

单株和簇状植物分布方式对消波的影响试验

彭浩¹, 陈杰^{1,2,3}, 蒋昌波^{1,2,3}, 何飞¹, 隆院男^{1,2},
屈科^{1,4}, 邓斌^{1,2,4}, 伍志元^{1,4}

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 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污染控制工程技术中心, 湖南长沙 410114)

摘要:在波浪水槽中规则波和不规则波水力条件下开展多组次物理模型试验,探究单株和簇状刚性植物分布方式对消波特性的影响。结果表明,单株-矩形分布植物带密度相同时,适当增加相邻植物间沿流向的距离,消波效果增强;对于单株-交错分布植物带,拖曳力系数随植物间距以及植物淹没度的增大而增大;对于簇状植物带,透射系数随单簇内植物株数的增加以及簇中心间距的减小而减小。在试验条件下得到了植物带消波效果与水动力因素和植物因素之间的拟合关系式,揭示了植物分布密度和分布排列结构对植物消波的影响。

关键词:刚性植物;单株形式;簇状形式;分布方式;透射系数;拖曳力系数

中图分类号:U656.31+1;P731.22 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2019)04-0027-08

Experimental study on wave attenuation effects by single and patchy rigid vegetation//PENG Hao¹, CHEN Jie^{1,2,3}, JIANG Changbo^{1,2,3}, HE Fei¹, LONG Yuannan^{1,2}, QU Ke^{1,4}, DENG Bin^{1,2,4}, WU Zhiyuan^{1,4}(1. School of Hydraulic 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 primary objective of this study is to explore the wave attenuation effects of single and patchy arrays of rigid vegetation under both regular and irregular wave conditions by multi-group physical model tests. The experimental results show that for vegetation belts of a single-rectangular distribution with the same distribution density, wave dissipation is higher with an increasing space between adjacent plants along the flow direction. For vegetation belts of a single-staggered distribution, drag coefficients increase with an increasing space between plants and submergence ratio. For the patchy vegetation belts, transmission coefficients decrease with the increasing number of plants within a single patch and the decreasing space between adjacent patches. Fitting relationships between wave attenuation and hydrodynamic factors as well as vegetation factors are obtained under the experimental conditions, revealing the effects of distribution densities and arrangement structures of vegetation belts on wave attenuation.

Key words: rigid vegetation; single arrangement; patchy arrangement; distribution modes; transmission coefficient; drag coefficient

波浪冲刷是造成海岸线侵蚀的重要原因之一。近年来,以红树林为代表的近岸水生植物作为一种新型的消波护岸工具,以其消浪效果好、经济成本低且有利于维护海岸生态平衡等特点成为海岸工程关注的焦点^[1-2]。

国内外学者关于植物消波特性开展了大量的研究工作。在水动力因素对植物消波的影响方面,John等^[3]发现波浪沿沉水植被区传播时,其波高呈指数函数衰减规律,且衰减强度随水深的增加而降低;Tschirky等^[4]还提出了植物带透射系数与水动

基金项目:国家自然科学基金(51839002);湖南省自然科学基金(2018JJ3546);长沙理工大学研究生科研创新项目(CX2017SS10)

作者简介:彭浩(1994—),男,硕士研究生,主要从事海岸水沙动力过程及其数值模拟研究。E-mail:18390988554@163.com

通信作者:陈杰(1982—),男,副教授,博士,主要从事海岸水沙动力过程及其数值模拟研究。E-mail:Chenjiejie166@163.com

力因素(水深、周期、入射波高)之间的经验公式。大量研究表明,植物的消波特性和水动力因素相关,同时还受植物因素的影响^[5-6]。在植物不同组成部位对其消波特性的影响方面,陈杰等^[7-8]在研究中采用PVC圆柱模拟刚性植物茎部;Hashim等^[9-10]分别探究了刚性植物根部和树冠对波浪传播变形的影响。在植物分布特征对于消波的影响方面, Augustin等^[11-13]通过试验研究发现,植物分布密度越大,其消波效果越好。然而,对于同一植被区域,即使植物分布密度相同,植物仍可呈现不同的分布排列结构,进而产生不同的消波特性和影响。目前关于分布方式对植物消波影响的研究较少。同时,海岸植物在人类活动和生态环境的影响下常以簇状形式分布^[14],现阶段对于以簇状存在的植物消波特性的研究较为罕见。

为弥补现有研究的不足,拟通过物理模型试验,研究单株和簇状形式下分布排列结构对植物消波特性的影响。

1 理论分析

1.1 植物带密度和排列结构定义

Nepf^[15]基于圆柱概化模型提出以单位流域面积内植物投影面积 p 定义植物密度:

$$p = N_0 D = \frac{Dh}{S^2 h} = \frac{D}{S^2} \quad (1)$$

式中: N_0 为单位面积的植物株数; D 为植物直径; S 为植物间距; h 为水深。由式(1)进一步推出表征植物密度的无量纲参数 p_d :

$$p_d = \frac{D^2}{S^2} \quad (2)$$

虽然式(2)忽略了植物形状与摆动效应,但为探索植被密度对水流阻力的影响提供了较为合理的依据^[15-16]。

图1为植物尾涡区消波示意图,展示了由于植物存在产生的紊流区和尾涡区,以及植物排列结构产生的尾涡遮蔽区和尾涡重叠区。当植物间横向间距小于紊流区与尾涡区长度之和或植物尾涡区发生纵向重叠时,植物间将产生遮蔽效应或重叠效应,使

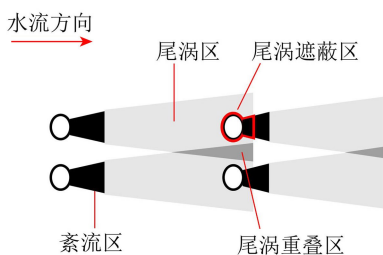


图1 植物尾涡区消波

得植物的消波能力减弱^[15-17]。

在现阶段学者研究中大多数采用的矩形分布^[7-8]、交错分布^[8,11,18-20]、随机分布^[21]3种植物分布方式中,Nepf^[15]给出了交错分布植物带的排列结构定义式:

$$n = \frac{L_1/D}{L_2/D} = \frac{L_1}{L_2} \quad (3)$$

式中: n 为植物排列结构参数; L_1 为植物间纵向(垂直于水流方向)间距; L_2 为植物间横向(沿水流方向)间距。

1.2 植物拖曳力系数计算模型

现实情况下,海洋波浪具有较强的随机性,常采用不规则波进行植物消浪的相关研究^[11,18-20]。Mendez等^[22]提出了不规则波的植物消波解析模型,并给出了波能衰减系数 ε_v 的表达式:

$$\varepsilon_v = \frac{2}{3\sqrt{\pi}} C_D b_v N_0 k \frac{\sinh^3(k\alpha h_v) + 3\sinh(k\alpha h_v)}{[2kh + \sin(2kh)] \sinh(kh)} a_{rms} \quad (4)$$

式中: C_D 为拖曳力系数,表征植物带在微观尺度上的消波效果^[23]; b_v 为单株植物迎水面宽度; k 为波数; α 为植物淹没度; h_v 为植物高度; a_{rms} 为不规则波波幅。

也可用式(4)求解植物的拖曳力系数 C_D 。前人研究发现植物的拖曳力系数 C_D 与邱卡数 K_c 、植物淹没度 α 之间存在密切联系,为便于分析,定义植物淹没度为

$$\alpha = \frac{h}{h_v} \quad (5)$$

定义邱卡数 K_c 来表征植物所受拖曳力对惯性力的相对值:

$$K_c = \frac{u_{max} T_p}{b_v} \quad (6)$$

式中: T_p 为周期; b_v 为单株植物迎水面宽度; u_{max} 为静水面处水质点水平最大速度,采用线性波理论求得^[2,22]:

$$u_{max} = a \frac{2\pi}{T_p} \frac{1}{\tanh(kh)} \quad (7)$$

式中: a 为入射波振幅。

同时,定义植物带透射系数 K_t 来表征植物带在宏观尺度上的消波效果^[23]:

$$K_t = \frac{H_1}{H_0} \quad (8)$$

式中: H_1 为植物带后方的透射波高; H_0 为植物带前方的入射波高。

在前人的研究基础上,结合Yang等^[14]关于簇状植物的试验研究,开展试验模型设计。利用

式(4)求得单株-交错分布植物拖曳力系数,并与相关学者^[11,18-20]的研究成果进行整合,采用式(8)计算单株-矩形分布植物带以及簇状-矩形和簇状-交错植物带透射系数,并得到植物带透射系数与水动力因素和植物因素之间的关系式。

2 试验布置

试验在长沙理工大学长 40.0 m、宽 0.5 m、高 0.8 m 的波浪水槽中进行。水槽前端的液压伺服式造波机可产生规则波和不规则波,水槽末端铺设有多孔介质材料组成的消能网,以减小波浪反射的影响(图 2)。

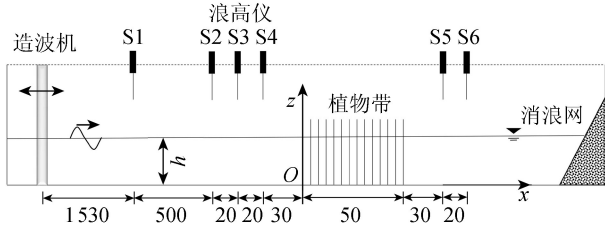


图 2 试验布置(单位:cm)

在何飞等^[5-6,24-25]的试验研究基础上,同时考虑设备条件的限制,确定试验几何比尺为 1 : 20。采用 PVC 圆管概化模拟刚性植物,其弹性模量 $E = 2.9 \text{ GPa}$,与波浪相互作用时不会产生明显的变形^[26]。采用高 $h_v = 45 \text{ cm}$ 、直径 $D = 1.0 \text{ cm}$ 的 PVC 圆管模拟树龄为 15 a、树干直径为 20 cm 左右的红树林。试验时将 PVC 管插置在有机玻璃底板上,底板尺寸为 $50 \text{ cm} \times 48 \text{ cm} \times 1.6 \text{ cm}$,孔间距为 2.5 cm。坐标原点与造波板的距离为 21.0 m,模拟植物布置在 $x = 0.0 \sim 50.0 \text{ cm}$ 的位置。

设计矩形和交错两种分布方式,并分别采用单

株和簇状两种植被结构特征,探讨不同分布方式下排列结构对植物消波特性的影响。利用式(2)进行单株-交错植物带密度计算,参考式(2)重定义单株-矩形植物带密度参数 g_d 和簇状植物带密度参数 ψ 分别为

$$g_d = \frac{D^2}{L_1 L_2} \quad (9)$$

$$\psi = \varphi \frac{l^2}{\zeta^2} \quad (10)$$

其中

$$\varphi = \frac{V_s}{V}$$

式中: l 为簇直径; ζ 为簇中心间距; φ 为单簇植物固体体积分数; V 为控制体体积; V_s 为控制体中植被固体所占体积。

在非淹没条件下,植物淹没高度与水深相等,植物固体体积分数可以用植物投影面积总和与植物带面积的比值进行计算。

共设计 9 种红树林的分布模型,其中模型 1 ~ 4 为单株-矩形分布,模型 5 为单株-交错分布,模型 6 和模型 8 为簇状-矩形分布,模型 7 和模型 9 为簇状-交错分布(图 3)。具体试验模型参数如表 1 所示,水波参数的设置如表 2 所示(表中 T 为规则波周期, H 为规则波波高, T_p 为不规则波谱峰周期, H_{rms} 为不规则波均方根波高),共进行 22 组次试验。

试验时首先放置植物模型,随后对造波机预热,保证造波机性能稳定,开启数据采集系统,确保浪高仪性能良好。然后调整水槽中水位至试验水位,待水面平静后开始造波,使用 6 个加拿大 WG-50 型浪高仪测量沿程波高,其数据由江苏东华测试技术有限公司开发的 DH5922 动态信号测试分析系统采集。浪高仪最小测量周期为 $1.5 \mu\text{s}$,误差为 0.4% ,

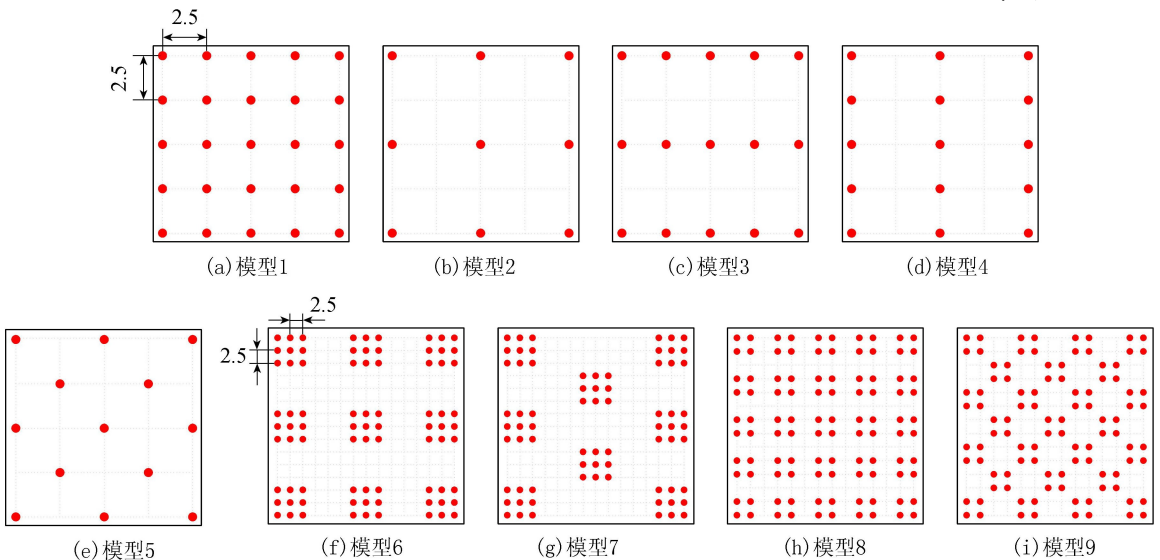


图 3 植物模型分布方式(单位:cm)

表 1 模型参数

| 模型 | 分布方式 | 模型参数取值 |
|------|---------|---|
| 模型 1 | 单株-矩形分布 | $g_d=0.16, n=1.0$ |
| 模型 2 | 单株-矩形分布 | $g_d=0.04, n=1.0$ |
| 模型 3 | 单株-矩形分布 | $g_d=0.08, n=0.5$ |
| 模型 4 | 单株-矩形分布 | $g_d=0.08, n=2.0$ |
| 模型 5 | 单株-交错分布 | $p_d=0.16, S=3.54 \text{ cm}$ |
| 模型 6 | 簇状-矩形分布 | $\psi=0.031, m=6 \text{ 株}, \zeta=15.00 \text{ cm}$ |
| 模型 7 | 簇状-交错分布 | $\psi=0.025, m=6 \text{ 株}, \zeta=16.77 \text{ cm}$ |
| 模型 8 | 簇状-矩形分布 | $\psi=0.217, m=4 \text{ 株}, \zeta=7.50 \text{ cm}$ |
| 模型 9 | 簇状-交错分布 | $\psi=0.245, m=4 \text{ 株}, \zeta=7.07 \text{ cm}$ |

表 2 试验水波参数

| 工况 | 规则波 | | | 工况 | 不规则波 | | |
|----|-------|-------|-------|----|-------|---------|-------------|
| | h/m | T/s | H/m | | h/m | T_p/s | H_{rms}/m |
| 1 | 0.15 | 1 | 0.02 | 1 | 0.20 | 1 | 0.02 |
| 2 | 0.15 | 2 | 0.02 | 2 | 0.20 | 2 | 0.02 |
| 3 | 0.20 | 1 | 0.02 | 3 | 0.20 | 1 | 0.04 |
| 4 | 0.20 | 2 | 0.02 | 4 | 0.20 | 2 | 0.04 |
| 5 | 0.20 | 1 | 0.04 | 5 | 0.25 | 1 | 0.02 |
| 6 | 0.20 | 2 | 0.04 | 6 | 0.25 | 2 | 0.02 |
| 7 | 0.25 | 1 | 0.02 | 7 | 0.25 | 1 | 0.04 |
| 8 | 0.25 | 2 | 0.02 | 8 | 0.25 | 2 | 0.04 |
| 9 | 0.25 | 1 | 0.04 | 9 | 0.25 | 1 | 0.06 |
| 10 | 0.25 | 2 | 0.04 | 10 | 0.25 | 2 | 0.06 |
| 11 | 0.25 | 1 | 0.06 | | | | |
| 12 | 0.25 | 2 | 0.06 | | | | |

采样频率为 50 Hz, 规则波数据采集时间不少于 60 s, 不规则波数据采集时间不少于 3 min。完成一个组次试验后, 需待水面平静后, 再进行下一组次的造波, 重复上述步骤完成所有组次试验。

3 结果分析与讨论

3.1 单株形式植物

近岸植物影响下的波浪传播变形规律复杂, 其主要影响因素有水动力因素(水深、波长、周期和入射波高等)和植物因素(植物带长度、植物分布排列结构、植物分布密度等)^[5-6]。单株-矩形分布植物带透射系数 K_t 可表示为

$$f(h, H, L, T, B, D, L_1, L_2, n, K_t) = 0 \quad (11)$$

式中: L 为波长; B 为植物带长度。式(11)可变为如下形式:

$$\Pi\left(ak, kh, \frac{L}{B}, \frac{D^2}{L_1 L_2}, n, K_t\right) = 0 \quad (12)$$

式中: ak 为波陡; kh 为相对水深。

建立单株-矩形分布植物带透射系数与波陡、相对水深、植物带相对长度、植物分布密度、植物排列结构参数之间的关系式, 规则波与不规则波的拟合度分别为 0.924 和 0.780, 可综合反映出水动力因素及植物因素对单株-矩形分布植物带消波特性的影响。具体拟合情况如图 4 所示。

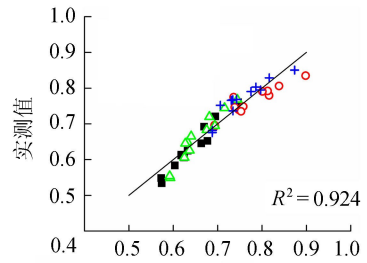
规则波

$$K_t = 0.294 \left(\frac{L}{B}\right)^{0.128} n^{0.104} g_d^{-0.134} \cdot (kh)^{0.179} (ak)^{-0.155} \quad (13)$$

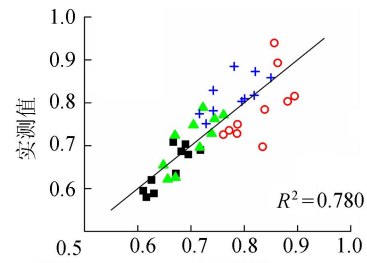
不规则波

$$K_t = 0.335 \left(\frac{L}{B}\right)^{0.180} n^{0.075} g_d^{-0.161} \cdot (kh)^{0.118} (a_{rms} k)^{-0.064} \quad (14)$$

— 拟合线 ■ 模型1 ○ 模型2 ▲ 模型3 + 模型4



(a) 规则波



(b) 不规则波

图 4 单株-矩形分布植物带透射系数 K_t 预测值与实测值对比

结合 Augustin 等^[11]、Hu 等^[18]、Wu 等^[19-20] 在不规则波作用下交错分布植物消浪特性研究中的相关数据, 建立不规则波情况下单株-交错分布植物带拖曳力系数与邱卡数、植物带密度参数、植物排列结构参数、植物淹没度之间的关系式, 拟合度为 0.858 (式(15), 图 5)。

$$C_D = 7.726 K_c^{-0.577} p_d^{-0.439} S^{-0.775} \alpha^{0.154} \quad (15)$$

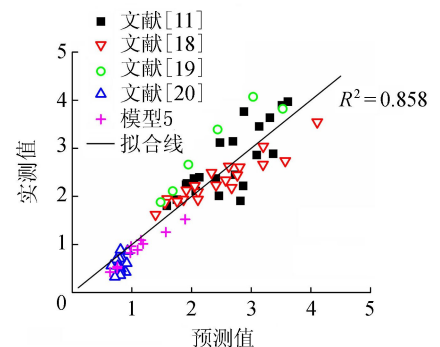


图 5 不规则波作用下单株-交错分布植物带拖曳力系数 C_D 预测值与实测值对比

3.2 簇状形式植物

受水动力因素和植物因素共同作用,簇状植物带透射系数可用下式表示:

$$f(h, H, L, B, D, l, m, \zeta, K_1) = 0 \quad (16)$$

式(16)可变为如下形式:

$$\Pi\left(ak, kh, \frac{L}{B}, \psi, m, \zeta, K_1\right) = 0 \quad (17)$$

式中: ak, kh 为水动力因素; $\frac{L}{B}, \psi, m$ 为植物因素; ζ, K_1 为透射系数影响因素。

分别建立不同波况下簇状-矩形分布(式(18)(19),图6)和簇状-交错分布(式(20)(21),图7)植物带透射系数与波陡、相对水深、植物带相对长度、植物带密度参数、单簇内植物株数、簇中心间距的关系式,拟合度分别为 0.880、0.796、0.920 和 0.620。

簇状-矩形分布规则波

$$K_1 = 0.969 \left(\frac{L}{B}\right)^{0.115} m^{-1.051} \psi^{-0.022} \cdot \zeta^{0.444} (kh)^{0.128} (ak)^{-0.098} \quad (18)$$

簇状-矩形分布不规则波

$$K_1 = 1.287 \left(\frac{L}{B}\right)^{0.040} m^{-1.002} \psi^{-0.101} \cdot \zeta^{0.254} (kh)^{0.009} (a_{rms} k)^{-0.078} \quad (19)$$

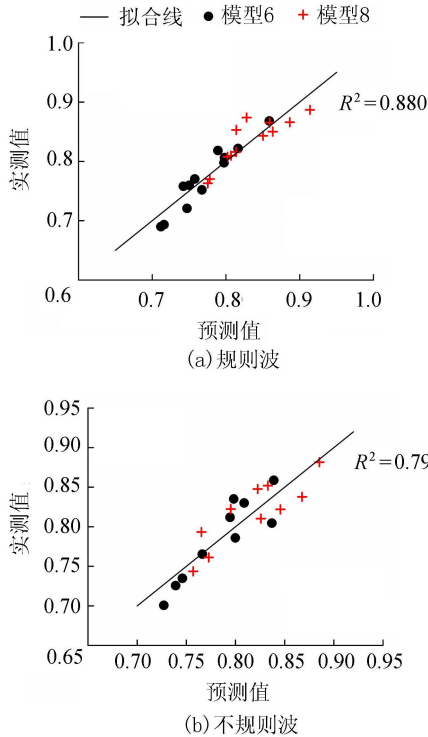


图6 簇状-矩形分布植物带透射系数 K_1 预测值与实测值对比

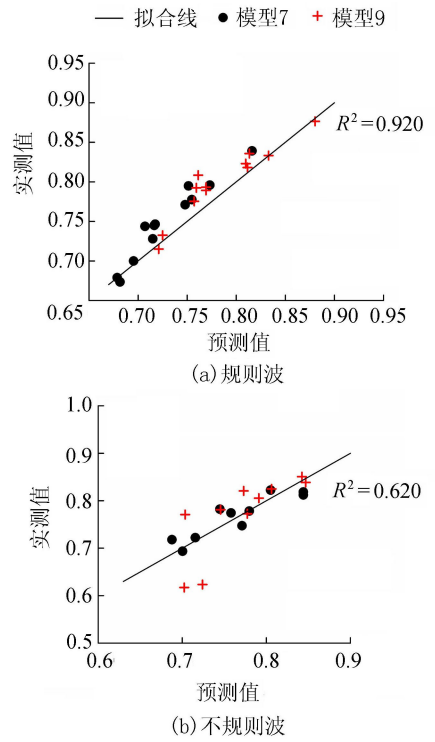


图7 簇状-交错分布植物带透射系数 K_1 预测值与实测值对比

簇状-交错分布规则波

$$K_1 = 1.242 \left(\frac{L}{B}\right)^{0.119} m^{-1.023} \psi^{-0.064} \cdot \zeta^{0.230} (kh)^{0.149} (ak)^{-0.113} \quad (20)$$

簇状-交错分布不规则波

$$K_1 = 0.940 \left(\frac{L}{B}\right)^{0.070} m^{-1.002} \psi^{-0.043} \cdot \zeta^{0.350} (kh)^{0.069} (a_{rms} k)^{-0.134} \quad (21)$$

3.3 拟合公式检验与讨论

为了定量考察经验公式预测值与实测数据的吻合情况,引入均方根偏差 R_M 的变异系数 C_V :

$$C_V = \frac{R_M}{\bar{Q}_j} = \frac{\left[\sum_{j=1}^N (Q_j - \hat{Q}_j)^2 / N \right]^{0.5}}{\bar{Q}_j} \quad (22)$$

式中: Q_j 为试验数据; \hat{Q}_j 为经验公式预测值; \bar{Q}_j 为实测数据平均值。当 $C_V < 12\%$ 时,说明公式预测值与实际值的吻合情况较好^[5]。表3展示了各模型经验公式预测值与实测数据之间的相对误差。从表3可知,经验公式对大部分模型的实测数据预测效果较好,由于模型5的拖曳力系数与其他学者数据相比较小,由式(15)计算所得的拖曳力系数比实测值大,造成预测效果较差。

受水动力因素和植物因素的共同影响,植物消波特性变化非常复杂,造成部分数据点与拟合曲线偏差较大,但从整体上看仍呈幂函数关系。假设 $D = 1 \text{ cm}$,由式(13)~(15)以及式(18)~(21)可以

表3 实测数据与经验公式预测值均方根偏差的变异系数

| 模型 | $C_V/\%$ | |
|----|----------|-------|
| | 规则波 | 不规则波 |
| 1 | 3.37 | 4.28 |
| 2 | 2.77 | 4.23 |
| 3 | 3.94 | 5.14 |
| 4 | 2.92 | 7.47 |
| 5 | | 24.49 |
| 6 | 2.19 | 2.76 |
| 7 | 3.22 | 2.97 |
| 8 | 2.52 | 2.62 |
| 9 | 2.65 | 6.62 |

预测本试验没有开展的部分工况结果。

图8为规则波和不规则波作用下单株-矩形分布植物 n 从 0.25 增大至 3 以及 g_d 从 0.09 增大至 0.465 的理论计算结果。由图8可知, g_d 相同时, K_t 随 n 的增大而增大, 当 n 介于 0.50 和 2 之间时, K_t 对 n 的敏感度较大。当 g_d 从 0.09 增大至 0.35 时, K_t 迅速减小, g_d 大于 0.35 时, K_t 对 g_d 的敏感度较小, 植物的消波效果趋于稳定。综上所述, 在单株-矩形分布方式下, 当 g_d 相同时, 适当增加相邻植物间沿流向的距离, 植物间遮蔽效应减弱, 消波效果增强; 当 n 相同时, 适当减小植物间的横向和纵向间距, 植物的消波阻力效应增强。

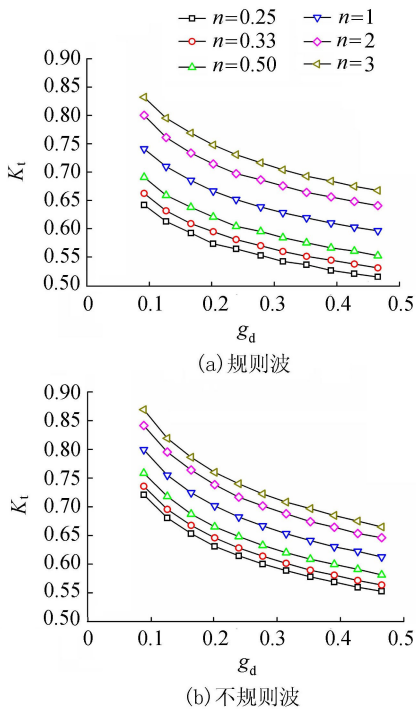
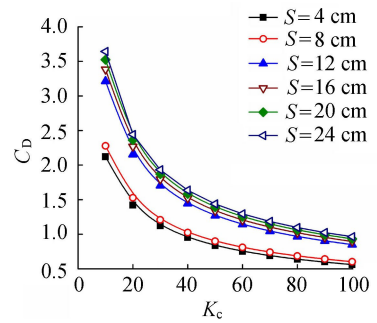
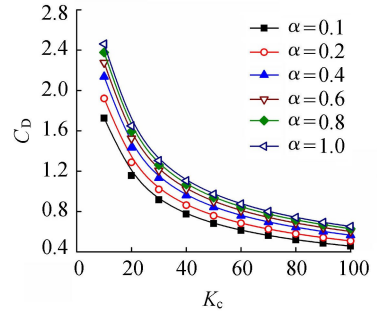


图8 单株-矩形分布植物带透射系数 K_t 与植物带密度、排列结构之间的关系

图9为不规则波作用下单株-交错分布植物带 S 从 4 cm 增大至 24 cm, α 从 0.1 增大至 1.0 及 K_c 均从 10 增大至 100 的理论计算结果。从图9(a)可见, C_D 随 S 的增大而增大, 当 S 从 8 cm 增大至 12 cm



(a) 规则波



(b) 不规则波

图9 单株-交错分布植物拖曳力系数与邱卡数、植物间距及植物淹没度之间的关系

时, C_D 对 S 的敏感度较大, 当 $S > 12$ cm 时, C_D 对 S 的敏感度较小。从图9(b)可知, 在非淹没情况下, C_D 随 α 的增大而增大, 即植物消波能力随 α 的增大而增强。此外, 邱卡数 K_c 从 10 增大至 70 过程中, 拖曳力系数 C_D 迅速减小, 当 K_c 从 70 增大至 100 期间, C_D 对 K_c 的敏感度逐渐降低。综上所述, 在单株-交错分布方式下, C_D 随 K_c 的增大而减小, 且 C_D 对 K_c 的敏感度随 K_c 的增大而降低。同时, 在本试验条件下, C_D 随 α 及 S 的增大而增大, 适当增大 S , 植物间遮蔽效应和重叠效应减弱, 植物带消波效果增强。

图10(a)(b)分别为不同波况下簇状-矩形分布植物 ζ 从 10 cm 增大至 20 cm 和 ζ 从 10 cm 增大至 17 cm, 单簇内植物株数 m 从 4 株增加至 9 株的理论计算结果, 图10(c)(d)分别为不同波况下簇状-交错分布植物 ζ 从 10 cm 增大至 20 cm 以及 ζ 从 10 cm 增大至 17 cm, m 从 4 株增加至 9 株的理论计算结果。从图10可知, 当 ζ 相等时, K_t 随 m 的增加而减小, 当 $4 < m < 7$ 时, K_t 对 m 的敏感度较大, K_t 随 m 的增加迅速减小, 当 $7 < m < 9$ 时, K_t 对 m 的敏感度较小。同时还可以发现, 在试验条件下, K_t 均随 ζ 的增大而增大, 且 K_t 对 ζ 的敏感度随 ζ 的增大而逐渐降低。综上所述, 当簇状植物带 ζ 一定时, K_t 随 m 的增加而减小, 且 K_t 对 m 的敏感度在 m 大于 7 时逐渐降低, 同时, 植物带的消波效果在各分布方式下均随 ζ 的增大而减弱且趋于稳定。

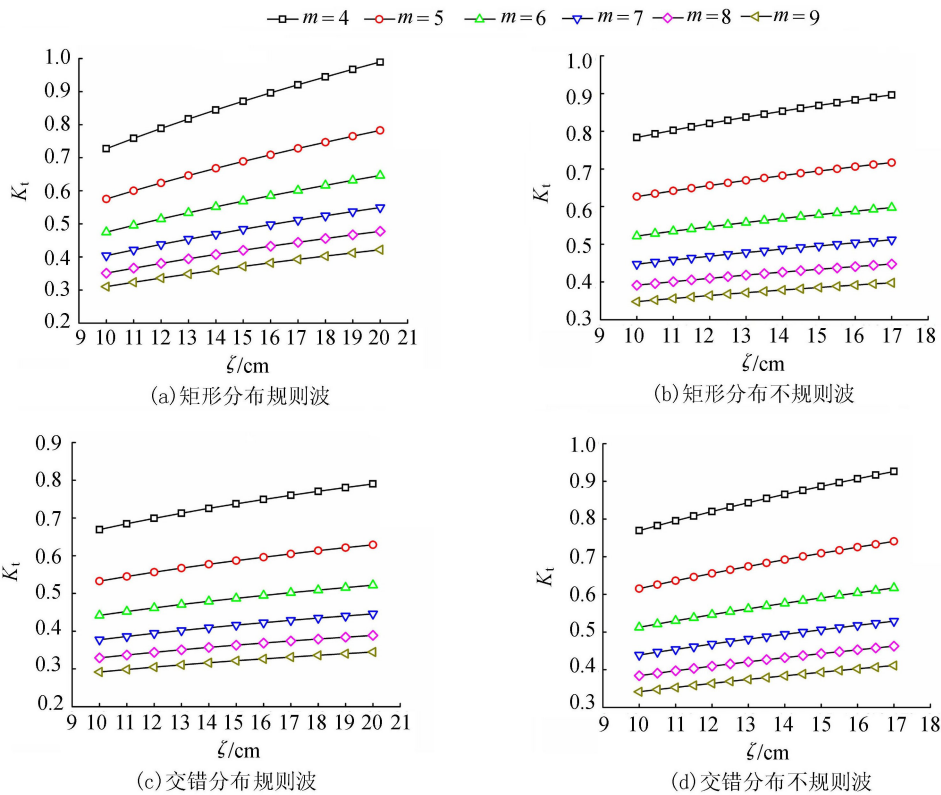


图 10 簇状植物带透射系数与簇中心间距、单簇内植物株数之间的关系

4 结 论

a. 红树林的存在可以抵挡波浪对岸线的冲刷,起到保护岸线的作用。对于单株-矩形分布植物带, g_d 从 0.09 增大至 0.35 时, K_t 迅速减小; 当 g_d 大于 0.35 时, K_t 对 g_d 的敏感度较小, 植物带消波效果趋于稳定; 当 g_d 相同时, 适当增加相邻植物间沿流向的距离, 消波效果增强。对于单株-交错分布植物带, C_D 随 S 以及 α 增大而增大, 且当 S 从 8 cm 增大至 12 cm 时, C_D 对 S 的敏感度较大; 当 $S > 12$ cm 时, C_D 对 S 的敏感度较小。

b. 对于簇状植物带, 在各分布方式下均出现随着 m 的增加以及 ζ 的减小, 波浪通过植物带衰减越剧烈的现象, 同时, K_t 对 m 的敏感度在 $4 < m < 7$ 范围内较大, 在 $m > 7$ 后逐渐降低。适当增加 m 及减小 ζ , 植物带的消波效果增强。

c. 在试验条件下, 得到了植物带消波效果与水动力因素和植物因素之间的关系式, 重点讨论了植物分布密度和排列结构对植物消波的影响, 有助于完善生物海岸的水动力学理论, 为采用近岸植物护岸提供一定的理论依据。

参考文献:

[1] 何飞, 陈杰, 蒋昌波, 等. 规则波作用下植物带波高衰减特性实验研究[J]. 海洋科学进展, 2018, 36(1): 146-

158. (HE Fei, CHEN Jie, JIANG Changbo, et al. Experimental investigation on the characteristics of regular wave height attenuation in vegetation field[J]. Advances in Marine Science, 2018, 36 (1): 146-158. (in Chinese))

[2] 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. (in Chinese))

[3] JOHN B M, SHIRLAL K G, RAO S. Effect of artificial vegetation on wave attenuation: an experimental investigation[J]. Procedia Engineering, 2015, 116(1): 600-606.

[4] TSCHIRKY P, HALL K, TURCKE D. Wave attenuation by emergent wetland vegetation [C] // 27th International Conference on Coastal Engineering. Sydney: [s. n.], 2000:865-877.

[5] 何飞, 陈杰, 蒋昌波, 等. 考虑根茎叶的近岸植物对海啸波消减实验研究[J]. 热带海洋学报, 2017, 36(5): 9-15. (HE Fei, CHEN Jie, JIANG Changbo, et al. Experimental investigation on tsunami wave attenuation under the effects of coastal vegetation with root, stem and crown[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2017, 36 (5): 9-15. (in Chinese))

[6] 何飞, 陈杰, 蒋昌波, 等. 考虑根茎叶影响的刚性植物

- 消浪特性实验研究[J]. 水动力学研究与进展:A辑, 2017,32(6):116-124. (HE Fei, CHEN Jie, JIANG Changbo, et al. Experimental investigation on wave attenuation under the effects of rigid vegetation with root, stem and crown[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2017,32(6):116-124. (in Chinese))
- [7] 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, et al. Study of sediment transport by tsunami waves V: influence of mangrove[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(2):206-213. (in Chinese))
- [8] 姚宇, 杜睿超, 袁万成, 等. 斜坡非淹没刚性植被影响下孤立波爬高的研究[J]. 水动力学研究与进展:A辑, 2015, 30(5):506-515. (YAO Yu, DU Ruichao, YUAN Wancheng, et al. Investigation of solitary wave runup on a slope under the effect of emergent, rigid vegetation[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2015, 30(5):506-515. (in Chinese))
- [9] HASHIM A M, CATHERINE S M P. A laboratory study on wave reduction by mangrove forests [J]. APCBEE Procedia, 2013,5:27-32.
- [10] 何飞, 陈杰, 蒋昌波, 等. 植物带影响下孤立波沿程波高衰减特性试验[J]. 水利水电科技进展, 2018, 37(6):75-82. (HE Fei, CHEN Jie, JIANG Changbo, et al. Experimental study on the characteristics of solitary wave height attenuation under the effects of a vegetation belt[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 37(6):75-82. (in Chinese))
- [11] AUGUSTIN L N, IRISH J L, LYNETT P. Laboratory and numerical studies of wave damping by emergent and near-emergent wetland vegetation [J]. Coastal Engineering, 2009, 56(3): 332-340.
- [12] OZEREN Y, WREN D G. Laboratory measurements of wave attenuation through model and live vegetation[M]. Coastal Hazards: ASCE Engineering Mechanics Conference, 2013.
- [13] LI Y, ANIM D O, WANG Y, et al. Laboratory simulations of wave attenuation by an emergent vegetation of artificial Phragmites australis: an experimental study of an open-channel wave flume [J]. Journal of Environmental Engineering & Landscape Management, 2015, 23(4): 1-10.
- [14] YANG Y, IRISH J L, WEISS R. Impact of patchy vegetation on tsunami dynamic[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2017, 143(4), 04017005.
- [15] NEPF H M. Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation [J]. Water Resources Research, 1999, 35(2):1985-1986.
- [16] SUZUKI T. Wave dissipation over vegetation fields[D]. Saitama:Saitama University, 2011.
- [17] RAUPACH M R. Drag and drag partition on rough surfaces [J]. Boundary-Layer Meteorology, 1992, 60(4):375-395.
- [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(3):131-142.
- [19] WU W C, COX D T. Effects of wave steepness and relative water depth on wave attenuation by emergent vegetation[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2015, 164:443-450.
- [20] WU W C, COX D T. Effects of vertical variation in vegetation density on wave attenuation [J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 2015, 142(2):4015020.
- [21] PUJOL D, COLOMER J, SERRA T, et al. A model for the effect of submerged aquatic vegetation on turbulence induced by an oscillating grid[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2012, 114: 23-30.
- [22] MENDEZ F J, LOSADA I J. An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields [J]. Coastal Engineering, 2004, 51(2):103-118.
- [23] 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, et al. Advances in laboratory experiment, theoretical analysis of mechanism of wave attenuation by vegetation [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(3): 433-445. (in Chinese))
- [24] 蒋昌波, 王瑞雪, 陈杰, 等. 非淹没刚性植物对孤立波传播变形影响实验[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2012, 9(2): 51-56. (JIANG Changbo, WANG Ruixue, CHEN Jie, et al. Laboratory investigation on solitary wave transformation through the emergent neritic vegetation[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2012, 9(2): 51-56. (in Chinese))
- [25] 陈杰, 赵静, 蒋昌波, 等. 非淹没刚性植物对规则波传播变形影响实验研究[J]. 海洋通报, 2017, 36(2): 222-229. (CHEN Jie, ZHAO Jing, JIANG Changbo, et al. Laboratory investigation on the effects of emergent rigid vegetation on the regular wave transformation[J]. Marine Science Bulletin, 2017, 36(2):222-229. (in Chinese))
- [26] MAZA M, LARA J L, LOSADA I J. A coupled model of submerged vegetation under oscillatory flow using Navier-Stokes equations [J]. Coastal Engineering, 2013, 80(7):16-34.

(收稿日期:2018-03-18 编辑:郑孝宇)