

李晓涵, 屈科, 杨元平, 等. 波状涌潮在变化地形上的水动力研究[J]. 海洋学报, 2023, 45(7): 90–101, doi:10.12284/hyxb2023080

Li Xiaohan, Qu Ke, Yang Yuanping, et al. Study on the hydrodynamics of undular tidal bore over the uneven seabed[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(7): 90–101, doi:10.12284/hyxb2023080

# 波状涌潮在变化地形上的水动力研究

李晓涵<sup>1</sup>, 屈科<sup>1,3,4\*</sup>, 杨元平<sup>2</sup>, 王旭<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310017; 3. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 4. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 本文采用非静压单相流模型 (NHWAIVE) 研究了波状涌潮在变化地形上的传播演变特性。通过设置合理的计算工况, 系统分析了涌潮高度、潮前水深和斜坡坡度对波状涌潮水动力特性的影响。计算结果表明, 涌潮高度和潮前水深对波状涌潮在变化地形上的水动力特性影响显著, 不同的地形坡度对波状涌潮水动力特性影响较小。变化地形的存在可导致涌潮高度显著增大, 引起沿程最大水位的剧烈变化, 并且使涌潮传播速度降低。随涌潮高度的逐渐增加, 斜坡前后潮差持续增大, 同时表层速度与水深平均速度均呈现增大趋势。当增加潮前水深时, 斜坡前后潮差减小, 表层速度与水深平均速度单调递减。本文研究成果对于正确认识波状涌潮在变化地形上的传播演变规律有一定的参考意义, 为波状涌潮河段涉水建筑物的工程设计及安全评估提供了科学依据。

**关键词:** 波状涌潮; 变化地形; 非静压模型; 数值模拟

中图分类号: TV139.2; P753

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)07-0090-12

## 1 引言

涌潮是发生在喇叭形海湾和河口中的一种特有的潮水暴涨现象<sup>[1-2]</sup>, 其强度的大小主要与外海潮汐强度和潮前水深大小有关<sup>[3]</sup>, 同时还受上游径流量和气象变化等因素影响<sup>[4]</sup>。根据涌潮强度的不同, 存在两种基本的涌潮形态: 当涌潮强度较小时, 由一系列平行向前推进的波构成的波列, 称为波状涌潮, 只有在特殊条件下, 方可进而形成如钱塘江涌潮一般的强涌潮; 当涌潮强度较大时, 涌潮潮头自由水面失稳, 发生破碎, 形成向前推进的水滚, 称为旋滚涌潮<sup>[5-6]</sup>。

世界上至少有 450 处河口存在涌潮<sup>[7]</sup>, 其中以我国钱塘江河口的涌潮最为典型。由于涌潮到达时, 河

口区域内的水位会骤然上涨, 流速也会发生突变, 涌潮对河道和涉水建筑物的安全构成潜在威胁。因此, 研究河口区域内涌潮生成、演变具有重要的科学意义和工程应用价值。近些年来, 国内外的学者对涌潮的生成和演变规律开展了大量的研究工作。涌潮研究主要采用原型观测<sup>[8-10]</sup>、理论分析、物理模型试验<sup>[11]</sup>以及数值模拟<sup>[12-14]</sup>等方法。谢东风等<sup>[15]</sup>基于实测数据分析了钱塘江涌潮沿程潮位、涨落潮历时等特征, 建立了涌潮潮头陡度的计算公式, 成功复演了涌潮到达时潮头陡度急剧变化的过程, 弥补了涌潮陡度观测的困难。张巍等<sup>[16]</sup>利用定点连续观测资料对钱塘江涌潮的潮流特性进行分析。Yeh 和 Mok<sup>[17]</sup>通过水槽试验研究了破碎涌潮的紊动特性及其与水跃的差

收稿日期: 2022-05-03; 修订日期: 2023-02-03。

基金项目: 浙江省自然科学基金 (LY22E090007); 浙江省河口海岸重点实验室开放基金 (ZIH21009); 国家级大学生创新创业训练计划 (202210536016); 湖南省大学生创新创业训练计划 (2491); 长沙理工大学教学改革研究项目 (XJG22098)。

作者简介: 李晓涵 (2002—), 男, 山东省高唐县人, 主要从事波浪水动力研究。E-mail: lxh202004330107@163.com

\* 通信作者: 屈科 (1985—), 男, 陕西省三原县人, 博士, 副教授, 主要研究方向为计算流体力学、海岸工程和海洋工程。E-mail: kqu@csust.edu.cn

异。Treske<sup>[18]</sup>通过明渠试验研究了涌潮的形成机理。Miahr<sup>[19]</sup>在矩形玻璃水槽中生成了波状涌潮,并在分析波状涌潮流场的基础上研究了涌潮的混合和弥散作用。杨火其等<sup>[20]</sup>通过水槽试验建立了涌潮流速与潮前水深、涌潮高度及潮头前进速度关系的经验公式,使得涌潮流速可通过易测量的潮前水深、涌潮高度以及涌潮潮头传播速度等参数间接求解。岳书波等<sup>[11]</sup>利用高速摄像机对比了不同条件下潮头的掺气形态,拟合出潮头掺气长度的计算公式,为预测涌潮潮头掺气的特征提供了量化的可能。由于现场观测和模型试验需要花费大量的人力物力,并且数据采集的数量和分布区域均受到很大程度的限制,因此,近些年来,数值模拟已逐渐成为研究涌潮水动力特性的最重要技术手段。根据所求解的流动控制方程以及研究区域的不同,通常可将涌潮的数值计算模型分为大尺度数值计算模型和小尺度计算模型。大尺度模型着眼于整体研究涌潮在生成、演变和衰减过程的水动力特性<sup>[21-23]</sup>。小尺度模型着眼于研究涌潮的阶段特征以及与复杂海岸结构物的相互作用。其中,戚蓝等<sup>[1]</sup>通过数值求解两相不可压缩流控制方程,建立了分析涌潮水动力特性的数值计算模型,阐述了波状涌潮的流速分布规律,系统研究了落潮速度、潮前水深和涌潮高度等因素对波状涌潮流速特性的影响。Landrini等<sup>[24]</sup>采用无网格粒子SPH方法数值分析了斜坡上涌潮生成、传播和破碎的演化特征。除此之外,Li等<sup>[25]</sup>采用SPH法模拟了涌潮通过桥墩的流动过程,并且分析了桥墩周围的紊流特征。林伟栋等<sup>[5]</sup>通过数值模拟复杂的溃坝水流过程,对回头潮的水面形态特征进行了初步的研究。通过数值模拟不同流态下的溃坝水流运动,Furuyama和Chan-son<sup>[26]</sup>对层流溃坝流、紊流溃坝流以及带有弱破碎特征的涌潮流动开展了系统的研究工作。

虽然前人的研究工作对于正确认识涌潮的生成及演变特性具有重要意义,但是有关涌潮在变化地形上传播演变特性的相关研究目前还比较少见。由于河堤、海塘等的修建在一定程度上改变了河道的地形<sup>[27-28]</sup>,从而影响涌潮的传播演变过程,同时涌潮又对海塘护岸工程具有很强的破坏力,一旦淘空海塘建筑物的基础,将影响海塘塘身的整体稳定性,导致护基建筑受到严重毁坏;钱塘江海塘护岸工程施工主要在盐官至老盐仓段<sup>[29]</sup>,而在此河段发生的涌潮一般为波状涌潮<sup>[14]</sup>,因此有必要系统研究波状涌潮在变化地形上传播演变特性,为波状涌潮河段涉水建筑物的工程设计及安全评估提供科学依据。本文采用非静压

单向流模型(NHWAVE)研究了波状涌潮在变化地形上的传播演变规律,并分析了涌潮高度、潮前水深、斜坡坡度等因素的影响。

## 2 数值模型

### 2.1 控制方程

NHWAVE的控制方程为基于 $\sigma$ 坐标系的连续性方程和动量方程,其守恒形式的表达式为

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial Du}{\partial x} + \frac{\partial Dv}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial \sigma} = S_h + S_p + S_\tau, \quad (2)$$

式中, $t$ 为时间; $x$ 、 $y$ 、 $\sigma$ 为笛卡尔坐标的3个方向;通量函数为 $U=(Du, Dv, Dw)$ ,  $F=(Duu + \frac{1}{2}g\eta^2 + gh\eta, Duv, Duw)$ ,  $G=(Duv, Dvv + \frac{1}{2}g\eta^2 + gh\eta, Dvu)$ ,  $H=(u\omega, v\omega, w\omega)$ ;  $u$ 、 $v$ 、 $w$ 代表 $x$ 、 $y$ 、和 $z$ 方向上的速度分量; $\omega$ 代表 $\sigma$ 坐标系下的垂向速度; $S_h$ 代表方程中的静压项; $S_p$ 代表方程中的动压项; $S_\tau$ 代表湍流应力项; $h$ 表示静止水深; $p$ 表示压力; $\rho$ 表示水密度; $g$ 表示重力加速度。式(2)中各源项如下所示:

$$S_h = \begin{pmatrix} gD \frac{\partial h}{\partial x} \\ gD \frac{\partial h}{\partial y} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$S_p = \begin{bmatrix} -\frac{D}{\rho} \left( \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial x} \right) \\ -\frac{D}{\rho} \left( \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial y} \right) \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \sigma} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$S_\tau = \begin{pmatrix} DS_{\tau_x} \\ DS_{\tau_y} \\ DS_{\tau_z} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

### 2.2 湍流模型

本文采用标准的 $k-\varepsilon$ 湍流模型来计算湍流黏性系数,其控制方程如下所示:

$$\frac{\partial Dk}{\partial t} + \nabla \cdot (Duk) = \nabla \cdot \left[ D \left( v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + D(P_s + P_b - \varepsilon), \quad (6)$$

$$\frac{\partial D\varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (D\varepsilon) = \nabla \cdot \left[ D \left( v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} D[C_{1\varepsilon}(P_s + C_{3\varepsilon}P_b) - C_{2\varepsilon}\varepsilon], \quad (7)$$

式中, $v_t$ 为湍流运动黏度; $\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$ 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_\mu$ 是湍流相关经验系数,其中 $v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ,  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ,  $C_\mu = 0.09$ ;  $k$ 是体积平均的湍流动能,  $k = \frac{1}{2} \overline{U'U'}$ ;  $\varepsilon$ 是湍流耗散率,  $\varepsilon = \frac{C_\mu^{0.75} k^{1.5}}{l}$ ,  $l$ 为湍流长度尺

度;  $P_s$ 、 $P_b$  分别代表剪切力和浮力;  $\nabla$  为哈密顿算子。关于数值计算模型 NHWAVE 算法的详细描述可参考文献 [30]。

### 2.3 边界条件

本文基于潘存鸿等<sup>[4]</sup>通过一维连续性方程和动量方程推导的涌潮传播流速公式作为边界条件, 其公式如下:

$$c = V_0 + \sqrt{gh_1(h_1 + h_0)/2h_0}, \quad (8)$$

$$c = V_1 + \sqrt{gh_1(h_1 + h_0)/2h_1}, \quad (9)$$

式中,  $c$  为涌潮传播速度;  $h_0$  和  $V_0$  分别为潮前水深和潮前流速;  $h_1$  和  $V_1$  分别为潮后水深和潮后流速。

## 3 模型验证

### 3.1 溃坝波在水平地形和倾斜地形上传播变形

本节基于非静压数值模型 NHWAVE 建立二维数值波浪水槽, 根据 Liu 等<sup>[31]</sup> 和 Zhang 等<sup>[32]</sup> 所做的溃坝波水槽试验, 数值模拟了溃坝波在水平地形和倾斜地形上传播变形的水动力学过程, 并将数值计算结果与物理试验得到的自由液面数据进行对比, 验证非静压模型计算波状涌潮水动力特性的能力。实验水槽长 18 m, 宽 1 m, 高 1 m, 实验挡板设置在  $l_u = 8.37$  m 处用于控制溃坝流的发生。

二维数值水槽的计算域布置与物理实验的模型布置相同, 计算域入口为固壁边界, 出口为固壁边界, 具体布置如图 1 所示。x 方向为涌潮传播方向, 网格大小为  $dx = 0.02$  m, z 方向为水深方向, 共划分 20 层网格;  $h_u$  和  $h_d$  分别为上游和下游初始水深;  $\alpha$  为上游与下游水深之比;  $\theta$  为底坡坡度。本文利用非静压模型验证了实验的 6 组工况, 具体的实验工况如表 1 所示。定义无量纲参数:  $Z = \frac{z}{h_u}$ ,  $X = \frac{x}{h_u}$ 。

将 NHWAVE 计算的溃坝波与实验结果进行了对比, 如图 2 所示, 通过对比可看出数值计算与实验结果基本吻合。

### 3.2 规则波在陡坡地形上传播演变

本节计算了规则波在岸礁地形上传播演变的水

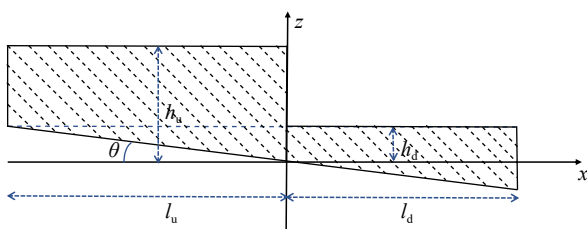


图 1 溃坝波实验布置图

Fig. 1 Experimental layout of dam-break wave

表 1 实验工况

Table 1 Experimental setups

工况编号	$h_u/m$	$h_d/m$	$\theta/(^\circ)$
Y1	0.4	0.04	0
Y2	0.4	0.08	0
Y3	0.4	0.16	0
Y4	0.4	0.04	0.02
Y5	0.4	0.08	0.02
Y6	0.4	0.16	0.02

动力学过程, 将计算结果与相应的试验结果进行了对比分析, 验证了非静压模型 NHWAVE 计算波浪在陡坡地形上传播变形的能力。试验数据采用 Yao 等<sup>[33]</sup> 在南洋理工大学水动力实验室进行的岸礁地形下规则波增减水的水槽试验。二维数值波浪水槽计算域与试验保持一致, 如图 1 所示。岸礁模型礁前斜坡坡度为 1 : 6, 礁前斜坡坡脚离造波区  $L_1 + L_2 = 21$  m, 斜坡长度  $b = 2.1$  m,  $L_3 = 8.9$  m, 模型高度为 0.35 m, 沿程布置 12 个测点, 水槽右侧设置海绵消波层(图 3)。x 方向为波浪传播方向, 网格大小  $dx = 0.02$  m; z 方向为水深方向, 共划分 20 层网格。数值模型验证工况为: 波高  $H = 0.095$  m、水深  $h = 0$  m、周期  $T = 1.0$  s。

图 4 展示了数值模拟结果与实验值的对比。通过对比可以看出: 计算结果与实验数据的吻合度较高。所以该模型有能力模拟波浪与较陡地形相互作用的复杂水动力过程。

综上, 该模型能准确地模拟波状涌潮在较陡斜坡上的传播演变, 可以利用该模型进一步开展研究。

## 4 工况设置

数值计算区域布置如图 5 所示, 图中  $H$  为涌潮高度,  $c$  为涌潮传播速度,  $h_0$  和  $V_0$  分别为潮前水深和潮前流速, 沿程分布 226 个水位测点 (WG1-WG226)。定义纵向的正方向为波状涌潮的传播方向(从下游到上游), 垂向的正方向为从底部竖直指向自由水面, 网格大小为  $dx = 0.1$  m, 共划分 10 层网格。

本文对波状涌潮在变化地形影响下的水动力特性进行了高精度数值模拟研究,  $h_0$  和  $H$  比  $V_0$  对涌潮传播过程中形态变化的影响更明显<sup>[1]</sup>, 故工况设置主要考虑了不同涌潮高度  $H$ 、潮前水深  $h_0$ 、斜坡坡度  $\tan\beta$  等因素对涌潮传播演变的影响。根据黄静等<sup>[3]</sup> 关于涌潮的水槽实验模拟及验证可知, 潮前水深一般为 2.0 m, 同时工况的设置需要满足波状涌潮的产生条件, 因此

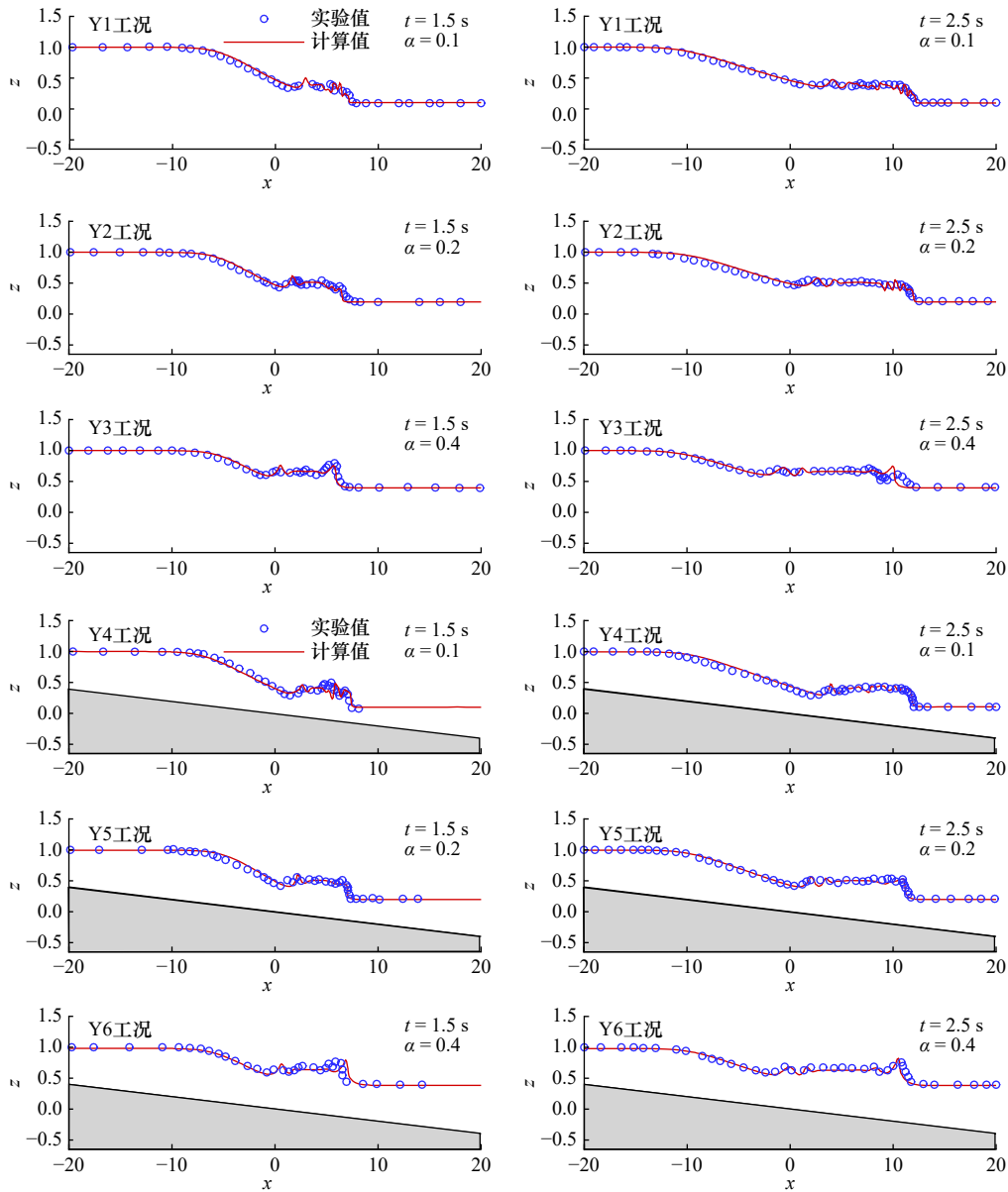


图2 不同测点下波面高程空间对比

Fig. 2 Spatial distribution of water elevations recorded at different wave gauges

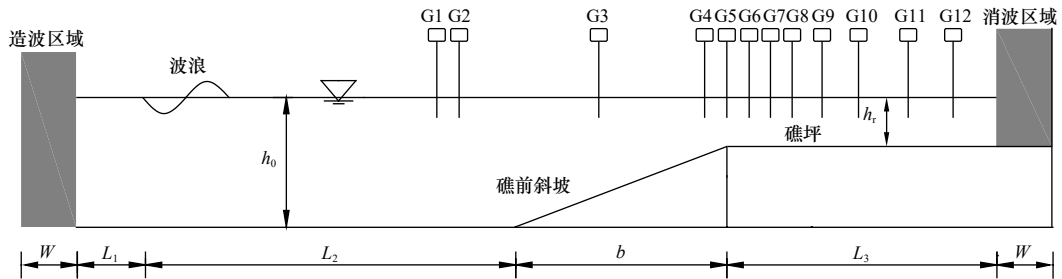


图3 规则波实验布置图

Fig. 3 Experimental layout of regular wave

经典工况设置为潮前水深  $h_0 = 2.0$  m, 涌潮高度  $H = 0.06$  m; 海塘坡脚的坡度范围大致在  $1 : 1$  至  $1 : 10$ <sup>[27-28]</sup>, 因此本文经典工况的变化底坡坡度设为  $\tan \beta = 1 : 5$ 。为了系统讨论波状涌潮传播演变的规律, 共设置

13种计算工况, 均满足波状涌潮的物理条件即  $Fr < 1.3$ <sup>[1, 14]</sup>。涌潮高度  $H$ 、潮前水深  $h_0$ 、斜坡坡度  $\tan \beta$  中的 2 个因素不变, 依次改变其中的 1 个, 具体工况如表 2 所示。

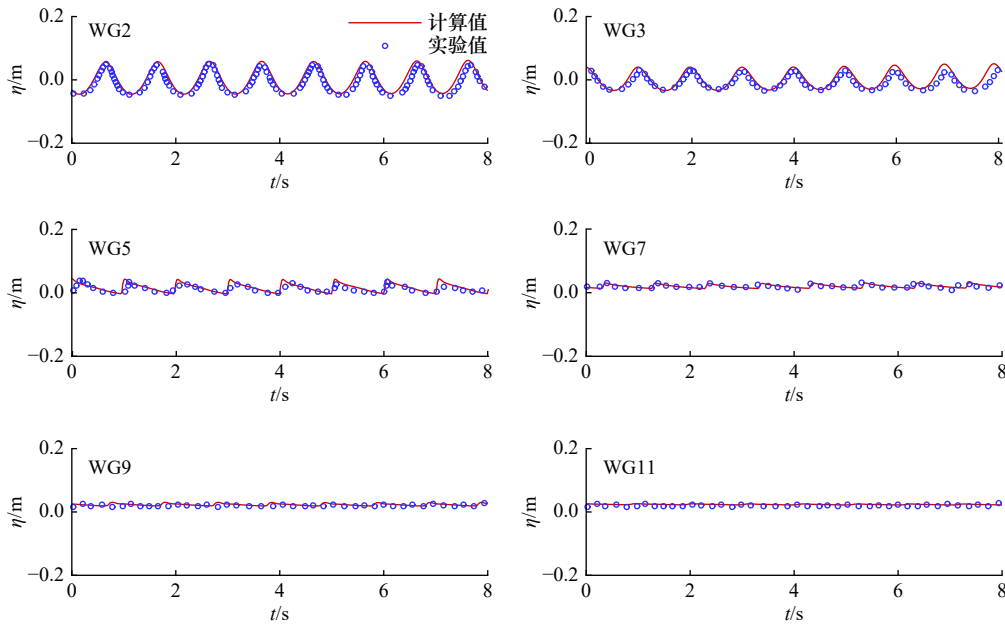


图 4 不同测点下波面高程空间对比

Fig. 4 Spatial distribution of water elevations recorded at different wave gauges

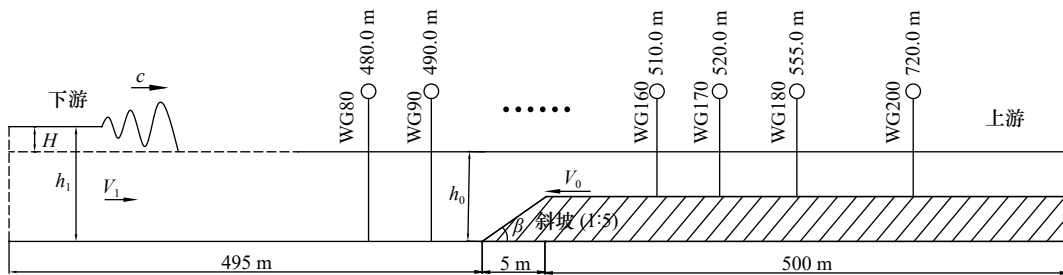


图 5 数值计算布置

Fig. 5 Computational layout

## 5 结果与讨论

### 5.1 水动力特性

本节在采用 A1 经典工况的基础上,对波状涌潮在变化地形上传播的水动力特性展开分析。图 6 为 6 个具有代表性时刻水体的速度云图,图 7 为代表性测点的时程曲线图,图 8 展示了不同测点表层速度随时间的变化曲线图。由图 6 和图 7 可知,波状涌潮的最大波幅和波陡均出现在第一个波峰位置,随后依次减缓。从图 6a 和图 6b 可以看出,在变化地形前已形成稳定的波状涌潮,涌潮在传播过程中,不同涨落潮周期之间涌潮波幅的衰减幅度相应变小,但是涌潮传播经过某一个特征点之后,该点处的自由水面波动持续时间也相应减小,在较短的时间内恢复平整,而且当波状涌潮在稳定传播时,不同测点流速最大位置位于波状涌潮的潮头处。由图 7 中  $x = 300\text{ m}$ 、 $x = 495\text{ m}$ 、 $x = 500\text{ m}$  的时程曲线可知地形的存在影响了波状涌潮的传播特性,不同周期之间的涌潮波幅衰减程度变

表 2 数值模拟工况设置

Table 2 Parameter setup of numerical simulation

工况	涌潮高度 $H/\text{m}$	潮前水深 $h_0/\text{m}$	底坡坡度 $\tan \beta$	弗劳德数 $Fr$
A1	0.60	2.0	1 : 5	1.220
A2	0.40	2.0	1 : 5	1.150
A3	0.45	2.0	1 : 5	1.167
A4	0.50	2.0	1 : 5	1.185
A5	0.55	2.0	1 : 5	1.204
B1	0.60	1.9	1 : 5	1.234
B2	0.60	2.1	1 : 5	1.212
B3	0.60	2.2	1 : 5	1.203
B4	0.60	2.3	1 : 5	1.194
C1	0.60	2.0	1 : 1	1.220
C2	0.60	2.0	1 : 3	1.220
C3	0.60	2.0	1 : 7	1.220
C4	0.60	2.0	1 : 9	1.220

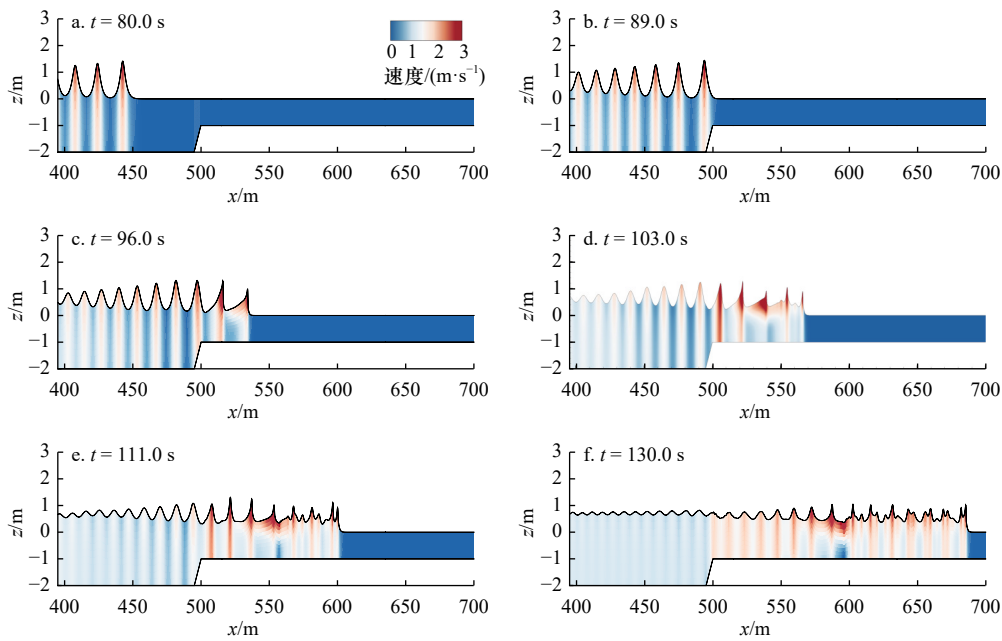


图6 不同时间情况下水体的速度云图

Fig. 6 Snapshots of the velocity contour of water body at different time instances

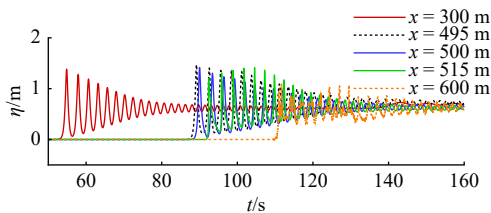


图7 不同测点处的水面时程曲线

Fig. 7 Time series of the water surface elevation at different wave gauges

得更加缓慢,且当波状涌潮在斜坡之前时潮波的波峰和波谷成对称性,当传播到斜坡上时潮波的波峰和波谷呈明显不对称形状,尤其是波列的前几个波,这种现象最为明显,这可能是由于波状涌潮在斜坡之前传播受阻在斜坡上传播变形浅化导致的。由图6b可以看出当波状涌潮传播至斜坡坡脚时,受浅化作用影响,第一列潮头波的能量积聚,开始使第一列整列波的水质点速度与最大水位增大;由图6c、图6d和图6e可知,浅化持续作用已使潮头波的波形完全失去对称性,前坡更陡,到一定程度自由表面破碎,先在第一个波的波形前形成水滚,强度再增大时,随后的波峰继续变陡,波谷变坦,依次破碎,能量释放出来,且会影响后面的波,使得波动性逐渐减弱。如图7所示,从 $x = 300$  m与 $x = 495$  m测点的水位时程曲线可以看出当波状涌潮传播至斜坡时,由于相互作用会使得一部分水体反射回来,使得下游潮波的高度略有增加;从 $x = 515$  m处测点的水位时程曲线可以看出,涌潮前4列波的波幅小于第5列潮波的波幅,这是因

为在地形上传播演变时由于水体强度增大使得前4列波依次破碎导致的,由 $x = 600$  m处测点的水位时程曲线可知由于地形的持续作用,涌潮强度很大,基本上不再产生波动已经形成了溯源推进的水滚,此处的涌潮已经形成了“旋滚涌潮”。图8展示了不同时刻表层速度的变化,从 $x = 495$  m和 $x = 500$  m测点处的速度时程曲线可以看出,浅化作用明显使最大表层速度增大;由 $x = 515$  m测点处的速度时程曲线可知,潮头破碎使涌潮的表层速度增大,故涌潮的最大表层速度是在第一个波峰破碎处。图9显示了涌潮在变化地形上传播演变过程中涌潮高度的空间分布,从图中可以看出,由于斜坡的存在使部分水体发生反射,从而在地形前涌潮高度开始增大,到达坡脚前基本稳定,在坡脚处涌潮高度开始下降在坡顶稳定下来。如图10所示,在涌潮抵达斜坡前,最大水面高程有一小段锯齿状抬升,这可能是由于波列之间的周期较小,后面的波峰浅化带来的扰动使后方的水位略微增大;在坡顶( $x = 500$  m)处最大水面高程下降,这是由于从

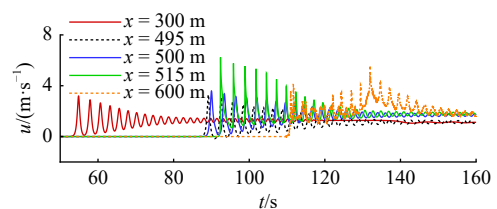


图8 不同测点表层速度的时间分布

Fig. 8 Time series of the water surface velocity at different wave gauges

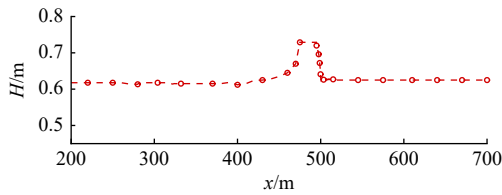


图 9 涌潮高度的空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of the maximum tidal bore height

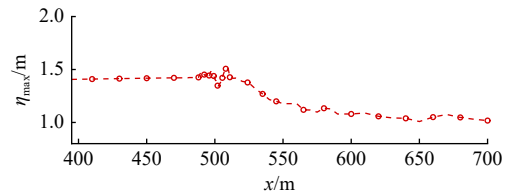
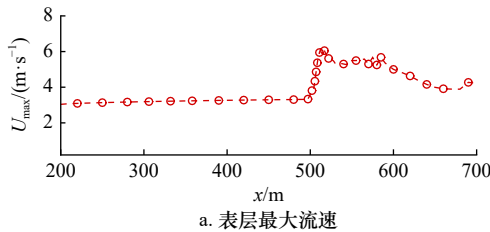


图 10 最大水面高程的空间分布

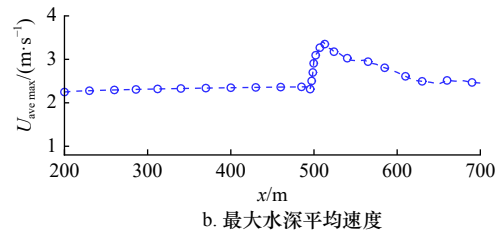
Fig. 10 Spatial distribution of the maximum water surface elevations

深水区往浅水区传播时由于地形的作用使得后方的整体水位略有下降,涌潮在坡顶继续向前传播,最大水面高程由于持续浅化作用继续增大直至潮头开始破碎,此后开始下降。图 11a 为涌潮最大表层速度的沿程分布,从图中可以看出,最大表层速度的最大值大约出现在坡后潮头的破碎处,应着重注意此处的安全防护,以避免人身财产损失。最大水深平均速度的空间分布如图 11b 所示,由于持续浅化作用使波列能量积聚,从而使水深平均速度在坡顶处开始明显增大,在第一个波峰破碎处达到最大,结合  $x = 515 \text{ m}$  测点处的速度时程曲线也可知,且由图 6f 可知地形后

的水深平均速度大于地形之前的水深平均速度。图 12 展示了涌潮速度的空间分布,从图中可以看出,斜坡的存在阻碍了涌潮的传播,潮速在斜坡处下降;而后由于在坡顶处能量积聚达到最大值,随后涌潮的能量释放从而使传播速度迅速加快;涌潮传播速度在增大至最大值后开始慢慢下降,最终趋于稳定,且由于水深的减小以及能量的耗散,坡后潮速低于坡前潮速。综上可知,变化地形的存在显著影响了波状涌潮传播的潮高、潮速、水体的扰动速度以及最大水面高程,使水动力特性发生改变。



a. 表层最大流速



b. 最大水深平均速度

图 11 涌潮传播过程中流速分布

Fig. 11 Velocity distribution in the process of tidal surge propagation

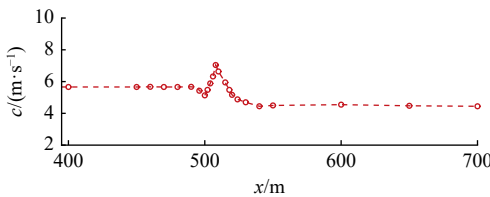


图 12 涌潮传播过程潮速的沿程分布

Fig. 12 Spatial distribution of the tidal velocity in the process of tidal surge propagation

### 5.2 涌潮高度的影响

现采取 A1、A2、A3、A4 和 A5 共 5 种工况来研究不同入射潮高  $H$  对波状涌潮传播时的水动力特性影响的规律。图 13 展示了在潮前水深  $h_0 = 2.0 \text{ m}$ , 潮前流速  $V_0 = 0 \text{ m/s}$ , 底坡坡度  $\tan\beta = 1 : 5$  的情况下仅改变单一变量入射潮高  $H$  时涌潮高度的沿程变化。如图 13 所示,随着入射潮高的增大,波状涌潮的最大潮高增幅相应增大, A1 工况下潮高开始增大位置明显靠前,这是因为入射潮高越大涌潮传播速度越快, A1 工况对应的潮速最快,会首先传播至斜坡与斜坡相互作用

一部分水体反射回来,从而最先影响波状涌潮的潮高。图 14 是 5 种工况下最大水面高程空间分布的比较,从图中可以看出随着入射潮高的增大,最大自由水面高程变大,但在地形上水体间的紊动较小,出现这种现象可能是由于涌潮在传播过程中上下游边界条件并未发生改变,整体水深较大的涌潮所具备的能量越多,在潮头向前传播过程中除去前端潮头的耗散以及前端波列的破碎消耗的部分能量后,剩余能维持自由水面形态的势能越大,从而导致了后续水体间产

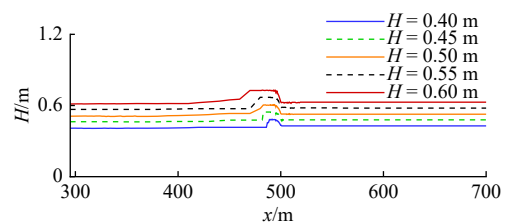


图 13 不同入射潮高下最大涌潮高度的空间分布

Fig. 13 Spatial distributions of the maximum tidal bore height under different incident tidal height

生水力间断现象较弱<sup>[4]</sup>,故在潮波破碎后,当 $H = 0.4\text{ m}$ 时最大水面高程的波动范围更明显,最大波动幅度达35.4%;因为随着涌潮入射高度的增加,涌潮的波幅也相应增大<sup>[4]</sup>,故在地形上达到破碎极限状态的位置会提前。图15分别对比了5种工况下最大表层速度的空间分布以及最大水深平均速度的空间分布,从图中可以看出随着入射潮高的增大,最大表层速度和最大水深平均速度也增大。图16是5种工况下波状涌潮潮速 $c$ 在地形变化时的空间分布随着潮前水深变化的规律,从图中可以看出,入射潮高越大,在传播至斜坡之前潮速 $c$ 越大;当传播到斜坡上时由于重力作用以及阻水效应使得涌潮潮速略有减小,并且随着入

射潮高的减小,涌潮潮速减少的越多;入射潮高越大,传播至坡顶之后达到潮速最大值的位置越靠前,这可能与涌潮的破碎位置有关。

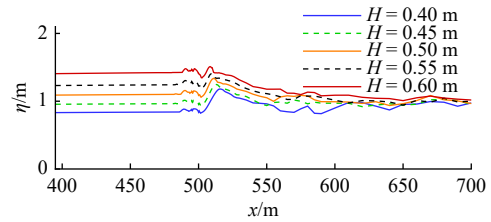


图14 不同入射潮高下最大水面高程的空间分布  
Fig. 14 Spatial distributions of maximum water surface elevation under different incident tidal height

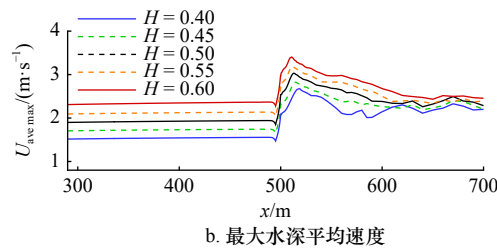
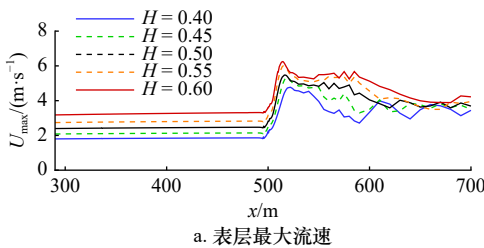


图15 涌潮传播过程中流速随潮高变化对比

Fig. 15 Comparisons of flow velocity changes with incident tidal height during surge propagation

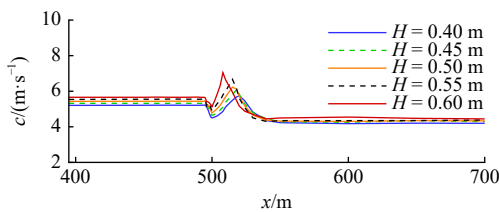


图16 不同入射潮高下潮速的空间分布  
Fig. 16 Spatial distribution of tidal velocity at different incident tidal height

### 5.3 潮前水深的影 响

现采取 A1、B1、B2、B3、B4 共 5 种工况来研究不同入射潮高 $H$ 对波状涌潮传播时的水动力特性影响的规律。图17展示了潮前流速 $V_0 = 0\text{ m/s}$ ,底坡坡度 $\tan\beta = 1 : 5$ ,潮前水深 $h_0$ 分别为1.9 m、2.0 m、2.1 m、2.2 m、2.3 m时的潮高沿程变化对比。如图17所示,随着潮前水深 $h_0$ 的增大,斜坡前后潮差逐渐减小,潮高的开始增大位置越靠前,这可能是因为整体水深大的涌潮所具备的能量大,涌潮的传播速度快,B4工况对应的潮速最快,在这个工况下涌潮会首先传播至斜坡,与斜坡相互作用一部分水体反射回来,从而最先影响波状涌潮的潮高,但由于水深的增加使得反射回来的水体稍有减小。图18是5种工况下最大水面高程空间分布的比较,从图中可以看出随着潮前水深的增大,在波状涌潮传播至斜坡之前时最大自由水面高

程减小,出现这种现象可能是因为由于涌潮在传播过程仅改变水深这个单一变量,整体水深大的涌潮所具备的较大势能,使其维持自身水面稳定的能力更强,从而导致了后续水体间产生水力间断现象较弱<sup>[4]</sup>,波列的波峰相对较小,因此在波状涌潮传播至斜坡之前时,潮前水深越大,最大水面高程越小;同时图18也

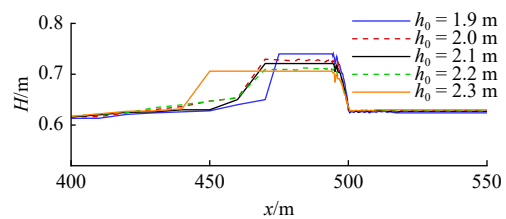


图17 不同潮前水深下最大涌潮高度的空间分布  
Fig. 17 Spatial distributions of the maximum tidal bore height under different pre-tide water depth

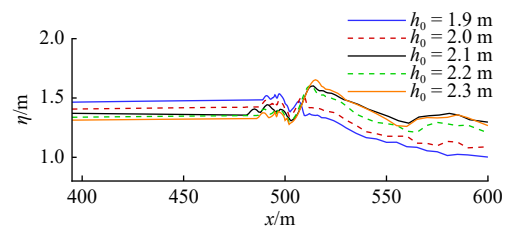


图18 不同潮前水深下最大水面高程的空间分布  
Fig. 18 Spatial distributions of maximum water surface elevation under different pre-tide water depth

展示了,当波状涌潮传播到斜坡之后时由于过水断面的改变使最高水位下降,在坡顶处降到最低,随后由于持续浅化变形最大水位开始继续增大直至破碎,随潮前水深的增大,达到最大水面高程最大值时离坡顶的距离越远,这可能是因为水深相对大的情况下,波列的波峰相对较小,波状涌潮不容易达到极限波陡,所以涌潮发生浅化作用持续的距离更远。图 19a 展示了 5 种工况最大表层速度的空间分布,由图所示随着潮前水深的增大,最大表层速度减小;图 19b 对比了 5 种工况下的最大水深平均速度的空间分布,从图

中可以看出,随着潮前水深的增大,最大水深平均速度也减小,这可能是因为水深大,波列的波峰小,水体的扰动速度小导致的。图 20 展示了 5 种工况下波状涌潮潮速在地形变化时的空间分布随着潮前水深变化的规律,从图中可以看出,随着潮前水深的增大,在传播至斜坡之前潮速与潮前水深呈正相关,当传播到斜坡上时由于重力作用以及阻水效应使得涌潮潮速略有减小,传播至坡顶之后在短距离内潮速增大,随后慢慢减小直至能量趋于稳定,并且稳定后依然是水深越大潮速越大。

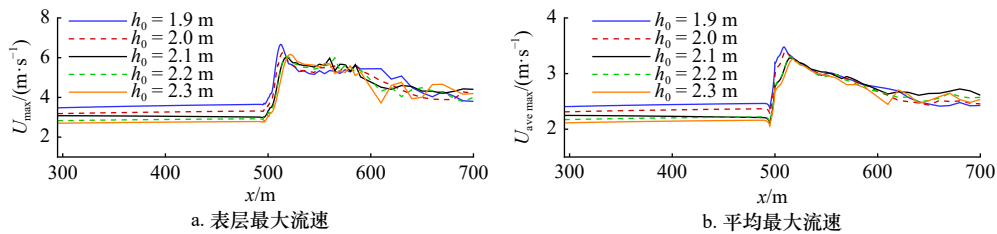


图 19 涌潮传播过程中流速随潮前水深变化对比

Fig. 19 Comparisons of flow velocity changes with pre-tide water depth during surge propagation

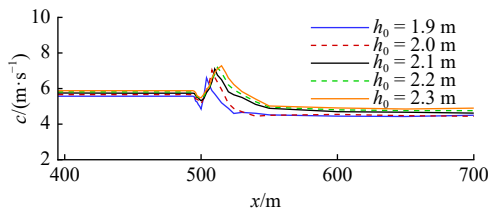


图 20 不同潮前水深下潮速的空间分布

Fig. 20 Spatial distribution of tidal velocity at different pre-tide water depth

### 5.4 斜坡坡度的影响

通过计算 A1、C1、C2、C3、C4 共 5 种工况来研究不同斜坡坡度  $\tan\beta$  对波状涌潮传播的水动力特性影响。图 21 展示了涌潮高度  $H = 0.4$  m, 潮前水深  $h_0 = 2.0$  m, 潮前流速  $V_0 = 0$  m/s, 斜坡坡度  $\tan\beta$  分别为 1 : 1, 1 : 3, 1 : 5, 1 : 7, 1 : 9 下的潮高沿程变化情况对比。从图 21 可知,当变化地形的坡度改变时,会造成斜坡之前的涌潮高度稍有改变,当坡度相对较小时斜坡附近的涌潮高度也较小,而且涌潮高度增加的位置也会有所后移,造成这种现象的原因可能是,当涌潮传播至变化地形与斜坡作用的位置虽然稍有提前但作用较弱,反射的水体能量较小,反射回来的水体传播速度较快;但对于 A1 和 C4 两种工况下的潮高最大相差仅为 2.0%, 平均仅相差 0.4%, 可认为在不同底坡坡度下潮高变化幅度非常小。图 22 对比了 5 种工况下最大水面高程的空间分布,从图中可以看出,当坡度较大时最大水面高程在斜坡前变化比较剧烈,而坡度

较小时在斜坡之前最大水面高程变化比较平稳,造成这种现象的原因是在波状涌潮传播至不同坡度的斜坡上时发生的浅水变形的程度有所不同,造成的前方波峰的变形对方波峰的扰动也会有区别,当坡度较大时涌潮与斜坡作用剧烈,使得前方波峰的变形对方方的扰动更加剧烈;在坡顶继续沿底坡传播时,底坡坡度  $\tan\beta = 1 : 9$  的最大水面高程所达到的最大值比

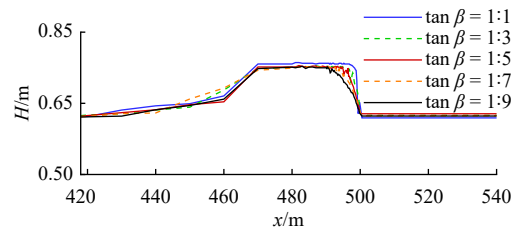


图 21 不同斜坡坡度下最大涌潮高度的空间分布  
Fig. 21 Spatial distribution of the maximum tidal bore height under different slope

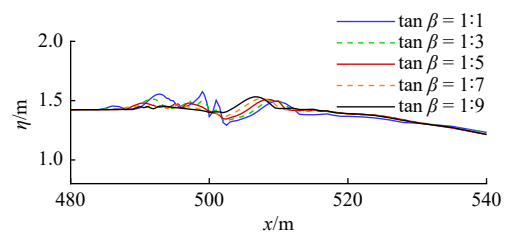


图 22 不同斜坡坡度下最大水面高程的空间分布  
Fig. 22 Spatial distribution of maximum water surface elevation under different slope

其余工况更大,且达到最大值时的横向位置更靠前,出现这种现象可能是由于涌潮在平缓斜坡传播时能量耗散最少,从而使碰撞后剩余的势能和动能更多;在不同坡度的地形上完全破碎后最大水面高程基本一致。图 23a 和图 23b 分别对比了 5 种工况下最大表层速度和最大水深平均速度的空间分布,从图中可以

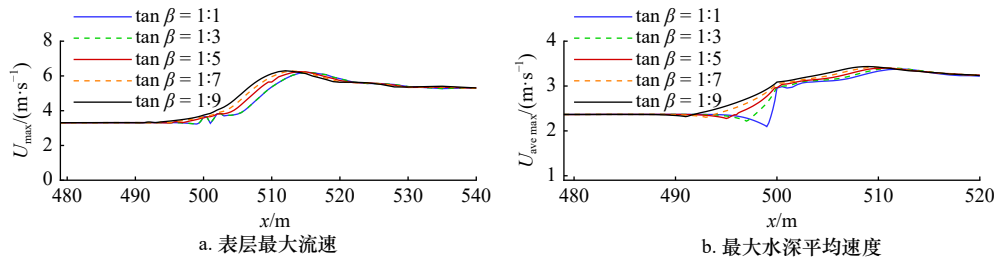


图 23 涌潮传播过程中流速随斜坡坡度变化对比

Fig. 23 Comparison of flow velocity changes with slope during surge propagation

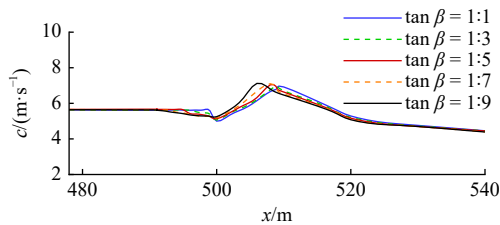


图 24 不同斜坡坡度下潮速的空间分布

Fig. 24 Spatial distribution of tidal velocity at different slope

## 6 结论

本文采用非静压单相流模型 NHWAVE, 通过设置合理的计算工况, 数值模拟了波状涌潮在变化地形上的传播与演变, 对比分析了涌潮高度、潮前水深、斜坡坡度等因素对波状涌潮水动力特性的影响, 主要结论如下:

### 参考文献:

- [1] 威蓝, 肖厅厅, 张芝永, 等. 涌潮水流 CFD 数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2019(3): 32-40.  
Qi Lan, Xiao Tingting, Zhang Zhiyong, et al. Numerical simulation of tidal bore based on CFD method[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(3): 32-40.
- [2] 林炳尧. 钱塘江涌潮的特性[M]. 北京: 海洋出版社, 2008: 87, 130.  
Lin Bingyao. Characteristics of Qiantang River Tide[M]. Beijing: China Ocean Press, 2008: 87, 130.
- [3] 黄静, 潘存鸿, 陈刚, 等. 涌潮的水槽模拟及验证[J]. 水利水运工程学报, 2013(2): 1-8.  
Huang Jing, Pan Cunhong, Chen Gang, et al. Experimental simulation and validation of the tidal bore in the flume[J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(2): 1-8.
- [4] 潘存鸿, 鲁海燕, 曾剑. 钱塘江涌潮特性及其数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2008(2): 1-9.  
Pan Cunhong, Lu Haiyan, Zeng Jian. Characteristic and numerical simulation of tidal bore in Qiantang River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2008(2): 1-9.
- [5] 林伟栋, 赵西增, 叶洲腾, 等. 涌潮运动的 CFD 模拟研究[J]. 水动力学研究与进展, 2017, 32(6): 696-703.  
Lin Weidong, Zhao Xizeng, Ye Zhouteng, et al. Numerical simulation of tidal bore using CFD model[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2017, 32(6): 696-703.

看出不同的地形坡度变化对波状涌潮在传播过程中最大表层速度和最大水深平均速度无显著性影响, 仅在坡角处存在微小的区别。图 24 对比了 5 种工况下波状涌潮潮速的空间分布, 从图中可以看出, 随着底坡坡度的增大, 涌潮潮速在坡顶处略微减小, 一段距离后涌潮潮速基本一致。

(1) 随着涌潮高度的增大, 斜坡前后潮差显著增大且潮高增大位置明显靠前, 最大自由水面高程也随之增大, 但最大水面高程的变化幅度相对减小。另外, 涌潮传播速度逐渐增大, 潮速达到最大值的位置更靠前, 与此同时, 表层流速与沿水深平均速度均呈现增大趋势。

(2) 随着潮前水深的增大, 斜坡前后潮差逐渐减小, 潮高开始增大位置靠前, 同时, 斜坡前的最大水位逐渐减小, 斜坡后的最大水位逐渐增加。除此之外, 斜坡后方的涌潮传播速度相应增大, 但是表层速度和沿水深平均速度却逐渐减小。

(3) 随着斜坡坡度的增大, 斜坡前后潮差略微增大, 局部最大水位空间分布变化显著, 涌潮传播速度仅在斜坡后的局部范围内变化并且呈减小趋势, 同时表层速度和沿水深平均速度略微减小。

- [6] 林炳尧, 黄世昌, 毛献忠. 波状水跃和波状涌潮的分析[J]. 水动力学研究与进展, 1998, 13(1): 106–115.  
Lin Bingyao, Huang Shichang, Mao Xianzhong. Analyses of undular hydraulic jump and undular bore[J]. Journal of Hydrodynamics, 1998, 13(1): 106–115.
- [7] Chanson H. Current knowledge in tidal bores and their environmental, ecological and cultural impacts[J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2011, 11(1): 77–98.
- [8] 刘文虎, 朱小华, 张钟哲, 等. 钱塘江涌潮观测及其动力学特性研究[J]. 大连海洋大学学报, 2015, 30(5): 567–572.  
Liu Wenhua, Zhu Xiaohua, Zhang Zhongzhe, et al. Observation and dynamic characteristics of tidal bore in Qiantang River, China[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2015, 30(5): 567–572.
- [9] Wolanski E, Williams D, Spagnol S, et al. Undular tidal bore dynamics in the Daly Estuary, Northern Australia[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 60(4): 629–636.
- [10] Simpson J H, Fisher N R, Wiles P. Reynolds stress and TKE production in an estuary with a tidal bore[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 60(4): 619–627.
- [11] 岳书波, 曾剑, 陈永平, 等. 涌潮潮头掺气的模型试验研究[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(1): 28–35.  
Yue Shubo, Zeng Jian, Chen Yongping, et al. Investigation of aeration of tidal bore front by physical experiments[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(1): 28–35.
- [12] 潘存鸿, 鲁海燕. 二维浅水间断流动数值模型在涌潮模拟中的应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(11): 2107–2113.  
Pan Cunhong, Lu Haiyan. 2D numerical model for discontinuous shallow water flows and application to simulation of tidal bore[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2009, 43(11): 2107–2113.
- [13] 潘存鸿, 鲁海燕, 于普兵, 等. 钱塘江二维涌潮数值模拟及其应用[J]. 浙江水利科技, 2008(2): 4–8.  
Pan Cunhong, Lu Haiyan, Yu Pubing, et al. 2D numerical simulation of bore on Qiantang River and its application[J]. *Zhejiang Hydrotechnics*, 2008(2): 4–8.
- [14] 黄婷, 张怀, 石耀霖. 基于Boussinesq型方程的钱塘江涌潮数值模拟[J]. 地球物理学报, 2022, 65(1): 79–95.  
Huang Ting, Zhang Huai, Shi Yaolin. Numerical simulation of the tidal bore in the Qiantang River based on Boussinesq-type equations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(1): 79–95.
- [15] 谢东风, 潘存鸿, 陆波, 等. 基于实测资料的钱塘江涌潮水动力学特性研究[J]. 水动力学研究与进展, 2012, 27(5): 501–508.  
Xie Dongfeng, Pan Cunhong, Lu Bo, et al. A study on the hydrodynamic characteristics of the Qiantang tidal bore based on field data[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2012, 27(5): 501–508.
- [16] 张巍, 贺治国, 谈利明, 等. 基于定点连续观测的钱塘江涌潮特性研究[J]. 水动力学研究与进展, 2017, 32(2): 253–259.  
Zhang Wei, He Zhiguo, Tan Liming, et al. Dynamic characteristics of Qiantang tidal bore based on field observations at a fixed location[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2017, 32(2): 253–259.
- [17] Yeh H H, Mok K M. On turbulence in bores[J]. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 1990, 2(5): 821–828.
- [18] Treske A. Undular bores (favre-waves) in open channels-experimental studies[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1994, 32(3): 355–370.
- [19] Miah H C. Physical modelling of the flow field in an UNDULAR tidal bore[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2005, 43(3): 234–244.
- [20] 杨火其, 潘存鸿, 周建炯, 等. 涌潮水力学特性试验研究[J]. 水电能源科学, 2008, 26(4): 136–138.  
Yang Huoqi, Pan Cunhong, Zhou Jianjiong, et al. Experiment study on hydraulic properties of tidal bore[J]. *Water Resources and Power*, 2008, 26(4): 136–138.
- [21] 赵雪华. 钱塘江涌潮的一维数学模型[J]. 水利学报, 1985(1): 50–54.  
Zhao Xuehua. A one-dimensional mathematical model of the surge of Qiantang River[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1985(1): 50–54.
- [22] 潘存鸿. 三角形网格下求解二维浅水方程的和谐Godunov格式[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 204–209.  
Pan Cunhong. Well-balanced Godunov-type scheme for 2D shallow water flow with triangle mesh[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(2): 204–209.
- [23] 潘存鸿, 徐昆. 三角形网格下求解二维浅水方程的KFVS格式[J]. 水利学报, 2006, 37(7): 858–864.  
Pan Cunhong, Xu Kun. Kinetic flux vector splitting scheme for solving 2-D shallow water equations with triangular mesh[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(7): 858–864.
- [24] Landrini M, Colagrossi A, Greco M, et al. Gridless simulations of splashing processes and near-shore bore propagation[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2007, 591: 183–213.
- [25] Li Jing, Liu Huaxing, Tan S K. Lagrangian modeling of tidal bores passing through bridge piers[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2010, 22(1): 496–502.
- [26] Furuyama S I, Chanson H. A numerical study of open channel flow hydrodynamics and turbulence of the tidal bore and dam-break flows[J]. *Hydraulic Model*, 2008.
- [27] 赵渭军, 赵刚, 李永和. 钱塘江海塘护塘建筑物技术演进[J]. 浙江水利科技, 2015, 43(2): 34–37.  
Zhao Weijun, Zhao Gang, Li Yonghe. Investigation on facilities for protecting Qiantang Estuary seadyke[J]. *Zhejiang Hydrotechnics*, 2015, 43(2): 34–37.
- [28] 杨火其, 杨永楚, 庄娟芳. 钱塘江河口斜坡式土堤水下防护面板稳定性试验[J]. 水利水运工程学报, 2001(3): 65–68.

- Yang Huoqi, Yang Yongchu, Zhuang Juanfang. Stability experiment of underwater face-plate on sloping dyke in Qiantangjiang Estuary[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2001(3): 65–68.
- [29] 陈伟, 倪舒娴, 袁淼. 钱塘江海塘建设的历史沿革[J]. *浙江建筑*, 2018, 35(9): 1–6.
- Chen Wei, Ni Shuxian, Yuan Miao. Historical evolution of seawall construction for the Qiantang River[J]. *Zhejiang Construction*, 2018, 35(9): 1–6.
- [30] Ma Gangfeng, Kirby J T, Shi Fengyan. Numerical simulation of tsunami waves generated by deformable submarine landslides[J]. *Ocean Modelling*, 2013, 69: 146–165.
- [31] Liu Wenjun, Wang Bo, Guo Yakun, et al. Experimental investigation on the effects of bed slope and tailwater on dam-break flows[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125256.
- [32] Zhang Fengjie, Wang Bo, Guo Yakun. Experimental study of the dam-break waves in triangular channels with a sloped wet bed[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 255: 111399.
- [33] Yao Yu, Huang Zhenhua, Monismith S G, et al. 1DH Boussinesq modeling of wave transformation over fringing reefs[J]. *Ocean Engineering*, 2012, 47: 30–42.

## Study on the hydrodynamics of undular tidal bore over the uneven seabed

Li Xiaohan<sup>1</sup>, Qu Ke<sup>1,3,4</sup>, Yang Yuanping<sup>2</sup>, Wang Xu<sup>1</sup>

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou 310017, China; 3. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha 410114, China; 4. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China)

**Abstract:** In this study, hydrodynamic characteristics of transformation and breaking processes of the undular tidal bore on the uneven seabed have been numerically investigated by applying a nonhydrostatic numerical wave model (NHWAVE). Effects of tidal bore height, initial water depth and bed slope on the hydrodynamics of tidal bore are discussed in detail. Research findings indicates that the tidal bore height and initial water depth have significant effects on the transformation and breaking processes of the undular tidal bore on the uneven seabed. However, different bed slope on the undular tidal bore hydrodynamic characteristics of the influence of less. The existence of bed slope can lead to a significant increase in the height of the undular tidal bore, causing dramatic changes in the maximum water level along the range, and make the tidal bore propagation speed is reduced. The average speed of water depth tends to increase with the tidal bore height, as well as the height difference between the upstream and downstream tidal bore height. When increasing the water depth, the tidal difference between the upstream and downstream tidal bore height decreases, and the surface velocity decreases monotonically with the average velocity of water depth. The research findings drawn from this study can have certain reference significances for the accurate understanding of the hydrodynamics of tidal bore on the uneven seabed. It provides a scientific basis for the engineering design and safety assessment of wading buildings in the tidal river section.

**Key words:** undular tidal bore; uneven seabed; nonhydrostatic wave model; numerical simulation