyan@cssrc.com.cn;

2.南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江), 湛江 524025, Email: liuxl@cssrc.com.cn;)

摘要: 为了岛礁海域海洋结构物的工程实际应用, 首先需要对岛礁周边的风浪流环境特性有深入的了解, 以获得合理的设计参数。因此在南海多个岛礁海域布置了测量装置, 持续采集风浪流等环境数据。本文以岛礁海域风浪流实测数据为基础, 建立南海岛礁环境数据库, 对实测数据进行统一管理, 提供风、浪、流等数据的统计分析功能, 如散布图统计、波浪谱以及极值分析, 给出风浪流在近岛礁海域的实际分布特征, 为近岛礁工程的设计和实施提供数据基础和支撑服务。

关键词: 岛礁; 南海; 风浪数据; 数据库

1 引言

中国南海海洋岛礁往往都环绕着宽度数百到数千米、水深很浅的珊瑚礁盘, 这些礁盘不仅具有丰富的渔业和旅游资源, 而且发挥着消波、护岛的重要作用。为开发海洋资源, 可以在岛礁附近布设各种浮体结构物, 作为海洋开发、渔业生产、环境旅游等综合保障基地^[1]。为了这些浮式结构物的工程实际应用, 首先需要对岛礁周边的风浪流环境特性有深入的了解, 以获得合理的设计参数。因此在南海多个岛礁海域布置了测量装置, 持续采集风浪流等环境数据。测量装置部署如图 1 和表 1 所示。

围绕岛礁一, 部署了三台浮标式测波仪, 其中潟湖内采用的是国际最为通用的 DataWell 波浪骑士浮标, 潟湖口部署自研的多参数浮标, 潟湖外部署的是自研的中长期浮标^[2]。在岛礁二设置了两个测点, 部署了两台 ADCP 波潮仪。岛礁三部署了一台浮标式测波仪。岛礁四部署了一台 ADCP 波潮仪。

随着这些测量装置的部署、测量工作的展开, 积累了大批岛礁海域风浪流实测数据, 亟需对测量、采集的数据进行管理、应用、分析, 因此建立了南海岛礁环境数据库系统, 对实测数据进行统一管理, 提供风、浪、流等数据的统计分析功能, 给出风浪流在近岛礁海域的实际分布特征。

基金项目: 工信部高技术船舶科研项目[2016]22、[2019]357; 湛江湾实验室自主项目 ZJW-2019-08

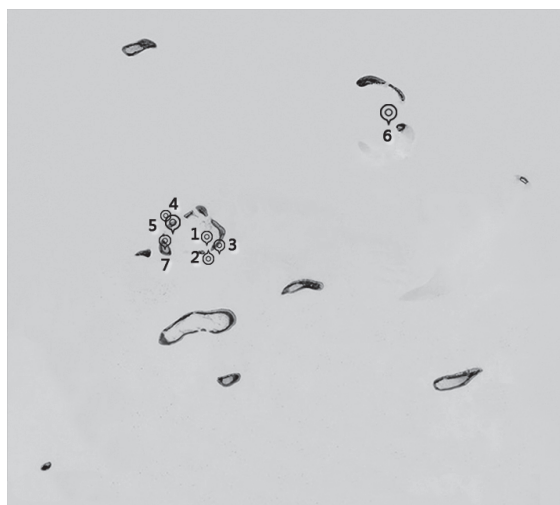


图1 设备部署示意图

表1 测量装置部署信息

序号	岛礁测点	测量装置	测量水深/m	测量物理量	测量时间
1	岛礁一潟湖内	波浪骑士浮标	25	波浪	2014年6月至2018年3月
2	岛礁一潟湖口	多参数浮标	35	波浪、风、流	2014年6月至2018年4月
3	岛礁一潟湖外	中长期浮标	>100	波浪、风	2014年6月至2016年11月
4	岛礁二1号点	ADCP 波潮仪	35	波浪、流	2017年12月至2019年3月
5	岛礁二2号点	ADCP 波潮仪	40	波浪、流	2018年4月至2018年6月
6	岛礁三	浮标		波浪、流	2009年9月至2011年12月
7	岛礁四	ADCP 波潮仪	25	波浪、流	2017年7月至2017年11月

2 系统设计

系统主要由资源层、服务支撑层、应用服务层组成(图2)。

资源层：为系统提供软硬件平台，支撑系统的运行。主要包括指服务器及存储设备等硬件资源，为系统运行提供硬件环境支撑；以及数据库（Oracle）、中间件（Tomcat）、操作系统（Windows）等软件资源，为系统运行提供软件环境和数据支撑。

服务支撑层：系统针对具体业务功能提供的基础性的功能组件或工具，主要包括：工作流组件、文档在线查看组件、数据导入组件、数据处理分析组件、接口组件、数据建模工具、数据展示工具、流程建模工具。

应用服务层：通过应用服务层的建立，提供各项系统功能和服务，并根据人员的不同权限提供不同的功能，包括：浮标信息管理、测点信息管理、测量数据管理、测量数据分析、工作报告管理、系统管理(图3)。



图2 系统框架

浮标信息管理，管理各浮标的基本信息、布放信息、状态信息及性能参数。管理各浮标的布放信息，包括布放时间、布放经纬度、水深、测量时间等。

管理各浮标的布放信息、状态信息及性能参数。布放信息包括：布放时间、布放经纬度、水深、测量时间等；状态信息包括：时间范围、状态、故障与事故描述等，可绘制工作状态图；性能参数包括：测量参数、测量范围、准确度等。

测点信息管理，管理岛礁测点的相关信息。

测量数据管理按各测点、各测量装置进行组织并管理数据，包括岛礁一潟湖内波浪骑士数据管理、岛礁一潟湖口多参数浮标数据管理、岛礁一潟湖外中长期浮标数据管理、岛礁二1号点 ADCP 数据管理、岛礁二2号点 ADCP 数据管理、岛礁三浮标数据管理、岛礁四 ADCP 数据管理。

测量数据分析，提供单个测点的浪、风、流的数据分析；并将各测点测量数据进行融合提供汇总分析，如波浪数据的汇总分析、潟湖内外波浪变化分析、极值分析等。

工作报告管理，提供管理工作周报和月报的功能，包括工作报告的上传、下载等。

系统管理，提供系统正常运行所必备的用户管理、权限管理、日志管理等功能。

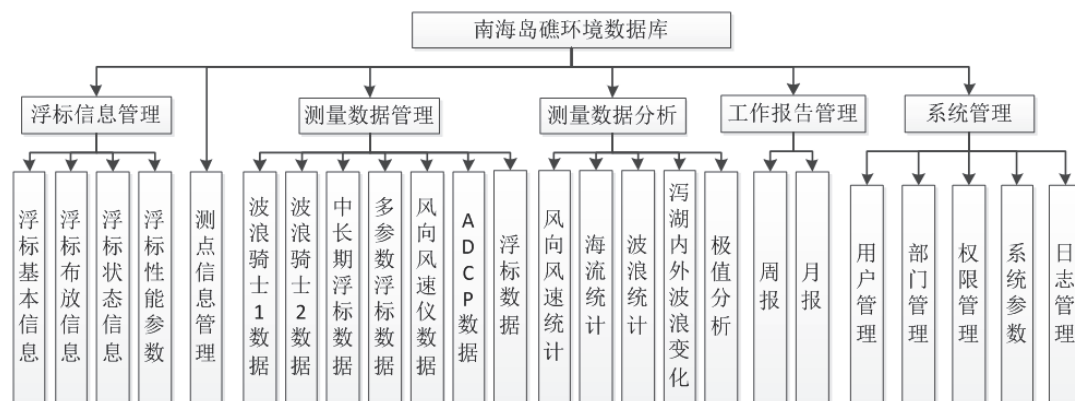


图3 功能结构

4 数据应用

4.1 风的统计分析

岛礁一潟湖口和潟湖外测量了风的数据, 对风的数据提供风速和风向统计, 包括统计风速个数、风级个数和占比、风向的个数和占比等(图 7)。

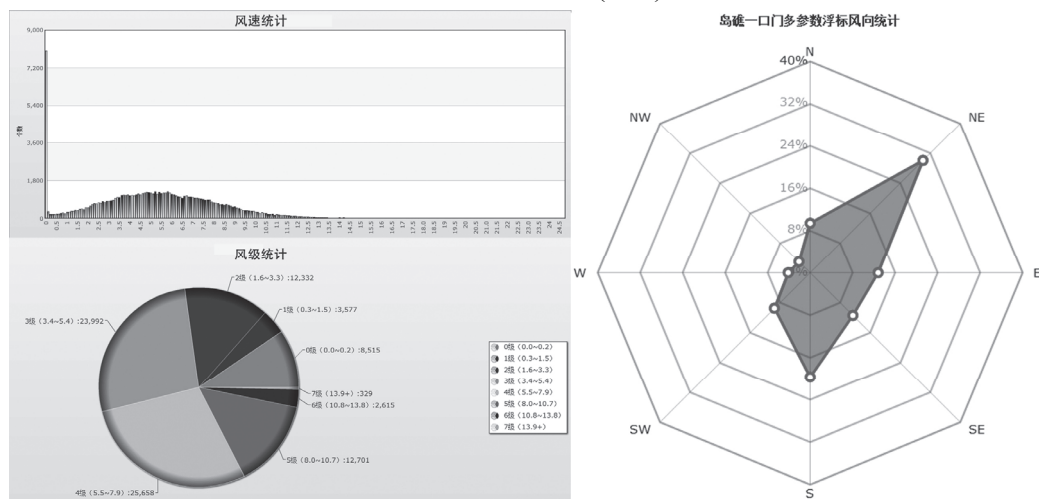


图 7 风的统计分析

4.2 浪的统计分析

对单个的测点, 提供波高随时间变化、波高分布频率、波向随时间变化、波向玫瑰图、谱峰周期随时间变化、跨零周期随时间变化、方向上的波浪散布图及所有方向波浪散布图、波浪谱的统计分析, 并能根据用户输入的时间和数据有效值范围进行筛选数据(图 8 至图 11)。

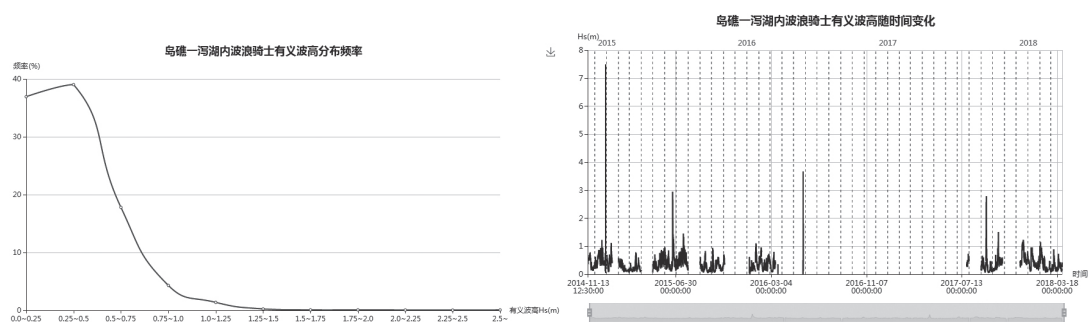


图 8 波高统计

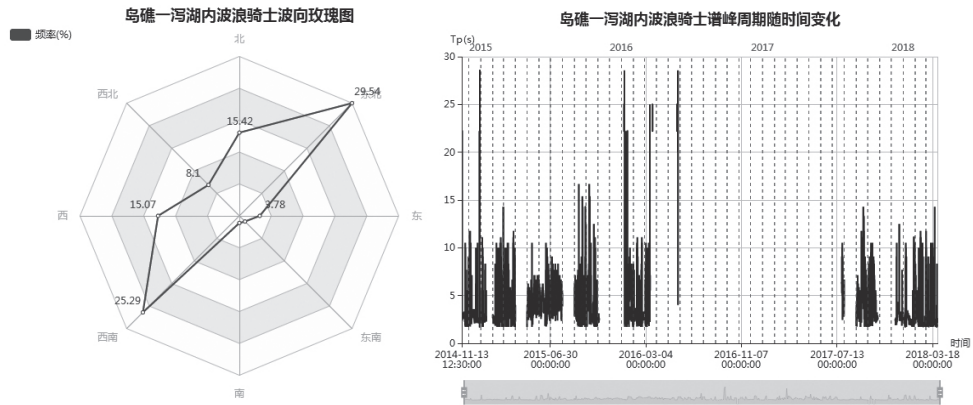


图9 波向和周期统计

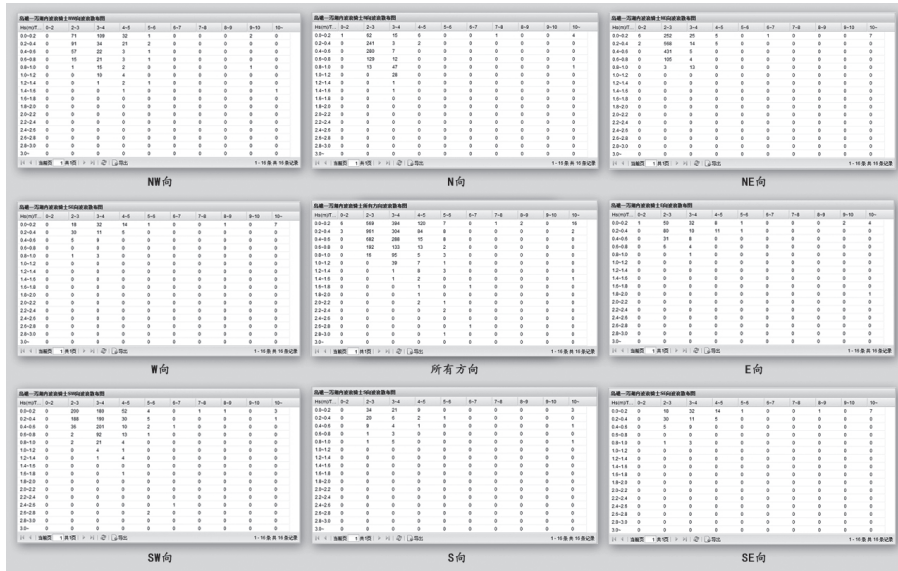


图10 波浪散布

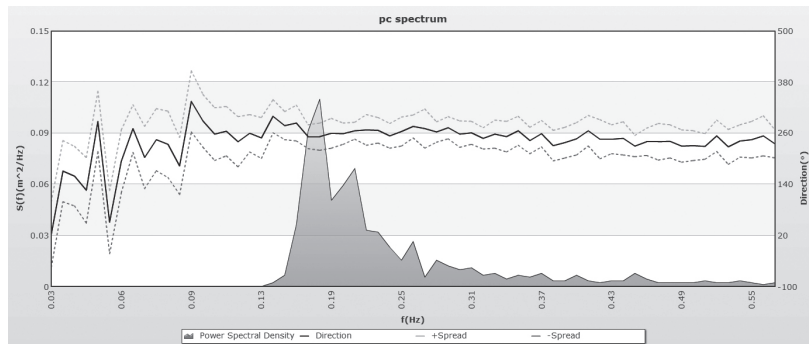


图11 波浪谱

岛礁一测量了泻湖内、泻湖口、泻湖外的波浪数据，汇总同一时刻下，3 个测量装置

的波浪数据, 进行分析; 统计同一时刻下, 潟湖内外的有义波高数据, 显示潟湖内外波浪变化情况, 包括最大比值、最小比值、平均比值和参与统计的数据数(图 12)。

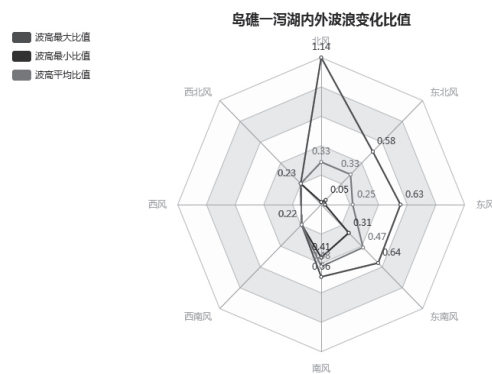


图 12 潟湖内外波浪变化

浪的极值分析, 使用最小二乘法实现参数估计, 根据估计参数, 实现计算不同回归周期(2 年、5 年、20 年、50 年、100 年)的回归值, 并绘制与样本参数的对比图。极值分析计算过程和结果如图 13 所示。

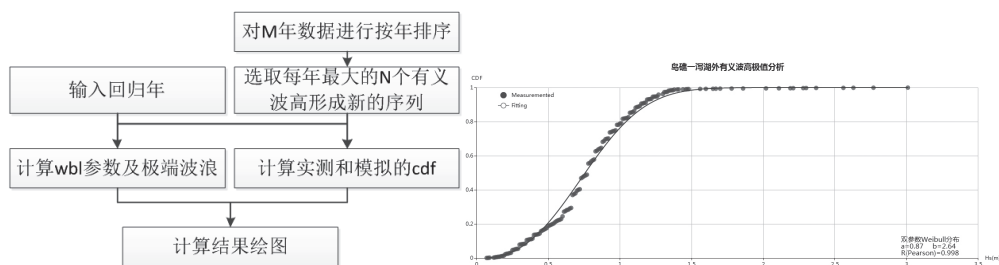


图 13 极值分析计算过程和结果

4.3 流的统计分析

对测量装置测量的流数据进行统计分析, 提供流向、流速统计, 包括统计流速个数、流向个数和占比(图 14)。

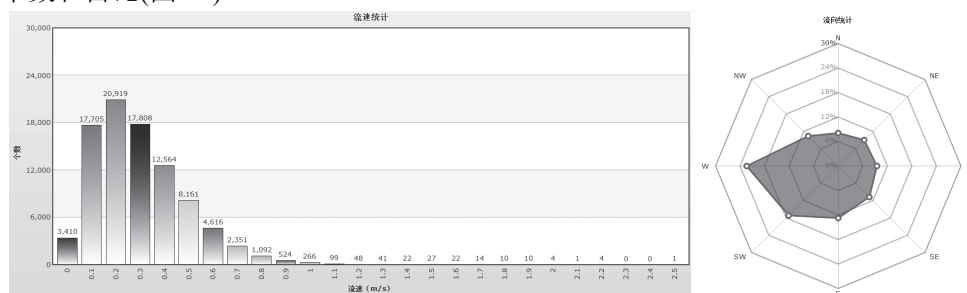


图 14 流的统计分析

5 结论

南海岛礁环境数据库,对岛礁实测数据进行统一管理、应用、分析,实现查询风、浪、流等环境数据及其相应的图和表,具备显示波浪谱和方向谱,具备选定时段内风向、风速、波高、周期、海流流速、海流方向、潮位和水温等环境参数分布特性的统计分析功能,给出风浪流在近岛礁海域的实际分布特征,为研究近岛礁的风浪流情况提供实测依据,为近岛礁工程的设计和实施提供数据基础和支撑服务。

参考文献

- 1 陈天宇,刘小龙,陈文炜,等.近岛礁波浪演化数值模拟和实测研究[J].中国造船,2017,58增刊1: 180-188
- 2 蔡志文,陈文炜,刘小龙,等.南海岛礁泻湖风与波浪实测[C].2018第五届装备环境工程发展论坛论文集, 52-55.
- 3 陈文炜,刘小龙,等. Ochi-Hubble双峰谱在近岛礁海域的适用性研究[J].中国造船,2020,61(1):233-120-130
- 4 宗智,王轶赓,顾学康,等.近岛礁有理分式波浪谱研究[J].舰船科学技术,2018,33(5): 570-575
- 5 夏运强,王海峰,杨锦凌,等.远海岛礁近岸波浪观测技术比选[J].水运工程,2017(5): 27-30
- 6 杨锦坤,宋晓,卢佳唯.中国-东盟海洋环境大数据服务平台设计与实现[J].海洋信息,2018(2): 23-29
- 7 刘波,臧爱清,徐继男.基于船舶航行的海洋环境信息数据库设计[J].舰船科学技术,2019,41(6): 129-132
- 8 李萍.海洋环境数据在船舶及海洋工程领域的应用[J].中国船检,2019,12月: 100-102
- 9 辛冰,符昱,王漪,等.海洋科学数据共享平台设计与实现[J].海洋信息,2018(1): 43-55

Mangagement and application of enviromenttal data of winds, waves and currents near islands and reefs in the South China Sea

ZHANG Yan¹, LIU Xiao-long^{1,2}, ZHANG Xin¹, HAN Lu-yang¹

(1.China Ship Scientific Research Center, Wuxi, 214082, China, Email: zhangyan@cssrc.com.cn;

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhanjiang), Zhanjiang, 524025, China, Email: liuxl@cssrc.com.cn)

Abstract: Practical engineering application of marine structures in sea areas with islands and reefs makes it necessary to have a profound understanding of the environmental characteristics near the islands and reefs so that reasonable design parameters can be obtained. Measurement devices were arranged in several areas with islands and reefs in the South China Sea for continuous collection of environmental data of winds, waves and currents. Based on the measured data, an environmental data bank concerning the areas in the South China Sea with islands and reefs was established for unified management, capable of making statistical analysis of wind, wave and current data like scattering statistics, wave spectra and ultimate values, and providing the actual distribution characteristics of winds, waves and currents in sea areas with islands and reefs. The data bank provides a data foundation and supportive services for the design and implementation of marine structures near islands and reefs.

Key words: islands and reefs; the South China Sea; wind and wave data; data bank

岛屿地形对海啸长波能量俘获的数值模拟

高星宇, 牛小静

(清华大学 水利水电工程系, 北京, 100084, Email: nxj@tsinghua.edu.cn)

摘要: 海啸是一种破坏性很大的自然灾害, 历史上观测到多次海啸在岛屿附近产生很大爬高的情景。目前对岛屿地形下海啸波能量俘获研究大多为解析理论研究, Niu^[8] 基于长波方程给出了海啸波传经圆形岛屿的解析解, 并发现在某些情况下在岛屿周边会激发共振模态。使用基于 Boussinesq 方程的 Celeris 模型对岛屿地形下海啸长波能量俘获展开研究, 通过数值实验检验岛屿周边水波共振现象, 分析入射波频率对于岛屿附近能量俘获的影响。针对理想圆形岛屿地形的系列数值实验结果表明岛屿周边相对波高随着入射波频率变化呈现出非单调的变化, 在部分频段表现出明显的共振特征, 验证了 Niu (2017) 的理论结果。

关键词: 海啸波; 岛屿; 能量俘获; Boussinesq 方程

1 引言

海啸是一种发生频率很低但破坏性很强的自然灾害。海啸波的周期通常是几分钟到几小时, 仅次于潮汐, 其波长可以达到几公里到几百公里。当海啸波传播到近岸地形时, 由于水深减小、波幅增大, 从而淹没滨海地区, 产生巨大的破坏。

由于折射和绕射作用, 当海啸波传经岛屿时, 海啸波可能会受地形影响并聚集在岛屿附近, 给岛屿带来灾害。在 1992 年海啸袭击印尼的 Flores 岛、1993 年海啸袭击日本的 Okushiri 岛以及 2004 年海啸袭击印度的 Car Nicobar 岛事件中, 均观测到在岛屿的背浪面都有较大的海啸爬高并且带来了巨大灾难^[1]。为了保护岛屿上建筑及人员安全, 研究岛屿周围的水动力特性, 特别是面对海啸时岛屿周围的能量俘获现象具有重要意义。

目前关于岛屿周围的水动力研究多为理论分析法。对于坐落在圆形浅滩上的圆柱形岛屿, Homma^[2]、Zhu 和 Zhang^[3]、Yu 和 Zhang^[4]都给出了长波经过岛屿的解析解。其中前两种解析解可变水深分别是径向距离的二次幂和一次幂函数关系, Yu 和 Zhang 的解析解中可变水深是径向距离任意次幂函数关系。对于更加复杂的岛屿剖面形式, Zhang 和 Zhu^[5]以及 Fujima^[6]都给出了长波经过固定岛屿参数的解析解, Jung^[7]以及 Niu^[8]给出了可变岛屿参数的解析解。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51779125)、国家重点研发计划课题 (2018YFC0407504)

基于推导出的解析解公式, Niu^[8]研究了岛屿坡度、岛屿曲率以及其他因素对岛屿周围能量捕获的影响。发现在某些条件下, 会在岛屿周边激发共振模态导致岛屿周围的波高骤增。由于 Niu 的理论解未考虑非线性、色散性以及耗散的影响, 因此这种现象是否合理仍有待验证。

2 数值模型

近年来, 随着计算机性能的快速提高和数值方法的飞速发展, 数值模拟法已被越来越多的学者所采用。许多学者使用非线性浅水模型对 Briggs 等人^[9]的孤岛物理实验进行了数值验证。与理论分析相比, 基于非线性浅水方程的数值模拟方法可以考虑非线性的影响。此外在一些研究中, 研究人员发现色散性也会对海啸的演进产生影响^[10-12]。为了更好地研究近海海啸波的传播规律、考虑海啸波的非线性和色散性, 使用 Boussinesq 模型进行研究很有必要。

使用的数值模型 Celeris 是南加州大学的 Tavakkol 和 Lynett 开发的开源模型^[13]。Celeris 使用有限体积-有限差分的混合格式来求解扩展的 Boussinesq 方程, 使用 GPU 来加速计算, 并提供交互式的可视界面。

本研究中使用 Jung^[7]以及 Niu^[8]文献中使用的理想岛屿地形(图 1), 即可变水深是径向距离的幂函数关系。由于实际海岸以下水深近似是距海岸线距离的三分之二次幂函数关系^[14], 因此设置岛屿曲率参数 $\alpha=2/3$, 其它参数为静水深 $h_0=4\text{km}$, 水面岛屿半径 $r_1=10\text{km}$, 水底岛屿半径 $r_0=90\text{km}$ 。表 1 展示了我们使用的岛屿地形的一些参数, 它与夏威夷群岛的拉奈岛具有一定的相似性。

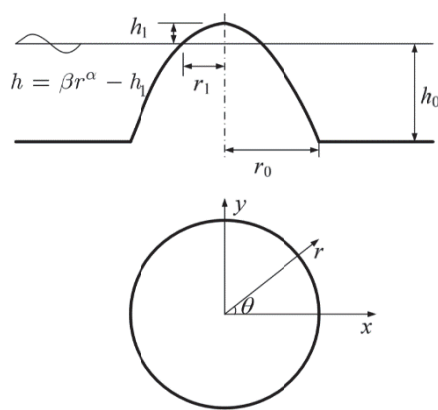


图 1 理想岛屿地形示意图^[8]

表 1 理想岛屿地形和拉奈岛的地形数据对比

岛屿	岛屿面积 (km ²)	海岸线长度	最大海拔
		(km)	(m)
理想岛屿	314	63	1202
拉奈岛	365	75	1026

3 结果和分析

实际情景中一个岛屿可能会将面临各种入射波情况，不同的入射条件会产生不同的危害。在以前的一些研究中^{[7][15]}，研究人员发现当海啸波的波长与研究对象（例如岛屿）的长度相当时，可能会发生强烈的能量积聚。但是很少有研究去分析不同条件与能量聚集现象之间的具体关系，这主要是因为现有的数值模拟主要是模拟实际发生的海啸或使用物理实验数据来验证模型，没有形成一组用于分析的情景集。在本研究中，通过设计不同入射周期的一系列的数值模拟算例来分析入射周期条件与岛屿周围海啸能量积累之间的关系。

3.1 入射波周期的影响

通过改变入射波的周期而不改变岛屿的地形，研究了入射波周期与岛屿周围能量积累之间的关系。使用理想岛屿地形，我们计算了不同周期入射波的一系列情景集。由于海啸波的周期较大，因此我们考虑入射波周期为 300s 及以上的情况。以计算稳定后的平均波高作为参考指标，图 2 绘制了部分不同入射波周期对应的岛屿周围的相对波高分布。

受岛屿地形影响，岛屿迎浪面一侧研究区域的相对波高均呈现两端向前弯曲的条带状分布。当海啸波传播到岛屿近岸地形时，由于水深减小能量聚集，岛屿海岸线附件的波高很大。由于存在绕射现象，岛屿背浪面处的波高也较大，这与观测到的历史海啸事件中岛屿背浪面很大的海啸爬升一致。在海岸线附近的区域中，波高沿岛屿的径向方向向外呈现明显的下降趋势。随着入射波周期的增加，岛屿海岸线附近较大波高簇的数量呈减少趋势，这主要是因为入射波的波长在增加。

将平均波高在入射波波高六倍以上的区域视为危险区域，可以看到 $T = 490s$ 时危险区域面积大于 $T = 455s$ 和 $T = 552s$ ，这表明岛屿周边相对波高并不随入射周期变化而单调变化。为了定量研究不同入射波周期下岛屿周围的波高规律，选择距海岸线 2km、水深约 150m 的点作为参考点，并绘制参考点的平均波高与入射周期之间的关系如图 3。从图中可以看出，数值计算结果与理论解结果吻合较好，都表现出参考点的相对波高并不随入射波周期增大而单调变化的规律，证实了在某些条件下可能发生类似共振的现象。由于理论解没有考虑非线性、色散性以及耗散的影响，理论解结果通常略大于数值计算结果，并且在共振峰处可以达到入射波波高的数十倍。与理论解相比，数值计算在共振峰处的结果更为合理。

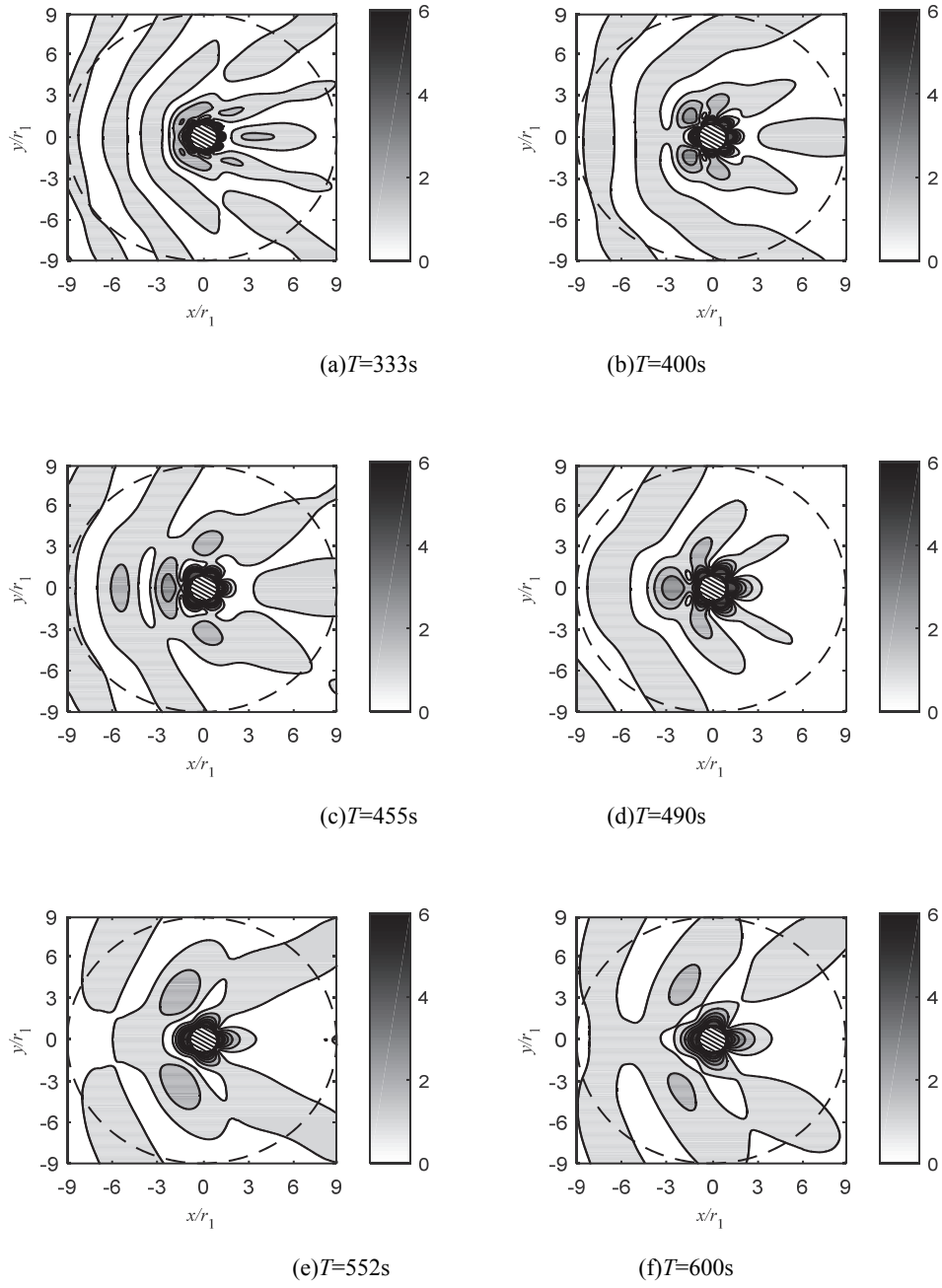


图2 不同入射波周期的相对波高分布

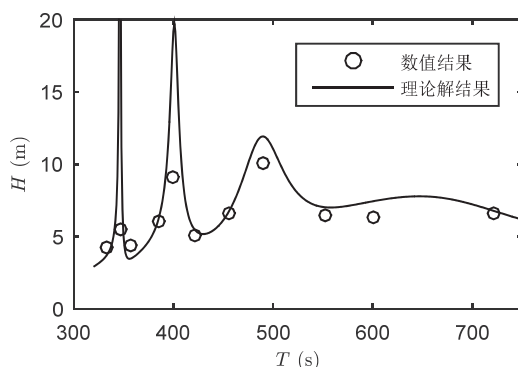


图3 参考点平均波高与入射波周期的关系

3.2 解析解理论

对于共振现象, Niu 在解析解中给出了解释^[8]。在解析解理论中, 内外区域水面高度可以表示为:

$$\eta = \begin{cases} A_l \sum_{n=0}^{\infty} i^n \varepsilon_n J_n(k_0 r) \cos n\theta + \sum_{n=0}^{\infty} B_n H_{1n}(k_0 r) \cos n\theta & r_0 < r \\ \sum_{n=0}^{\infty} D_n R_n(r) \cos n\theta & r_1 \leq r \leq r_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中: A_l 为入射波波幅; $i = \sqrt{-1}$ 为虚数单位; J_n 为 n 阶第一类贝塞尔函数; $k_0 = \sigma / \sqrt{gh_0} = 2\pi / (T\sqrt{gh_0})$ 为入射波在外区域的波数; H_{1n} 为 n 阶的第一类汉克尔函数; ε_n 为雅可比符号:

$$\varepsilon_n = \begin{cases} 1 & n=0 \\ 2 & n \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

B_n 和 D_n 为待定的复数常数, 可由内区域和外区域边界解得:

$$\begin{cases} B_n = -\frac{A_l i^n \varepsilon_n [R_n(r_0) k_0 J'_n(k_0 r_0) - R'_n(r_0) J_n(k_0 r_0)]}{R_n(r_0) k_0 H'_{1n}(k_0 r_0) - R'_n(r_0) H_{1n}(k_0 r_0)} \\ D_n = \frac{2 A_l i^{n+1} \varepsilon_n}{\pi r_0 [R_n(r_0) k_0 H'_{1n}(k_0 r_0) - R'_n(r_0) H_{1n}(k_0 r_0)]} \end{cases} \quad (3)$$

$R_n(r)$ 是关于 r 的一个函数并且在岸线处取值为 1, $R_n(r)$ 可表示为:

$$R_n = \sum_{m=0}^{\infty} a_m \left[1 - \left(\frac{r_1}{r} \right)^q \right]^m \quad (4)$$

岛屿曲率 $\alpha=p/q$ (p 和 q 均为正整数), 式 (4) 中系数 a_m 的前两项取值为: $a_0=1$, $a_1=-q^2v^2/p$, 其中 $v^2=4\pi^2r_1^2/(T^2gh_1)$ 。

1) 当 $p-2q \geq 0$ 即 $\alpha \geq 2$ 时, 系数 a_m 其余取值为:

$$a_m = -\frac{A_{0,m-1}a_{m-1} + \sum_{k=1}^{\min(m-1,p)} A_{k,m-k-1}a_{m-k-1}}{pm^2} \quad (m \geq 2) \quad (5)$$

$$\text{其中: } A_{0,m} = -(0.5p^2 + 1.5p)m^2 + (0.5p^2 - 0.5p)m + q^2v^2 \quad (6)$$

$$A_{k,m} = (-1)^k \left[-(C_p^{k+2} + 2C_p^{k+1} + C_p^k)m^2 + (C_p^{k+2} + C_p^{k+1})m + n^2q^2C_p^k + q^2v^2C_{p-2q}^k \right] \quad (7)$$

2) 当 $p-2q < 0$ 即 $\alpha < 2$ 时, 系数 a_m 其余取值为:

$$a_m = -\frac{A_{0,m-1}a_{m-1} + \sum_{k=1}^{\min(m-1,2q)} A_{k,m-k-1}a_{m-k-1}}{pm^2} \quad (m \geq 2) \quad (8)$$

$$\text{其中: } A_{0,m} = (C_{2+2q-p}^2 - C_{2+2q}^2)(m^2 - m) - (2+2q-p)pm + q^2v^2 \quad (9)$$

$$A_{k,m} = (-1)^k \left[(C_{2+2q-p}^{k+2} - C_{2+2q}^{k+2})(m^2 - m) - [(p-1)C_{1+2q-p}^{k+1} + C_{1+2q}^{k+1}]m - n^2q^2(C_{2q-p}^k - C_{2q}^k) \right] \quad (10)$$

由于 $R_n(r)$ 在岸线处取值为 1, 因此岸线处岛屿地形和入射波产生的影响可以用 D_n 来表征。根据式 (3) 可以给出 $|D_n|$ 与无量纲参数 $r_1\sigma(gh_0)^{-1/2}$ 之间的关系见图 4。

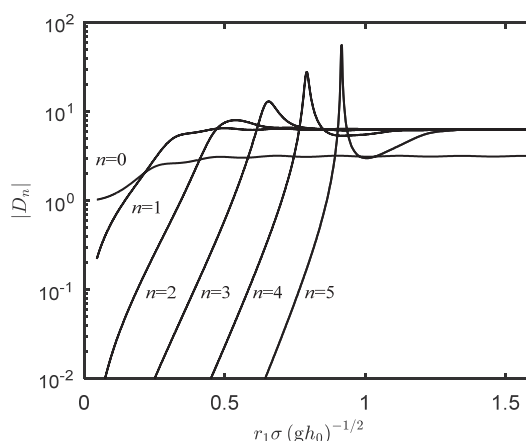


图 4 $|D_n|$ 与 $r_1\sigma(gh_0)^{-1/2}$ 关系

数值计算中入射波周期 300s-800s 对应的无量纲参数 $r_1 \sigma (gh_0)^{-1/2}$ 约为 1-0.4, 在这部分区段内某些时刻 $|D_n|$ 的值会很大导致相对波高很大。由于 n 取不同值时 $|D_n|$ 峰值对应的周期不同, 因此导致最终相对波高不随周期变化而单调变化。在实际情况中, 对于更复杂的岛屿地形, 研究可能引起其共振的海啸条件对海啸预警和预防具有重要意义。

4 结论

使用基于 Boussinesq 方程的 Celeris 模型对岛屿地形下海啸长波能量俘获展开研究, 其中岛屿地形采用理想圆形岛屿地形, 海啸波使用正弦波形式。使用控制变量的方法, 控制地形参数与其它入射波参数不变, 只改变入射波周期来研究入射波周期对于岛屿附近能量俘获的影响。结果显示与 Niu 的理论解^[8]相同, 随着入射波周期的变化, 理想地形岛周围的海啸波高并不总是单调变化并且在某些特定情况下可能会发生共振导致岛屿周边波高度突然增加。理论解由于没有考虑非线性等因素的影响, 结果在海岸线附近的值偏大。本研究中使用的地形是理想的圆形岛屿地形, 对于更复杂的实际地形, 是否存在类似现象还有待进一步研究。

参考文献

- 1 Choi B H, Kim D C, Pelinovsky E, et al. Three - dimensional simulation of tsunami run - up around conical island[J]. Coastal Engineering, 2007, 54(8): 618-629.
- 2 Homma S. On the behaviour of seismic sea waves around circular island[J]. Geophysical Magazine, 1950, 21: 199-208.
- 3 Zhu S, Zhang Y. Scattering of long waves around a circular island mounted on a conical shoal[J]. Wave Motion, 1996, 23(4): 353-362.
- 4 Yu X, Zhang B. An extended analytic solution for combined refraction and diffraction of long waves over circular shoals[J]. Ocean engineering, 2003, 30(10): 1253-1267.
- 5 Zhang Y, Zhu S. New solutions for the propagation of long water waves over variable depth[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1994, 278: 391-406.
- 6 Fujima K, Yuliadi D, Goto C, et al. Characteristics of long waves trapped by conical island[J]. Coastal Engineering in Japan, 1995, 38(2): 111-132.
- 7 Jung T H, Lee C, Cho Y S. Analytical solutions for long waves over a circular island[J]. Coastal engineering, 2010, 57(4): 440-446.
- 8 Niu X. An analytical solution for long waves scattering around circular islands with flexible profile shapes. Coastal Dynamics 2017:1582-1593
- 9 Briggs M J, Synolakis C E, Harkins G S, et al. Laboratory experiments of tsunami runup on a circular island[J].

- Pure and applied geophysics, 1995, 144(3-4): 569-593.
- 10 Hanson J A, Bowman J R. Dispersive and reflected tsunami signals from the 2004 Indian Ocean tsunami observed on hydrophones and seismic stations[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(17).
- 11 Grilli S T, Ioualalen M, Asavanant J, et al. Source constraints and model simulation of the December 26, 2004, Indian Ocean Tsunami[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2007, 133(6): 414-428.
- 12 Lynett P J, Wu T R, Liu P L F. Modeling wave runup with depth-integrated equations[J]. Coastal Engineering, 2002, 46(2): 89-107.
- 13 Tavakkol S, Lynett P. Celeris: A GPU-accelerated open source software with a Boussinesq-type wave solver for real-time interactive simulation and visualization[J]. Computer Physics Communications, 2017, 217: 117-127.
- 14 Bruun P. Coast erosion and the development of beach profiles[M]. US Beach Erosion Board, 1954.
- 15 Dyke P. Wave trapping and flow around an irregular near circular island in a stratified sea[J]. Ocean Dynamics, 2005, 55(3-4): 238-247.

Numerical study on long waves trapped by a circular island

GAO Xing-yu, NIU Xiao-jing

(Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing ,100084.

Email:nxj@tsinghua.edu.cn)

Abstract: Tsunami is a very destructive natural disaster. Historically, it has been observed many times that tsunami wave energy can be trapped by islands and caused large tsunami runup. So far, most researches on tsunami wave energy trapped by islands are analytical studies. Niu (2017) provided an analytical solution based on the long wave equation and found that resonance modes can be excited in some cases. In this study, the numerical model ‘Celeris’ based on Boussinesq equation is used to verify the wave resonance phenomenon and analyze the effect of the incident wave frequency on the energy capture near the island. The numerical results show that the relative wave height around the island does not change monotonously with the period of the incident wave and obvious resonance characteristics occur in some frequency bands, which validate the theoretical results of Niu (2017).

Key words: Tsunami waves; Islands; Energy capture; Boussinesq equation

堰塞坝人工泄槽冲蚀研究

刘进, 马飞, 韩建军, 刘雨轩, 吴建华

(河海大学 水利水电学院, 南京 210098, Email: mafei921@163.com)

摘要: 地震、暴雨等自然灾害诱发山体滑坡, 堵塞河流, 形成堰塞坝, 对下游经济及居民安全产生重大威胁。开挖泄流槽是堰塞坝应急抢险的最主要最有效的工程手段。目前关于堰塞坝的研究, 坝体材料对堰塞坝冲蚀特性的影响尚不明朗。本研究以金沙江白格堰塞坝为原型, 利用物理模型试验的方法, 研究了砂石料堰塞坝和天然土料堰塞坝泄流槽的冲蚀过程。结果表明: 依据几何比尺相似准则确定试验坝料粒径的砂石堰塞坝, 泄槽冲蚀过程较短, 冲槽宽度显著大于原型; 而天然土料堰塞坝人工泄槽冲蚀特性与原型更为相似, 故在堰塞坝溃坝模拟时, 选用天然土作为模型坝体材料更为合理。

关键词: 堰塞坝; 人工泄槽; 模型材料; 比尺效应; 溃决过程

1 引言

堰塞坝是在地震、降雨、火山喷发等作用下, 因其诱发的山体滑坡、泥石流使岩石堆积堵塞河谷而形成的天然坝体。与人工坝体不同, 堰塞坝的形成具有高突发性、高危险性和高复杂性。其坝体形状不规则、结构松散、组成物质不均, 专业人员难以进行有效勘察和及时排险, 因而大部分堰塞坝在形成后很快便漫顶溃坝, 对下游构成严重威胁。2018年11月3日, 金沙江干流白格堰塞坝原址再次垮塌, 因泄流而形成丽江水文史上最大洪峰, 对下游数百千米金沙江沿岸居民生命财产及基础设施造成了巨大威胁^[1]。

天然形成的堰塞坝结构松散, 抗侵蚀能力差, 据不完全统计, 约33%的堰塞坝在形成之后的1d之内溃决, 约70%的堰塞坝会在1个月内溃决^[2]。另一方面, 堰塞坝没有溢洪道, 在强降雨及上游来水情况下, 库容会短时间内急剧增高, 形成漫顶溃坝。调查显示, 漫顶溃坝是堰塞坝溃决的主要形式, 全球因漫顶破坏而溃决的堰塞坝超过40%^[3]。

堰塞坝的应急与排险一直以来都是我国自然灾害防治的重要课题, 国内对风险很小的堰塞坝通常予以保留, 而在处理高风险堰塞坝时, 多采取人工挖渠泄流的方式^[4-5], 如2008

年唐家山堰塞坝等^[6]。通过对泄流槽几何参数及来流量对堰塞坝溃口发展的研究，分析堰塞坝开挖泄流槽情况下的稳定溃决机制，有助于对排险工程中的决策进行有效预测与评估。

本文基于物理模型试验，对两种坝体材料（砂石料和黏土料）的堰塞坝的人工泄槽冲刷过程进行了研究，并对溃坝试验的坝体材料选择进行了讨论。

2 试验装置与方法

试验系统由供流装置、蓄水池、水槽试验段、沉淀池 4 部分组成，如图 1 所示。钢板水箱位于堰塞坝上游，提供上游来水；蓄水池位于水箱与坝体之间，坝体布置在水槽的中间段，下游设置三角薄壁堰测量下泄流量，坝体的下游面和顶部布置摄影机，以记录溃口的发展情况；沉淀池去除水中悬浮颗粒，定期排泥，最后通过水泵循环利用水流。

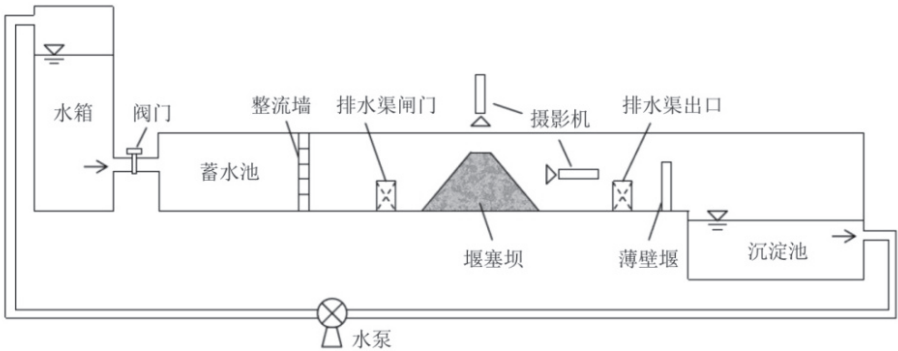


图 1 试验系统整体布置

2018 年，暴雨诱发山体滑坡堵塞了金沙江，形成了 $5\times 10^8\text{ m}^3$ 库容的堰塞湖以及约 80 m 高的堰塞坝——白格堰塞坝。为了排除堰塞坝的突发性溃决风险，采取了开挖泄流槽这一工程措施，泄流槽底宽 3 m、顶宽 45 m、深 15 m，于白格堰塞坝顶进行开挖。白格堰塞坝在漫顶溃决前和漫顶溃决后的情况如图 2 所示，其溃决时间共持续了 53 h。

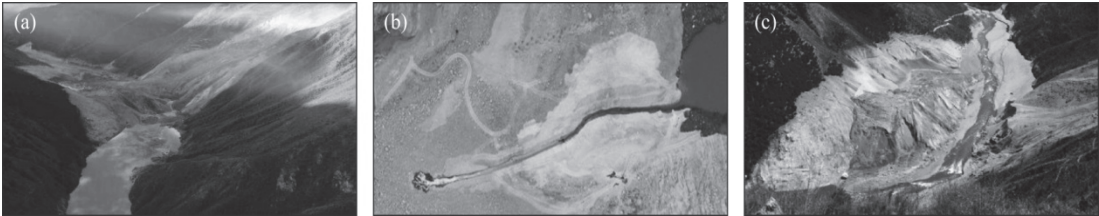


图 2 白格堰塞坝人工泄槽冲蚀过程：(a)堰塞坝，(b)冲刷前，(c)冲刷后

本试验以白格堰塞坝为原型，模拟开挖泄流槽的堰塞坝漫顶溃决过程。模型比尺选为 1:100，故堰塞坝模型宽 1.0 m、高 0.8 m。实际中的白格堰塞坝坝体由 50% 中值粒径为 50.0 cm 的巨石、35 % 中值粒径为 20.0 cm 的石砾和 15 % 中值粒径为 0.5 cm 的沙粒组成。所以在砂石堰塞坝试验中，基于原型堰塞坝体材料粒径分布，试验坝体材料砂石粒径根据几何相似准则确定。试验前，控制上游来流量为 5 L/s，当模拟水库水位到达坝顶高程时，停止上游供水，待在砂石含水量饱和后（静置约 3~4 h），恢复上游供水，开始试验。

在天然土壤材料堰塞坝模型试验中，模型几何尺寸同砂石堰塞坝，筑坝土料含水量约为 7%，采用铁铲等工具进行人工压实。试验中，当蓄水池水位涨至人工泄槽底板高程时，直接进行冲蚀试验，上游来流量也控制为 5 L/s。

3 试验结果与讨论

同白格堰塞坝一样，本研究在堰塞坝模型顶端开挖泄流槽，泄流槽开挖尺寸按原型及几何比尺确定。砂石材料堰塞坝人工泄槽冲蚀过程如图 3 所示。

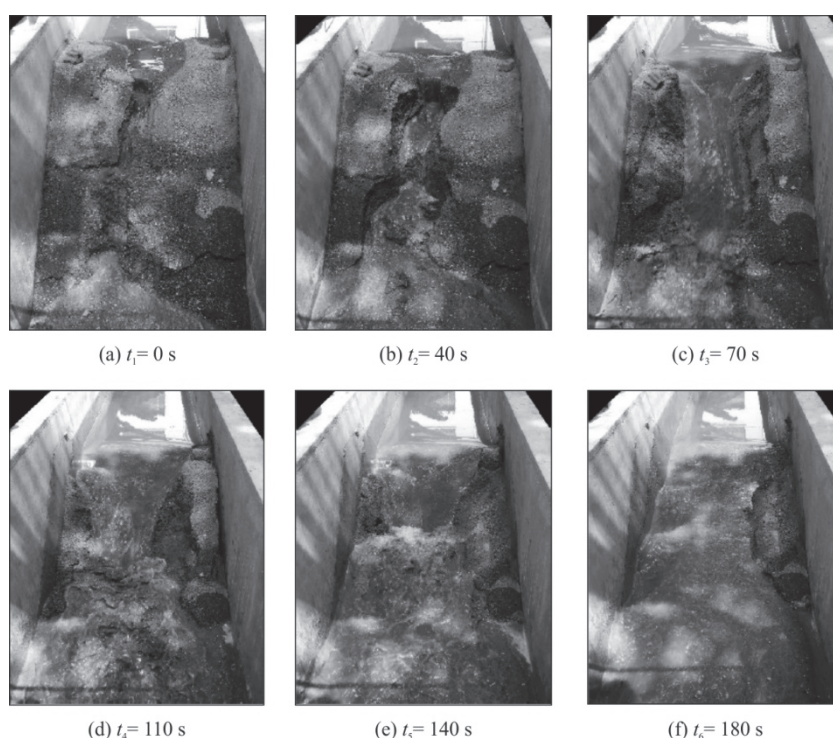


图 3 砂石坝料人工泄槽冲蚀过程

在冲蚀过程中,当下泄水流流经泄流槽槽底时,水流会对坝体顶部产生强烈的下切作用,冲蚀并挟带部分砂土至下游,随后在下游坝面形成一个小的冲刷沟,并逐渐在泄流槽下游面发展成溃口。随着冲蚀过程的持续,冲刷沟两侧的砂土会发生明显的坍塌现象,溃口也因强烈的下切作用和侧面侵蚀而扩大。在该次试验中,整个模型溃决的时间大约持续了 3 min,而根据时间比尺随确定的理论溃决时间应为 0.5 h (白格堰塞坝溃决持续 53 h),可以看出模型的实际溃决时间远远快于理论溃决时间。从图 3 也可以看出,待流量稳定后,溃口也随之消失,从而形成了一个新的稳定的河床,这也与实际的溃决情况不符。

本次试验结果进一步证实了 Amaral 等^[7]的观点,即筑坝材料的几何比尺在试验中需要进行修正。本研究结果同时表明:试验结果与原型数据的不匹配主要是由于材料内摩擦角的不同造成的,即模型试验的材料内摩擦角为 30° ,而白格堰塞坝的材料内摩擦角为 $35^\circ \sim 40^\circ$ 左右,模型材料内摩擦角较小可能导致模型的大规模侧壁塌陷和快速溃决。因此,模型的材料内摩擦角应与原型的材料内摩擦角近似相等,才可获得溃决过程的一般相似性。此外,原型水库太大,无法完全模拟。本研究中,模型水库的库容为 14 m^3 ,远远小于应设的库容(即 500 m^3 水库),从而水力条件很难在试验中完全相似,这也对堰塞坝模型的溃决过程造成了影响。总之,在建立溃坝模型时,仍需要进一步研究如何降低比尺效应的影响。

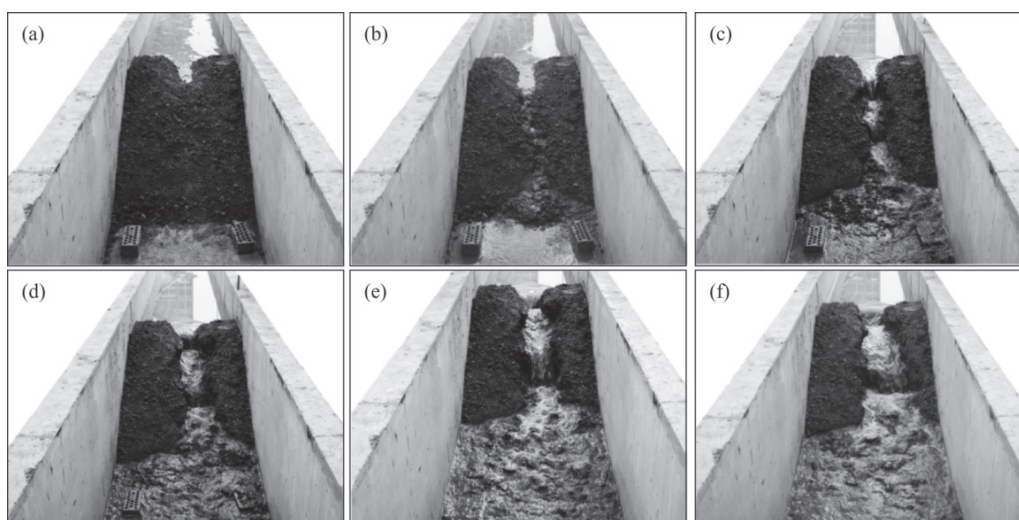


图 4 土壤坝料人工泄槽冲蚀过程

随后,又进行了以天然土壤作为模型坝体材料的人工泄槽冲蚀试验。整冲蚀过程分为四个阶段,如图 4 所示。最初,当漫顶水流的切应力超过堰塞坝材料的临界切应力时,坝体下游边坡开始受冲蚀,且在坡面上逐渐形成冲刷沟,此阶段为第一阶段,如图 4(a)和 4(b)所示;由于在泄流槽出口处和下游表面较为不平整处切应力较大,易在冲刷沟中形成小台阶和小水池,这些小台阶和水池会随冲蚀过程发展成一个或两个明显台阶,此阶段为第二

阶段, 如 4(c)所示; 随着冲蚀过程的推进, 台阶逐渐向上游反溯直至上游溃口, 便形成了所谓的溯源冲蚀现象, 此阶段为第三阶段, 如图 4(d)和 4(e)所示; 第四阶段为稳定阶段, 无论是溃口形态还是下泄流量皆趋于稳定, 如图 4(f)所示。整个溃决过程历时近半小时, 其溃口发展与工程原型较为相符。因此, 以天然土壤作为模型坝体材料更为合适。

4 结论

本文通过试验研究开挖泄流槽对堰塞坝模型的溃决过程的影响, 得到如下结论:

(1) 砂石料堰塞坝模型试验和原型的材料内摩擦角的不同会对坝体溃决过程产生显著影响。因此, 溃坝试验研究中, 试验坝体材料的内摩擦角应与原型保持一致。

(2) 天然土壤堰塞坝模型的溃决过程大致分为如下阶段: 首先在坝体下游坡面上形成冲刷沟, 然后形成若干个台阶和水池, 逐渐发展合并成一两个更大的台阶, 随后台阶逐渐向上游反溯直至上游溃口, 最终达到溃口形态和下泄流量的稳定状态。

(3) 天然土壤堰塞坝人工泄槽冲蚀情况与工程原型较为相符。因此, 以天然土壤作为模型坝体材料更为合适。

参 考 文 献

- 1 王浩, 丁怡婷, 寇江泽, 等. 金沙江堰塞湖抢险救援紧张进行[N]. 人民日报, 2018-10-14(04).
- 2 叶华林. 基于堰塞坝几何形态的数理统计对其稳定性影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- 3 何利君, 陈昊, 杨兴国, 等. 堰塞坝漫顶破坏溃口深度变化数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2012, 8: 126-128.
- 4 Schuster R L. A worldwide perspective on landslide dams[A]. Usoi landslide dam and lake Sarez - an assessment of hazard and risk in the Pamir mountains, Tajikistan[R]. UN, ISDR Prevention Series 1, 2000: 19-22.
- 5 Highland L M, Bobrowsky P. The landslide handbook - a guide to understanding landslides[M]. Reston, Virginia, US Geological Survey Circular 1325, 2008.
- 6 Peng M, Zhang L M, Chang D S. Engineering risk mitigation measures for the landslide dams induced by the 2008 Wenchuan earthquake[J]. Engineering Geology, 2014, 180: 68-84.
- 7 Silvia A., Laura C., Teresa V, et al. Designing experiments to study dam breach hydraulic phenomena[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146(4): 04020014.

Study on breaching of landslide dam with artificial open chutes

LIU Jin, MA Fei, HAN Jian-jun, LIU Yu-xuan, WU Jian-hua

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, 210098.

Email: mafei921@163.com)

Abstract: Landslides caused by earthquakes, rainstorms and other natural disasters block rivers and form dams, posing a real threat to the economy and safety downstream. Digging artificial open chute is one of the most important and effective engineering methods for tackling landslide dam breaching. However, the influence of material composition on the breaching of landslide dams is still unclear. In this paper, the Baige landslide dam on the Jinsha River was taken as a prototype, and the physical model experiments were performed to study the breaching of sand/stone- and earth- constructed landslide dams with artificial open chute. Results indicate that, according to the geometric similarity criterion, the breaching of the sand/stone-constructed model landslide dam is significantly faster than that of the prototype dam, while the earth-constructed landslide dam is more similar to the prototype. Therefore, it is more reasonable to use earth as the model material in the simulation of landslide dam breaching.

Key words: Landslide dam; Artificial open chute; Material; Scale effect; Dam breaching.

波浪中内倾船纵向运动及阻力增值的数值分析

张杰杰, 黄江浩, 姚朝帮, 冯大奎

(a 华中科技大学船舶与海洋工程学院, 湖北 武汉 430074

b 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240

c 船舶与海洋工程水动力湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074

Email: M201971694@hust.edu.cn)

摘要: 内倾船的船首及舷侧采用内倾设计, 使得它的水线面面积与回复力矩与传统外飘船型有很大不同。为探究该船型在波浪中的运动以及阻力增值特性, 本文基于粘性 CFD 软件 Star CCM+, 综合采用重叠网格和数值造波技术, 开展了不同波长、入射波高条件下的船体运动数值模拟, 并采用试验数据验证数值计算的可靠性。通过分析不同波高 ($h/L=0.0159, 0.0191, 0.03178$), 不同速度 ($Fr=0.238, 0.331, 0.397$) 时船体的垂荡及纵摇响应幅值算子可以得出: 研究的内倾船型的垂荡和纵摇运动响应呈现出非线性的特征。

关键词: 内倾船; 阻力增值; RANS 方程; 耐波性

1 引言

与传统船型相比, 内倾船在水线以下是一种外凸的曲线形式, 在水线以上舷侧向内倾斜 $10^\circ - 20^\circ$, 同时由于内倾船多采用穿浪艏设计, 从而可以降低航行中的首部兴波阻力。但内倾船在波浪中运动时也存在其特有的问题: “内倾”设计使船舶垂荡运动剧烈, 甲板上浪的问题比传统船型严重, 这使得船舶的垂荡和纵摇运动具有很明显的非线性特征, 不利于船舶的安全性能; 在随浪航行中, 船舶产生横摇运动, 而船舶的内倾设计容易使船舶的回复力矩不足, 在发生船舶横荡时, 可能会使船舶的横稳性丧失; 在横浪航行中, 内倾设计以及浮心低于重心的设计会使船舶产生横倾, 这就会让船舶更难恢复到平衡位置。

国内外已经有很多关于内倾船在波浪中运动响应的研究, Hashimoto 通过模型试验与理论计算研究了内倾船舶的失稳问题^[1]。Yugo Sanada 等通过使用新的爱荷华州水利科学研究院水池, 研究了 ONRT 船舶在静水中、迎浪以及随浪运动中的航行轨迹和特点^[2]。Galbraith 等通过 Star CCM+ 运用重叠网格技术成功的模拟出船舶在迎浪航行中的参数横摇问题^[3]。王建华等使用数值模拟研究了双螺旋桨全附体 ONRT 船在静水中和不同入射波条件下的 Z

形操纵运动仿真。与传统的船型相比,船舶在大波陡的波浪中的纵向运动会产生上浪和非线性水动力问题^[4]。刘乐等以 DTMB 5613 船模为研究对象,使用 Openfoam 对其在迎浪航行状态下进行数值模拟,通过改变傅汝德数(Fn)以及波陡($H\lambda$)来研究内倾船的非线性运动特征,研究表明,内倾船高速航行状态下在大波陡的波浪中的纵向运动具有很明显非线性特征。船舶内倾设计引起的上浪等非线性现象是导致内倾船非线性纵向运动的主要因素^[5]。王建华等利用自研 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU 研究了全附体内倾船在静水和迎浪航行中的水动力性能,并给出了推力和扭矩的数值预测^[6]。

本论文以 ONRT 船舶为研究对象,运用 Star CCM+对其进行数值模拟,并与模型试验结果进行了对比。探究了不同航速下内倾船在不同波高以及波长在迎浪规则波中航行中的纵摇、垂荡时历曲线以及波浪增阻,分析了内倾船在迎浪航行中运动的非线性特征。

2 ONRT 模型

论文研究对象为 ONRT 内倾船模型,该模型的主要参数如表 1 所示,三维光体模型如图 1 所示。

表 1 ONRT 船模主要参数

排水 (Δ/t)	0.0726
水线间长(L_{wl}/m)	3.147
型宽 B/m	0.384
吃水(T_{wl}/m)	0.112
型深/m	0.266
纵向浮心	1.625
重心	0.156
方形系数(C_b)	0.535

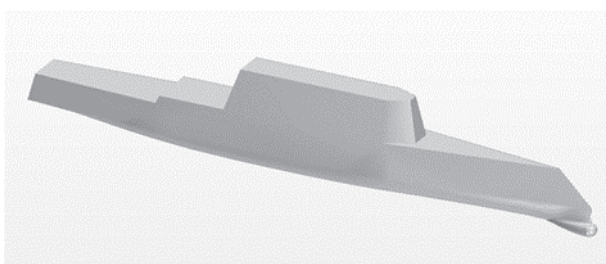


图 1 ONRT 船模三维图

3 数值计算方法

对本文研究中采用的数值计算方法进行简要介绍,主要包括控制方程、湍流模型、造波方法、VOF 波。

3.1 控制方程

物理守恒定律是 CFD 模拟的基础。质量、动量和能量的守恒是物理守恒定律的基础。质量守恒定律公式,

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

ρ 为流体密度, u, v, w 为速度 $\vec{u}$ 在三个方向上的分量。

在直角坐标系下, X, Y, Z 三个方向的动量守恒方程可以表示为,

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + F_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \quad (4)$$

p 为压力, $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yx}, \tau_{yy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{zy}, \tau_{zz}$ 为粘性压力的分量。

3.2 湍流模型

基于 Boussinesq 假设, $k-\varepsilon$ 模型是一种适合于船舶仿真的流域模型^[7]。湍流动能方程(k)和湍流能量耗散率方程(ε)分别为,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu_0 + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + P_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial[(\mu_0 + \frac{\mu_t}{\sigma_s}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}]}{\partial x_j} + C_{s1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{s2} \frac{\varepsilon^2}{k} P_k - R_s \quad (6)$$

3.3 数值造波方法

通过模拟柔性造波板入口边界处的速度分布, 产生入射波。根据无限水深线性波理论, 规则波的自由波面可以表示为,

$$\zeta = a \cos(kx - \omega t) \quad (7)$$

边界速度场为,

$$u = a\omega e^{kz} \cos(kx - \omega t) \quad (8)$$

$$v = 0 \quad (9)$$

$$w = a\omega e^{kz} \cos(kx - \omega t) \quad (10)$$

式中 a 为波幅; ω 为波浪圆频率; k 为波数; u 纵向速度; v 水平方向速度; w 垂向速度。

3.4 VOF 模型控制方程

自由液面的准确捕捉是船舶耐波性的准确预报的基础。本论文主要描述 VOF 波两相流模型。VOF 方法的公式如下,

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_q \cdot \nabla \alpha_q = 0 \quad (11)$$

ρ_q 、 α_q 、 u_q 分别表示第 q 相流动的密度、体积分数和流动速度。

为了改善液体与空气交界面的捕捉精度及控制数值耗散, 文中采用界面压缩的方法进行修正, 并弱化由数值离散格式导致的界面扩散的影响, 相关计算公式如下,

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_q \cdot \nabla \alpha_q + u_c \cdot (u_q \nabla \alpha_q (1 - \alpha_q)) = 0 \quad (12)$$

u_c 为压缩速度, 表达式如下,

$$u_c = C_\alpha |u| \frac{|\nabla \alpha|}{|\nabla \alpha|} \quad (13)$$

其中 $\nabla \alpha / |\nabla \alpha|$ 为气液分界面的单位法向量; $|u|$ 为流动速度的大小, 表征界面的扩散情况; C_α 为锐化因子, 主要用来控制压缩项的使用和压缩量, 取值范围为 0-1。

4 数值模拟计算工况及网格

本文主要研究内倾船在波浪中的非线性运动响应的数值计算工况如表 2 所示,

表 2 计算工况

F_n	波高 (m)	波长 (m)
0.238	0.06	2,3,4,5,6,8
0.331		
0.397	0.05,0.06,0.10	

由于船舶左右两侧对称,所以选择船舶的一半来作为计算对象以减少计算量。计算域的大小为:船前为 2 倍船长,船后为 6 倍船长,船舶上下接近 1.5 倍船长。入口为速度入口,设为来流速度和波传播速度;出口为压力出口,压力为设为静水压力;流体区的上下部分设为速度入口;流体区的中间面设为对称面,侧面设为速度入口。为了避免波的反射,在压力出口前设置了一个波阻尼区。计算域的示意图如图 2 所示,

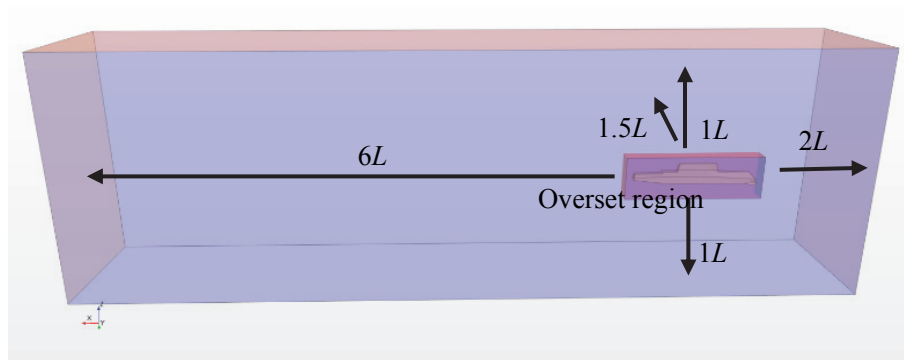
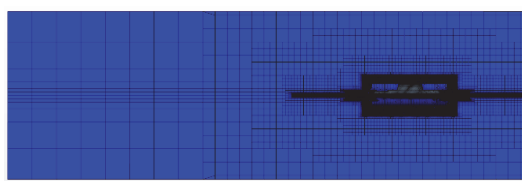


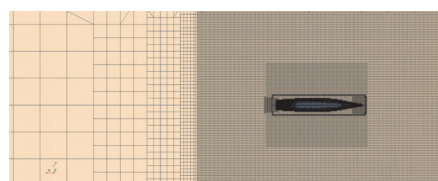
图 2 计算域

根据上述计算域,考虑到内倾船在静水以及波浪中的运动响应,采用了重叠网格技术来处理船体复杂的运动。由于船舶是迎浪航行,在计算过程中释放了两个自由度,即垂荡和纵摇。当使用重叠网格技术时,需要在整个流体区域内设置背景区域和运动区域,压力、速度等相关物理量通过背景区域和运动区域的交界面传递。

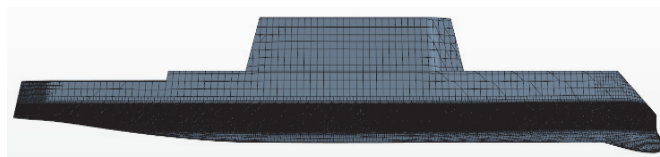
为了满足重叠网格区域与背景网格区域的插值条件以及捕捉波面的形状,对局部网格进行加密,最终选用的网格如图 3 所示,



(a)重叠网格区域及背景域网格



(b) 兴波自由面附近网格



(c) 船体表面网格

图3 内倾船网格

5 计算结果与分析

5.1 数值方法的验证

为了验证 CFD 数值模拟的正确性,在中国特种飞行器研究所的长条拖曳水池中对 ONRT 船波浪中的运动性能进行了试验研究。试验中测量了船体的垂荡、纵摇以及阻力值。其中,入射波长为 6m,波高为 0.06m 时的数值结果与试验结果的对比如表 3 所示,

表 3. 数值模拟与实验结果对比结果

	X_3 (mm)	X_5 (°)	TF_3	TF_5	误差 (X_3)	误差 (X_5)
EFD	26.3	1.74	0.875	0.964	7.79%	7.04%
CFD	24.2	1.61	0.807	0.896		

表中 TF_3 为无因次化垂荡, TF_5 为无因次化纵摇。表达式如下,

$$TF_3 = \frac{x_3}{\zeta_I} \quad (14)$$

$$TF_5 = \frac{x_5}{k\zeta_I} \quad (15)$$

x_3, x_5 分别是垂荡幅值和纵摇幅值, ζ_I 是入射波的波幅, $k = 2\pi/\lambda$ 是波数。

由表可知,计算误差小于 10%,从而说明本文选用的计算网格以及数值算法具有较高的精度。

5.2 波浪中阻力增值特性分析

在考虑了升沉和纵倾的影响下计算出船舶三种速度下在静水中航行的船舶阻力,数据如表 4 所示,

表 4 静水中船舶阻力

F_n	$C_R \times 10^{-3}$	$C_F \times 10^{-3}$	$C_T \times 10^{-3}$
0.238	1.007	3.357	4.364
0.331	0.789	3.291	4.081
0.397	2.503	3.197	5.7

表 4 中 C_T 为总阻力系数, C_R 为剩余阻力系数, C_F 为摩擦阻力系数。

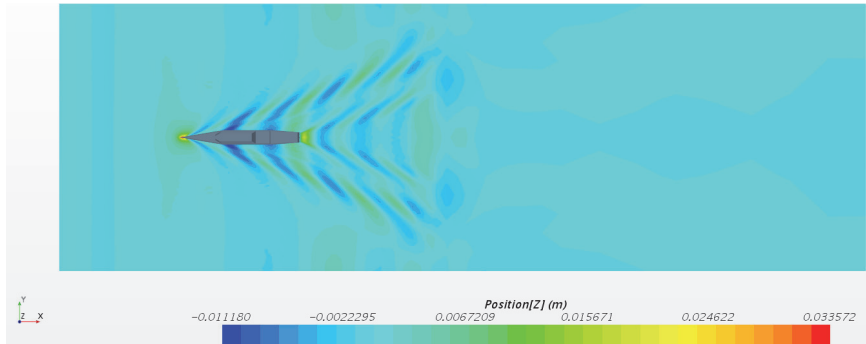
摩擦阻力系数 C_F 也可以用 ITTC-57 公式进行计算:

$$C_F = \frac{0.075}{\log_{10}(\text{Re}-2)^2} \quad (16)$$

经比较数值模拟得出的 C_F 与 ITTC-57 公式计算出的 C_F , 得出相对误差小于 5%。

表 5 C_F 误差

F_n	$\text{Re} \times 10^6$	$C_F \times 10^{-3}$	Error(C_F)
0.238	4.167	3.514	-4.47
0.331	5.784	3.307	-0.48
0.397	6.942	3.199	-0.08

图 4. 波形图 ($F_n=0.238$)

当 $F_n=0.238$ 时, 静水波形图如图 4 所示。可以看出有很明显的开尔文波系。

船舶在由辐射波和绕射波引起的波浪中的阻力增值, 是通过以相同的速度波浪中阻力平均值减去静水阻力来计算, 阻力增值的计算表达式如下,

$$F_{aw} = F_{wave} - F_{calm} \quad (17)$$

图 5 中给出了典型工况下波浪中阻力时历曲线。

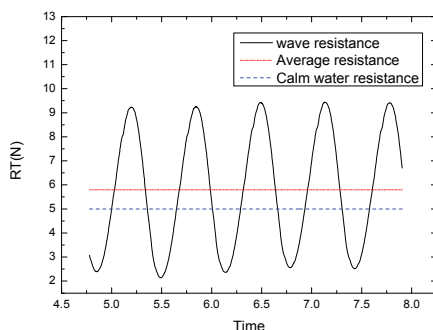


图 5. 波浪增阻时历曲线

5.3 速度与波高对波浪中阻力增值影响规律

论文中分析了不同波高和波长下的波浪增阻，波浪增阻的无因次化表达式为 C_{aw} ，

$$C_{aw} = \frac{(F_{aw})}{\rho g \zeta_{H1}^2 B_{WL}^2 / L_{WL}} \quad (18)$$

B_{WL} 为水线宽， L_{WL} 为设计水线长，计算结果如下：

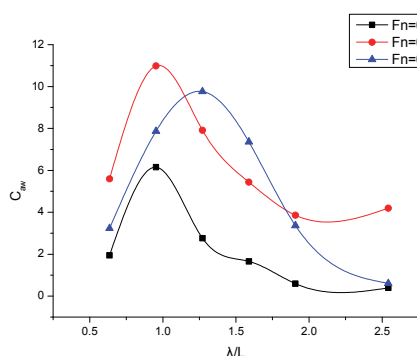


图 6. C_{aw} ($h=0.06m$)

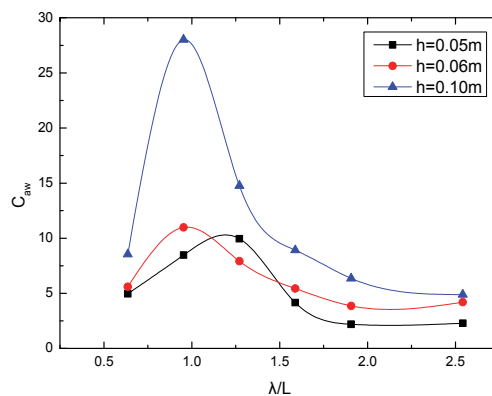


图 7. C_{aw} ($F_n=0.331$)

从上图可以看出，波高相同时，随着波长的增加，内倾船在不同航速下的波浪中阻力增值先增大后减小。速度相同时，阻力增值随着波高的增加而增加，随着波长的增加先增大后减小。在运动响应共振区附近 C_{aw} 达到最大值。 $F_n=0.331$ ， $h=0.1m$ 时 C_{aw} 达到 28.021。

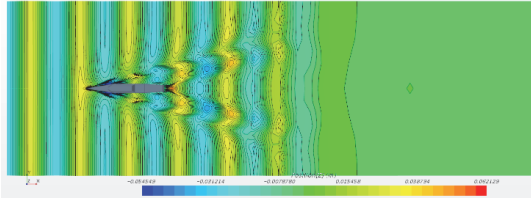
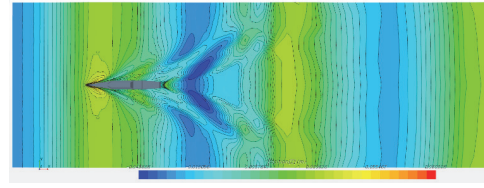
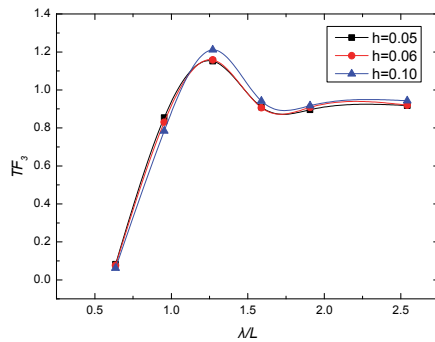
图.8 波形图 ($F_n=0.331, \lambda=2\text{m}$)图.9 波形图 ($F_n=0.331, \lambda=8\text{m}$)

图 8 和图 9 分别给出了 $F_n=0.331$ 处的 $\lambda=2\text{m}$ 和 $\lambda=8\text{m}$ 的兴波自由面波形，从图中可以看出复杂的辐射和绕射波系。

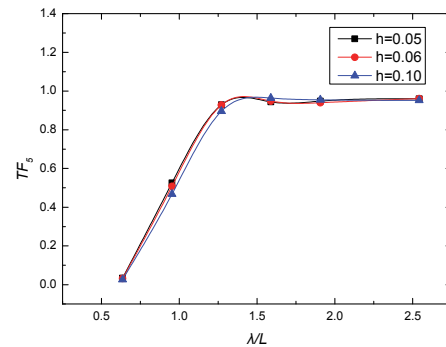
5.4 波浪中运动响应特性分析

5.4.1 速度影响

图 10 显示了不同波高下船舶模型的纵向运动响应算子。从图中可以看出，该模型的垂荡响应算子 (TF_3) 和纵摇响应算子 (TF_5) 在短波区具有线性特征，而在长波区船舶运动响应的非线性特征不明显。随着波高的变化纵摇运动相应算子差别不大；随着波高的增加垂荡运动相应算子增大， $h=0.1\text{m}$ 时的垂荡运动最大。



(a)垂荡响应算子

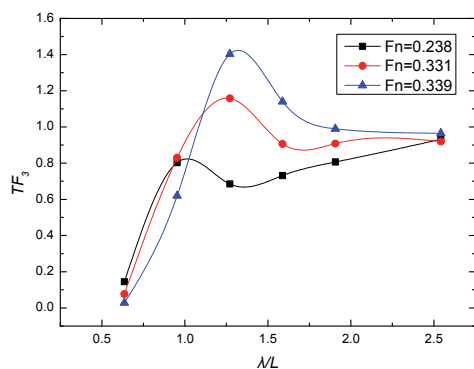


(b)纵倾响应算子

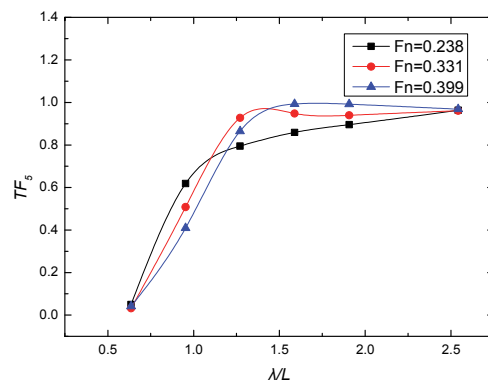
图10 无因次化垂荡和纵倾响应算子

5.4.2 波高影响

船舶模型在不同速度下的纵向运动响应算子如图 9 所示。随着波长的增加，内倾船的垂荡响应算子在不同航速下先增大后减小，而内倾船的纵摇响应算子最终趋于 1。随着航速的增加，垂荡响应算子的最大位置向后移动，最大位置也变大。



(a). 垂荡响应算子



(b). 纵倾响应算子

图. 11 无因次化垂荡和纵倾响应算子;

6 研究结论

本文利用流体力学软件 Star CCM+开展了波浪中 ONRT 船舶的非线性运动和阻力增值特性的数值分析, 通过分析可以得到以下结论:

- (1) 随着波长的增加, 内倾船在不同航速下的波浪中阻力增值先增大后减小, 在运动响应共振区附近达到最大;
- (2) 内倾船的垂荡和纵摇响应算子在短波区具有线性特征, 在长波区具有非线性特征。随着航速的增加, 垂荡响应算子的最大位置向长波移动, 峰值也变大; 随着波高的增加垂荡响应算子逐渐增加, 纵摇响应算子变化不大;

本文研究了内倾船型在不同波高和航速时的运动响应和阻力增值。由于船体内倾, 船舶在迎浪航行中是非线性的。今后, 我们将进一步研究船舶在迎浪中的参数横摇运动, 以及内倾船在斜浪和横浪中的运动和阻力增值。本文受到了工信部民机专项课题(编号: 0261140079, 0262140558)。

参考文献

- 1 Hashimoto H. Pure loss of stability of a tumblehome hull in following seas. Proc. of the 9th Int. Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan, 2009.
- 2 Sanada, Y., Tanimoto, K., Takagi, K., Gui, L., Toda, Y., & Stern, F. Trajectories for onr tumblehome maneuvering in calm water and waves. Ocean Engineering, 2013, 72: 45-65.
- 3 Alistair G, Evangelos B. Parametric rolling of the tumblehome hull using CFD. Proceedings of the 12th

- International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, Glasgow, UK, 2015
- 4 Jianhua, Wang , Z. Lu , and W. Decheng . Numerical simulations of zigzag maneuver of free running ship in waves by RANS-Overset grid method. Ocean Engineering, 2018,162:55-79.
- 5 Le Liu, Xiaofei Mao. Research on the longitudinal nonlinear motion of the Tumblehome ship in the waves based on CFD. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering Edition), 2017,41:682-686.
- 6 Jianhua Wang, Decheng Wan. Investigations of self-propulsion in waves of fully appended ONR tumblehome model. Applied Mathematics and Mechanics,2016,37 (12):134-1358.
- 7 McKean H.P.. Boussinesq's equation on the circle. J . 1981,3:1-2.
- 8 Tezdogan T, Demirel Y K, Kellett P, et al. Full-scale unsteady RANS CFD simulations of ship behaviour and performance in head seas due to slow steaming. Ocean Engineering, 2015, 97:186-206.

Numerical study on the response of nonlinear motion of tumblehome ship in waves

ZHANG Jie-jie, YAO Chao-bang, FENG Da-Kui, ZHANG Zhi-guo

(1 School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Huazhong University of Science and Technology
, Wuhan 430074, China

2 Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China

3 Hubei Key Laboratory of Naval Architecture and Ocean Engineering Hydrodynamics, Wuhan 430074
. Email:M201971694@ hust.edu.cn)

Abstract: The tumblehome ship has a wave piercing hull design with tumblehome sides and transom stern, which making the variation of the water plane area and the restoring moment of the tumblehome ship are very different from other conventional ship. In order to explore the motion performance and added resistance characteristics of the ship in waves, based on viscous CFD software Star CCM +, combined with overset technology and numerical wave making, the numerical simulation of ship motion under different wavelength and height is carried out, and the reliability of numerical simulation is verified by experimental data. By analyzing the heave and pitch response amplitude operators of different wave heights ($h/l = 0.0159, 0.0191, 0.03178$) and different speeds ($F_N = 0.238, 0.331, 0.397$), it can be concluded that the heave and pitch responses of the tumblehome ship are nonlinear.

Key words: ONRT, added resistance , RANS, seakeeping

基于改进循环神经网络的污水处理厂 出水总氮预测方法

廉勃, 尹海龙

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092, Email: yinhailong@tongji.edu.cn)

摘要: 污水处理厂出水总氮 (TN) 是评价水处理效果的重要指标, 精准预测未来短期出水 TN 可为污水处理厂优化运行提供数据支撑。本研究提出基于改进循环神经网络的数据挖掘技术对污水处理效果进行模拟预测。结果表明: 与 BP 神经网络 (BPNN) 在测试集上的平均相对误差 (MRE) 为 10.6% 相比, 循环神经网络 (RNN) 的模拟预测精度较高, 双层 GRU 精度最高, MRE 为 5.25%, 其他 RNN 中精度由高到底分别为单层 GRU>单层 LSTM>单层 RNN。同时加入 Dropout 正则化层会使得预测 MRE 降低 0.18~0.71%。

关键词: 污水处理; 循环神经网络; 总氮

1 引言

污水处理厂的出水 TN 是判断生物系统性能和反馈控制运行的重要依据^[1]。根据微生物反应过程和物理生化反应过程建立的机理模型, 在预测出水指标工作上长期占据主导地位^[2]。但是机理模型存在着化学计量参数和动力学参数测定复杂、对复杂的生化反应过程模拟程度有限的缺陷。

于是, 结合数据驱动技术对污水处理过程进行建模分析逐渐成为一种新的解决思路。数据驱动模型结合统计学方法及机器学习方法。主要方法有偏最小二乘法、主成分分析法、回归分析、支持向量机、随机森林法 (RF)、人工神经网络 (ANN) 等。其中 ANN 具有运算速度快和对非线性问题拟合效果好的特点, 开始广泛应用于出水指标的预测^[3]。林等人基于 ARIMA 模型和 BPNN (反向传播神经网络) 实现通过综合电单耗和 6 项进水指标实现的对出水总氮的预测^[2]; 乔俊飞等基于递归 RBF 神经网络通过 ORP、DO 和温度等 8 项过程指标实现对出水氨氮的在线预测^[4]; 李佟等人基于 BP 神经网络与马尔可夫链通过进水量、5 项进水指标及 MLSS 和 MLVSS 等 8 项指标实现对出水总氮的预测^[5]。考虑到污水处理过程的表征数据属于时序数据, RNN 更适合于基于时序数据的模拟^[6]。因此, 本研究采用 RNN 和改进 RNN 基于当前时刻的进水指标和历史出水指标实现对出水 TN 的预测。

2 RNN 与改进 RNN

2.1 RNN 简介

BPNN 中模型的每次输入是独立的,即网络的输出只依赖于当前的输入,但是在污水处理的过程中,某时刻的出水受前一个时间周期内的进水和过程变量的影响,也和过去一段时间的出水相关。这样的时序数据就需要一种更强大的网络来解决。循环神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)是一类具有短期记忆能力的神经网络^[7]。基础的 RNN 网络结构如图 1 所示,上一个时间戳的状态向量 h_{t-1} 与当前时间戳的输入 x_t 经过线性变换后,通过激活函数 $\tanh$ 后得到新的状态向量 h_t 。通过循环神经网络间网络细胞的传递,能够保留上一个时间节点的信息。从而实现污水处理过程模拟中预测某时刻出水时对之前一个时间段的进水指标、过程变量以及出水指标的考虑。

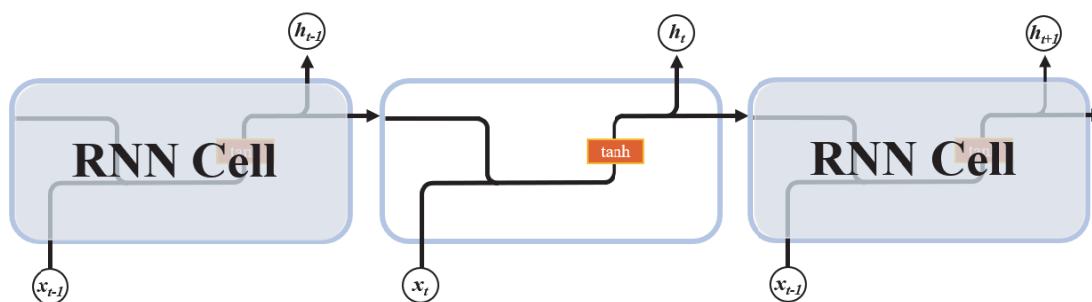


图 1RNN 基础结构

2.2 RNN 弊端和改进模型

循环神经网络在学习过程中的主要问题是由于梯度消失或爆炸问题,很难建模长时间间隔的状态之间的依赖关系。于是采用两种方法改善这种现象,其中一种是长短时记忆网络(Long Short-Term Memory, LSTM)。相对于基础的 RNN 网络只有一个状态向量 h_t , LSTM 新增了一个状态向量 C_t , 同时引入了门控(Gate)机制,通过 Gate 来控制信息的遗忘和刷新。有两个状态向量 c 和 h , 其中 c 作为 LSTM 的内部状态向量,可以理解为 LSTM 的内存 Memory, 而 h 表示 LSTM 的输出向量,相对于基础的 RNN 来说, LSTM 把内部 Memory 和输出分开为 2 个变量,同时利用 3 个门控:输入门(Input Gate),遗忘门(Forget Gate)和输出门(Output Gate)来控制内部信息的流动。

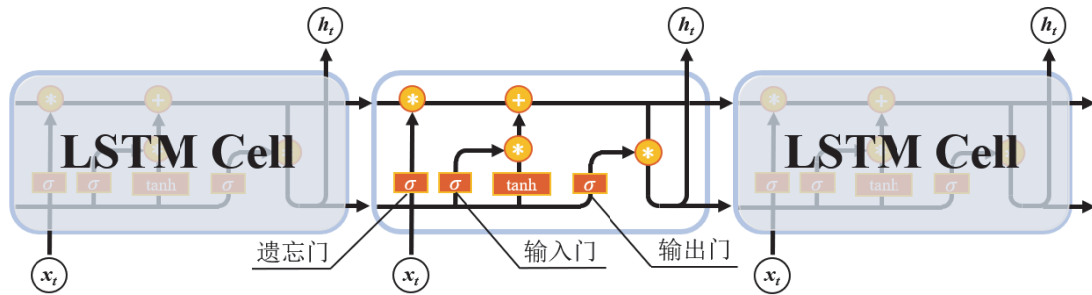


图 2LSTM 基础结构

另一种是门控循环网络(Gated Recurrent Unit, GRU), GRU 是简化版 LSTM 中应用最广泛的变种之一, GRU 把内部状态向量和输出向量合并, 统一为状态向量 h , 门控数量也减少到 2 个: 复位门(Reset Gate)和更新门 (Update Gate)。

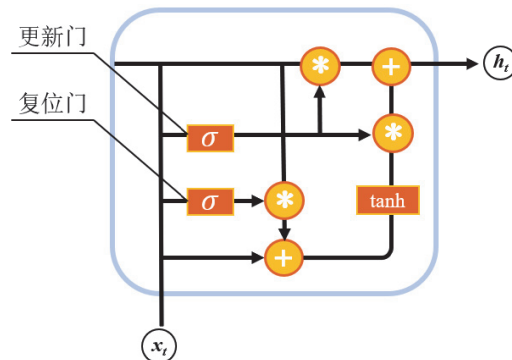


图 3GRU 基础结构

2.3 Dropout 层

随着神经网络模型的逐渐复杂, 优化 (Optimization) 和泛化 (Generalization) 之间的对立逐渐凸显。优化指调节模型以在训练数据上得到最佳性能, 泛化指训练好的模型在测试集上的性能好坏。训练开始时, 随着优化效果的提升, 泛化能力逐渐提高。当训练数据迭代一定代数后, 模型泛化能力不再提高, 即模型开始过拟合 (Regularization)^[7]。Hinton 提出通过 dropout 层^[8]等正则化手段来防止过拟合现象。核心方法是在训练过程中随机丢弃神经元及其连接, 稀释网络复杂度, 从而降低过拟合现象。本研究对多种 RNN 结构均加入了 dropout 层以减低过拟合现象, 提高模型预测精度。

3 预测模型设计

3.1 数据来源与输入输出变量选取

数据取自江苏某大型污水处理厂 2019 年的运行报表。该厂日设计处理规模达到 18 万吨。进水分为两股进入污水处理构筑单元。其中 8 万 t 的主体工艺为倒置 AAO 生物反应池，10 万 t 的主体工艺为改良式交替生物反应池。全年出水指标达标，稳定达到城镇水污染物排放标准》(GB18918)中的一级 A 标准。其中 TN 出水均值与一级 A 标准中总氮出水相比最接近，为标准出水限值的 54.87%，TN 达标对运行管理的要求最高，本研究选择出水总氮作为模型预测输出变量。

表 12019 年出水指标均值

项目	COD	BOD5	SS	TN	NH3N	TP
一级 A 标准	50	10	10	15	5(8)	0.5
2019 年出水均值	16.84	2.40	4.60	8.23	0.40	0.13

该污水厂进出水日均数据有进水水量、进水温度、降雨、进水 COD、进水 BOD₅、进水 SS、进水 NH₃-N、进水 TP、进水 TN、出水 COD、出水 BOD₅、出水 SS、出水 NH₃-N、出水 TP 和出水 TN 等共计 15 项指标。将 2019 年全年 365 条历史数据拆分，分别进行训练、验证和测试。将出水 TN 外的指标分别与出水 TN 做相关性分析后发现，其中进出水的 BOD₅ 和降雨量与出水 TN 相关性较差，相关性系数不足 0.1，于是将这三项指标剔除。并考虑到出水受到之前几天的进水影响，最终采用前五天的上述 11 项指标作为神经网络的输入变量，即每一个出水总氮数据对应一个 5×11 的历史数据矩阵。

表 2 待选取模型变量与出水 TN 相关性

变量名称	与出水 TN 相关性	变量名称	与出水 TN 相关性
流量	-0.14	出水 COD	0.25
进水 COD	0.18	出水 BOD ₅	0.04
进水 BOD ₅	0.02	出水 SS	0.11
进水 SS	0.15	出水氨氮	0.18
进水氨氮	0.40	出水 TP	0.22
进水 TP	0.22	进水温度	0.15
进水 TN	0.41	降雨量	-0.00

3.2 数据预处理

一般而言，污水处理厂的进出水指标的原始数据每一维特征由于来源以及度量单位不同，各项指标的分布范围差异较大，进水 COD 均值高达 343.8，出水氨氮只有 0.40。此时，

计算欧氏距离时,取值范围大的指标会起到主导作用,因此需要对样本数据进行预处理,归一化到同水平取值区间。

表 3 模型输入变量的描述性统计

项目	流量	进 水 COD	进 水 SS	进水 氨氮	进 水 TP	进 水 TN	出 水 COD	出 水 SS	出水 氨氮	出 水 TP	进 水 温度
平均值	16.02	343.80	142.70	32.77	4.21	44.81	16.84	4.60	0.40	0.13	21.38
标准差	1.11	94.36	44.71	6.06	0.86	7.30	4.26	0.92	0.28	0.04	6.13
最小值	10.75	95.6	46	11.8	1.15	21.2	9	2	0.0753	0.024	0
最大值	18.56	722	401	64.3	7.37	75.9	31.2	8	1.98	0.293	30.9

采用标准归一化将每一维数据统一调整为均值为 0, 方差为 1 的数据分布。假设有 N 个样本 $\{x^{(n)}\}_{n=1}^N$, 对于每一维特征 x , 我们先计算它的均值和方差。然后将特征值减去均值, 并处以标准差, 得到新的特征值。

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x^{(n)} \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x^{(n)} - \mu)^2 \quad (2)$$

$$\hat{x}^{(n)} = \frac{x^{(n)} - \mu}{\sigma} \quad (3)$$

3.3 网络结构设计及参数设定

BPNN 的输入指标为 6 项常规进水指标、流量以及温度等 8 项指标。网络结构采用 8 (输入层) -32 (隐含层 1) -32 (隐含层 2) -1 (输出层) 的网络结构进行训练每一层的优化器采用 RMSprop, 迭代代数设定为 100 代, 每一层的激活函数采用 Relu6 函数, 损失函数为平均绝对误差 (MAE, MeanSquaredError)。训练数据 240 条, 验证数据 60 条, 测试数据 50 条。

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |y'_i - y_i|}{N} \quad (4)$$

普通 RNN 的网络结构采用 (5×11 (输入层矩阵) -32 (隐含层) -1 (输出层) 的网络结构, 双层 LSTM 网络结构采用 (5×11 (输入层矩阵) -32 (隐含层 1) -32 (隐含层 2) -1 (输出层) 的结构。多种网络结构的详细配置参数见下表。训练数据 240 条, 验证数据 60 条, 测试数据 60 条。

表 4 神经网络结构及参数设定

	网络结构	激活函数	优化器	损失函数	训练验证比	迭代代数
BPNN	8-32-32-1	Relu6	RMSprop	MAE	4: 1	100
RNN	5*11-32-1	Sigmoid	RMSprop	MAE	4: 1	100
LSTM	5*11-32-1	Sigmoid	RMSprop	MAE	4: 1	200
GRU	5*11-32-1	Sigmoid	RMSprop	MAE	4: 1	200
2-GRU	5*11-32-32-1	Sigmoid	RMSprop	MAE	4: 1	400

4 出水 TN 模拟预测

采用平均绝对误差（MAE，MeanAbsoluteError）和平均相对误差（MRE，MeanRelativeError）来评价和分析不同的网络结构的模拟出水结果。因为每次进行数据拟合实验，采用相同的测试集和验证集得到的网络权重有差异，所以结果中呈现的 MAE 和 MRE 均为待结果稳定后多次拟合实验的均值。

$$MRE = \frac{\sum_{i=1}^N |(y'_i - y_i) / y_i|}{N} \times 100\% \quad (4)$$

4.1 BPNN 预测结果

基于 BPNN 的训练过程中，计算训练集和验证集的损失函数结果如下，可以看到，随着迭代次数的增加，训练和验证误差收敛到 1，验证集与训练集的 MAE 均呈现较低的水平，说明学习过程没有出现过拟合。测试集的相对误差为 10.60%。

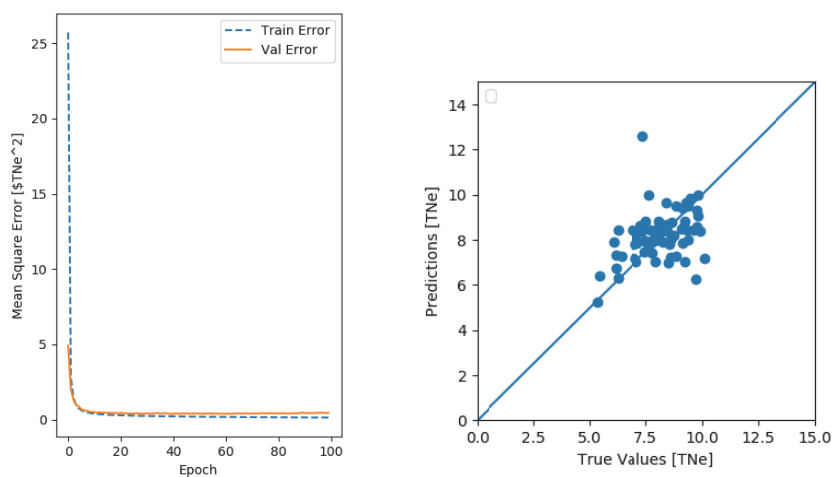


图 4 训练集和验证集的损失函数 MAE /测试集中预测值与真实值散点图

4. 2RNN 及改进 RNN 的预测结果

经过多种 RNN 的网络结构输入历史数据进行训练,对 300~350d 的出水数据进行预测。结果见表 5,相较于 BPNN 的 MRE 大于 10%,基于 RNN 建立的网络结构预测出水 TN 的 MRE 均低于 10%。RNN 中,预测结果优劣由好到差依次为 2 层 GRU>GRU>LSTM>RNN。并且在各种网络中引入 dropout 单元的网络泛化能力要优于无 dropout 单元的网络。

表 5 神经网络模型预测结果

	MRE (%)	MAE (mg/L)	与 BPNN 相比精度提升 (%)
BPNN	10.60	0.887	/
RNN	8.92	0.747	15.85
RNN-dropout-	8.21	0.687	22.54
LSTM	7.71	0.645	27.28
LSTM-dropout	7.32	0.613	30.94
GRU	6.37	0.533	39.90
GRU-dropout	5.80	0.485	45.31
2-GRU	5.25	0.440	50.44
2-GRU-dropout	5.07	0.424	52.20

5 结论

基于污水处理过程中的 6 项进出水指标、水量及温度等数据,建立预测出水 TN 的神经网络模型。

(1) 使用 BPNN 网络结构的模型在测试集上的预测相对误差为 10.60%。预测精度较高。

(2) 使用 RNN 网络结构的模型在测试集上的预测误差在 5.18%~8.92%,效果由高到低依次为 2-GRU, GRU, LSTM, RNN。相对于 BPNN 预测精度提升约 15%~50%。

(3) 使用 dropout 单元将网络正则化,降低模型过拟合现象可以有效提高模型预测精度。随着网络结构越来越复杂,提高效果趋于弱化。

使用 RNN 对污水处理厂的生物处理过程进行模拟预测出水对污水处理厂的控制出水稳定、出水超标预警和提质增效等方面具有一定的实际应用价值。在预测模型后,建立水质和能耗的多目标优化,再对接自动化控制模块为污水处理厂智能优化节能降耗、无人值守提供解决思路。同时,RNN 本身的弊端也很明显,基于数据驱动技术模拟污水处理厂运行没有考虑生化反应机理、物料守恒关系等组分和变量间的内在联系,继续研究数学统计模型与机理模型间内在联系,找到模拟预测结果的合理解释方案,将会大大提高数据驱动技术在污水处理方面的应用和推广。

参考文献

- 1 林佳敏,陈金良,林晶晶,等.BP神经网络和ARIMA模型对污水处理厂出水总氮浓度的模拟预测[J].环境工程技术学报,2019,9(05):573-578.
- 2 Rodriguez-Roda I, Sanchez-Marre M, Comas J, et al. A hybrid supervisory system to support WWTP operation: implementation and validation[J]. Water Science and Technol, 2002, 45(4/5):289-297.
- 3 Hamed M, Khalafallah M, Hassanien E, et al. Prediction of wastewater treatment plant performance using artificial neural networks[J]. Environmental Modelling & Software, 2004, 19(10):919-928.
- 4 乔俊飞,马士杰,许进超.基于递归 RBF 神经网络的出水氨氮预测研究[J].计算机与应用化学,2017,34(02):145-151.
- 5 李佟,李军.基于 BP 神经网络与马尔可夫链的污水处理厂脱氮效果模拟预测[J].环境科学学报,2016,36(02):576-581.
- 6 李泽龙,杨春节,刘文辉,等.基于 LSTM-RNN 模型的铁水硅含量预测[J].化工学报,2018,69(03):992-997.
- 7 FRANÇOIS C. Deep Learning with Python[M]. Washington: Manning Publications Co., 2018.
- 8 Srivastava N, Hinton G, Krizhevsky A, et al. Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting[J]. Journal of Machine Learning Research, 2014, 15(1):1929-1958.

Prediction method of effluent TN in wastewater treatment plants based on improved Recurrent neural network

LIAN Qing, YIN Hai-long

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092.

Email: yinhailong@tongji.edu.cn)

Abstract: Total nitrogen in effluent is the important indicators for evaluating the performance of wastewater treatment plants. Accurate prediction of short-term effluent TN in the future can provide data support for the optimal operation of wastewater treatment plant. In this paper, the data mining technology based on improved recurrent neural network is proposed to simulate and predict the effect of wastewater treatment. The results show that the analog prediction accuracy of the Recurrent neural network (RNN) is higher, the double-layer GRU accuracy is the highest, the MRE is 5.25%, compared with the Mean relative error (MRE) of BPNN by the test data is 10.6%. The accuracy of other RNN is single-layer GRU > single-layer LSTM > single-layer RNN. Adding the Dropout regular layer will reduce the prediction MRE by 0.18 to 0.71%.

Key words: Wastewater treatment; RNN; TN

港内波浪对地震响应的数值模拟研究

郑振钧, 马小舟, 董雨进, 马玉祥, 董国海

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 大连, 116024, Email: maxzh@dlut.edu.cn)

摘要: 本研究将基于 Boussinesq 方程的 FUNWAVE-TVD 模型进行了拓展以考虑地震对波浪运动的影响, 并采用物模模型实验数据进行验证。采用该模型研究了地震扰动下港内波浪的响应。结果表明, 即使周期仅为数秒的地震扰动也可以诱发港内数百秒乃至上千秒的本征周期运动。

关键词: 港湾振荡; 地震; Boussinesq 方程; 本征周期

1 引言

港湾振荡可由多种因素激发, 如海啸、地震波、低频长波和气象波动。港湾振荡可能会干扰港口的装卸作业甚至破坏系泊船及系泊系统^[1]。地震波也可以引发剧烈的水体波动现象。然而, 目前的研究往往局限于地震引发全封闭水域的振荡现象, 如湖泊和大坝。由地震引发的港湾振荡尚未得到系统的研究。

一般而言, 港口建筑物在设计时会考虑地震的影响, 然而却很少能考虑港内水体对地震的响应。特别考虑到地震激励的周期往往只有 0.1~10 s, 而港口的本征周期却通常高达数百秒、上千秒。由地震引发的港湾振荡机理尚不明确。因此, 研究港内波浪对地震的响应, 既有重要的工程价值也有深刻的科学意义。

如果将港口近似看作刚体, 那么地震扰动下港内水体运动可以与液舱晃荡相似。液舱晃荡的数值模拟方法主要有计算流体力学方法和势流理论方法。也有部分学者应用沿水深积分的平面二维方程来研究液舱晃荡, 如完全非线性浅水方程^[2]和 Boussinesq 方程^[3-4]。然而, 这类方程的适用性受到浅水假定的限制, 如垂向特征尺度与水平特征尺度之比要小于 1/10, 这往往不符合与液舱装载的实际情况。幸运的是, 港口的垂向特征尺度往往远小于水平特征尺度, 因此对于模拟地震引发的港内水体晃荡而言, 这类平面二维方程是合理的近似。

在科学研究和工程领域中得到广泛使用 FUNWAVE-TVD 模型是基于弱色散性、全非线性的 Boussinesq 方程开发的^[5], 可以模拟波浪折射、绕射、反射、波浪非线性相互作用

等复杂的物理现象。本研究将 FUNWAVE-TVD 进行了拓展,通过在动量方程添加随时间变化的源项来考虑地震效应。该拓展得到了物理模型实验结果的验证。随后,将位于斯里兰卡的汉班托塔港作为关注对象开展地震引发港内水体振荡的研究。

2 模型拓展和验证

在地震的作用下,港口边壁会发生运动。为了避免动边界条件的模拟,我们将坐标系固定在晃动的地面上,由于非惯性参考系而产生的惯性力即为地震的影响。添加了惯性加速度的 FUNWAVE-TVD 控制方程如下:

$$\eta_t + \nabla \cdot [H(\mathbf{u}_\alpha + \bar{\mathbf{u}}_2)] = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{u}_{\alpha,t} + (\mathbf{u}_\alpha \cdot \nabla) \mathbf{u}_\alpha + (g - a_z) \nabla \eta + \mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2 + \mathbf{V}_3 - \mathbf{a}' = 0 \quad (2)$$

其中 ∇ 是水平梯度算子, $H = h + \eta$ 是总水深(即静水深 h 加上瞬态的波面高程 η), a_z 和 $\mathbf{a}' = (a_x, a_y)$ 是本研究添加的因地震导致的惯性加速度, g 是重力加速度,下标 t 代表时间偏导数, $\mathbf{u}_\alpha$ 、 $\bar{\mathbf{u}}_2$ 、 $\mathbf{V}_1$ 、 $\mathbf{V}_2$ 和 $\mathbf{V}_3$ 的具体表达式见[5]。为实施有限体积法离散,将(2)改写为守恒形式

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_t + \nabla \cdot \left[\frac{\mathbf{M}\mathbf{M}}{H} \right] + \nabla \cdot \left[\frac{1}{2} (g - a_z) (\eta^2 + 2h\eta) \right] &= \eta_t (\mathbf{V}'_t - \bar{\mathbf{u}}_2) \\ + H (\mathbf{u}_\alpha \cdot \bar{\mathbf{u}}_2 + \bar{\mathbf{u}}_2 \cdot \nabla \mathbf{u}_\alpha - \mathbf{V}_1'' - \mathbf{V}_2 - \mathbf{V}_3 + \mathbf{a}') &+ (g - a_z) \eta \nabla h \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{M} = H(\mathbf{u}_\alpha + \bar{\mathbf{u}}_2)$, $\mathbf{V} = H(\mathbf{u}_\alpha + \mathbf{V}')$ 。 $\mathbf{V}'$ 和 $\mathbf{V}_1''$ 具体表达式见[5]。

连续性方程(1)和动量方程(3)采用有限体积法离散,而源项采用有限差分法离散。采用四阶 MUSCL-TVD 方法获取数值通量。采用具有强稳定性的三阶 Runge-Kutta 方法进行时间积分。在每个 Runge-Kutta 步中,波面可以通过时间积分直接得到,而速度通过求解三对角稀疏矩阵得到。采用基于 Courant-Friedrichs-Lewy (CFL)准则的自适应时间步长方案。

采用文献[6]的物理模型实验结果对数值模型进行验证。实验布局见图 1,水箱长 0.57m、水深 0.15m。根据的解析解,可计算水箱的第一阶本征频率 $\omega_0 = 6.058 \text{ rad/s}$ 。参照的实验设置,水箱受余弦变化的水平运动激励。运动频率分别为 $0.583 \omega_0$ (case 1) 和 $1.0 \omega_0$ (case 2),对应非共振和共振条件。水箱所受加速度振幅分别为 0.0624 m/s^2 (case 1) 和 0.175 m/s^2 (case 2)。

case 1 的结果如图 2(a)~(c)所示,可见数值解与模型实验结果吻合较好。波面呈现的调制现象是由于激励频率与水体本征频率存在差频而产生的。在波峰和波谷时,数值解没有

精确地吻合实验结果，这可能是方程的弱色散性限制导致的。case 2 的结果见图 2 (d)~(f)，可见数值解很好地捕捉到了液舱晃荡的共振现象。波面运动呈现了强非线性，即波峰变陡、波谷变坦。波高快速增长，在接近 0.16m 时，数值的不稳定导致了数值溢出而中断模拟。

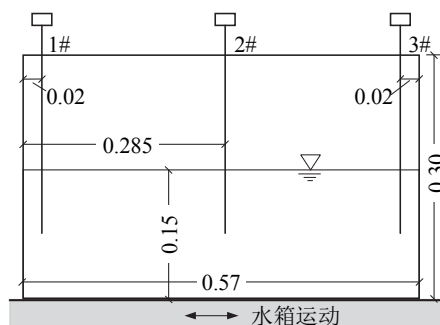


图1 文献[6]的物理模型实验布局

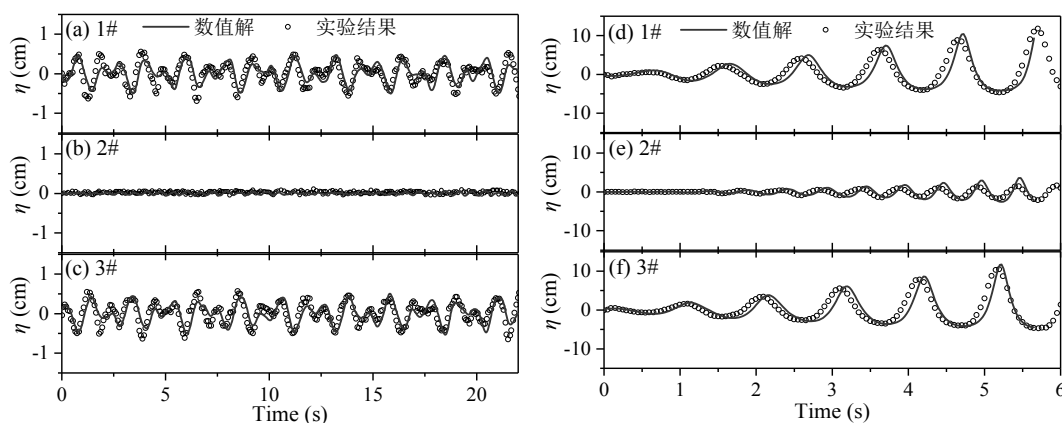


图2 验证算例 case 结果。(a)~(c):case 1; (d)~(f):case 2

3 地震作用下港内波浪响应研究

汉班托塔港的波浪模型布局见图 3。计算域大小为 $(3.76 \times 3.84) \text{ km}^2$ ，网格大小为 $dx = dy = 4.0 \text{ m}$ 。地形是根据汉班托塔港区域的实测水深建立的。需要注意的是水深大于 19m 的区域，水深统一设为 19m。为了避免波浪在计算域边界产生反射，在计算域四周设置海绵层（图 3 中虚线区域所示）。共布有 3 个数值波高仪，命名为 G1 - G3。

本研究只考虑水平 x 方向的余弦变化激励，加速度振幅设为 0.6 m/s^2 ，对应汉班托塔港区域 975 年一遇的地震加速度峰值^[7]。周期分别设为 5s、3s、1s，对应算例为 case A，case B，case C。计算总时长为 5000 s，其中前 30 s 为地震作用的持续时间。

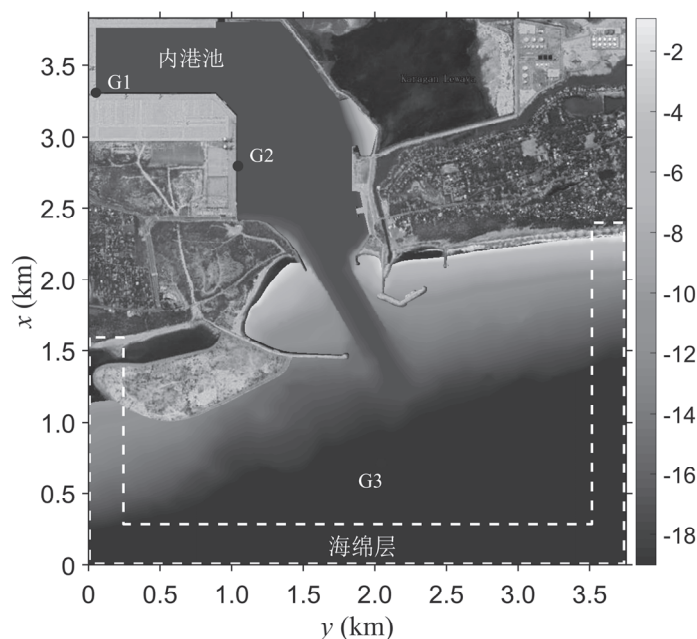


图3 汉班托塔港波浪模型计算域示意图

在地震作用下, G1~G3 数值波高仪记录的波面过程线如图 4 所示。可以看出, G1 处的波面一开始便出现振荡的现象, 而 G2 处的波面大约 25s 后才开始振荡, 这是因为在 x 方向地震作用与 G2 点所在的边壁平行, 因此经过 G2 点的波浪是从其他边壁产生并传来的。G3 点的波面运动相对 G1~G2 来说非常微弱, 这是因为港外生成的波面运动很快扩散至计算域边界并被海绵层所吸收。而港内生成的波面运动一开始会被约束在港内, 随后才通过口门缓慢地辐射能量。因此港内的波面运动更剧烈、更持久。

为了识别本征周期, 1000~5000s 的波面用以进行傅里叶变换获得振幅谱 (图 5)。可以看出, 能量会集中在一系列频率上, 这些频率也即为港口的本征频率。部分比较突出的本征周期记录于表 1。这些周期与文献[8]基于实测资料分析出的汉班托塔港的本征周期一致, 说明了本文的模型可以很好地模拟出汉班托塔港的本征周期振荡现象。

数值结果表明, 周期越大的地震激励能激发越剧烈的港内响应。港内边壁可以看作推板式造波机。由于地震加速度振幅是不变的, 则边壁的运动振幅会随着地震周期的增大而增大, 因而产生的波浪具有更高的波能流。也即地震周期越大, 从地震激励传递到港内水体运动的能量就越多。

基于上述结果, 我们知道即使周期仅为数秒的地震激励, 也能诱发港口周期为数百秒乃至上千秒的本征运动。这是因为港内水体在受到地震的瞬态激励后, 水体获得的能量会集中于本征周期上运动, 这是封闭或者半封闭水域的波浪运动特性。港内系泊船运动的本征周期往往在十几秒至数十秒, 港内波浪运动的高阶本征周期与系泊船本征周期相近, 很

可能会进一步诱发系泊船剧烈的运动响应。

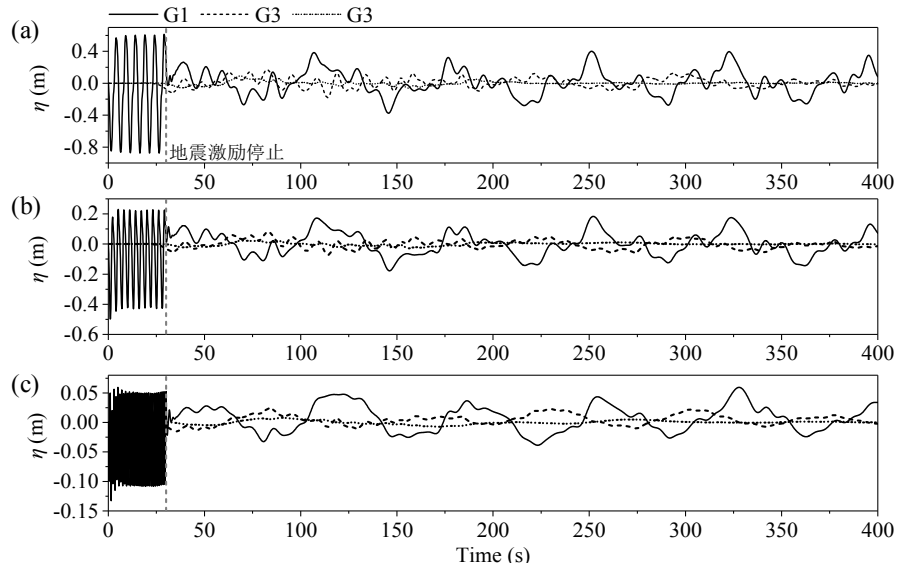


图4 G1~G3 数值波高仪记录的波面时间序列: (a)case A, (b)case B, (c)case C。从上到下, 地震波的周期为 5s、3s 和 1s。

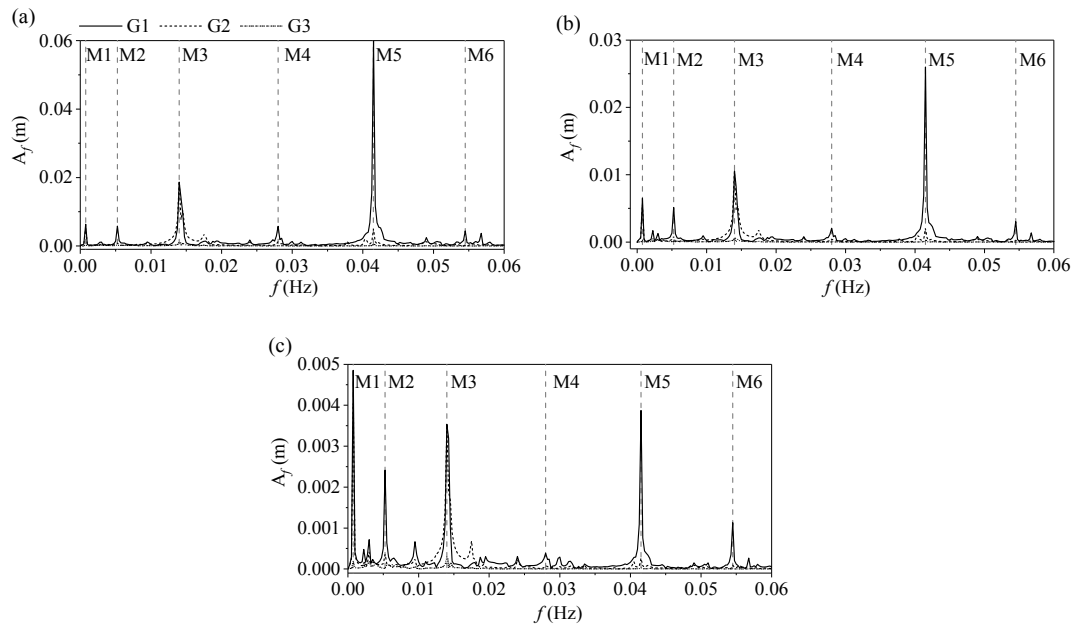


图5 G1~G3 记录的振幅谱: (a)case A, (b)case B, (c)case C。地震扰动的周期从上到下为 5s、3s 和 1s。

表 1 班托塔港本征周期统计

模态	M1	M2	M3	M4	M5	M6
周期 (s)	1333	190	71.4	35.7	24.1	18.3

参考文献

- 1 王岗, 高俊亮, 王培涛, 郑金海, 董国海. 港湾共振研究综述. J. 海洋学报, 2017: 1-13.
- 2 Ardakani, H.A. and Bridges, T.J., 2011. Shallow-water sloshing in vessels undergoing prescribed rigid-body motion in three dimensions. J. Journal of Fluid Mechanics, 667: 474-519.
- 3 Antuono, M., Bouscasse, B., Colagrossi, A. and Lugni, C., 2012. Two-dimensional modal method for shallow-water sloshing in rectangular basins. J. Journal of Fluid Mechanics, 700: 419-440.
- 4 Su, Y. and Liu, Z.Y., 2016. Numerical model of sloshing in rectangular tank based on Boussinesq-type equations. J. Ocean Engineering, 121: 166-173.
- 5 Shi, F., Kirby, J. T., Tehranirad, B., etc. FUNWAVE-TVD Fully Nonlinear Boussinesq Wave Model with TVD Solver Documentation and User's Manual (Version 3.0). R. No. CACR-11-03, University of Delaware, 2016.
- 6 Liu, D. and Lin, P., 2008. A numerical study of three-dimensional liquid sloshing in tanks. J. Journal of Computational Physics, 227(8): 3921-3939.
- 7 Gamage, P. and Venkatesan, S., 2019. Evaluation of seismic hazard in low to moderate seismic regions, Sri Lanka—a case study. J. Journal of Seismology, 23(3): 579-611.
- 8 Dong, G., Zheng, Z., Ma, X. and Huang, X., 2020b. Characteristics of low-frequency oscillations in the Hambantota Port during the southwest monsoon. J. Ocean Engineering, 208: 107408.

Numerical study of seismic response of wave motion within a harbor

ZHENG Zhen-jun, MA Xiao-zhou, DONG Yu-jing, MA Yu-xiang, DONG Guo-hai

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, 116024.

Email: maxzh@dlut.edu.cn)

Abstract: The Boussinesq-type wave model, FUNWAVE-TVD, is extended to include seismic effects. This extension is validated against experimental data. Subsequently, this model is used to study the seismic-induced harbor oscillations. Results show that natural modes of a harbor with periods of roughly 100-1000 s can be triggered by seismic excitations with periods of only 1-5 s.

Key words: Harbor oscillations; Earthquake; Boussinesq equations; Natural periods