

刚性植物分布方式对海啸波消减 影响实验研究*

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

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

摘要 在理论分析的基础上通过物理模型实验探究了刚性植物分布方式对海啸波消减的影响。实验中借助孤立波模拟海啸波, 分析了矩形、交错、组合三类分布方式下孤立波沿程波高、透射系数以及拖曳力系数的变化情况。结果表明, 植物分布密度相等时, 孤立波在矩形和组合分布植物模型前的壅高均大于交错分布植物模型。同时, 植物分布密度一定时, 分布方式将对植物消波产生影响, 且植物间横向间距 L_2 比纵向间距 L_1 的影响更大。在雷诺数 $2000 < Re_p < 4000$ 且体积分数小于或等于 0.331 的条件下, 各植物模型的拖曳力系数随植物分布密度的增大而增大。

关键词 孤立波; 刚性植物; 分布方式; 波浪衰减; 透射系数; 拖曳力系数; 淹没度
中图分类号 P731.22 **doi:** 10.11693/hyhz20171200303

海啸是一种极具破坏性的海洋灾害, 是沿海国家最严重的自然灾害之一, 如何有效减小海啸灾害一直是海岸工程研究的热点(陈杰等, 2013)。大量研究表明, 以红树林为代表的生物海岸植被能显著消减海啸波波能, 降低沿岸地区由海啸灾害所带来的生命财产损失(姚宇等, 2015; 陈杰等, 2016; 何飞等, 2017a, 2018a)。

大量现场观测表明, 海啸波的首波与孤立波非常接近, 因此目前学术界多采用孤立波来近似模拟海啸波(姚宇等, 2015)。近年来, 关于近岸植被对孤立波消减影响研究主要从以下两个方面展开: (1)水动力因素对植物消减孤立波的影响(Giri *et al.*, 2008; 姚宇等, 2015); (2)植物因素对孤立波消减特性的影响。其中, 何飞等(2017a, 2018b)通过物理模型实验分别探讨了植物根、茎、叶对孤立波消减特性及沿程波高衰减特性的影响; Huang 等(2011)通过实验和数值模拟探究了植物分布密度对植物消波的影响,

研究发现植物分布密度越大, 孤立波反射系数越大, 而透射系数越小; Irtem 等(2009)、Irish 等(2014)、Yao 等(2015) 分别通过物理模型实验研究了不同植物分布密度下孤立波的斜坡爬高值变化情况, 研究结果表明, 孤立波在斜坡的爬高值随植物分布密度的增大而减小。此外, Thuy 等(2009)和 Iimura 等(2012)还探究了植物分布方式对孤立波斜坡爬高的影响。现阶段关于植物分布排列方式对其消波特性影响的研究较为少见。

因此, 本文拟在前人的研究基础上, 设计物理模型实验, 探究刚性植物分布方式对海啸波消减特性的影响。

1 理论分析

1.1 植物排列结构定义

现阶段学者研究中大多数采用矩形分布(姚宇等, 2015; 陈杰等, 2016)、交错分布(Hu *et al.*, 2014; 姚宇等,

*国家自然科学基金重点项目, 51839002 号; 湖南省自然科学基金项目, 2018JJ3546 号; 长沙理工大学研究生科研创新项目, CX2017SS10 号。彭浩, 硕士研究生, E-mail: 18390988554@163.com

通讯作者: 陈杰, 副教授, E-mail: chenjie166@163.com

收稿日期: 2017-12-01, 收修改稿日期: 2018-05-01

2015; 陈杰等, 2016)和随机分布(Pujol *et al*, 2012)三类植物分布方式。Nepf(1999)提出了交错分布植物带的排列结构定义式:

$$n = \frac{L_1/D}{L_2/D} = \frac{L_1}{L_2}, \quad (1)$$

式中: n 为植物排列结构参数, L_1 为植物间纵向间距, L_2 为植物间横向间距, D 为植物直径。图 1 为 Suzuki (2011)提出的交错排列植物带结构示意图。

图 2 为植物尾涡区消浪示意图。图中展示了由于植物存在产生的紊流区和尾涡区, 以及植物排列结构导致的尾涡遮蔽区和尾涡重叠区。当相邻植物间横向间距小于紊流区和尾涡区长度之和或植物尾涡区发生纵向重叠时, 将形成遮蔽效应和重叠效应, 减弱植物的消浪能力(Raupach, 1992)。

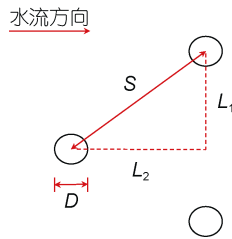


图 1 植物排列结构

Fig.1 Vegetation arrangement structure

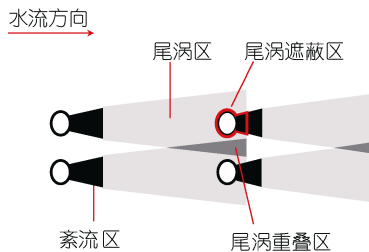


图 2 植物尾涡区消浪

Fig.2 Wave attenuation in the tail vortex area of vegetation

1.2 计算植物拖曳力系数

近岸植物的消波作用能有效消减孤立波波能, 而近岸植物对孤立波的影响可以用拖曳力或拖曳力系数来表征。

Tanino 等(2008)提出了恒定流条件下非淹没植被拖曳力系数的表达式:

$$C_D = \frac{\langle \overline{f_D} \rangle}{\rho \langle \overline{u} \rangle^2 \langle D \rangle / 2}, \quad (2)$$

式中: C_D 为拖曳力系数, $\langle \overline{f_D} \rangle$ 为沿水流方向上单位

长度植物的平均拖曳力, ρ 为流体密度; $\langle D \rangle$ 为植物直径, $\langle \overline{u} \rangle$ 为植被区内平均孔隙流速。

Ergun(1952)提出了关于植被平均拖曳力的表达式:

$$\frac{\langle \overline{f_D} \rangle}{\mu \langle \overline{u} \rangle} = \alpha_0 + \alpha_1 Re_p, \quad (3)$$

式中: μ 为流体的动力黏滞系数, α_0 为植物固体体积分数 ϕ 的函数, α_1 为常数, $Re_p = \langle \overline{u} \rangle \langle \overline{d} \rangle / \mu$ 为基于植被区内孔隙流速 $\langle \overline{u} \rangle$ 的雷诺数。

参考 Huang 等(2011)和姚宇等(2015), 采用植物固体体积分数 ϕ 来估算植物分布密度:

$$\phi = \frac{V_S}{V}, \quad (4)$$

式中: V 为控制体体积, V_S 为控制体内植被固体所占体积。

将(3)式代入(2)可得出拖曳力系数 C_D 的经验表达式(Tanino *et al*, 2008):

$$C_D = 2 \left[\frac{\alpha_0}{Re_p} + \alpha_1 \right]. \quad (5)$$

Tanino 等(2008)根据实验数据, 得到 α_0 、 α_1 的表达式:

$$\alpha_0 = 83.8, \quad (0.15 < \phi < 0.35) \quad (6)$$

$$\alpha_1 = (0.64 \pm 0.11) + (3.8 \pm 0.5) \phi. \quad (7)$$

对于孤立波, 由于惯性力可忽略不计, 恒定流作用下求得的植物拖曳力系数经验表达式可以直接用于孤立波的情况(姚宇等, 2015)。

为便于分析, 定义植物淹没度 α :

$$\alpha = \frac{h}{h_v}. \quad (8)$$

式中: h 为水深; h_v 为植物高度。同时定义 H_0 为 S2 浪高仪所测波高, H_i 为 x 轴正向各浪高仪所测波高, 波高参数 H_i/H_0 表征孤立波的沿程波高变化。

本文拟在前人的研究基础上, 开展刚性植物分布方式对海啸波消减影响实验研究。参照式(1)对实验中矩形分布和交错分布植物模型的排列结构进行定义, 讨论分布方式对植物消减海啸波的影响, 并得到矩形分布植物带透射系数与水动力因素和植物因素之间的关系式。同时, 利用式(5)进行植物拖曳力系数计算与分析。

2 实验概述

实验在长沙理工大学长 40.0m, 宽 0.5m, 高 0.8m

的波浪水槽内进行。水槽前端的液压伺服式不规则波造波机生产实验所需的孤立波, 其主控系统是大连

理工大学研发的 Wave Make 系统。实验布置如图 3 所示。

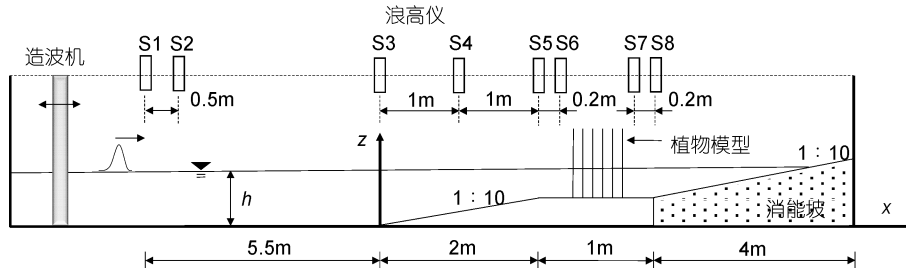


图 3 实验布置

Fig.3 The setup of the experimental flume

在陈杰(2016, 2017a, 2017b, 2018)、何飞(2017a, 2017b, 2018a)等研究基础上, 参考 Augustin 等(2009)、Sánchez-González 等(2011)、Hu 等(2014)实验地形布置, 同时考虑实验设备条件的限制, 开展设计实验。实验比尺为 1 : 20。如图 3 所示, 以植物模型前的斜坡坡底为坐标起点, $x=0-2.0\text{m}$ 为 1 : 10 的斜坡, $x=2.0-3.0\text{m}$ 为平台, $x=3.0-7.0\text{m}$ 为 1 : 10 的消能坡。采用 PVC 圆管概化模拟红树林, 其弹性模量 E 为 2.90—3.92Gpa, 与波浪相互作用时无明显变形现象。PVC 圆管高 $h_v=45\text{cm}$, 直径 $D=1.1\text{cm}$, 模拟 20—50 年树龄直径为 20—25cm 的红树林。

图 4 所示(图 4a 为矩形分布, 图 4b 为交错分布)。

如图 5 所示, 实验一共设计 6 种红树林分布方案, 其中模型 M1、M2、M3、M4 为矩形分布, 模型 M5 为交错分布, 模型 M6 为组合分布, 即矩形分布和交错分布的叠加组合分布。 ℓ 为有机玻璃底板的孔间距, 其数值为 2.5cm。考虑到实际情况中的波况及实验仪器的限制, 实验水深分别为 25.0cm、30.0cm、35.0cm, 孤立波入射波高分别为 4.0cm、5.0cm、6.0cm、7.0cm, 共进行 72 组次实验。具体植物模型参数及实验工况如表 1 所示。

根据目前学者研究中主要采用的矩形分布(姚宇等, 2015; 陈杰等, 2016)、交错分布(Hu *et al*, 2014; 姚宇等, 2015; 陈杰等, 2016)和随机分布(Pujol *et al*, 2012)三类植物分布方式, 并参考前述理论分析内容, 拟设计矩形分布、交错分布和组合分布三类红树林分布方案, 探讨分布排列方式对刚性植物消波特性的影响。本文交错分布排列结构采用植物间距 S 定义, 矩形分布排列结构采用式(1)中参数 n 定义。植物排列结构如

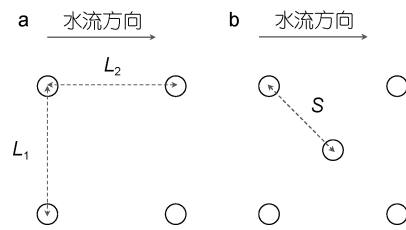


图 4 红树林模型结构

Fig.4 Sketch of mangrove model

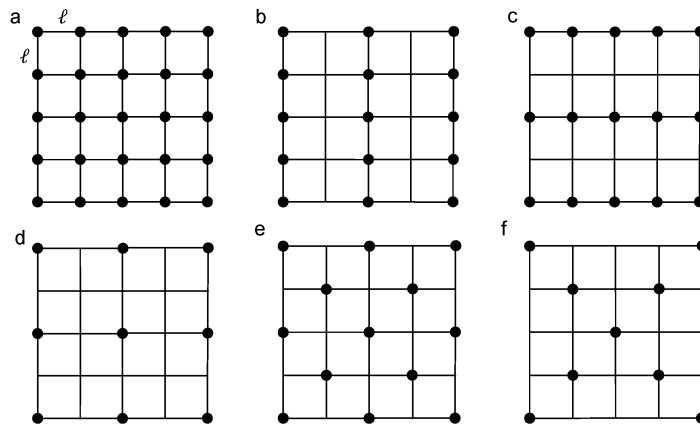


图 5 红树林模型分布方式

Fig.5 Mangrove distribution mode

注: 图 a, b, c...f 分别代表模型 M1, M2, M3...M6

表 1 实验工况
Tab.1 Test cases

| 植物模型 | 植物分布方式/类型 | 实验水深 $h(\text{cm})$ | 入射波波高 $H(\text{cm})$ | 植物固体体积分数 ϕ | 模型结构参数 n/S |
|------|------------|------------------------|-------------------------|--------------------|-----------------|
| M1 | 正方形分布(类型一) | 25.0 | 4.0/5.0/6.0/7.0 | 0.331 | 1.0 |
| | | 30.0 | | | |
| | | 35.0 | | | |
| M2 | 长方形分布(类型一) | 25.0 | | 0.174 | 2.0 |
| | | 30.0 | | | |
| | | 35.0 | | | |
| M3 | 长方形分布(类型一) | 25.0 | | 0.166 | 0.5 |
| | | 30.0 | | | |
| | | 35.0 | | | |
| M4 | 正方形分布(类型一) | 25.0 | | 0.087 | 1.0 |
| | | 30.0 | | | |
| | | 35.0 | | | |
| M5 | 交错分布(类型二) | 25.0 | 0.166 | 1.4 | |
| | | 30.0 | | | |
| | | 35.0 | | | |
| M6 | 组合分布(类型三) | 25.0 | 0.122 | — | |
| | | 30.0 | | | |
| | | 35.0 | | | |

实验首先放置植物模型, 随后对造波机进行预热, 保证造波机性能稳定, 再开启数据采集系统。调整水槽中水位至实验水深, 待水面平静后开始造波, 并测量波高数据。波高测量采用加拿大 WG-50 型浪高仪。浪高仪最小测量周期为 $1.5\mu\text{s}$, 误差为 0.4%, 采样频率为 50Hz。为减小波形变化对数据采集的影响, 安排实验组次从小波高到大波高。为避免余浪对入射波的叠加影响, 每完成一个组次实验后需等待水面平静后再进行下一次造波。数据采集时间要经历从造波机开始造波到波浪传播经过植物模型直至水面平静的整个过程, 重复上述步骤直至完成所有实验组次。

3 结果分析

3.1 波形沿程变化

图 6 给出了模型 M1 在实验工况 $h=35.0\text{cm}$, $H_0=5.0\text{cm}$ 时沿波浪传播方向 6 个测点(S3—S8)所记录的自由液面时间序列。结果显示, S3 和 S4 记录的自由液面时间序列存在两个明显的峰值: 第一个是入射波波峰, 第二个是由于植物模型的存在造成的反射波波峰。当孤立波经过植物模型前 S5 和 S6 浪高仪所在位置时, 无明显反射波存在, 且波浪出现壅高现象, 这是由于入射波和反射波发生了叠加, 孤立波峰值增大。孤

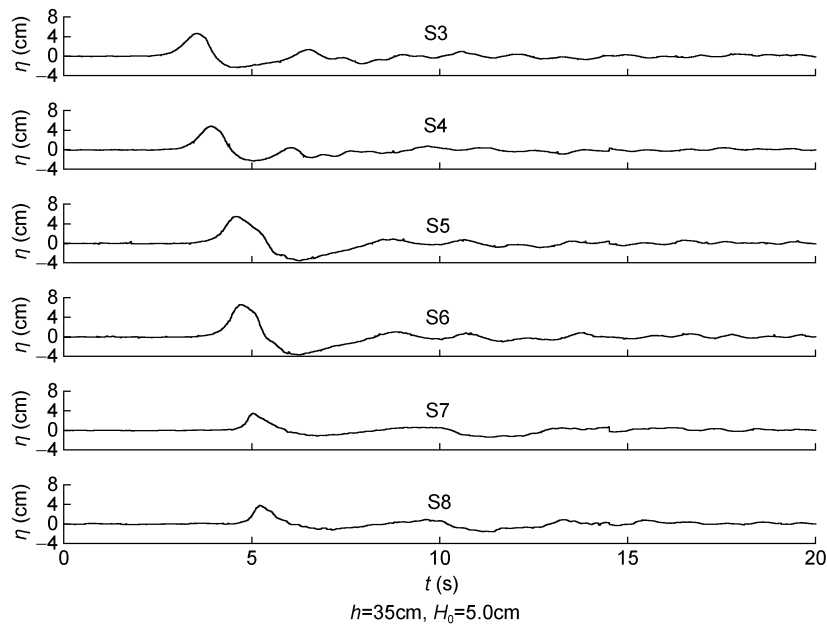


图 6 模型 M1 波面历时图

Fig.6 Surface elevations at different locations for vegetation model M1

立波经过植物模型后, 透射波继续以孤立波的形式向前传播, 但波形由尖陡变为平缓, 这是因为波浪与植物模型相互作用时部分波能被植物模型所消减。

3.2 波高沿程变化

图 7 分别给出了植物模型 M1(正方形分布, $\phi=0.331$)、M3(长方形分布, $\phi=0.166$)、M5(交错分布, $\phi=0.166$)和 M6(组合分布, $\phi=0.122$)在植物淹没度 $\alpha=0.67$ 和 0.78 条件下孤立波沿程波高变化情况。结果显示, 孤立波首先在斜坡地段($0 < x < 2.0\text{m}$)出现波浪爬高现象, 且爬高主要集中在斜坡后 1/2 段, 其中 M3 在 $H/h=0.2, \alpha=0.67$ 条件下斜坡后 1/2 段的孤立波爬高值为前 1/2 段的 7.6 倍; 当孤立波传播至平台地段($2.0 < x < 2.25\text{m}$)时, 由于植物的阻挡产生了明显的波浪壅高现象, 其中 M1 在 $H/h=0.17, \alpha=0.78$ 条件下出现 H_i/H_0 的最大增量 0.27。在本实验地形条件下, 孤立波经过各植物模型前 H_i/H_0 的平均增量比较: $M1 > M3 >$

$M6 > M5$, 由此可见, 当 ϕ 相等时, 孤立波经过 M3 和 M6 前的波高增量均大于 M5。此外, 当 α 相同时, 孤立波在斜坡地形的爬高值及各植物模型前的壅高值均随 H/h 的增大而增大, 其中 M1 在 $\alpha=0.67$ 条件下, $H/h=0.20$ 时的 H_i/H_0 增量比 $H/h=0.13$ 增加了 29.1%; 孤立波传播至植物模型中时, 由植物引起的水体紊动会造成大量的波能衰减, 使得波高急剧减小, 在此过程中 H_i/H_0 的平均下降值比较: $M1 > M3 > M5 > M6$; 孤立波透过植物模型后, 波高趋于稳定。

综上所述, 当 α 相等时, 孤立波在斜坡地形的爬高值以及植物模型前的壅高值均随 H/h 的增大而增大; 当 ϕ 相等时, 孤立波经过矩形和组合分布植物模型前的壅高值均大于交错分布植物模型。由于 M1 的分布密度较大, 孤立波在 M1 前后的波高变化幅度最大。此外, 组合分布方式使得孤立波在植物模型前会产生较大的壅高, 且消浪效果较差。

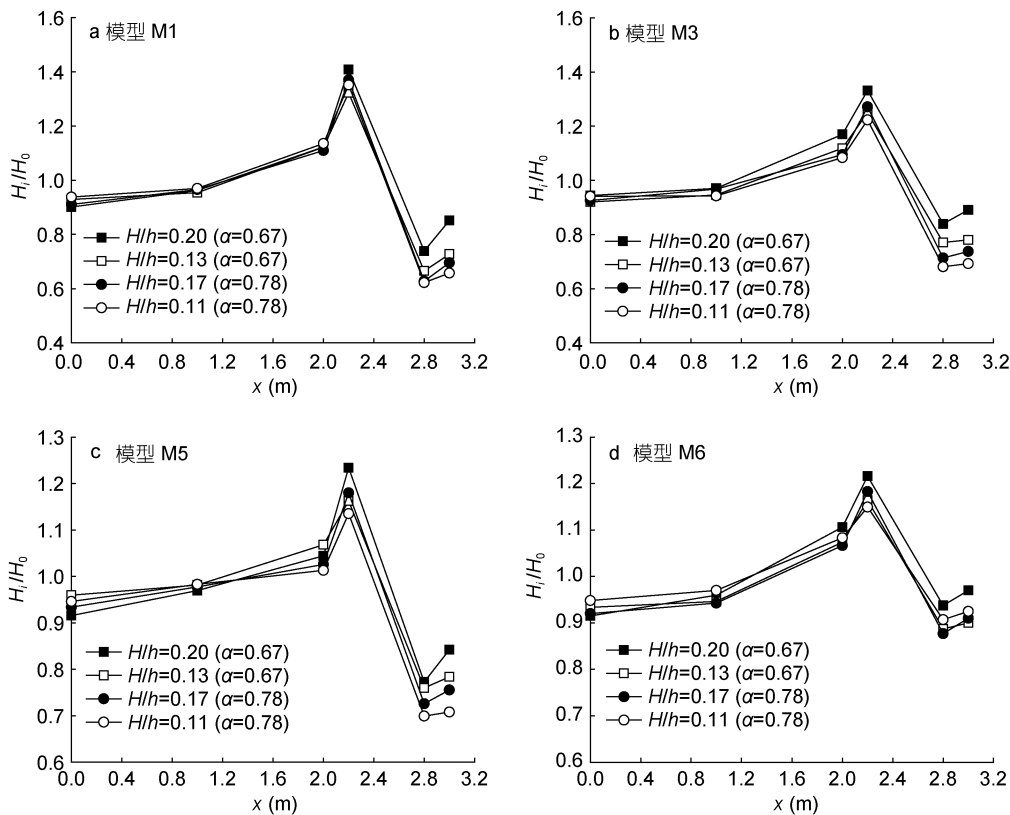


图 7 孤立波波高沿程变化
Fig.7 Variation of solitary wave height at different locations

3.3 孤立波透射系数变化

3.3.1 相对波高的影响 图 8 分别给出了 6 种植物模型在植物淹没度 $\alpha=0.56、0.67、0.78$, 入射波高 $H=4.0\text{cm}、5.0\text{cm}、6.0\text{cm}、7.0\text{cm}$ 条件下透射系数 K_t

随相对波高 H/h 的变化情况。结果显示, 各植物模型 K_t 对 H/h 的敏感度均随 H/h 的增大而减小。其中, M1(图 8a)在各淹没度 α 条件下均表现为 K_t 随 H/h 的增大而增大, M2—M6(图 8b—f)中 K_t 与 H/h 之间的变

化关系依赖于 α , 具体表现为: 当 $\alpha=0.67$ 和 0.78 时, K_t 随 H/h 的增大而逐渐增大; 当 $\alpha=0.56$ 时, K_t 随 H/h 的增大逐渐减小。此外, 在 $\alpha=0.67$ 和 0.78 条件下, 各模型 K_t 在 $H/h=0.20$ 附近变化趋于平缓; 当 $\alpha=0.56$ 时, K_t 在 $H/h=0.20$ 附近趋于稳定。同时, 各模型的消浪能力在 $\alpha=0.56$ 条件下最好, 其中 M1 在 $\alpha=0.56$,

$H/h=0.16$ 时达到 62% 的消浪效果。综上所述, H/h 对 K_t 的影响与 ϕ 及 α 相关。在 $0.087 < \phi < 0.176$ 且 α 相等的条件下, 各植物模型 K_t 随 H/h 的变化趋势相同, 且 K_t 对 H/h 的敏感度随 H/h 的增大而逐渐减小。M1 的分布密度较大, 没有出现临界水深, K_t 均随 H/h 的增大而增大且趋于稳定。

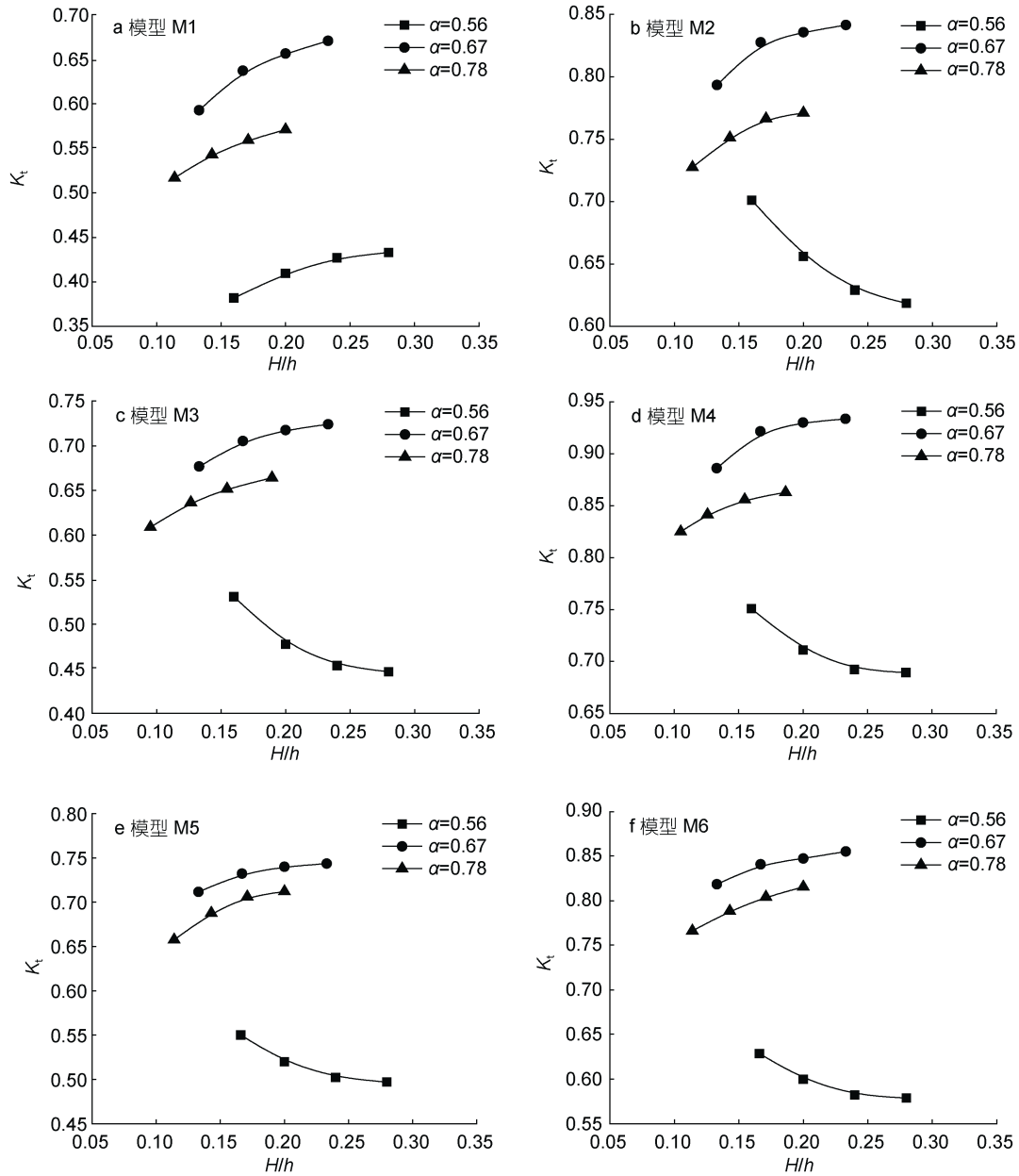


图 8 不同淹没度下孤立波透射系数随相对波高变化

Fig.8 The transmission coefficients of solitary waves vary with relative wave heights at different submergence

3.3.2 植物固体体积分数的影响 图 9a、b 分别给出了植物淹没度 $\alpha=0.67$ 和 $\alpha=0.78$ 条件下 6 种植物模型的孤立波透射系数 K_t 随相对波高 H/h 的变化情况。本

实验中各植物模型的固体体积分数 ϕ 大小比较: $\phi_{M1} > \phi_{M2} > \phi_{M3} = \phi_{M5} > \phi_{M6} > \phi_{M4}$ 。结果显示, 入射波要素相同时, 各植物模型 K_t 大小比较: $M4 > M6 > M2 >$

$M5 > M3 > M1$ 。其中, $M1$ 的分布密度最大, 消浪效果最好, $M2$ 、 $M3$ 和 $M5$ 的分布密度相近, 由于分布排列方式不同导致消浪效果也存在差异。例如, $M3$ (长方形分布)与 $M5$ (交错分布)的固体体积分数 ϕ 相等, 透射系数 $M5 > M3$, 即 $M3$ 的消浪效果更好。 $M4$ 的分布密度最小,

消浪效果最差。此外, $M1$ 和 $M4$ 均为正方形分布, 体积分数 $\phi_{M1} > \phi_{M4}$, 透射系数 $M4 > M1$, 因此, 在正方形分布方式下, K_t 随 ϕ 的增大而减小。综上所述, 在正方形排列方式下, K_t 随 ϕ 的增大而减小, 当分布排列方式存在差异时, K_t 并不是随着 ϕ 的变化而单调的变化。

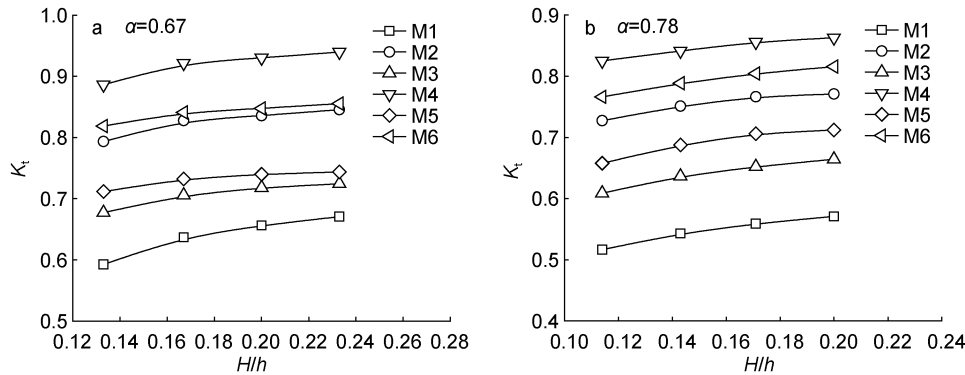


图9 相同淹没度下孤立波透射系数随相对波高变化

Fig.9 The variation of transmission coefficients of solitary waves with relative wave heights at a same submergence

3.3.3 植物分布排列方式的影响 本实验中植物模型 $M2$ 和 $M3$ 的固体体积分数 ϕ 基本相等, 且均为长方形分布, 但两者的植物排列结构不同, 其中 $M2(L_1=2\ell, L_2=\ell, n=2.0)$, $M3(L_1=\ell, L_2=2\ell, n=0.5)$, 透射系数 K_t 也存在较大的差异。由本文 1.1 节理论分析可知, $M2$ 的植物间横向距离 L_2 为 $M3$ 的 $1/2$, 因此 $M2$ 中沿波浪传播方向上的下游植物所受上游植物遮蔽效应影响更大, 而 $M3$ 中植物间纵向距离 L_1 为 $M2$ 的 $1/2$, 植物间出现更为明显的重叠效应。由本文 3.3.2 节分析可知, 入射波要素相同的条件下, $M3$ 的消浪效果更好, 因此, 相比于植物间重叠效应, 遮蔽效应对植物消浪能力的影响更为明显。同理分析 $M3$ (长方形分布)和 $M5$ (交错分布), 两者 ϕ 相等, $M3$ 的重叠效应大于 $M5$, 但遮蔽效应比 $M5$ 弱, 由于遮蔽效应对植物消浪能力的影响强于重叠效应, 因此 $M3$ 的消浪更充分。综上所述, ϕ 相等时, 植物间横向间距 L_2 比纵向间距 L_1 对植物消浪的影响更大, 其本质是 L_2 导致的遮蔽效应对植物消浪能力削弱的程度比 L_1 导致的重叠效应更大。因此, 当 ϕ 相等时, 适当增加相邻植物间沿波浪传播方向的间距, 削弱植物间遮蔽效应, 植物带消浪效果增强。

3.3.4 孤立波透射系数的非线性拟合 受水动力因素和植物因素的共同作用, 近岸植物影响下的波

浪传播变形规律复杂。根据前人的研究(Tanaka *et al*, 2007; Suzuki *et al*, 2012;何飞等, 2017a, 2017b), 发现近岸植物对孤立波消减特性的主要影响因素包括入射波高、水深、波长、植物带长度、植物分布密度、植物淹没度、植物分布方式等。因此近岸矩形分布植物带对孤立波的消浪效果可以用下式表示:

$$f(K_t, H, h, L, B, h_v, \phi, n) = 0, \quad (9)$$

式中: K_t 为透射系数; H 为入射波高; h 为水深; L 为孤立波波长; B 为植物带长度; h_v 为植物高度; ϕ 为植物固体体积分数; n 为排列结构参数;

将式(9)中的各影响因素进行无量纲变换可以得到:

$$f\left(K_t, \frac{H}{h}, \frac{B}{L}, \alpha, \phi, n\right) = 0, \quad (10)$$

式中: K_t 为透射系数; H/h 为相对波高, 可以表征水动力因素; B/L 为植物带相对长度、 α 为植物淹没度、 ϕ 为植物分布密度、 n 为植物排列结构参数, 均可以表征植物因素。

基于本文植物模型 $M1$ — $M4$ 的实验数据, 如图 10 所示, 建立矩形分布植物带孤立波透射系数 K_t 与各影响因素之间的关系式, 如式(11)所示, 拟合度为 0.770, 令关系式右端为 Π 。

$$K_t = 0.610 \left(\frac{H}{h}\right)^{0.116} \left(\frac{B}{L}\right)^{-0.008} (\alpha)^{0.732} (\phi)^{-0.321} (n)^{0.164}. \quad (11)$$

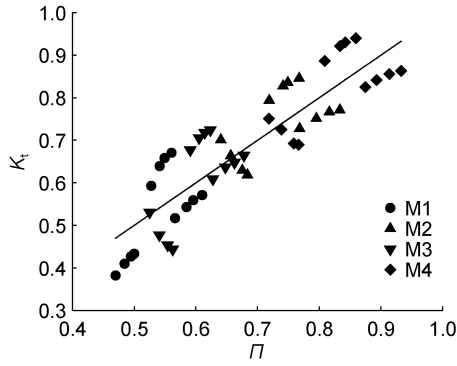


图 10 孤立波透射系数与各影响因素之间的关系

Fig.10 Relation between transmission coefficient of solitary wave and various influencing factors

由于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离较大,但从整体上看仍呈幂函数关系,可以看出水动力因素和植物因素均在不同程度上影响植物的消波特性。为了定量考察经验公式的预测值与实测数据的吻合度,引入均方根偏差(RMSD)变异系数 C_V :

$$C_V = \frac{\text{RMSD}}{(K_t)_j} = \frac{\left\{ \sum_{j=1}^N [(K_t)_j - (\widehat{K_t})_j]^2 / N \right\}^{0.5}}{(\overline{K_t})_j}, \quad (12)$$

式中: $(K_t)_j$ 表示实验实测数据; $(\widehat{K_t})_j$ 表示经验公式预测值; $(\overline{K_t})_j$ 表示实测数据平均值。当 $C_V < 14\%$ 时,表示预测值和实际值的吻合程度较好。表 2 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。由表 2 可知,经验公式(11)对矩形分布植物模型的实测数据预测效果较好,可综合反映出水动力因素及植物因素对于近岸刚性植物消减孤立波的影响。

表 2 实测数据与经验公式预测值均方差
Tab.2 Comparison in the root square error between formula-predicted values and experimental measurements

| 模型 | 植物固体体积分数 ϕ | $C_V\%$ |
|------|-----------------|---------|
| 模型 1 | 0.331 | 13.84 |
| 模型 2 | 0.174 | 8.32 |
| 模型 3 | 0.166 | 12.16 |
| 模型 4 | 0.087 | 7.97 |

3.4 植物模型拖曳力系数讨论

图 11 给出了 Tanino 等(2008)实验中植物固体体积分数 $\phi=0.15、0.20、0.27、0.35$ 四种工况以及本文中 M1、M2、M3、M5 四种植物模型的拖曳力系数 C_D 与雷诺数 Re_p 之间的关系曲线。Tanino 等(2008)主

要研究内容为非淹没状态下随机分布的刚性植物与恒定流之间的相互作用,并得出结论:在 $100 < Re_p < 700, \phi = 0.35$ 条件下,植物拖曳力系数 C_D 随着固体体积分数 ϕ 的增大而增大。值得注意的是, Tanino 等(2008)研究中植物模型采用的是随机分布的方式,并没有考虑分布排列结构对植物拖曳力系数的影响。本文中的 M1、M2、M3、M5 四种植物模型的 ϕ 大小比较: $\phi_{M1} > \phi_{M2} > \phi_{M3} = \phi_{M5}$, 通过计算求得各植物模型的雷诺数 Re_p 范围: $2000 < Re_p < 4000$, 利用式(5)求得各植物模型的 C_D 值大小比较: M1 最大, M2 次之, 而 M5 和 M3 基本相等。综上所述,在 $2000 < Re_p < 4000, \phi = 0.331$ 条件下,符合 Tanino 等(2008)提出的随着固体体积分数 ϕ 的增大,植物拖曳力系数 C_D 增大的规律,当 ϕ 相等时,矩形和交错两种不同的分布排列方式对 C_D 的影响较小。

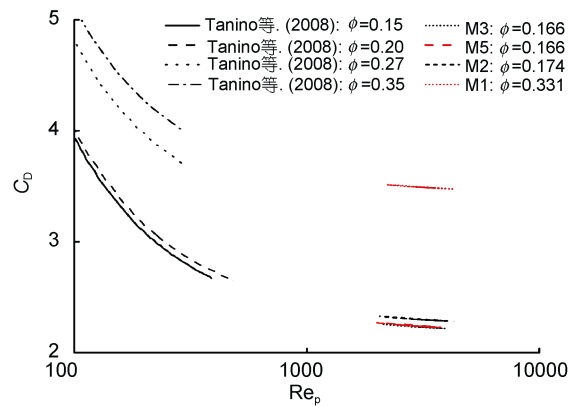


图 11 Re_p-C_D 关系曲线

Fig.11 Relationship curves between Re_p and C_D

4 结论

本文通过物理模型实验研究了刚性植物分布方式对孤立波消减影响,得到以下结论:

(1) 植物固体体积分数 ϕ 越大,孤立波经过植物模型前后的波高变化幅度越大。植物淹没度 α 相同时,孤立波在斜坡地形的爬高值以及植物前的壅高值均随相对波高 H/h 的增大而增大。当 ϕ 相等时,矩形和组合分布植物模型前的波高增量均大于交错分布植物模型。此外,组合分布方式使得孤立波在植物模型前会产生较大的壅高,且消浪效果较差。

(2) 相对波高 H/h 对透射系数 K_t 的影响与 ϕ 及 α 相关。在 $0.087 < \phi < 0.176$ 且 α 相等的条件下,各植物模型 K_t 随 H/h 的变化趋势相同且 K_t 对 H/h 的敏感度随 H/h 的增大而减小,当 H/h 到达一定数值时, K_t

随 H/h 的增大无明显变化, 此时植物模型的消浪效果趋于稳定。

(3) 当植物分布排列方式为正方形分布时, K_t 随 ϕ 的增大而减小, 当植物分布方式不同时, K_t 并不随 ϕ 的变化而单调地变化; 当 ϕ 相等时, 植物分布排列方式导致的遮蔽效应与重叠效应将减弱植物的消浪能力, 且遮蔽效应对植物消浪能力的影响比重叠效应更大, 适当增加相邻植物间沿波浪传播方向的间距, 植物带消浪效果增强。

(4) 在雷诺数范围 $2000 < Re_p < 4000$, 且 $\phi < 0.331$ 条件下, 植物拖曳力系数 C_D 随固体体积分数 ϕ 的增大而增大。当 ϕ 相等时, 矩形和交错两种不同的植物分布排列方式对 C_D 的影响较小。

参 考 文 献

- 何 飞, 陈 杰, 蒋昌波等, 2017a. 考虑根茎叶的近岸植物对海啸波消减实验研究. 热带海洋学报, 36(5): 9—15
- 何 飞, 陈 杰, 蒋昌波等, 2017b. 考虑根茎叶影响的刚性植物消浪特性实验研究. 水动力学研究与进展, 32(6): 770—778
- 何 飞, 陈 杰, 蒋昌波等, 2018a. 规则波作用下植物带波高衰减特性实验研究. 海洋科学进展, 36(1): 146—158
- 何 飞, 陈 杰, 蒋昌波等, 2018b. 植物带影响下孤立波沿程波高衰减特性试验. 水利水电科技进展, 38(1): 75—82
- 陈 杰, 何 飞, 蒋昌波等, 2017b. 规则波作用下刚性植物拖曳力系数实验研究. 水利学报, 48(7): 846—857
- 陈 杰, 何 飞, 蒋昌波等, 2018. 植物消波机制的实验与理论解析研究进展. 水科学进展, 29(3): 433—435
- 陈 杰, 赵 静, 蒋昌波等, 2017a. 非淹没刚性植物对规则波传播变形影响实验研究. 海洋通报, 36(2): 222—229
- 陈 杰, 蒋昌波, 邓 斌等, 2013. 海啸波作用下岸滩演变与床沙组成变化研究综述. 水科学进展, 24(5): 750—758
- 陈 杰, 管 喆, 蒋昌波, 2016. 海啸波作用下泥沙运动——V. 红树林影响下的岸滩变化. 水科学进展, 27(2): 206—213
- 姚 宇, 杜睿超, 袁万成等, 2015. 斜坡非淹没刚性植被影响下孤立波爬高的研究. 水动力学研究与进展, 30(5): 506—515
- Augustin L, Irish J, Balsmeier G *et al*, 2009. Laboratory measurements of wave attenuation and wave setup by vegetation. Coastal Engineering, 2008, 5: 324—330
- Ergun S, 1952. Fluid Flow Through Packed Columns. Chemical Engineering Progress, 48: 89—94
- Giri C, Zhu Z, Tieszen L L *et al*, 2008. Mangrove forest distributions and dynamics (1975—2005) of the tsunami-affected region of Asia. Journal of Biogeography, 35(3): 519—528
- Hu Z, Suzuki T, Zitman T *et al*, 2014. Laboratory study on wave dissipation by vegetation in combined current-wave flow. Coastal Engineering, 88: 131—142
- Huang Z H, Yao Y, Sim S Y *et al*, 2011. Interaction of solitary waves with emergent, rigid vegetation. Ocean Engineering, 38(10): 1080—1088
- Iimura K, Tanaka N, 2012. Numerical simulation estimating effects of tree density distribution in coastal forest on tsunami mitigation. Ocean Engineering, 54: 223—232
- Irish J L, Weiss R, Yang Y Q *et al*, 2014. Laboratory experiments of tsunami run-up and withdrawal in patchy coastal forest on a steep beach. Natural Hazards, 74(3): 1933—1949
- Irtem E, Gedik N, Kabdasli M S *et al*, 2009. Coastal forest effects on tsunami run-up heights. Ocean Engineering, 36(3—4): 313—320
- Nepf H M, 1999. Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation. Water Resources Research, 35(2): 479—489
- Pujol D, Colomer J, Serra T *et al*, 2012. A model for the effect of submerged aquatic vegetation on turbulence induced by an oscillating grid. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 114: 23—30
- Raupach M R, 1992. Drag and drag partition on rough surfaces. Boundary-Layer Meteorology, 60(4): 375—395
- Sánchez-González J F, Sánchez-Rojas V, Memos C D, 2011. Wave attenuation due to *Posidonia oceanica* meadows. Journal of Hydraulic Research, 49(4): 503—514
- Suzuki T, 2011. Wave dissipation over vegetation fields. Delft: Doctor Dissertation of Delft University of Technology
- Suzuki T, Zijlema M, Burger B *et al*, 2012. Wave dissipation by vegetation with layer schematization in SWAN. Coastal Engineering, 59(1): 64—71
- Tanaka N, Sasaki Y, Mowjood M I M *et al*, 2007. Coastal vegetation structures and their functions in tsunami protection: experience of the recent Indian Ocean tsunami. Landscape and Ecological Engineering, 3(1): 33—45
- Tanino Y, Nepf H M, 2008. Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid, emergent cylinders. Journal of Hydraulic Engineering, 134(1): 34—41
- Thuy N B, Tanimoto K, Tanaka N *et al*, 2009. Effect of open gap in coastal forest on tsunami run-up—investigations by experiment and numerical simulation. Ocean Engineering, 36(15—16): 1258—1269
- Yao Y, Du R C, Jiang C B *et al*, 2015. Experimental study of reduction of solitary wave run-up by emergent rigid vegetation on a beach. Journal of Earthquake and Tsunami, 9(5): 1540003

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON TSUNAMI WAVE ATTENUATION UNDER THE EFFECT OF RIGID VEGETATION DISTRIBUTION

PENG Hao¹, CHEN Jie^{1, 2, 3, 4}, JIANG Chang-Bo^{1, 2, 3, 4}, HE Fei¹, DENG Bin^{1, 2, 3, 4}, QU Ke^{1, 2, 3, 4},
LONG Yuan-Nan^{1, 2, 3, 4}, WU Zhi-Yuan^{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 We studied in a flume experiment the effects of rigid vegetation distribution on tsunami wave attenuation based on theoretical analysis in which solitary waves were used to represent tsunami waves. The variations of wave height, transmission coefficient, and the drag coefficient in rectangle and staggered patterns or the combined pattern were analyzed. Results show that under a given vegetation density, the wave run-up in front of the vegetation model in the rectangle and combined patterns is higher than that of staggered pattern. Moreover, under a given vegetation density, the wave attenuation in transversal space of adjacent plants (L_2) is greater than that in lengthwise spaces of adjacent plants (L_1). Under the condition of $2000 < Re_p < 4000$ (Re_p : the Reynolds number in porewater velocity in vegetation region) and the volume fraction is less than 0.331, the drag coefficient of different vegetation patterns increases when the fraction increases. Therefore, findings of this paper could provide a theoretical basis for the protection against tsunami by coastal plantation.

Key words solitary wave; rigid vegetation; distribution; wave height attenuation; transmission coefficient; drag coefficient; submergence ratio