

葛昭佩, 唐军, 赵楚嫣. 植被对波浪作用下床面切应力影响的数值模拟分析[J]. 海洋学报, 2022, 44(11): 111–120, doi:10.12284/hyxb2022125

Ge Zhaopei, Tang Jun, Zhao Chuyan. Numerical study on influence of vegetation on bed shear stress under coastal waves[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(11): 111–120, doi:10.12284/hyxb2022125

植被对波浪作用下床面切应力影响的数值模拟分析

葛昭佩¹, 唐军^{1*}, 赵楚嫣¹

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要: 本文基于 OpenFOAM 建立三维波浪数值水槽, 模拟计算植被水域波浪作用下的床面切应力, 分析了入射波高、植被密度、植被淹没高度、水流对植被水域波浪作用下床面切应力的影响。结果表明: 纯波时, 由于植被的阻水作用, 植被水域床面切应力沿程衰减, 其衰减程度与入射波高、植被密度及植被淹没高度呈现正相关; 与纯波时相比, 在波浪和同向流共同作用下正向床面切应力幅值增大, 负向床面切应力幅值减小; 弱水流对植被水域床面切应力的大小及分布无明显影响; 强水流时, 床面切应力在植被水域先增大后逐渐减小并在植被水域后显著降低。

关键词: 海岸植被; 波浪; 床面切应力; OpenFOAM

中图分类号: P731.22

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)11-0111-10

1 引言

波浪作用下的床面切应力对海床泥沙起动具有关键性作用, 是模拟分析近岸泥沙输移、岸滩演变的重要参数。近岸植被具有防浪固滩护岸的作用, 研究近岸植被对波浪作用下床面切应力的影响有助于理解其防护海岸的作用机制。

目前关于波浪作用下床面切应力的研究取得了一定成果。Jonsson^[1]从理论公式出发, 推导了层流边界层的床面切应力及边界层厚度公式, 并引入波浪底摩阻系数及边界层流态判别方法, 给出了紊流边界层的波浪摩阻系数经验公式; 孔令双等^[2]基于边界层理论, 导出了波流环境中床面切应力, 并建立了泥沙起动及水体挟沙力公式; 蔡翠苏^[3]基于水槽试验, 探讨了规则波和不规则波作用下底摩阻系数计算方法; 齐富康等^[4]基于渤海海峡观测数据, 分别应用 Soulsby 和 Van Rijn 的模型计算波流环境中床面切应力; Lin 和 Zhang^[5]建立三维数值模型, 模拟计算线性波、

Stokes 波、孤立波等条件下层流边界层床面切应力, 并分别与解析解比较分析; 滕涌等^[6]基于 ECOMSED 波流耦合底边界层模型, 分析了波高、近底流速及水深对波流条件下床面切应力的影响; Larsen 和 Fuhrman^[7-8]基于 waves2Foam 模拟海啸波的传播及爬升过程, 着重讨论了海啸波作用下的边界层及床面切应力并提出了一种预测海啸波作用下瞬时边界层厚度和床面切应力的方法。相对裸床, 植被影响下波浪水动力特性复杂, 目前关于植被水域波浪作用下床面切应力的计算以经验公式为主。Wang 等^[9]基于水槽试验分析了水流和波流条件下植被水域平均流速及湍流动能, 并由湍流动能推算植被水域床面切应力, 发现纯水流时植被水域床面切应力沿程降低, 而波流条件下植被水域床面切应力增大并在离开植被区后显著大幅降低; Reidenbach 和 Thomas^[10]观测了弗吉尼亚海岸保护区水动力, 并应用经验公式分别计算波、流的床面切应力, 发现与纯水流时相比波流条件下床面切应力大幅增大, 位于大叶藻水域测点处的床面切应力

收稿日期: 2022-03-11; 修订日期: 2022-05-20。

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1404200)。

作者简介: 葛昭佩(1996—), 男, 河南省商丘市人, 主要从事海岸环境水动力研究。E-mail: 1559096070@qq.com

* 通信作者: 唐军(1976—), 男, 宁夏回族自治区中宁县人, 主要从事近岸环境水动力研究。E-mail: jtang@dlut.edu.cn

始终小于裸床处且小于泥沙起动临界切应力,有效保护了海床免受侵蚀;陈家贵和沈小雄^[11]基于 Jonsson^[1]提出的层流边界层公式,结合水槽试验数据,分析了入射波高及柔性植被对最大床面切应力的影响;李颢等^[12]基于 Jonsson^[1]提出的边界层最大切应力公式及 Luhar 等^[13]提出的植被带中边界层流速公式,分析了刚性植被根茎对床面切应力沿程变化的影响。

总体来看,目前关于植被对波浪或波流作用下床面切应力影响的研究主要基于水槽试验或现场观测数据并结合经验公式分析计算,但由于植被影响下的流速剖面及雷诺应力分布复杂,经验公式未能很好地描述波浪条件下植被水域床面切应力^[9,14-15]。本文以 OpenFOAM 中的 waves2Foam 求解器^[16]为基础,在其中引入植被源项,建立植被水域波流数值水槽,通过计算全水深速度场及边界层内速度梯度而直接给出床面切应力分布。在应用已有实验数据及理论公式对数值模型验证的基础上,着重分析了入射波高、植被密度、植被淹没高度及水流对植被水域波浪作用下床面切应力的影响特性。

2 数值模型

waves2Foam 求解器是由 Jacobsen 等^[16]基于 OpenFOAM 开发的一个用于模拟波浪的第三方模块库,提供了水流、线性波、Stokes 波、孤立波等造波文件,亦可自定义造波文件实现其他类型波浪模拟。

2.1 控制方程

waves2Foam 求解器控制方程基于 OpenFOAM 标准,采用气液两相流方程。为考虑波浪与植被相互作用,在动量方程和湍流模型中引入植被源项,即拖曳阻力项和惯性力项^[17](称之为宏观数值模型,以下未特别说明的均指该数值模型)。控制方程为

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) &= \frac{\partial P^*}{\partial x_i} - g_i x_j \frac{\partial \rho}{\partial x_j} \\ &- \frac{1}{2} \rho C_D a N u_i |u_i| - \rho C_M \frac{\pi a^2}{4} N \frac{\partial u_i}{\partial t}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中, ρ 为混合流体密度, $\rho = \alpha \rho_w + (1 - \alpha) \rho_a$, ρ_w 为水密度, ρ_a 为空气密度, α 为体积分数应满足式(8); u_i 为笛卡尔坐标系中的速度分量; g_i 为重力加速度分量; t 为时间; P^* 为动水压力, $P^* = P - \rho g x$, P 为总压力; a 为植被杆径; N 为植被密度; C_D 为植被拖曳力系数,可使用 Morison 公式计算^[18],计算方法将在 2.2 节介绍; C_M 为惯性力系数, $C_M = C_m + 1$, 取 $C_m = 1$; μ_{eff} 为有效动力黏度, $\mu_{\text{eff}} = \mu + \rho \nu_t$, ν_t 由湍流模型获取。

传统湍流模型应用于气液两相流时,由于气液界面处较大的密度梯度^[19]及湍流动能的过度评估^[20]会造成大波陡波传播过程中的波高非物理衰减。为抑制此种现象,本文采用 Larsen 和 Fuhrman^[20]提出的修正 $k-\varepsilon$ 湍流模型。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \nu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \rho \nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \\ &- \rho \varepsilon + G_b + \rho C_{kp} C_D a N \sqrt{u_j u_j} k, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \varepsilon}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\ &+ C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \rho \nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \rho C_{\varepsilon p} C_D a N \sqrt{u_j u_j} \varepsilon, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\nu_t = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon}, \quad \tilde{\varepsilon} = \max \left(\varepsilon, \lambda_2 \frac{C_{\varepsilon 2}}{C_{\varepsilon 1}} \frac{p_0}{p_\Omega} \varepsilon \right), \quad (5)$$

$$\begin{cases} p_0 = 2S_{ij} S_{ij}, & S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \\ p_\Omega = 2\Omega_{ij} \Omega_{ij}, & \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \end{cases} \quad (6)$$

$$G_b = - \frac{\nu_t}{\sigma_i} \frac{\partial \rho}{\partial x_j} g_j, \quad (7)$$

式中, k 为湍流动能; ε 为湍流动能耗散率; ν_t 为湍流运动黏性系数; G_b 为浮力项; C_{kp} 和 $C_{\varepsilon p}$ 为植被源项经验系数,取值同 Hiraoka 和 Ohashi^[21] ($C_{kp} = 1$, $C_{\varepsilon p} = 3.5$)。上述湍流模型及修正项中的经验系数按表 1 取值。

表 1 经验系数取值

Table 1 Default values for the closure coefficient

经验系数	C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_ε	λ_2	σ_i
值	0.09	1.44	1.92	1.3	0.05	0.85

waves2Foam 为两相流求解器,其定义体积分数 α ($0 \leq \alpha \leq 1$) 来描述每个网格中各相的体积比重。各相的运动满足的控制方程为

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial u_i \alpha}{\partial x_i} - \frac{\partial u_{r,i} \alpha (1 - \alpha)}{\partial x_i} = 0, \quad (8)$$

$$u_{r,i} = \min(C_\alpha |u_i|, \max |u_i|). \quad (9)$$

式(8)第三项是用于保持气液界面清晰的人工压缩项; $u_{r,i}$ 为压缩速度; 压缩系数 $C_\alpha \in [0, 1]$, 其默认值为 1。

2.2 植被拖曳力系数

植被拖曳力系数 C_D 是对植被水域水动力特性进行宏观数值模拟时的关键参数,与波浪、水流、植被密切相关,直接影响数值模拟的准确性,但其取值尚无普适方法。本文将上述控制方程中的植被源项去除(令 C_D 、 C_M 、 C_{kp} 、 $C_{\varepsilon p}$ 4 项经验系数均取为 0),通过

直接考虑刚性植被外形对波流的扰动, 详细模拟纯波及波流条件下植被水域的水动力特征(称之为精细数值模型, 在本文中仅用于计算各工况代表 C_D 值), 通过提取植被上的波流及其所在截面的沿植被高度平均流速并使用 Morison 公式(式(10))直接计算植被拖曳力系数。

$$C_D = \frac{2 \int_0^T F_D u dt}{\int_0^T \rho h_v b_v u^2 |u| dt} = \frac{2 \left(\int_0^T F u dt - \int_0^T F_1 u dt \right)}{\int_0^T \rho h_v b_v u^2 |u| dt} = \frac{2 \int_0^T F u dt}{\int_0^T \rho h_v b_v u^2 |u| dt}, \quad (10)$$

式中, F_D 为植株上的拖曳力; F_1 为植株上的惯性力; F 为植株上的波流力, Dalrymple 等^[22]指出阻力与流速之间无相位差, 阻力的做功可由阻力和流速的乘积在周期内积分获得, 然而惯性力与流速之间存在 $\pi/2$ 的相位差, 使得惯性力在周期内的做功为0, 故上式计算过程中可忽略惯性力^[18], F 根据植被上压力及附近流场由式(11)计算; u 为植株所在截面的平均流速; ρ 为水的密度; h_v 为植被淹没高度; b_v 为植被直径。

$$F = \int_0^\eta \left(P + \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_t}{\partial x_t} \right) dA, \quad (11)$$

式中, P 为压力; η 为波面高程; μ_{eff} 为有效动力黏度; dA 为沿植被微分面积。

2.3 边界条件

数值水槽入口与出口采用松弛区造波与消波, 入口处速度场、压力场和自由波面由波浪理论公式给出, 出口采用自由出流条件; 床面采用无滑移边界条件; 两侧壁采用周期性边界条件, 该边界条件能够消除两侧壁面的影响, 可将水槽简化为较窄的数值水槽以提高计算效率, 且已被成功应用于波浪的数值模拟^[23-24]; 顶端采用压力出口边界。时间步长由库朗数

自动调节, 为保证计算稳定, 最大库朗数设置为0.25。

3 模型验证

由于缺乏波浪作用下植被水域床面切应力实测数据, 本文将分别验证植被水域波面演化和无植被时波浪作用下床面切应力。采用海岸和近海工程国家重点实验室开展的植被影响下波浪传播物理水槽试验结果^[25]验证本文模型模拟植被水域波浪传播的有效性; 采用理论公式验证层流边界层时的床面切应力, 采用徐华等^[26]的试验验证紊流边界层时的床面切应力。

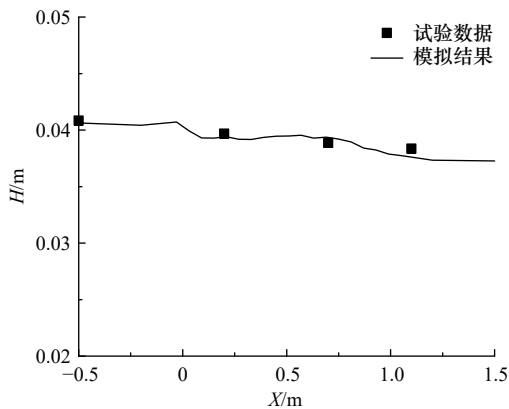
3.1 植被水域波浪传播验证

选取表2中的两种试验工况验证模型模拟植被水域波浪传播的有效性, 其中 C_D 值由精细数值模型计算, C_D 值计算过程以表2中工况1为例, 数值模拟中设置数值水槽长为18 m, 高为0.6 m, 宽为0.12 m, 取植被水域长为1.08 m, 其中以圆柱代表刚性植被, 整体网格尺寸 $\Delta x = \Delta y = 0.03$ m, $\Delta z = 0.01$ m, 为更好地贴合植被外形, 分别加密近植被域及单株植被附近网格。边界条件同2.3节, 此外, 植被表面设为无滑移边界条件。

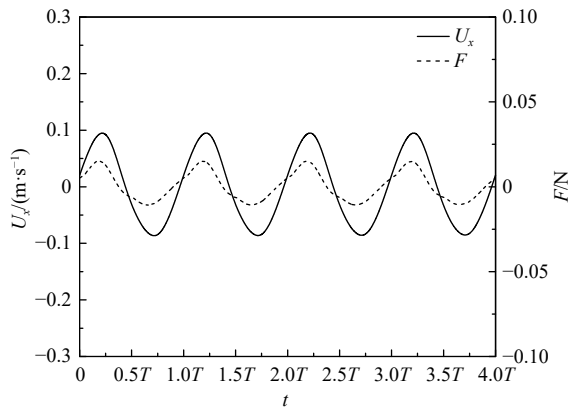
表2 植被及波浪参数

Table 2 Parameters of vegetation and waves

工况	波高/ m	周期/ s	水深/ m	流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	植被 杆径/m	植被 高度/m	植被水域 长度/m	植被密度/ ($\text{stem}\cdot\text{m}^{-2}$)
1	0.04	1.5	0.3	0	0.005	0.6	5	560
2	0.04	1.5	0.3	0.186	0.005	0.6	5	560



a. 植被水域波面演化



b. $x=0.6$ m处植被上的波浪力及截面平均速度

图1 考虑植被外形扰动的模拟结果

Fig. 1 Simulation results considering the disturbance of vegetation shape

样的方法计算每一排植株处的周期平均 C_D 值后, 做平均得出空间-周期平均 C_D 值作为该工况的代表 C_D 值。

将利用精细模型计算的各工况代表 C_D 值代入宏观模型中模拟计算。波浪经过植被水域的波面演化

及流速衰减的模拟值与试验值对比如图 2 和图 3 所示, 由图可知, 模型计算结果和试验数据^[25] 符合性较好, 表明利用精细数值模型计算 C_D 值准确并且使用宏观数值模型能够准确模拟植被水域波浪及波流水动力变化。

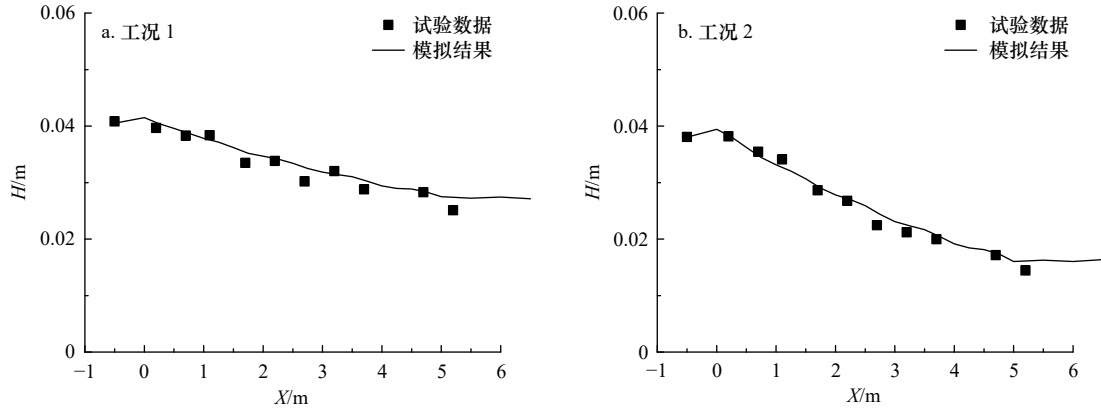


图 2 植被水域波面演化

Fig. 2 Free surface evolution along the vegetation zones

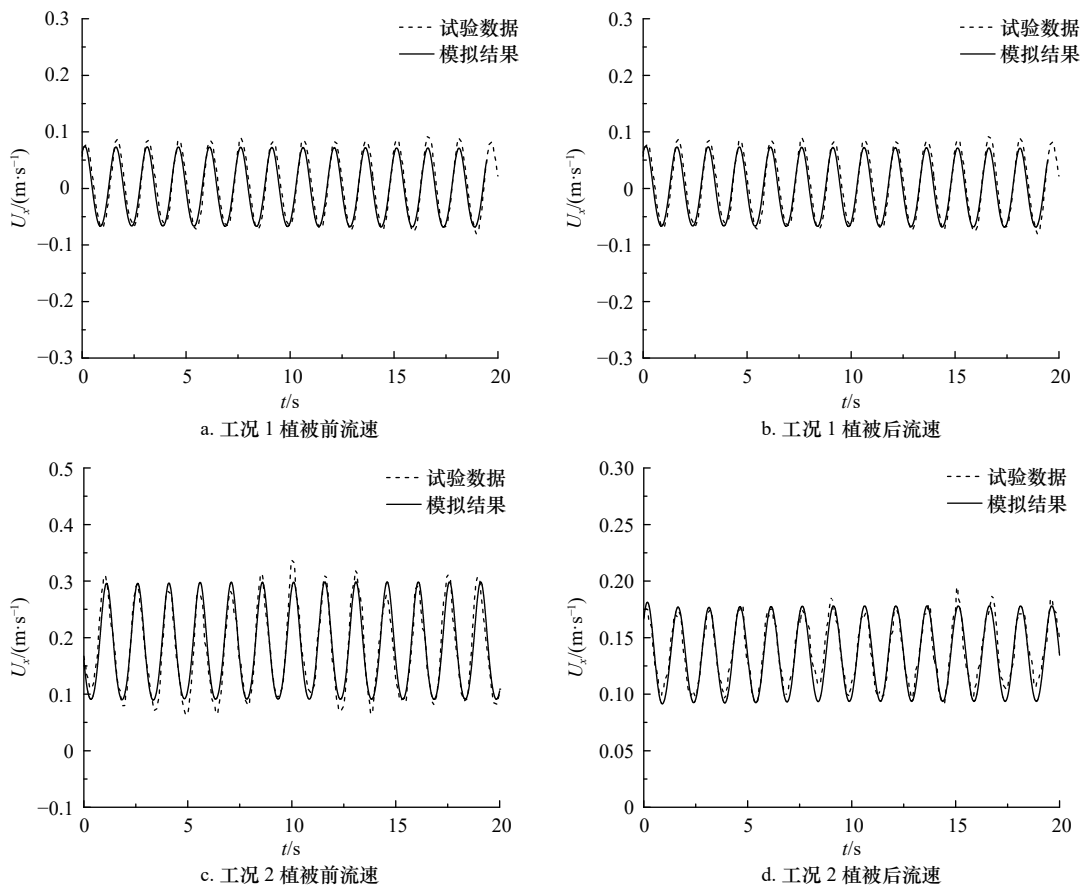


图 3 植被水域流速衰减验证

Fig. 3 Verification of velocity attenuation in vegetation zones

3.2 波浪作用下床面切应力验证

本文数值模型通过求解雷诺平均 Navier-Stokes 方程得出波浪作用下全水深速度场及边界层内速度梯度, 并由公式(12)计算床面切应力。

$$\tau = \rho(v + v_r) \frac{\partial u}{\partial z}. \quad (12)$$

为验证模型计算床面切应力的准确性, 此处设置 3 组验证工况, 其中工况 1、工况 2 为本试验工况, 工

况3为徐华等^[26]的试验工况,波浪参数如表3所示。工况1和工况2的边界层雷诺数均小于 1.26×10^4 ,依据Jonsson^[1]提出的判定标准,两者均属于层流边界层,工况3则属于光滑紊流边界层。

表3 验证工况参数

Table 3 Parameters of verification conditions

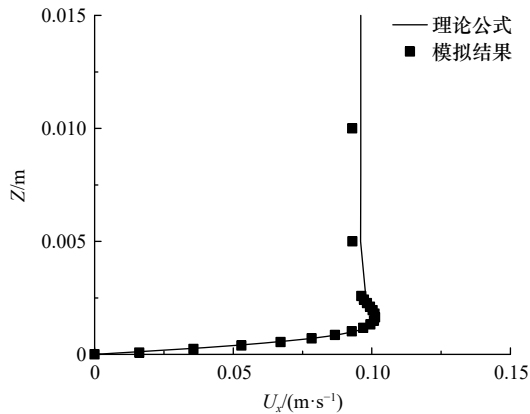
工况	波高/m	周期/s	水深/m	波浪水质点振幅/m	边界层雷诺数
1	0.05	1.5	0.4	0.022	2 103.68
2	0.1	1.5	0.4	0.045	8 414.72
3	0.15	2	0.54	0.092	26 769.86

线性波层流边界层波速^[27]及切应力理论解为

$$u = u_m [\cos(kx - \omega t) - e^{-\beta z} \cos(kx - \omega t + \beta z)], \quad (13)$$

$$\tau = \rho v \left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=0} = \rho v \beta u_m [\cos(kx - \omega t) + \sin(kx - \omega t)], \quad (14)$$

五阶 Stokes 波层流边界层波速^[28]及切应力理论解为



$$u = \sum_{n=1}^5 U_n \{ \cos n(kx - \omega t) - e^{-\beta_n z} \cos [n(kx - \omega t) + \beta_n z] \}, \quad (15)$$

$$\tau = \rho v \left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=0} = \rho v \sum_{n=1}^5 \beta_n U_n [\cos n(kx - \omega t) + n \sin n(kx - \omega t)], \quad (16)$$

式中, u_m 为波浪水质点最大水平速度; k 为波数; ω 为角频率; $\beta = \sqrt{\omega/2\nu}$ 为边界层参数; z 为距底部的距离; $\beta_n = \sqrt{n\omega/2\nu}$; U_n 为第 n 阶波浪水质点水平速度分量幅值。

边界层流速剖面及床面切应力验证结果如图4至图6所示。其中,工况1采用线性波理论解验证,工况2采用五阶 Stokes 波理论解验证,工况3采用试验测量值^[26]验证。从图中可以看出,待波浪场稳定后,工况1模拟值与理论值符合性较好;工况2床面切应力在波谷时模拟值较理论值偏大,但差值小于10%;工况3模拟值与试验测量值在一个完整周期内总体符合良好,表明该数值模型能够准确计算波浪作用下床面切应力。

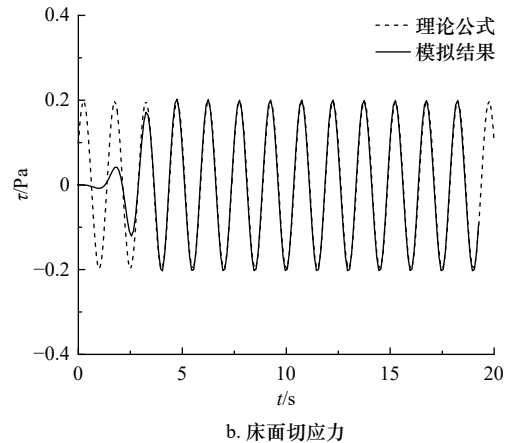


图4 理论值与模拟值对比(工况1)

Fig. 4 Comparison between theoretical and simulated values (case 1)

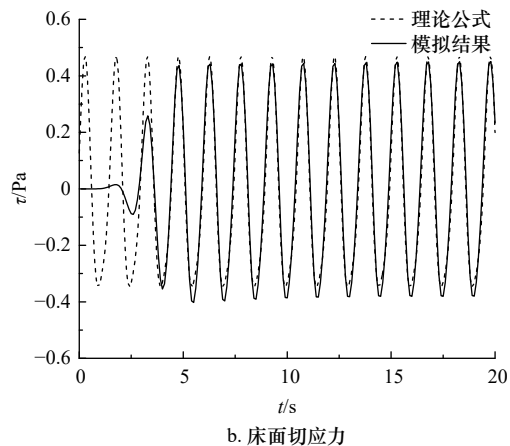
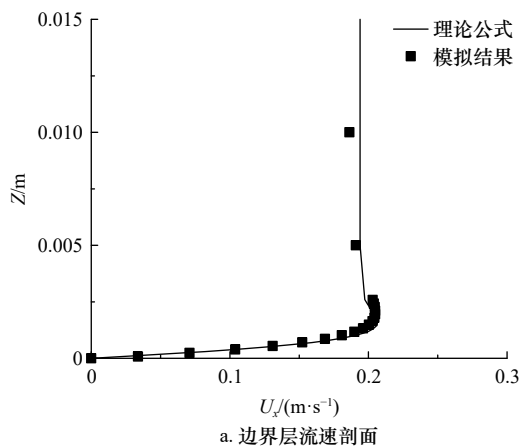


图5 理论值与模拟值对比(工况2)

Fig. 5 Comparison between theoretical and simulated values (case 2)

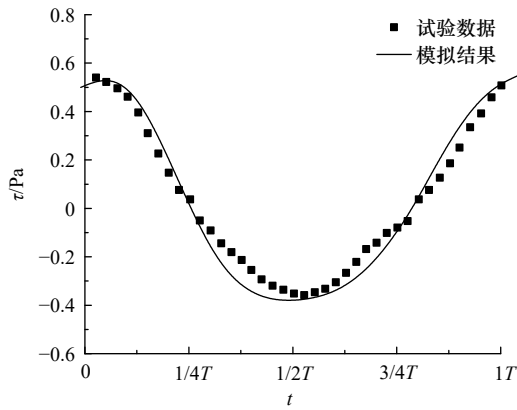


图 6 床面切应力对比(工况 3)

Fig. 6 Comparison of bed shear stress (case 3)

4 模拟结果分析

为分析不同入射波高、植被密度、植被淹没高度及水流流速条件下, 植被水域床面切应力的分布特征, 本文共模拟计算 22 种工况, 见表 4。其中工况 1、2、3、12、14、15、18、19、20 为文献 [25] 的试验工况, 这 9 种工况的波面演化及流速衰减模拟值与试验值均符合良好。

纯波时, 波浪经过植被水域后波高衰减的同时床面切应力也随之减小, 见图 7($x=0$ m 处为植被起点), 这是由于植被的阻水作用, 近底流速沿植被水域衰减使得边界层流速梯度减小所致(图 8)。图 7 中植被前后的波面与床面切应力均存在 $\pi/4$ 的相位差, 说明植被对波高和床面切应力的衰减作用是同步的。此外, 该相位差与式(13)、式(14)相一致, 进一步验证了该数值模型的准确性。

当植被处于淹没状态时, 植被的阻水效应仅发生在冠层以下, 使这一区域流速减小且阻水作用随着淹没高度的增大而增大, 而冠层以上由于过水断面的减小使得流速增大且超过无植被时的流速, 故在植被顶

端形成较大的速度梯度(图 9); 此外, 由于边界层的作用在近底处存在一速度峰值。上述水平速度沿水深的分布规律与 Liu 等 [29] 的试验结果一致。

表 4 模拟工况参数

Table 4 Parameters of numerical simulation conditions

工况	波高/m	周期/s	水深/m	流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	植被高 度/m	植被水域 长度/m	植被密度/ ($stem \cdot m^{-2}$)
1	0.05	1.5	0.4	0	0.6	5	560
2	0.1	1.5	0.4	0	0.6	5	560
3	0.15	1.5	0.4	0	0.6	5	560
4	0.1	1.5	0.4	0	0.6	5	149
5	0.1	1.5	0.4	0	0.6	5	2 228
6	0.1	1.5	0.4	0	0.1	5	560
7	0.1	1.5	0.4	0	0.2	5	560
8	0.1	1.5	0.4	0	0.3	5	560
9	0.05	1.5	0.4	0.01	0.6	5	560
10	0.05	1.5	0.4	0.02	0.6	5	560
11	0.05	1.5	0.4	0.04	0.6	5	560
12	0.05	1.5	0.4	0.063	0.6	5	560
13	0.05	1.5	0.4	0.08	0.6	5	560
14	0.05	1.5	0.4	0.103	0.6	5	560
15	0.05	1.5	0.4	0.155	0.6	5	560
16	0.05	1.5	0.4	0.2	0.6	5	560
17	0.1	1.5	0.4	0.02	0.6	5	560
18	0.1	1.5	0.4	0.062	0.6	5	560
19	0.1	1.5	0.4	0.103	0.6	5	560
20	0.1	1.5	0.4	0.155	0.6	5	560
21	0.1	1.5	0.4	0.2	0.6	5	560
22	0.1	1.5	0.4	0.3	0.6	5	560

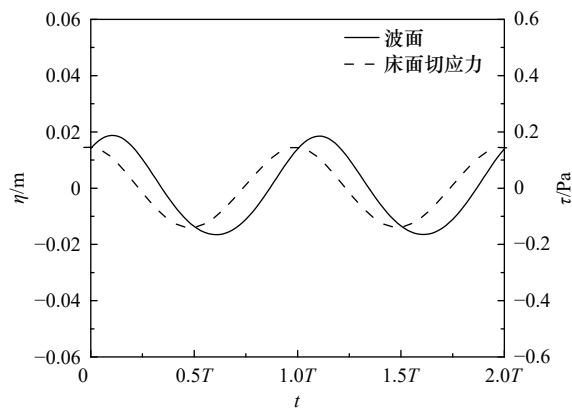
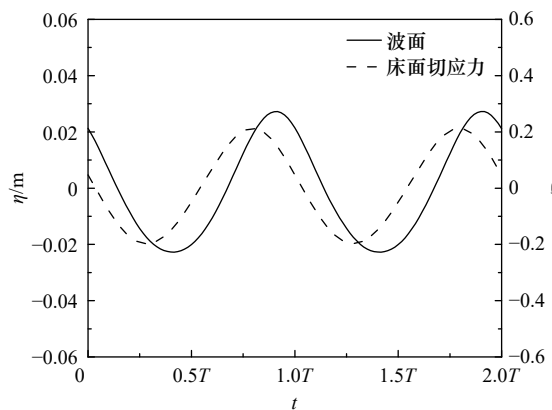


图 7 波面及床面切应力(工况 1)

Fig. 7 Free surface and bed shear stress (case 1)

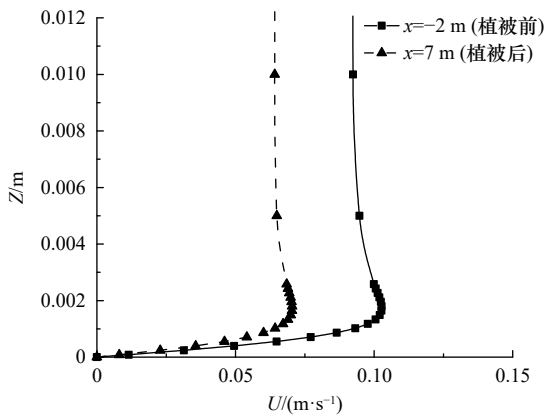


图 8 近底流速剖面(工况 1)

Fig. 8 The near-bottom velocity profile (case 1)

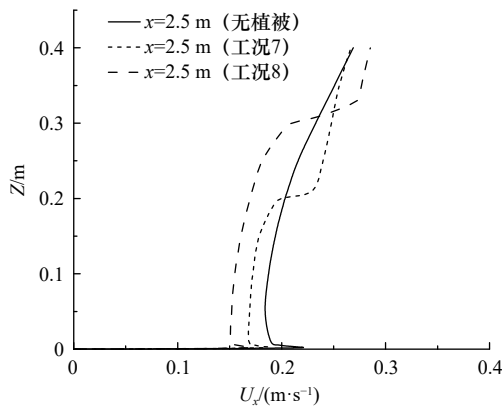


图 9 淹没植被沿水深速度剖面

Fig. 9 Longitudinal velocity profile of submerged vegetation

同向水流的存在会增加波浪水质点速度的非线性,同时增大正向床面切应力幅值,减小负向床面切应力幅值,使得一个波周期内正向切应力时间延长,负向切应力时间缩短,如图 10 所示。

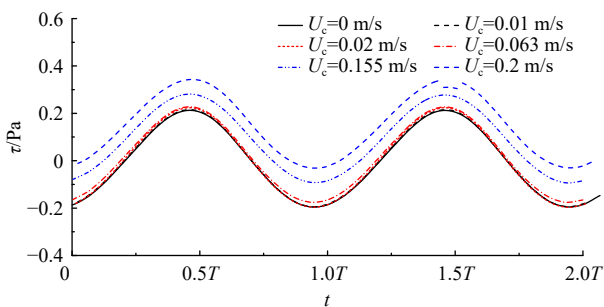


图 10 不同流速下床面切应力变化

Fig. 10 Variation of bed shear stress under different current velocity

工况 1~22 的最大床面切应力在植被水域的沿程变化如图 11 所示。当波浪传播至植被水域时,由于植被阻力作用,流速降低,形成流速梯度,增大了湍流强度,从而在植被前端形成紊流增强区^[30],使得该区域床面切应力小幅增大,且随着入射波高增大、植

被密度增大、水流流速增大,此种现象均愈加明显(综合图 11 可知)。入射波波高越大,在近底边界层形成的流速梯度越大,床面切应力随之增大;纯波时,由于植被的阻碍,床面切应力沿程衰减且植被水域前段衰减强度大于后段,植被对床面切应力的衰减作用随着入射波波高的增大而增大,波高 $H=0.05$ m 时床面切应力衰减率为 29.93%,波高 $H=0.15$ m 时增大至 53.20%(图 11a)。植被密度是植被水域主要参数之一,本文选取 3 种不同植被密度(工况 2、工况 4、工况 5)进行模拟,结果如图 11b,可知植被密度越大,波浪受到的阻力越大,植被对床面切应力的衰减作用随之增大。当植被处于淹没状态时, Nepf 的试验结果表明,当 $ah_v > 0.1$ 时,植被顶端会出现速度拐点形成较大的速度梯度(图 9)从而增强该区域附近的湍流强度,称之为冠层湍流;但当 $ah_v > 0.23$ 时,冠层湍流被限制在植被顶端,无法穿过植被层对底床处产生明显影响(其中, $a = \frac{b_v}{\Delta S_v}$, ΔS_v 为柱心距, b_v 为植被直径)^[31]。本节淹没工况 $ah_v > 0.28$,均避免了植被顶端效应对底床的影响。不同植被淹没高度对床面切应力的影响如图 11c,可以看出随着植被淹没高度的增加,植被对床面切应力的衰减作用增强,且出水植被衰减作用明显大于淹没植被。水流对波浪要素的变化有重要影响,但流速较小时对波浪边界层内部结构影响很小^[32],故在弱水流时最大床面切应力无明显变化,不过随着流速的不断增大,最大床面切应力增大愈加明显(图 11d);当水流为强水流时,植被水域床面切应力大于无植被水域,并在出植被水域后突然大幅降低,这一变化规律与 Wang 等^[9]基于试验测量的湍流动能估算床面切应力的变化趋势一致。图 12 为不同流速下植被前后最大床面切应力的衰减率,可以看出当流速较小时(约在 $U_c < 0.5U_w$, U_c 为水流流速, U_w 为波浪速度)波流通过植被水域时最大床面切应力衰减率无明显变化,之后随着流速不断增大衰减率明显增大。

5 结论

本文 OpenFOAM 中的 waves2Foam 求解器建立了含植被水域的波流数值水槽,模拟分析了波浪、水流、植被要素对植被水域床面切应力衰减的影响。模拟结果表明:当波浪传播到植被前端时,床面切应力会出现增大现象,并随着入射波高增大、水流流速增大、植被密度增大此种现象愈加明显;纯波时,波高和植被密度的增大均会导致植被水域床面切应力衰减幅度的增大,并且床面切应力在植被水域前段的衰减幅度较大,后段衰减幅度减小;对于完全淹没植

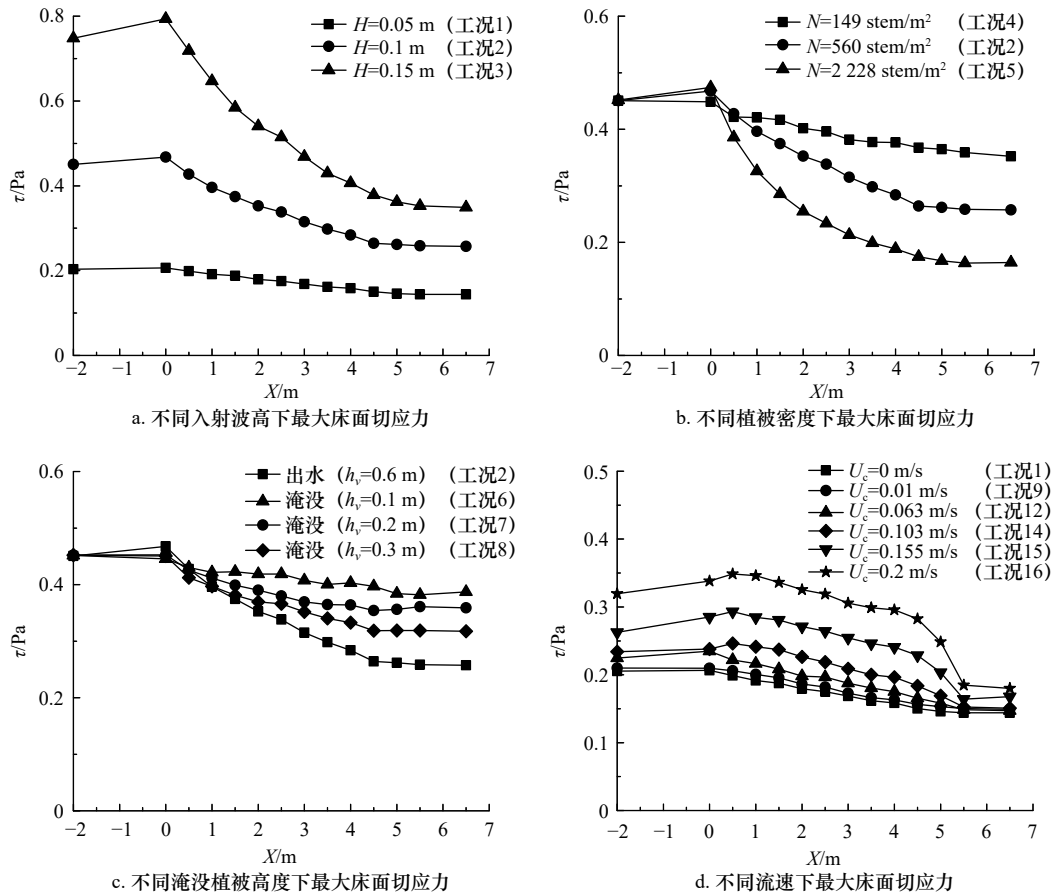


图 11 不同工况下植被水域最大床面切应力分布

Fig. 11 Distribution of maximum bed shear stress in vegetation zones under different conditions

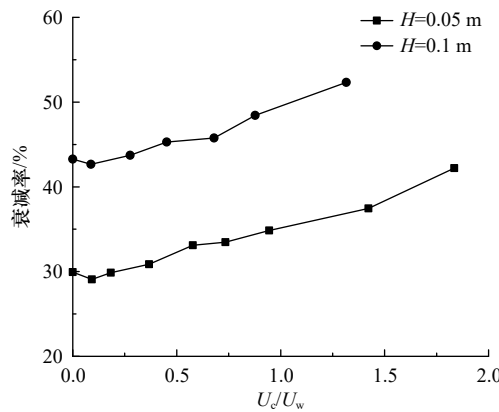


图 12 不同流速下最大床面切应力衰减率

Fig. 12 Decay rate of maximum bed shear stress at different current velocities

被, 植被水域的床面切应力沿程衰减幅度与植被淹没高度正相关, 并且当植被非淹没时, 植被水域的床面切应力沿程衰减幅度明显较大; 与纯波时相比, 在波浪和同向流共同作用下正向床面切应力幅值增大, 负

向床面切应力幅值减小, 使得一个波周期内正向切应力时间延长负向切应力时间缩短; 当水流流速较小时, 床面切应力的衰减率与无水流时相近, 之后随着流速增大衰减率随之增大。

参考文献:

[1] Jonsson I G. Wave boundary layers and friction factors[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Coastal Engineering. Tokyo: ASCE, 1966: 127-148.

- [2] 孔令双, 曹祖德, 焦桂英, 等. 波、流共存时的床面剪切力和泥沙运动[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2003, 18(1): 93–97.
Kong Lingshuang, Cao Zude, Jiao Guiying, et al. The bottom shear stress and sediment movement for a wave-current coexisting system[J]. *Journal of Hydrodynamics Series A*, 2003, 18(1): 93–97.
- [3] 蔡翠苏. 波浪作用下底摩阻系数和泥沙起动实验研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
Cai Cuisu. Laboratory investigation on wave friction factor and sediment initial motion under water waves[D]. Nanjing: Hohai University, 2007.
- [4] 齐富康, 边昌伟, 徐景平. 渤海海峡沉积物运输的参数化计算[J]. 海洋学报, 2020, 42(3): 83–96.
Qi Fukang, Bian Changwei, Xu Jingping. Parameterization of sediment transport in the Bohai Strait[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(3): 83–96.
- [5] Lin Pengzhi, Zhang Wenyu. Numerical simulation of wave-induced laminar boundary layers[J]. *Coastal Engineering*, 2008, 55(5): 400–408.
- [6] 滕涌, 杨永增, 芦静, 等. 波浪对泥沙作用的数值研究及在渤海区域的检验[J]. 海洋学报, 2012, 34(5): 174–182.
Teng Yong, Yang Yongzeng, Lu Jing, et al. A numerical study of the wave effect on sediment transport and test in the Bohai Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2012, 34(5): 174–182.
- [7] Larsen B E, Fuhrman D R. Full-scale CFD simulation of tsunamis. Part 1: model validation and run-up[J]. *Coastal Engineering*, 2019, 151: 22–41.
- [8] Larsen B E, Fuhrman D R. Full-scale CFD simulation of tsunamis. Part 2: boundary layers and bed shear stresses[J]. *Coastal Engineering*, 2019, 151: 42–57.
- [9] Wang X Y, Xie W M, Zhang D, et al. Wave and vegetation effects on flow and suspended sediment characteristics: a flume study[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 182: 1–11.
- [10] Reidenbach M A, Thomas E L. Influence of the Seagrass, *Zostera marina*, on wave attenuation and bed shear stress within a shallow coastal bay[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2018, 5: 397.
- [11] 陈家贵, 沈小雄. 波浪作用下柔性植物对最大床面剪切力的影响研究[J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(4): 278–280.
Chen Jiagui, Shen Xiaoxiong. Study on the effect of flexible plants on the maximum bed shear stress under waves[J]. *China Water Transport*, 2016, 16(4): 278–280.
- [12] 李颢, 陈杰, 蒋昌波, 等. 规则波下刚性植物根茎对边界层最大剪切力特性影响研究[J]. 海洋学报, 2021, 43(12): 102–110.
Li Xie, Chen Jie, Jiang Changbo, et al. Study on the influence of rigid plant roots and stems on the maximum shearing characteristics of boundary layer under regular wave[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(12): 102–110.
- [13] Luhar M, Couto S, Infantes E, et al. Wave-induced velocities inside a model seagrass bed[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(C12): C12005.
- [14] Hansen J C R, Reidenbach M A. Wave and tidally driven flows in eelgrass beds and their effect on sediment suspension[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2012, 448: 271–287.
- [15] Etminan V, Ghisalberti M, Lowe R J. Predicting bed shear stresses in vegetated channels[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(11): 9187–9206.
- [16] Jacobsen N G, Fuhrman D R, Fredsøe J. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2012, 70(9): 1073–1088.
- [17] Maza M, Lara J L, Losada I J. Tsunami wave interaction with mangrove forests: a 3-D numerical approach[J]. *Coastal Engineering*, 2015, 98: 33–54.
- [18] Hu Z, Suzuki T, Zitman T, et al. Laboratory study on wave dissipation by vegetation in combined current-wave flow[J]. *Coastal Engineering*, 2014, 88: 131–142.
- [19] Devolder B, Rauwoens P, Troch P. Application of a buoyancy-modified $k-\omega$ SST turbulence model to simulate wave run-up around a monopile subjected to regular waves using OpenFOAM®[J]. *Coastal Engineering*, 2017, 125: 81–94.
- [20] Larsen B E, Fuhrman D R. On the over-production of turbulence beneath surface waves in Reynolds-averaged Navier-Stokes models[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2018, 853: 419–460.
- [21] Hiraoka H, Ohashi M. A ($k-\epsilon$) turbulence closure model for plant canopy flows[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(10/11): 2139–2149.
- [22] Dalrymple R A, Kirby J T, Hwang P A. Wave diffraction due to areas of energy dissipation[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1984, 110(1): 67–79.
- [23] Etminan V, Lowe R J, Ghisalberti M. Canopy resistance on oscillatory flows[J]. *Coastal Engineering*, 2019, 152: 103502.
- [24] Wang Y X, Yin Z G, Liu Y. Numerical investigation of solitary wave attenuation and resistance induced by rigid vegetation based on a 3-D RANS model[J]. *Advances in Water Resources*, 2020, 146: 103755.
- [25] 王倚彤. 植被水域同向水流影响下规则波传播模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
Wang Yitong. Simulation study of regular wave propagation under the influence of coplanar currents in vegetation zones[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [26] 徐华, 夏云峰, 蔡喆伟, 等. 复杂水动力环境下床面切应力测量与研究初探[C]//第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会. 北京: 海洋

出版社, 2017: 260–266.

Xu Hua, Xia Yunfeng, Cai Zhewei, et al. Measurement and study of bed shear stress under complex hydrodynamic environment[C]// The 18th China Offshore Engineering Symposium. Beijing: China Ocean Press, 2017: 260–266.

- [27] Lamb H. Hydrodynamics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1932.
- [28] Schaffer H A, Svendsen I A. Boundary layer flow under skew waves[J]. Int. Hydrodyn. and Hydraulic Engrg. 1986: 13–23.
- [29] Liu D, Diplas P, Fairbanks J D, et al. An experimental study of flow through rigid vegetation[J]. Journal of Geophysical Research Earth Surface, 2008, 113(F4): F04015.
- [30] 陈明, 刘曙光, 娄厦, 等. 刚性植物对波高衰减和水流结构的影响[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(6): 32–37.
Chen Ming, Liu Shuguang, Lou Sha, et al. Impact of rigid vegetation on wave attenuation and flow structure[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(6): 32–37.
- [31] Nepf H M. Hydrodynamics of vegetated channels[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2012, 50(3): 262–279.
- [32] Tolman H L. An evaluation of expressions for wave energy dissipation due to bottom friction in the presence of currents[J]. *Coastal Engineering*, 1992, 16(2): 165–179.

Numerical study on influence of vegetation on bed shear stress under coastal waves

Ge Zhaopei¹, Tang Jun¹, Zhao Chuyan¹

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: To analyze the effects of wave height, vegetation density, submerged height of vegetation and current on the bed shear stress at vegetation zones, a three-dimensional wave-current numerical flume is established based on OpenFOAM in this study. The results show that the bed shear stress attenuates along the vegetation zones because of the blocking effect of vegetation, and the decay rate is positively correlated with the wave height, vegetation density and submerged height of vegetation. Compared with pure wave, the amplitude of positive bed shear stress increases and the amplitude of negative bed shear stress decreases under the condition of combined wave-current flows. The weak current has no obvious effect on the size and distribution of the bed shear stress at vegetation zones. In the case of strong current, the bed shear stress increases at vegetation zones and suddenly decreases after the vegetation zones.

Key words: coastal vegetation; wave; bed shear stress; OpenFOAM