

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, doi:10.12284/hyxb2021181

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, doi:10.12284/hyxb2021181

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

李颢¹, 陈杰^{1,2,3,4*}, 蒋昌波^{1,2,3,4}, 姚震¹, 罗元拼¹, 罗婉娇¹

(1. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南长沙 410114; 2. 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; 3. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南长沙 410114; 4. 湖南省环境保护河湖疏浚污染控制工程技术中心, 湖南长沙 410114)

摘要: 基于考虑根茎影响的近岸植物消波实验, 对边界层的最大剪切力特性进行了研究。利用前人提出的规则波下含植物水流的边界层流速计算公式, 探究了单独根和根茎组合两种植物模型的边界层最大剪切力特性, 分析了两种模型的剪切力的沿程变化、植物对剪切力衰减特性的影响, 拟合了衰减系数的公式。研究表明, 波浪在通过植物带时, 剪切力会出现一定幅度增大, 随后逐渐降低。植物对剪切力的消减效果随入射波高的增大而增大, 且茎有助于根群对边界层最大剪切力的消减作用, 其消减系数的范围为 0.06~0.61, 拟合的公式更加适用于水深较浅的情况。

关键词: 概化植物模型; 边界层; 剪切力; 根; 茎; 规则波

中图分类号: TV139.2; P731.22

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)12-0102-09

1 引言

近岸植物与波浪的相互作用一直是海岸研究领域的热点^[1-4]。以红树林为代表的刚性植物近岸消波减浪效果显著^[5], 其作为一种新型生态屏障, 可起到保护海岸的作用。

许多学者开展了以概化模型模拟近岸植物的研究工作, 包括数值模拟^[6-7]和实验研究。在实验方面, 起初学者们多以立体圆柱来模拟刚性植物, 如 Dalrymple 等^[8]忽略植物的部分结构特性, 以垂直圆柱模拟植物, 对规则波下的沿程能量损失做了研究。在此基础上, 部分学者考虑到植物结构上的差异性, 以不同的模型模拟植物的根、茎、叶。如 Husrin 等^[9]

以真实植物根和茎的刚性模型探究了孤立波下红树林的消波特性。但这些学者只考虑了单独的根、茎、叶对波浪的影响, 而忽略了根茎叶之间的配合, 三者组合共同对波浪的影响。所以, 一些学者优化了实验及实验模型, 进一步考虑了植物根、茎、叶组合对波浪的影响^[10]以及单株和簇状植物不同的消波特性^[11]。但前人的研究大多是分析了波浪的波高^[5]、流速^[12]、波能衰减^[8]等特性, 而对波浪经过植物带的过程中沿程剪切力变化的分析很少。

底部剪切力是引起泥沙输运而导致泥沙淤积的主要动力, 波浪作用下的泥沙运动已有许多学者^[13-15]研究, 对于波浪剪切力^[16-20]研究工作也已经开展。在波浪传播至红树林时, 大量刚性植物的存在会引起波

收稿日期: 2020-07-10; 修订日期: 2021-06-01。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51839002); 国家自然科学基金面上项目(51979014); 国家重点研发计划(2021YFB2601100); 湖南省研究生教育创新工程和专业能力提升工程项目(CX20200858); 长沙理工大学水利与环境工程学院院级研究生实验创新项目。

作者简介: 李颢(1997—), 男, 湖南省常德市人, 主要从事海岸动力过程及其模拟技术研究。E-mail: 1319394361@qq.com

* **通信作者:** 陈杰(1982—), 男, 广西省桂林市人, 博士, 教授, 主要从事海岸防灾减灾研究。E-mail: chenjie166@163.com

浪剪切力的变化,国内外已开展了一些研究工作^[21-22]。红树林根系发达,专门针对刚性植物根茎结构对波浪剪切力的影响,还有待进一步研究。因此,为弥补现有研究不足,设计了根茎定量概化植物模型,分析刚性植物的根、茎对于规则波下边界层最大剪切力特性的影响。

2 实验设置

实验在长沙理工大学长 40.0 m、高 0.8 m、宽 0.5 m 波浪水槽中进行。图 1 给出实验布置情况,水槽右侧设置了消能坡,消除波浪反射的干扰,左侧设有推板式造波机。水槽中分别设置了编号为 G1 至 G8 的浪高仪。2.0 m 长的植物模型带设置在水槽中部。

如图 2a 和图 2b 所示,实验设计了变态比尺红树林模型,横向比尺为 8:39,竖向比尺为 1:10。茎高 45.0 cm,采用直径 2.0 cm 的空心有机玻璃圆柱进行模拟。根高 14.1 cm,采用直径 0.8 cm 的空心有机玻璃圆柱进行模拟,有机玻璃圆管动态弹性模量 $E_{动}=4.35 \times 10^9$ N/m²、静态弹性模量 $E_{静}=3.15 \times 10^9$ N/m²。由于树根根须数量、根须直径、对底面投影面积等几何因素非常复杂,对植物树根部分仅做概化模型,且该模型材料,在波浪作用下不会产生变形,可以较好地模拟植物树干部分。如图 2d 所示在底部采用有机玻璃底板来固定植物模型,底板尺寸长×宽×高为 200.0 cm×49.5 cm×0.8 cm。单个植物模型根群直径为 10.0 cm,模型横向边距为 2.6 cm,间距为 3.2 cm;纵向边距为 1.975 cm,间距为 1.85 cm。

如表 1 所示,实验采用规则波为入射波,考虑了两种水深 h 、4 种波高 H 和 4 种周期 T 。模型分别采用根茎组合(如图 2b 所示)、单独根(图 2b 中去掉长茎即为单独根模型)两种植物模型型式。

3 理论分析

对于黏性很小的流体或大雷诺数的流体运动,黏性影响主要限于边界层,在边界层内存在着很大的速度梯度和相应的剪切力。针对此次试验,结合边界层

理论和前人的试验经验,可将整个植物带根群视为边界层^[12]。故在无植物带水流中,边界层最大剪切力的位置在底床附近;而含植物带水流中,边界层最大剪切力出现在植物带根群顶部附近。

Jonsson^[22]在总结前人研究工作基础上,对波浪底部边界层作了较全面的探讨,提出波浪作用下边界层最大剪切力 τ_m 可由下式计算:

$$\tau_m = \frac{1}{2} \rho f_w u_m^2, \quad (1)$$

式中, ρ 为流体密度,取 1 000 kg/m³; f_w 为波浪底摩擦系数; u_m 为近底波浪质点水平速度的最大值。层流边界层下的波浪摩擦系数计算式如下:

$$f_w = \frac{2}{\sqrt{Re}}, \quad (2)$$

式中,雷诺数 Re 计算如下:

$$Re = \frac{u_m a_m}{\mu}, \quad (3)$$

式中, μ 为水的黏滞系数,实验室温度为 20℃,取 1.01×10^{-6} kPa·s。

底部水质点最大运动振幅 a_m 可由下式计算:

$$a_m = \frac{A}{\sinh kh}, \quad (4)$$

$$u_c = a_m \sigma, \quad (5)$$

$$u_m = \sqrt{\frac{4 C_{Dw} k}{3\pi C_{Dc} \sigma} u_c^2}, \quad (6)$$

式中, A 为振幅,取 $A=H/2$; H 为波高; h 为水深; k 为波数; σ 为圆频率; C_{Dw} 是瞬时阻力系数; C_{Dc} 是时均阻力系数,比值取为 1.0^[21]。

式(5)是基于微幅波理论计算的近底质点水平速度,式(6)则是由 Luhar 等^[12]基于含植物带的规则波,经过推导,得出的在植物带中边界层流速的计算公式。

Jonsson^[22]给出波浪的边界层从层流状态进入紊流状态的判断依据为 $Re \geq 1.26 \times 10^4$ 。

图 3 给出了 G3 至 G7 位置的雷诺数计算结果,图中显示所有工况下边界层雷诺数均满足 Jonsson^[22]给出的判别式,故边界层处于层流状态。

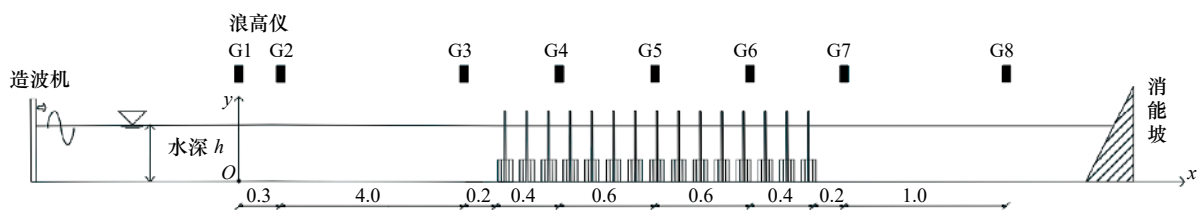


图 1 实验布置(单位: m)

Fig. 1 Sketch of experiment (unit: m)

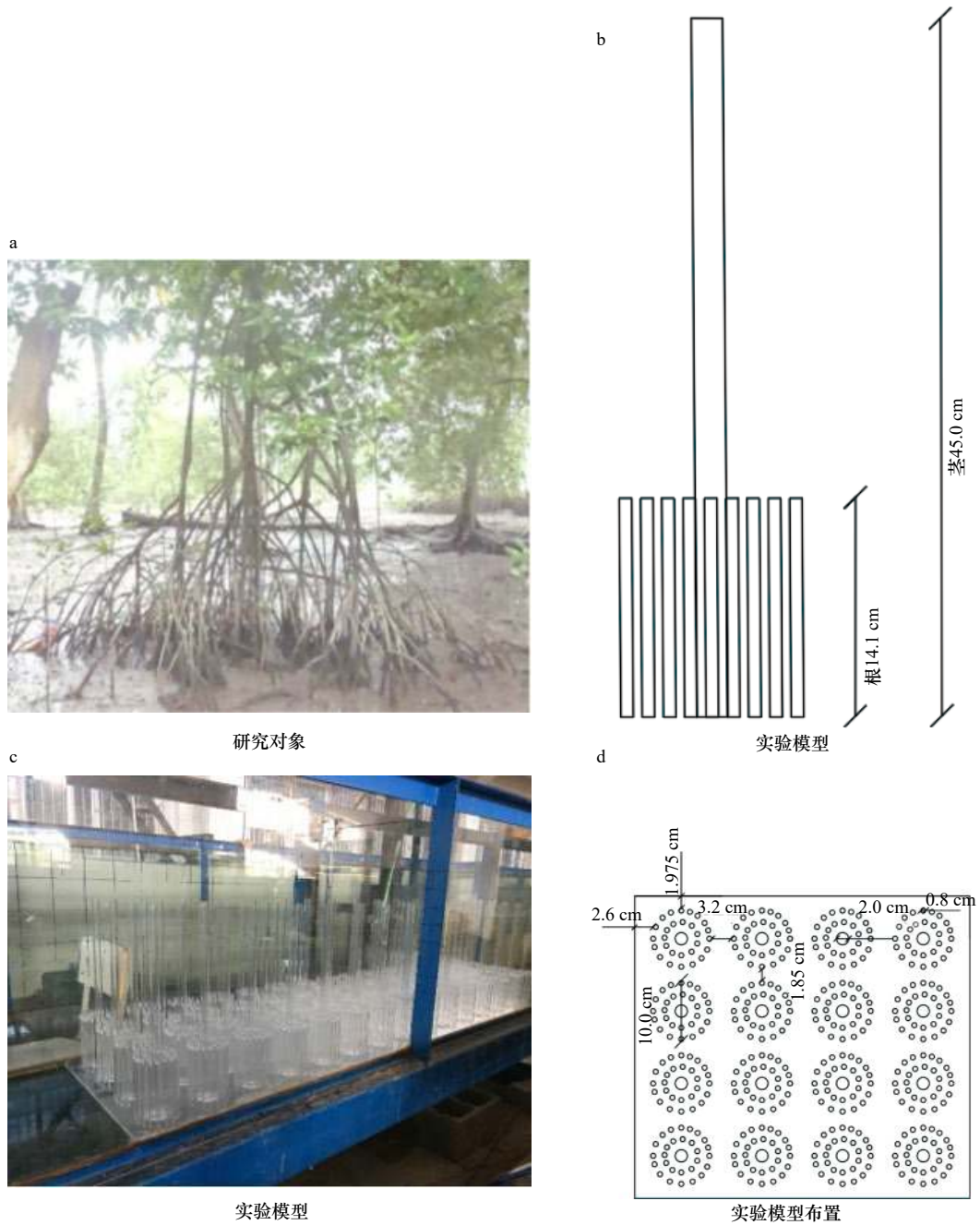


图 2 植物模型
Fig. 2 Plant models

表 1 实验工况

Table 1 Experimental cases

水深 h /cm	周期 T /s	波高 H /cm
30.0, 35.0	1.0, 1.3, 1.6, 1.9	4.0, 6.0, 8.0, 10.0

边界层最大剪切力可由 Jonsson^[22] 和 Luhar 等^[12] 公式计算得到, 其中影响边界层最大剪切力的变量是波高 H 。植物能够引起波浪的波高衰减, 已经在很多研究中证明。因而以波高为主要影响因素, 来探讨刚性植物对规则波下边界层最大剪切力特性的影响。

4 结果分析

4.1 剪切力沿程变化分析

如图 1 所示, 以 G1 浪高仪处为原点, 沿流向方向为 x 轴正方向, 沿水流正向设计了 15 株植物模型, 沿水流垂向设计了 4 株植物, 共计植物 60 株, 分析图中植物模型仅为植物带位置示意, 植物个数以图 1 为准。G1 与 G2 浪高仪用于验证入射波波形, G8 浪高仪用于分析数据时分离反射波, G3 浪高仪放置在植物带前 0.2 m 处, 用来测量进入植物带前波浪的波高

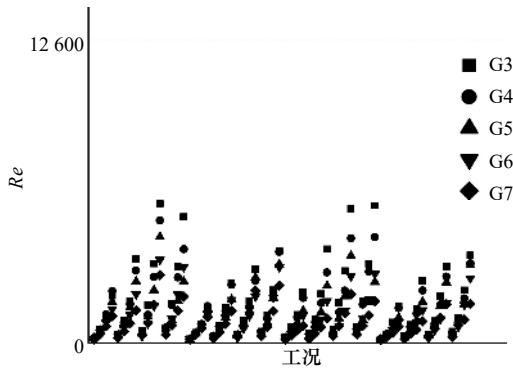


图3 雷诺数计算结果

Fig. 3 Reynolds number calculation results

数据。沿程共设置了5个断面,分别为G3、G4、G5、G6和G7。为更直观地体现植物模型对规则波剪切力的影响,对边界层最大剪切力相对衰减比例 τ_i/τ_0 在沿程5个断面的变化进行分析。其中, τ_0 为基于入射波高所计算的剪切力, τ_i 为特定断面的剪切力。

图4a至图4h给出单独根模型下剪切力的沿程变化情况。从总体上看,边界层最大剪切力 τ_m 的衰减效果随入射波高 H 的增大而增大。在波浪开始进入植物带时,波速较大,在刚接触会产生较大的紊动效应,导致剪切力会有一定幅度的上涨。当 $h=30$ cm时,在 $x=4.3$ m和 $x=4.9$ m位置,边界层最大剪切力会有一定幅度的增大,且当 $T=1.9$ s时,在 $x=6.1$ m位置,也出现了边界层最大剪切力变大的情况。而当 $h=35$ cm时,变大位置基本上后移到了 $x=5.5$ m或 $x=6.1$ m处,而在部分工况下,出现了明显的边界层效应;在 $x=6.7$ m位置,会出现边界层最大剪切力衰减强度的回升。在单独根模型下,波浪在穿过植物带后, $x=6.7$ m位置的 τ/τ_0 范围是0.46~0.85,平均为0.67。

图5a至图5h给出根茎模型下边界层最大剪切力的沿程变化情况。图5a至图5c中,边界层最大剪切力 τ_m 初始有些许增加,随后急剧下降。图5d至图5f中边界层最大剪切力 τ_m 上涨后移到了 $x=6.1$ m位置,在最后一段,会有一个快速的下降。图5g和图5h除了在植物带中出现了上涨情况外,在最后位置也出现了上涨。对比单独根模型实验结果,总体上,剪切力的衰减效果随入射波高的增大而增大,上涨的规律也与根模型类似。根茎模型对剪切力的消减效果是强于根模型的, $x=6.7$ m位置的 τ/τ_0 范围由0.46~0.85减小至0.46~0.76,综合所有工况计算得到 $x=6.7$ m位置的 τ/τ_0 的平均值,可发现平均值由根模型的0.67下降至根茎模型的0.58。由此可见,茎有助于根群减小底部剪切力。

4.2 剪切力衰减系数变化分析

为了更好地分析边界层最大剪切力在不同模型及不同工况下的变化规律,定义一个剪切力衰减系数 K ,计算式如下:

$$K = \frac{\tau_6 - \tau_3}{\tau_3}, \quad (7)$$

式中, τ_6 和 τ_3 分别是G6和G3断面的剪切力值。

图6给出式(7)计算得到边界层最大剪切力消减系数随波高的变化规律。其中图6a和图6b是根模型的边界层最大剪切力消减系数随波高的变化图。从图中可以看出,虽然有部分区域由于水流的紊流效应,消减系数会有降低的趋势,但整体上看消减系数还是随入射波高的增大而增大。 $T=1.3$ s和 1.9 s时的消减系数时大于 $T=1.0$ s和 1.6 s。图6c和图6d是根茎模型的边界层最大剪切力消减系数随波高的变化图。消减系数也是随入射波高的增大而增大,且根茎模型的消减系数整体略大于单独根模型的消减系数。同样于根模型 $T=1.3$ s和 1.9 s时的消减系数时大于 $T=1.0$ s和 1.6 s。根茎组合模型消减系数范围为0.12~0.61,单独根模型消减系数范围为0.06~0.51。

4.3 剪切力消减系数与水动力因素、植物因素之间的关系

波浪传播过程中的边界层最大剪切力变化与诸多因素有关。目前学者主要将其分为两类:水动力因素和植物因素^[23]。本实验中,影响规则波与植物相互作用的水动力因素包括入射波高 H 、周期 T 、水深 h 、波长 L 等,影响其规律的植物因素包括:植物高度 h_v 、植被区沿流线长度 B 、淹没体积 V_v 。因而剪切力消减系数与要素之间存在以下关系:

$$K = f(H, T, h, L, h_v, B, V_v). \quad (8)$$

将式(9)中的参数无量纲化得到式(10)

$$K = f\left(\frac{HL^2}{h^3}, \frac{u_m T}{L}, \frac{h_v}{h}, \frac{B}{L}, \frac{V_v}{V_s}\right), \quad (9)$$

式中, HL^2/h^3 为厄塞尔数,表示流体层中长的表面重力波的非线性程度; $u_m T/L$ 为KC数,表示黏性力相对惯性力之间的关系; h_v/h 为淹没度,从垂向方面考虑植物高度与水深的关系; B/L 为植被区相对宽度,是从纵向方面考虑植物带长度和波长的影响; V_v/V_s 为植被区相对淹没体积,来表示植物相对体积的影响。

为进一步分析式(9)中边界层最大剪切力消减系数 K 与各影响因子之间的关系,基于单独根和根茎植物模型的实验数据,对式(9)进行多元非线性回归拟合。得到了剪切力消减系数 K 与厄塞尔数 HL^2/h^3 、KC数 $u_m T/L$ 、淹没度 h_v/h 、植被区相对宽度 B/L 、植被

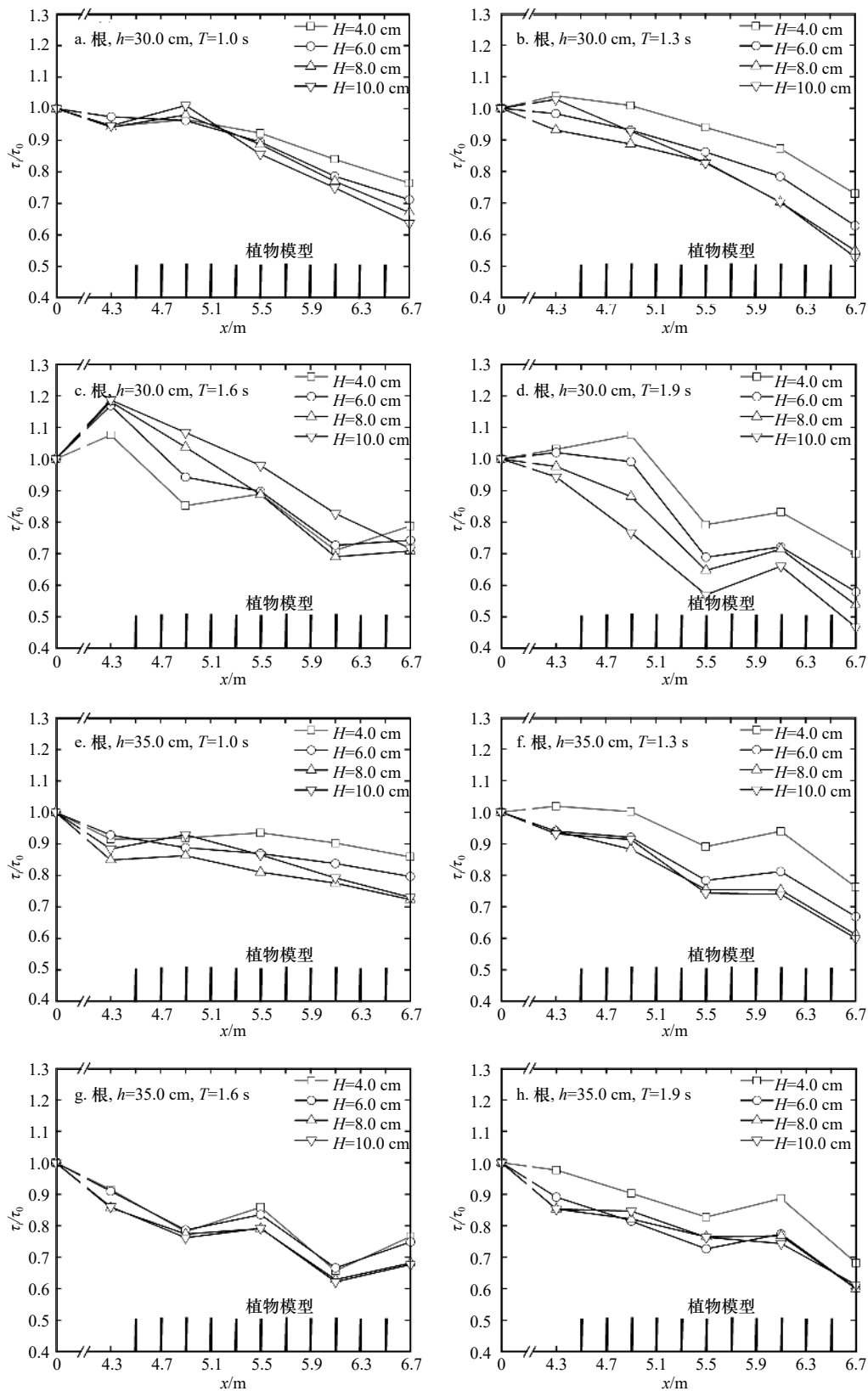


图 4 单独根模型剪切力沿程衰减规律

Fig. 4 The variation of shear force attenuation along the way with roots alone

区相对淹没体积 V_v/V_s 之间的关系, 结果如式(10)所示。由于受到多个水动力因素和植物因素的影响, 植物对边界层最大剪切力的消减机理十分复杂, 拟合情

况如图 7 所示, 虽然整体数据点和拟合曲线存在部分偏差, 但整体呈现幂函数的关系。拟合公式与实验数据之间拟合度达到 0.772。其中, 实测值与理论值相

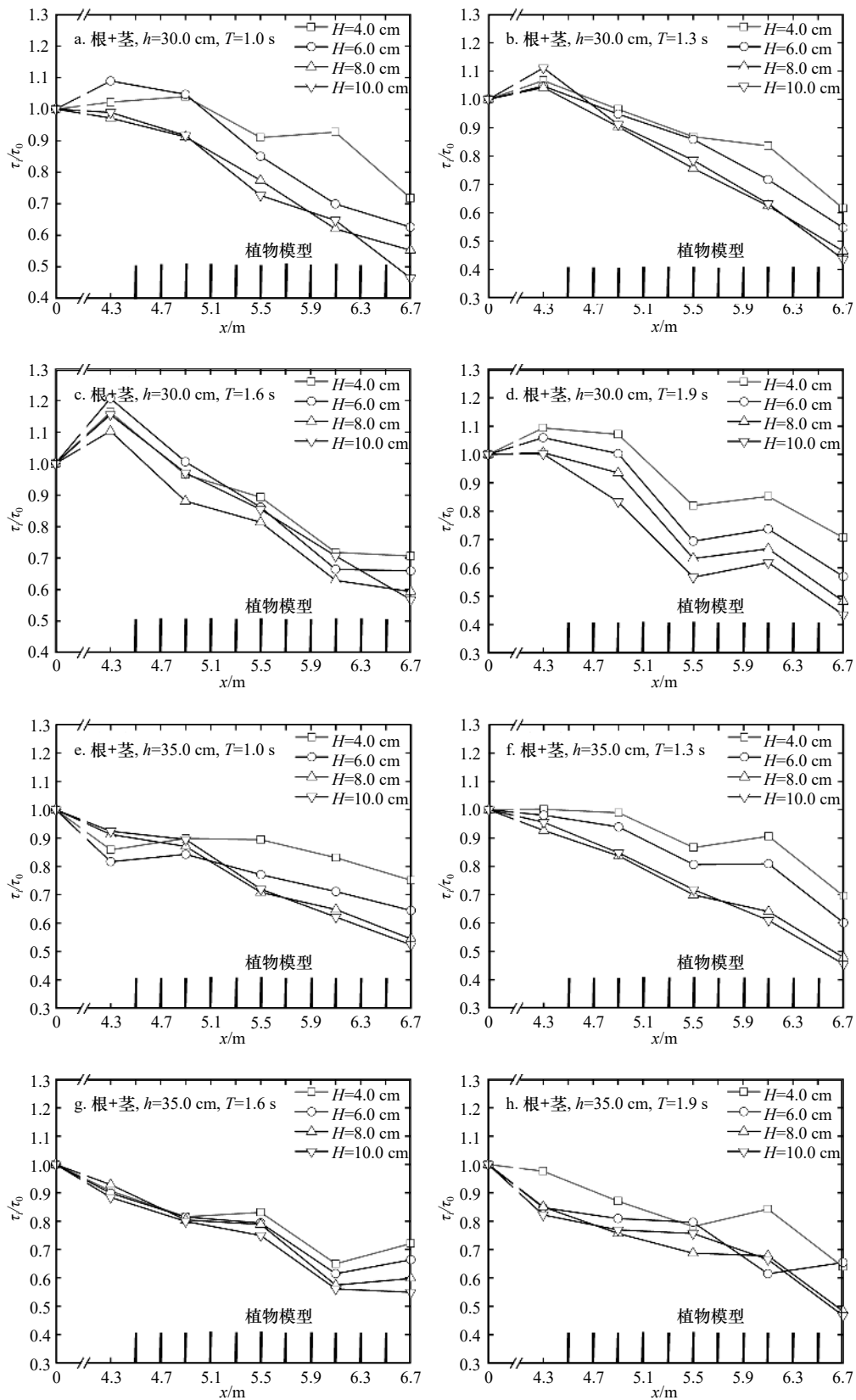


图5 根+茎模型影响下的剪切力沿程衰减规律

Fig. 5 The variation of shear force attenuation along the way with roots and stems

差 30% 的工况有: 单独根模型 8 个 ($h=35\text{ cm}$, $H=4\text{ cm}$, $T=1\text{ s}$; $h=35\text{ cm}$, $H=8\text{ cm}$, $T=1\text{ s}$; $h=35\text{ cm}$, $H=4\text{ cm}$, $T=1.3\text{ s}$; $h=35\text{ cm}$, $H=6\text{ cm}$, $T=1.6\text{ s}$;

$h=35\text{ cm}$, $H=4\text{ cm}$, $T=1.3\text{ s}$; $h=35\text{ cm}$, $H=6\text{ cm}$, $T=1.6\text{ s}$; $h=35\text{ cm}$, $H=8\text{ cm}$, $T=1.6\text{ s}$; $h=35\text{ cm}$, $H=10\text{ cm}$, $T=1.6\text{ s}$;

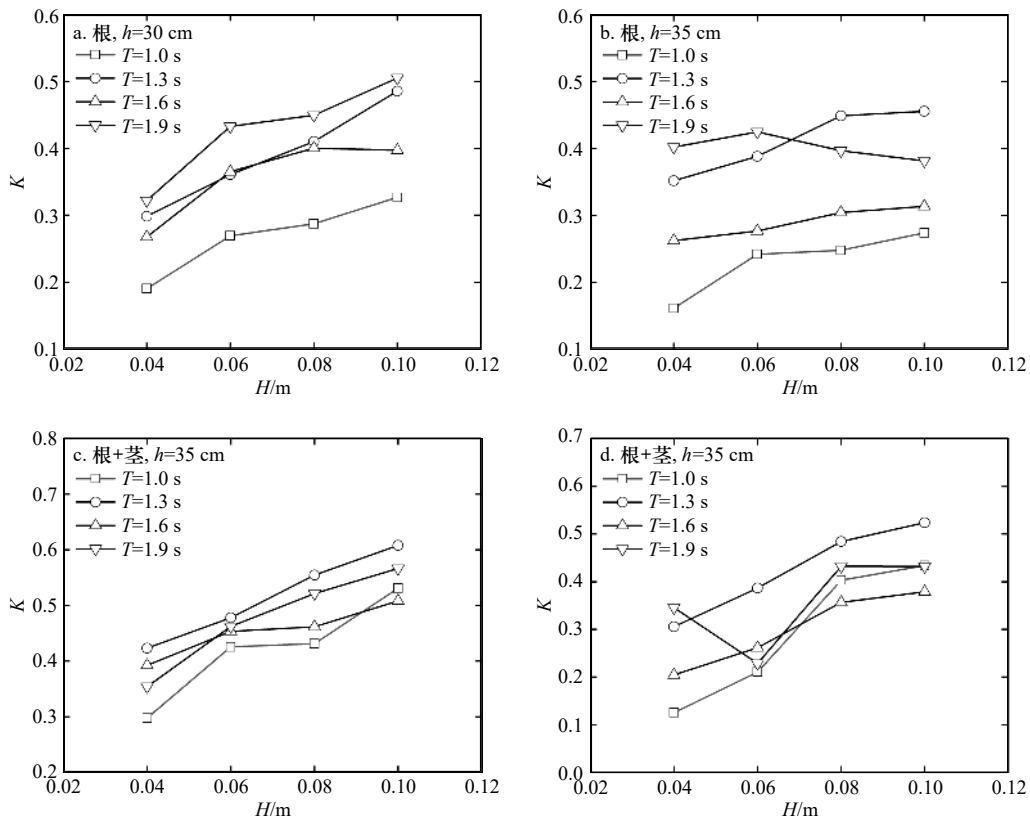


图 6 衰减系数变化规律

Fig. 6 The variation of attenuation coefficient

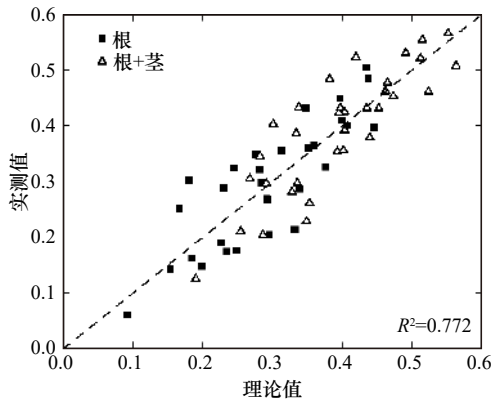


图 7 剪切力消减系数与无量纲参数之间的关系

Fig. 7 Relationship between shearing force reduction coefficient and dimensionless parameter

$h=35\text{ cm}$, $H=4\text{ cm}$, $T=1.9\text{ s}$)。根+茎模型 4 个 ($h=35\text{ cm}$, $H=4\text{ cm}$, $T=1\text{ s}$; $h=35\text{ cm}$, $H=4\text{ cm}$, $T=1.6\text{ s}$; $h=35\text{ cm}$, $H=6\text{ cm}$, $T=1.6\text{ s}$; $h=35\text{ cm}$, $H=6\text{ cm}$, $T=1.9\text{ s}$)。综合来看, 误差较大的点均为水深 h 为 35 cm 的工况, 故此拟合公式更适用于水深较浅的情况。且单独根模型的误差点多于根+茎模型, 也从侧面体现了茎有助于根群减小波浪底部剪切力。式(10)体现了消减系数变化与水动力因素和植物因素均存在着物理联系, 其中, 消减系数 K 与厄塞尔数 HL^2/h^3 、植被区相对宽度

B/L 呈负相关, 与 KC 数 $u_m T/L$ 、淹没度 h_v/h , 植被区相对淹没体积 V_v/V_s 呈正相关。

$$K = 32.869 \left(\frac{HL^2}{h^3} \right)^{-0.543} \left(\frac{u_m T}{L} \right)^{0.4} \left(\frac{h_v}{h} \right)^{0.046} \times \left(\frac{B}{L} \right)^{-0.587} \left(\frac{V_v}{V_s} \right)^{1.229} - 2.573. \quad (10)$$

5 结论

本实验研究探究的主要内容是规则波经过含植物带水流时, 位于边界层的最大剪切力是如何变化的。着重讨论植物模型对于边界层最大剪切力的影响特性, 为以后学者研究红树林带边界层最大剪切力提供理论依据。通过概化植物模型实验, 探究了单独根、根茎共同作用下近岸刚性植物对规则波沿程剪切力衰减特性及衰减系数变化规律, 研究发现边界层最大剪切力的衰减系数的范围为 $0.06 \sim 0.61$, 说明红树林是能够影响到波浪边界层最大剪切力, 且能使其减小。规则波下边界层最大剪切力衰减效果随波高的增大而增大, 且红树林的茎有助于根群减小底部剪切力。植物根茎模型对边界层最大剪切力变化特性的影响与淹没度、植被区相对淹没体积、植被区相对宽度、厄塞尔数及 KC 数均有关系。本实验仅考虑含

植物带水流边界层最大剪切力的理论研究, 研究有助于进一步探究以红树林为代表的近岸刚性植物对波浪边界层剪切力的特性影响, 为合理利用近岸刚性植物减少海岸带泥沙淤积、抵御海浪侵蚀提供一定指导。

参考文献:

- [1] 陈杰, 何飞, 蒋昌波, 等. 植物消波机制的实验与理论解析研究进展[J]. 水科学进展, 2018, 29(3): 433–445.
Chen Jie, He Fei, Jiang Changbo. Advances in laboratory experiment, theoretical analysis of mechanism of wave attenuation by vegetation[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(3): 433–445.
- [2] Horstman E, Dohmenjanssen C M, Narra P M, et al. Wave attenuation in mangroves: A quantitative approach to field observations[J]. Coastal Engineering, 2014, 94(12): 47–62.
- [3] Chen J, Duan Z, Jiang C B, et al. Laboratory study on tsunami erosion and deposition under protection of rigid emergent vegetation[J]. Natural Hazards, 2018, 92(2): 995–1010.
- [4] 陈杰, 何飞, 蒋昌波, 等. 规则波作用下刚性植物拖曳力系数实验研究[J]. 水利学报, 2017, 48(7): 846–857.
Chen Jie, He Fei, Jiang Changbo, et al. Experimental investigation on drag coefficient of rigid vegetation influenced by regular waves[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(7): 846–857.
- [5] He Fei, Chen Jie, Jiang Changbo. Surface wave attenuation by vegetation with the stem, root and canopy[J]. Coastal Engineering, 2019, 152: 103509.
- [6] 徐海珏, 胡萍, 白玉川, 等. 木本植被覆盖岸坡上波浪爬升过程的数值模拟研究[J]. 海洋学报, 2020, 42(3): 10–42.
Xu Haijue, Hu Pin, Bai Yuchuan, et al. Numerical simulation for wave climbing process on woody plants covered slope[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(3): 10–42.
- [7] 唐军, 沈永明, 崔雷. 基于抛物型缓坡方程模拟近岸植被区波浪传播[J]. 海洋学报, 2011, 33(1): 7–11.
Tang Jun, Shen Yongming, Cui Lei. Modeling coastal water wave propagation in vegetation field based on parabolic mild slope equation[J]. Haiyang Xuebao, 2011, 33(1): 7–11.
- [8] Dalrymple R A, Kirby J T, Hwang P A. Wave diffraction due to areas of energy dissipation[J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 1984, 110(1): 67–79.
- [9] Husrin S, Strusinska A, Oumeraci H. Experimental study on tsunami attenuation by mangrove forest[J]. Earth, Planets and Space, 2012, 64(10): 973–989.
- [10] 曾思益, 陈杰, 蒋昌波, 等. 基于根茎叶概化模型的孤立波消减特性实验[J]. 海洋科学进展, 2019, 37(4): 588–600.
Zeng Siyi, Chen Jie, Jiang Changbo, et al. Experimental investigation of the effects of vegetation on solitary wave attenuation based on a generalized model of root, stem and canopy[J]. Advances in Marine Science, 2019, 37(4): 588–600.
- [11] 彭浩, 陈杰, 蒋昌波, 等. 单株和簇状植物分布方式对消波的影响试验[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(4): 27–34.
Peng Hao, Chen Jie, Jiang Changbo, et al. Experimental study on wave attenuation effects by single and patchy rigid vegetation[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 39(4): 27–34.
- [12] Luhar M, Couto S, Infantes E, et al. Wave-induced velocities inside a model seagrass bed[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2010, 115: C12005.
- [13] 陈杰, 管喆, 蒋昌波. 海啸波作用下泥沙运动——V. 红树林影响下的岸滩变化[J]. 水科学进展, 2016, 27(2): 206–213.
Chen Jie, Guan Zhe, Jiang Changbo. Study of sediment transport by tsunami waves: V. influence of mangrove[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(2): 206–213.
- [14] 陈杰, 刘静, 蒋昌波, 等. 波浪作用下泥沙运动研究综述[J]. 泥沙研究, 2014(4): 74–80.
Chen Jie, Liu Jing, Jiang Changbo, et al. Review of sediment transport under waves[J]. Journal of Sediment Research, 2014(4): 74–80.
- [15] 陈杰, 蒋昌波, 邓斌, 等. 海啸波作用下岸滩演变与床沙组成变化研究综述[J]. 水科学进展, 2013, 24(5): 750–758.
Chen Jie, Jiang Changbo, Deng Bin, et al. Review of beach profile changes and sorting of sand grains by tsunami waves[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(5): 750–758.
- [16] 曹祖德, 孔令双, 焦桂英. 波、流共同作用下的泥沙起动[J]. 海洋学报, 2003, 25(3): 113–119.
Cao Zude, Kong Lingshuang, Jiao Guiying. Initiation of sediment movement for a wave-current coexistent system[J]. Haiyang Xuebao, 2003, 25(3): 113–119.
- [17] Galen E, Marianne C, Oliver F, et al. Observations of near-bed shear stress in a shallow, wave-and current-driven flow[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019, 124(8): 6323–6344.
- [18] Xu Hua, Xia Yunfeng, Ma Binghe, et al. Research on measurement of bed shear stress under wave-current interaction[J]. Chinese Ocean Engineering Society, 2015, 29(4): 589–598.
- [19] 王运洪. 泥沙起动规律的研究[J]. 海洋学报, 1984, 6(6): 874–880.
Wang Yunhong. Study on initiation of sediment[J]. Haiyang Xuebao, 1984, 6(6): 874–880.
- [20] Abreu T, Michallet H, Silva P A, et al. Bed shear stress under skewed and asymmetric oscillatory flows[J]. Coastal Engineering, 2013, 73(3): 1–10.
- [21] Walter B L, Gromke C B, Lehning M, et al. Shear-stress partitioning in live plant canopies and modifications to raupach's model[J].

Boundary-Layer Meteorology, 2012, 144(2): 217–241.

[22] Jonsson I G. Wave boundary layers and friction factors[J]. Coastal Engineering, 1967: 127–148.

[23] Tanaka N, Sasaki Y, Mowjood M I M, et al. Coastal vegetation structures and their functions in tsunami protection: Experience of the recent Indian Ocean tsunami[J]. Landscape & Ecological Engineering, 2007, 3(1): 33–45.

Study on the influence of rigid plant roots and stems on the maximum shearing characteristics of boundary layer under regular wave

Li Xie¹, Chen Jie^{1,2,3,4}, Jiang Changbo^{1,2,3,4}, Yao Zhen¹, Luo Yuanpin¹, Luo Wanjiao¹

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha 410114, China; 3. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China; 4. Engineering and Technical Center of Hunan Provincial Environmental Protection for River-Lake Dredging Pollution Control, Changsha 410114, China)

Abstract: The characteristics of the maximum shear force in the boundary layer were studied based on the wave attenuation experiment of nearshore plants considering the influence of roots. The maximum shear force characteristics of the boundary layer under two plant models, root alone and combination of roots and stems, were investigated by using the formula of boundary layer velocity calculation with plant water flow under regular waves proposed by predecessors. The shear force variation along the path and the effect of plants on the shear force attenuation characteristics of the two models were analyzed, and the formulas of the attenuation coefficients were fitted. Studies have shown that when waves pass through the plant zone, the shear force increases to a certain extent and then decreases gradually. The reduction effect of plant on shear force increases with the increase of incident wave height, and the stem contributes to the reduction effect of root group on the maximum shear force of boundary layer, and the reduction coefficient ranges from 0.06 to 0.61. The fitted formula is more suitable for shallow water.

Key words: generalized plant model; boundary layer; shear force; root; stem; regular wave