

规则波作用下植物带波高衰减特性实验研究

何 飞¹, 陈 杰^{1,2,3*}, 蒋昌波^{1,2,3}, 赵 静¹

(1.长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114;
3.长沙理工大学 水科学与环境工程国际研究中心, 湖南 长沙 410114)

摘 要:基于综合考虑根、茎、叶影响的近岸植物消波实验,对植物带沿程波高衰减特性进行了研究。结果表明,当淹没度为 0.778 时,茎与根作用下的植物带沿程波高衰减强度沿向岸方向逐渐增强,植物带沿程波高衰减规律与 Dalrymple 幂函数形式和 Kobayashi 指数形式的波高衰减规律并不一致。在非淹没情况下,叶作用下的植物带沿程波高衰减服从幂函数形式和指数形式的波高衰减规律。植物带沿程波高衰减强度随分布密度的增大而增大。研究发现根、茎、叶及分布密度对植物带沿程波高衰减特性的影响与植物淹没度和入射波高相关。另外,植物带消波并不是各部分消波作用的线性叠加。当植物带分布密度较大时,Dalrymple 和 Kobayashi 波浪传播模型的有效性有待进一步提高。

关键词:植物带;波高衰减;淹没度;指数形式

中图分类号:P731.22;TV139.2

文献标识码:A

文章编号:1671-6647(2018)01-0146-13

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2018.01.014

波浪冲刷造成的岸线侵蚀是海岸工程领域亟待解决的问题之一。近岸植物对波浪水体的阻力能有效削减波能^[1],植物作为一种生态式的新型消波护岸措施已成为海岸工程研究热点。波浪在近岸植被中衰减规律一直是植物消波研究重点关注的问题。

国内外学者针对植物带中波浪沿程衰减规律开展了大量的数值分析和物理模型实验研究工作。所涉及的数值分析理论主要是基于 Dalrymple 等^[2]提出的幂函数衰减规律以及 Kobayashi 等^[3]提出的指数函数衰减规律。在数值分析理论的基础上,学者进一步通过物理模型实验探究了植物带沿程波高衰减规律。部分学者探讨了茎作用下的植物带沿程波高衰减规律。例如,John 等^[4]针对沉水柔性及刚性植物开展了消波实验,研究发现植物带沿程波高与上述波高衰减规律基本一致;Vo-Luong 和 Massel^[5]以及 Wu 等^[6-7]所进行的刚性植物消波实验中,植物带沿程波高基本服从幂函数或指数函数衰减规律。而另一部分学者在探究植物带沿程波高衰减规律时考虑了叶的影响。例如,Li 等^[8]通过波浪水槽实验发现挺水柔性植物带沿程波高衰减规律与 Mendez 和 Losada^[9]研究结果一致,呈现指数函数衰减规律;Hu 等^[10]探究了叶作用下的植物带沿程波高衰减规律。还有一些学者探究了植物的根部对植物带沿程波高衰减特性的影响,如 Chen 等^[11]通过实验和数值模拟研究发现,植物带沿程波高衰减呈指数衰减规律。

值得注意的是,上述的幂函数以及指数函数波高衰减规律均是基于圆柱状纯杆植物模型提出的,在建立植物带中波浪传播模型时对拖曳力作线性化处理并对惯性力进行了忽略。尽管后续学者对上述的幂函数及指数波高衰减规律进行了一系列的物理模型验证,但均未综合考虑根茎叶的影响。而近岸植被通常是根茎

收稿日期:2017-02-19

资助项目:国家自然科学基金青年基金项目——往复急变流作用下的沙质岸滩非恒定输沙规律研究(51409022);国家自然科学基金重点项目——全球气候变化下的近岸水沙动力特性及其岸滩响应机制研究(51239001);水利部水科学与水工程重点实验室开放研究基金项目——植物对湖泊风浪传播影响研究(YK914013);长沙理工大学研究生科研创新项目——基于海洋基建工程的悬浮物扩散计算软件研发(CX2016SS06)

作者简介:何 飞(1992-),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要从事海洋动力过程及其数值模拟方面研究. E-mail: mright_1_HF@163.com

* **通讯作者:**陈 杰(1982-),男,广西桂林人,副教授,博士,主要从事海洋动力过程及其数值模拟方面研究. E-mail: chenjie166@163.com

(王 燕 编辑)

叶共同作用以完成消波,因而在探究植物带沿程波高衰减特性时,应当综合考虑根茎叶的影响,根茎叶共同作用下的植物带沿程波高衰减规律有待进一步研究。

综上所述,为弥补现有研究的不足,本文开展综合考虑根茎叶的近岸植物消波实验,深入探讨植物带沿程波高衰减规律。

1 波浪传播模型

1.1 Dalrymple 波浪传播模型

假设波浪传播满足线性波理论,根据波能守恒方程,植物带中波高衰减应满足:

$$\frac{\partial E c_g}{\partial x} = -\epsilon_v, \quad (1)$$

式中, c_g 为波群速度; ϵ_v 为波能衰减项; $E = (1/8)\rho g H^2$ 为能量密度,其中 ρ 为流体密度, g 为重力加速度, H 为波高; x 为植物带中向岸坐标。

植物带中波能衰减项 ϵ_v 可用式(2)进行表达:

$$\epsilon_v = \frac{2}{3\pi} \rho C_D b_v N \left(\frac{kg}{2\sigma} \right)^3 \frac{\sinh^3 kah_v + 3 \sinh kah_v}{3k \cosh^3 kh} H^3, \quad (2)$$

式中, C_D 为拖曳力系数; b_v 为单株植物迎水面宽度; N 为单位面积上植物数量; k 为波数; σ 为角频率; h 为水深; h_v 为植物垂直高度。

对于平底植物带消波模型,将式(2)代入式(1)可得:

$$\frac{\partial H^2}{\partial x} = -A_0 H^3, \quad (3)$$

式中, $A_0 = \frac{2}{3\pi} \rho C_D b_v N \left(\frac{kg}{2\sigma} \right)^3 \frac{\sinh^3 kah_v + 3 \sinh kah_v}{3k \cosh^3 kh}$ 。

对于式(3),给定边界条件 $H(x=0) = H_0$,可求得植物带沿程波高衰减规律^[2]为

$$\frac{H}{H_0} = \frac{1}{1 + k_v x}, \quad (4)$$

式中, k_v 为波能衰减系数。

1.2 Kobayashi 波浪传播模型

本文拟在前人的研究基础之上,开展综合考虑植物根茎叶的消波实验,以探究植物带沿程波高衰减特性,并将其与Dalrymple等^[2]提出的幂函数以及Kobayashi等^[3]提出的指数函数波高衰减规律进行对比。

波浪在植物带中传播时,在植物作用下波能将发生衰减。在线性波理论前提下,根据Kobayashi等^[3]的研究成果,波浪的自由液面满足:

$$\eta = \frac{H_0}{2} \exp(-k_v x) \cos(k_i x - \sigma t), \quad (5)$$

式中, H_0 为 $x=0$ 处波高; k_v 为波能衰减系数; k_i 为波数; σ 为角频率。假设微幅波以相速在植物带中传播, $c = \sigma/k_i$,实际沿程波高衰减将满足:

$$H = H_0 \exp(-k_v x). \quad (6)$$

为便于分析,定义植物淹没度为

$$\alpha = \min(h/h_v, 1), \quad (7)$$

式中, h_v 为植物垂直高度; h 为水深。

同时定义 L 为植物带宽度; H_0 为植物带前端 $x=0$ m处波高; $H_{1.5}$ 为植物带末端 $x=1.5$ m处波高(透

射波高), $H_{1.5}/H_0$ 可用来反映植物带总体波高衰减强度, $H_{1.5}/H_0$ 越大, 表明植物带波高衰减强度越小。 H_i 为植物带沿程波高, H_i/H_0 反映植物带沿程波高衰减特性。

2 实验设计

实验在长沙理工大学水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室的波浪水槽内进行, 水槽长 40.0 m, 宽 0.5 m, 高 0.8 m, 实验布置见图 1。对植物带各部分进行定义: 植物带 0~0.5 m 部分记为 S1; 0.5~1.0 m 部分记为 S2; 1.0~1.5 m 部分记为 S3; 0~1.5 m 部分记为 S。

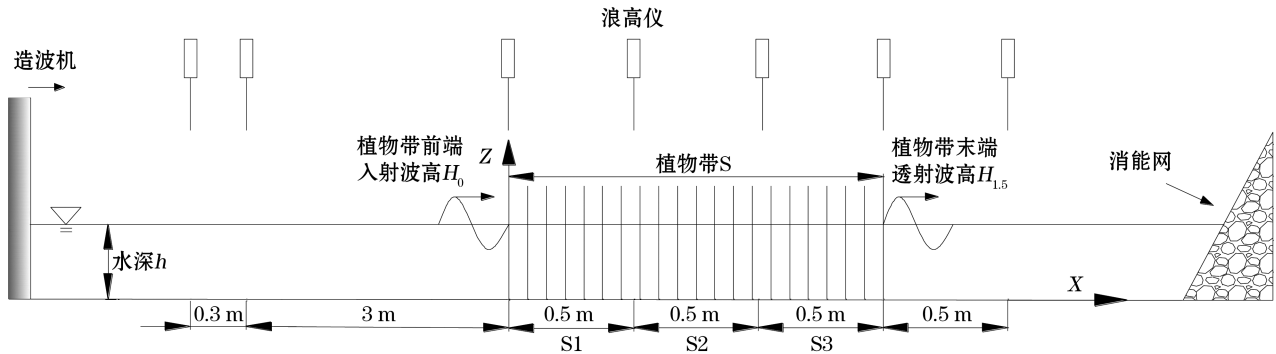


图 1 实验布置

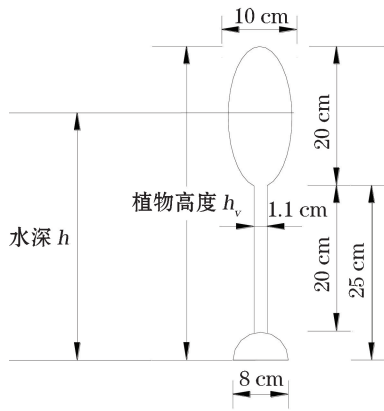
Fig.1 Arrangement of the experiment

在陈杰等^[12]的实验基础之上, 根据众多学者^[13-17]对我国相关防浪植物带的调查资料, 并结合 Mazda 等^[18]对相关树种树根的调查资料, 同时考虑到实验室仪器设备的性能, 设计实验所需要的“模型树”(图 2)。本实验采用的几何比尺为 1:10。刚性植物模型树干(茎)部分采用 PVC 圆管, PVC 管直径为 1.1 cm, 在波浪作用下不会产生变形, 可较好模拟植物树干(刚性)部分。植物树冠部分带有较多枝杈, 具有一定柔性。选取聚乙烯材料模拟植物冠部(叶), 冠部直径为 10 cm, 冠部垂直高度 20 cm。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, 采用硬质塑料球架模拟植物根部(根), 塑料球架弹性模量为 $(1.96 \pm 0.49) \times 10^8$ N/m², 在与波浪相互作用时没有较明显的变形, 可较好模拟植物树根部分。同时为更好地模拟根部的复杂性, 将塑料球架裁剪成一大一小两种尺寸, 小尺寸球架放置于内部, 大尺寸放置于外部, 根部外层直径为 8.0 cm, 根部垂直高度 5.0 cm。

为便于将植物安置在水槽底部, 制作有机玻璃底板用于固定植物模型。底板尺寸长×宽×厚为 150.0 cm×48.0 cm×0.8 cm, 在板上以孔间距 2.5 cm 穿孔。考虑到植物冠部及根部几何特征的复杂性, 以树干横截面积之和与底板面积比值来定义植物分布密度, 采用下式计算刚性植物分布密度:

$$\psi = \frac{n \times S_i}{S}, \quad (8)$$

式中, ψ 为植物分布密度; n 为分布区域内的植物总个数; S_i 为单个植物横截面面积; S 为整个分布区域面积。如图 3 所示, 实验中模型均以正方形分布方式布置, 可得到不同植物分布密度。



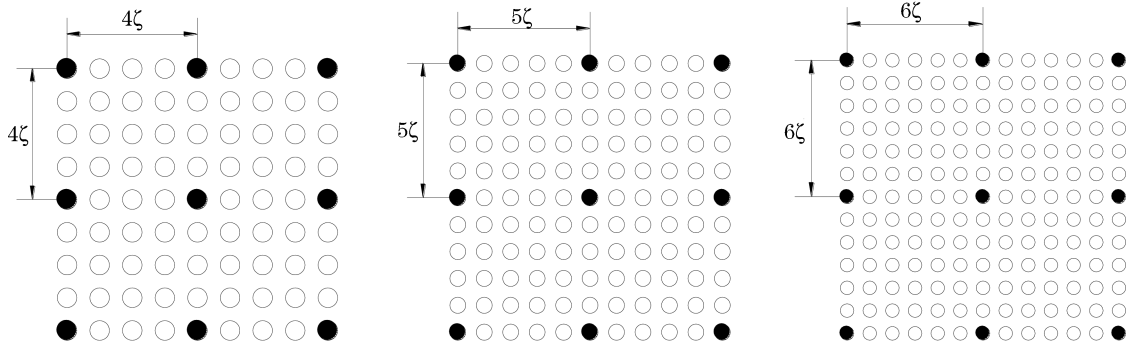
(a)植物模型示意图



(b)植物模型照片

图 2 植物模型

Fig.2 Vegetation model



(a)模型1, 2, 3和4

(b)模型5

(c)模型6

注:图中实心圆为底板植物模型插入位置,空心圆为底板开孔位置,ζ=2.5 cm

图 3 植物模型分布方式

Fig.3 Arrangement of the vegetation model

由表 1 可知,实验中入射波的周期均为 1.0 s。考虑到实际情况中的波况及实验仪器的限制,实验水深分别设置为 25.0,30.0,35.0 和 45.0 cm。实验水深为 25.0 和 30.0 cm 时,入射波高分别为 3.0,5.0 和 9.0 cm;实验水深为 35.0 和 45.0 cm 时,入射波高分别为 5.0,9.0 和 12.0 cm。模型 1,2,3 和 4 的分布密度保持一致($\phi=0.0099$)。为了综合考虑植物根、茎、叶以及分布密度因素的影响,模型 1 仅对茎进行模拟,模型 2 对茎和根进行模拟,模型 3 对茎和叶进行模拟,模型 4 对根、茎、叶进行模拟,模型 5 和模型 6 均对根、茎、叶进行模拟,分布密度分别为 0.0063 和 0.0040。

实验首先放置植物模型,随后对造波机预热,以保证造波机性能稳定,并开启数据采集系统,确保浪高仪性能良好。调整水槽中水位至实验水深,待水面平静后开始造波,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 μs,误差为 0.4%,采样频率为 50 Hz,数据采集时间不少于 60 s。完成一个组次实验后,需待水面平静后,再进行一组次造波,重复上述步骤完成下一组次实验。

表 1 实验植物模型及对应的工况

Table 1 The vegetation models and corresponding conditions applied in the experiments

序号	模型	实验水深 h/cm	入射波波高 H/cm	入射波周期 T/s	植物分布密度 ϕ
模型 1	树干	25.0	3.0,5.0,9.0	1.0	0.009 9
		30.0	3.0,5.0,9.0		
		35.0	5.0,9.0,12.0		
		45.0	5.0,9.0,12.0		
模型 2	树干+根部	25.0	3.0,5.0,9.0	1.0	0.009 9
		30.0	3.0,5.0,9.0		
		35.0	5.0,9.0,12.0		
		45.0	5.0,9.0,12.0		
模型 3	树干+冠部	25.0	3.0,5.0,9.0	1.0	0.009 9
		30.0	3.0,5.0,9.0		
		35.0	5.0,9.0,12.0		
		45.0	5.0,9.0,12.0		
模型 4	根部+树干+冠部	25.0	3.0,5.0,9.0	1.0	0.009 9
		30.0	3.0,5.0,9.0		
		35.0	5.0,9.0,12.0		
		45.0	5.0,9.0,12.0		
模型 5	根部+树干+冠部	25.0	3.0,5.0,9.0	1.0	0.006 3
		30.0	3.0,5.0,9.0		
		35.0	5.0,9.0,12.0		
		45.0	5.0,9.0,12.0		
模型 6	根部+树干+冠部	25.0	3.0,5.0,9.0	1.0	0.004 0
		30.0	3.0,5.0,9.0		
		35.0	5.0,9.0,12.0		
		45.0	5.0,9.0,12.0		

3 结果分析及讨论

3.1 Dalrymple 幂函数和 Kobayashi 指数函数的波高衰减规律

本实验所对应的 Dalrymple 等^[2]的幂函数和 Kobayashi 等^[3]指数函数的波高衰减规律的理论结果如图 4 所示。本实验中 $H_{1.5}/H_0$ 变化范围为 0.200~0.938, 所对应的 Dalrymple 幂函数的 k_v 的理论值变化范围为 0.044~3.333, 对应的 Kobayashi 指数函数的 k_v 的理论值变化范围为 0.042~1.073。可以看出, 当植物带沿程波高衰减越剧烈时, Dalrymple 幂函数和 Kobayashi 指数函数衰减规律都明显反映出植物带波能衰减更集中于植物带前半部分。Sánchez-González 等^[19]将上述植物带沿程波高衰减规律表述为波浪从平底区域传播至植物带区域而产生的

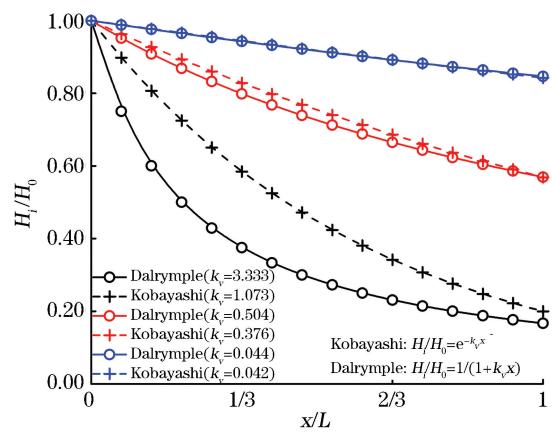


图 4 本文对应的 Dalrymple 幂函数和 Kobayashi 指数函数衰减规律

Fig.4 The wave attenuation laws corresponding to the Dalrymple's power function and the Kobayashi's exponential function mentioned in the paper

边界效应,即波能衰减集中在植物带的前半部分。从图 4 可以看出, k_0 越大,植物带消波的边界效应越强。

3.2 茎对植物带沿程波高衰减特性的影响

本实验以及 Augustin^[20] 实验中茎作用下植物带沿程波高衰减规律的实验结果如图 5 所示。从图 5a 及图 5b 可以看出,在本实验中,淹没度 α 为 0.556 和 0.667 时, H_i/H_0 对 x/L 的敏感度随 x/L 增大而减小;植物带沿程波高衰减与 Dalrymple 幂函数形式和 Kobayashi 指数形式的波高衰减规律较为吻合,植物带消波时具有明显的边界效应。但当 α 为 0.778 时, H_i/H_0 对 x/L 的敏感度随 x/L 增大而增大;植物带消波集中在植物带后半部分,此时无边界效应存在,植物带沿程波高衰减与上述规律并不一致。当 α 为 1.000 时,对于相对较大的波高($H=9$ 和 12 cm)的波浪,植物带消波集中在后 2/3 部分,此时无边界效应存在,植物带沿程波高衰减与上述规律也不一致。

Augustin^[20] 利用硬质塑料模拟植物树干部分(茎),基于波浪水槽实验探究了植物带沿程波高衰减特性。实验设计 2 种水深,分别模拟植物淹没和非淹没状态。从图 5c 和图 5d 可以看出,在 Augustin^[20] 实验中,周期 T 为 1.5 s,当 α 为 1.000 时,沿程波高衰减呈指数规律分布。而当 α 为 1.333 时, H_i/H_0 对 x/L 的敏感度随 x/L 增大而增大,此时均无边界效应存在,植物带沿程波高衰减与上述规律并不一致。周期 T 为 2.0 s,当 α 为 1.000 时,植物带前 3/4 部分沿程波高衰减与上述规律吻合。当 α 为 1.333 时,植物带沿程波高衰减与幂函数和指数形式的波高衰减规律较为吻合,此时存在边界效应。

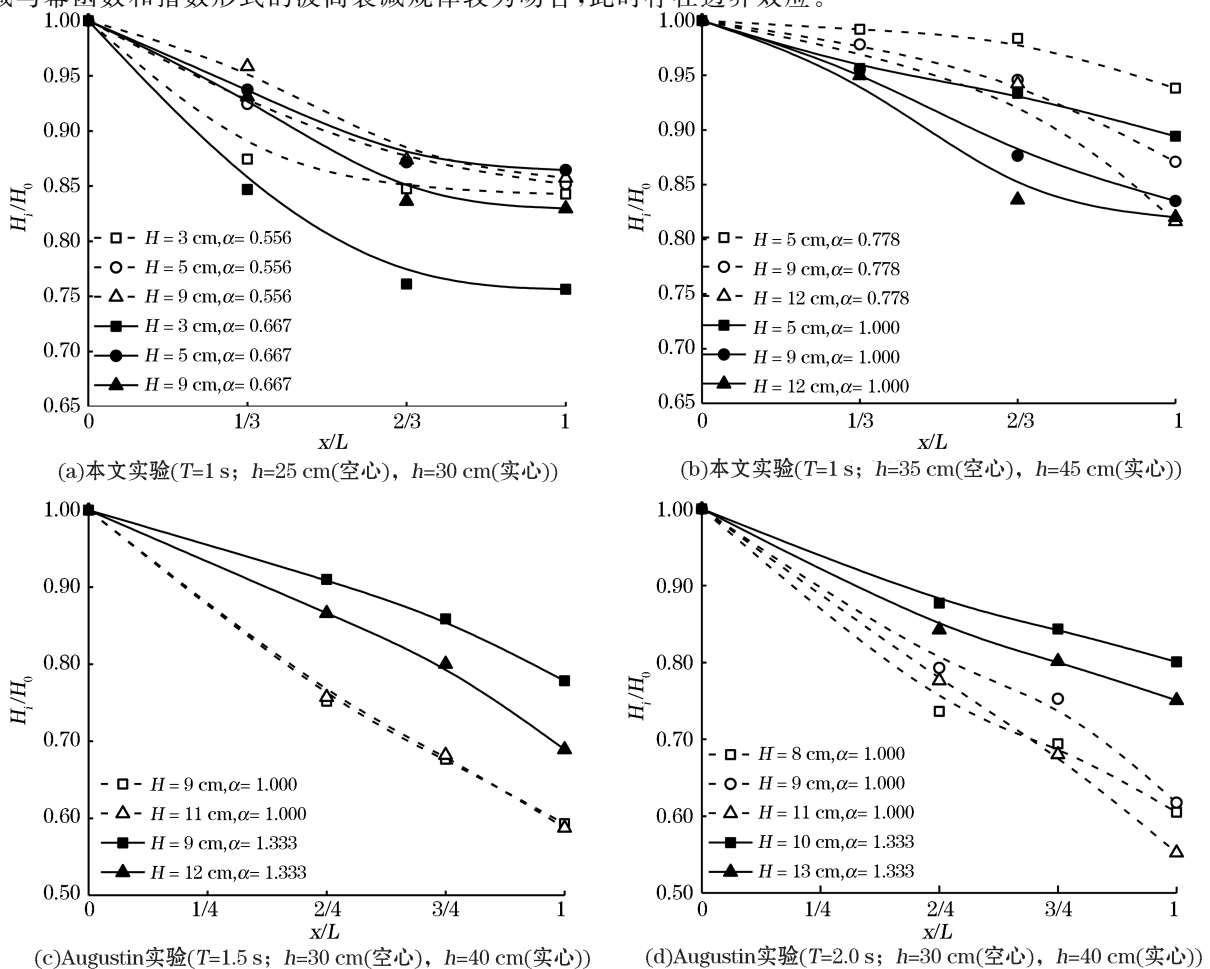


图 5 本文及 Augustin^[20] 实验中茎作用下植物带沿程波高衰减规律

Fig.5 The wave height attenuation induced by the stems of the plants in the experiments carried out in this paper and by Augustin^[20]

综上所述,在一定淹没度下,本实验中茎作用下的植物带沿程波高衰减规律与 Dalrymple 幂函数形式和 Kobayashi 指数形式的波高衰减规律并不一致,这和 Augustin^[20]的研究结果一致。茎对植物带沿程波高衰减特性的影响与 α 和 H 相关。

3.3 根对植物带沿程波高衰减特性的影响

本实验中模型 2(茎+根)与模型 1(茎)作用下植物带沿程波高衰减规律的对比实验结果如图 6 所示。可以看出,当淹没度 α 为 0.556 时,2 种植物模型作用下的植物带沿程波高衰减规律近似一致,说明此时根对沿程波高衰减趋势几乎无影响。当 α 为 0.667 时,相比茎,根对植物带消波的边界效应起明显的弱化效果。当 α 为 0.778 时,与茎相同的是根作用下的植物带沿程波高衰减与 Dalrymple 幂函数形式和 Kobayashi 指数形式的波高衰减规律并不一致。当 α 为 1.000 时,根作用下相对较大的波高($H=9$ 和 12 cm)波浪在植物带中波高衰减近似与上述波高衰减规律一致。结果表明,根对植物带沿程波高衰减特性的影响与 α 和 H 相关,且根作用下的植物带沿程波高衰减与 Dalrymple 幂函数形式和 Kobayashi 指数形式的波高衰减规律并不完全一致。

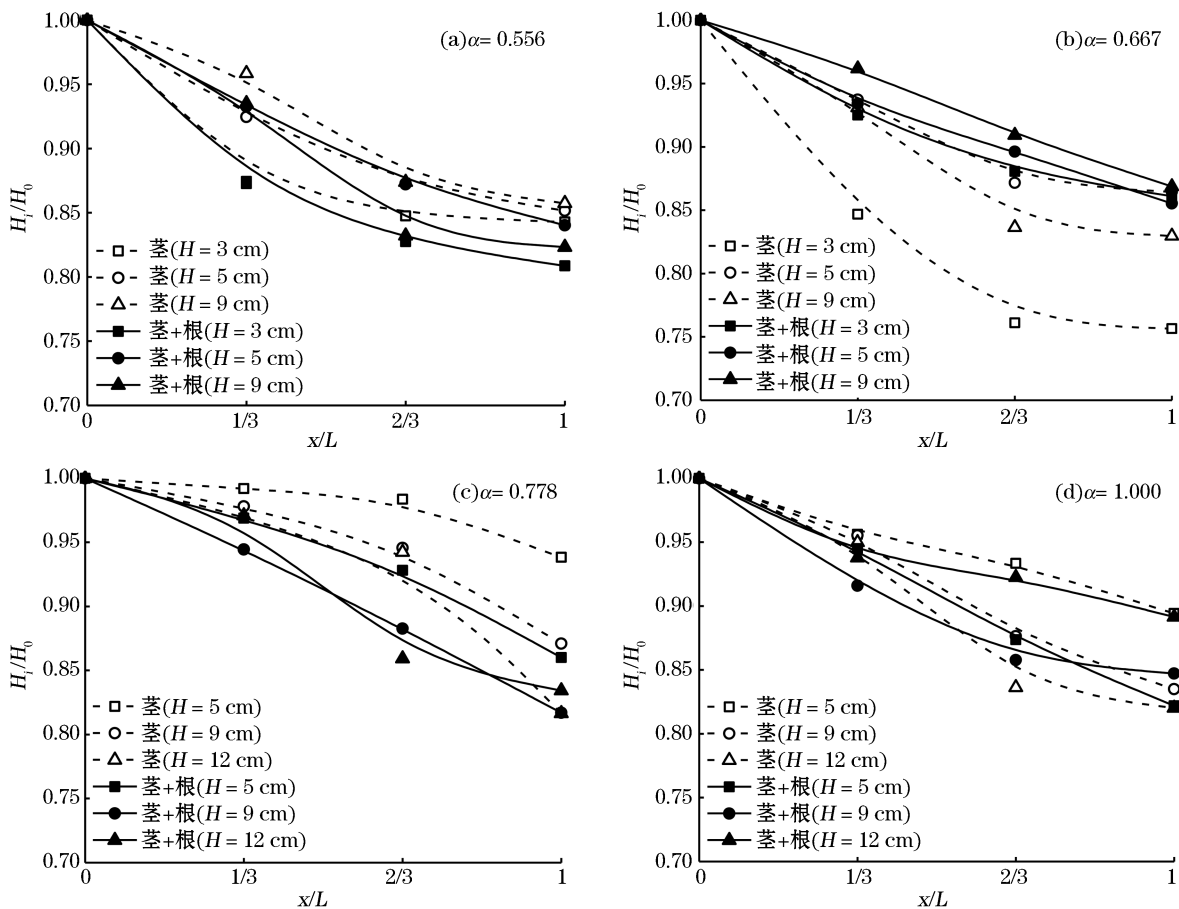


图 6 根作用下植物带沿程波高衰减规律

Fig.6 The wave height attenuation induced by the roots of the plants

3.4 叶对植物带沿程波高衰减特性的影响

模型 3(茎+叶)与模型 1(茎)作用下植物带沿程波高衰减规律的对比实验结果如图 7 所示。可以看出,当淹没度 α 为 0.556 时,相较于茎,叶作用下的大波高($H=9$ cm)沿程波高衰减与 Dalrymple 幂函数形式和

Kobayashi 指数形式的波高衰减规律较为吻合; α 为 0.667 时,叶的存在增大了沿程波高衰减强度,波高衰减仍满足幂函数和指数形式的波高衰减规律; α 为 0.778 时,相较于茎,叶作用下 H_i/H_0 对 x/L 的敏感度随 x/L 增大而增大,此时由于叶的存在,植物带消波时呈现明显的边界效应,植物带沿程波高衰减与上述波高衰减规律较为吻合; α 为 1.000 时,相较于茎,叶作用下相对较小的波高($H=5$ 和 9 cm)沿程波高衰减与幂函数和指数形式的波高衰减规律较为吻合,此时由于叶的存在,植物带对小波高波浪的消波呈现明显的边界效应。结果表明,叶的存在使得植物带沿程波高衰减强度明显增大;叶对植物带沿程波高衰减特性的影响与 α 和 H 相关;叶作用下的植物带沿程波高衰减与 Dalrymple 幂函数形式和 Kobayashi 指数形式的波高衰减规律并不完全一致。

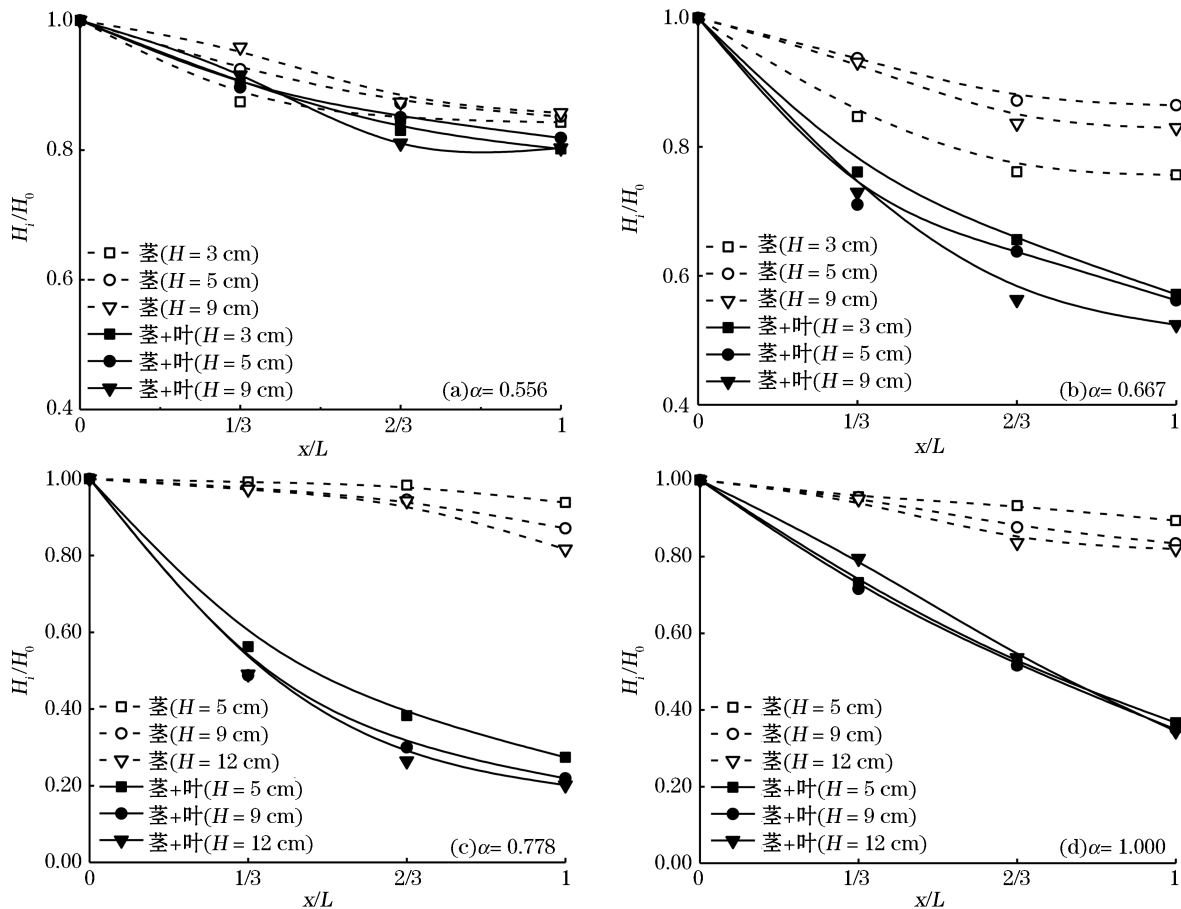


图 7 叶作用下植物带沿程波高衰减规律

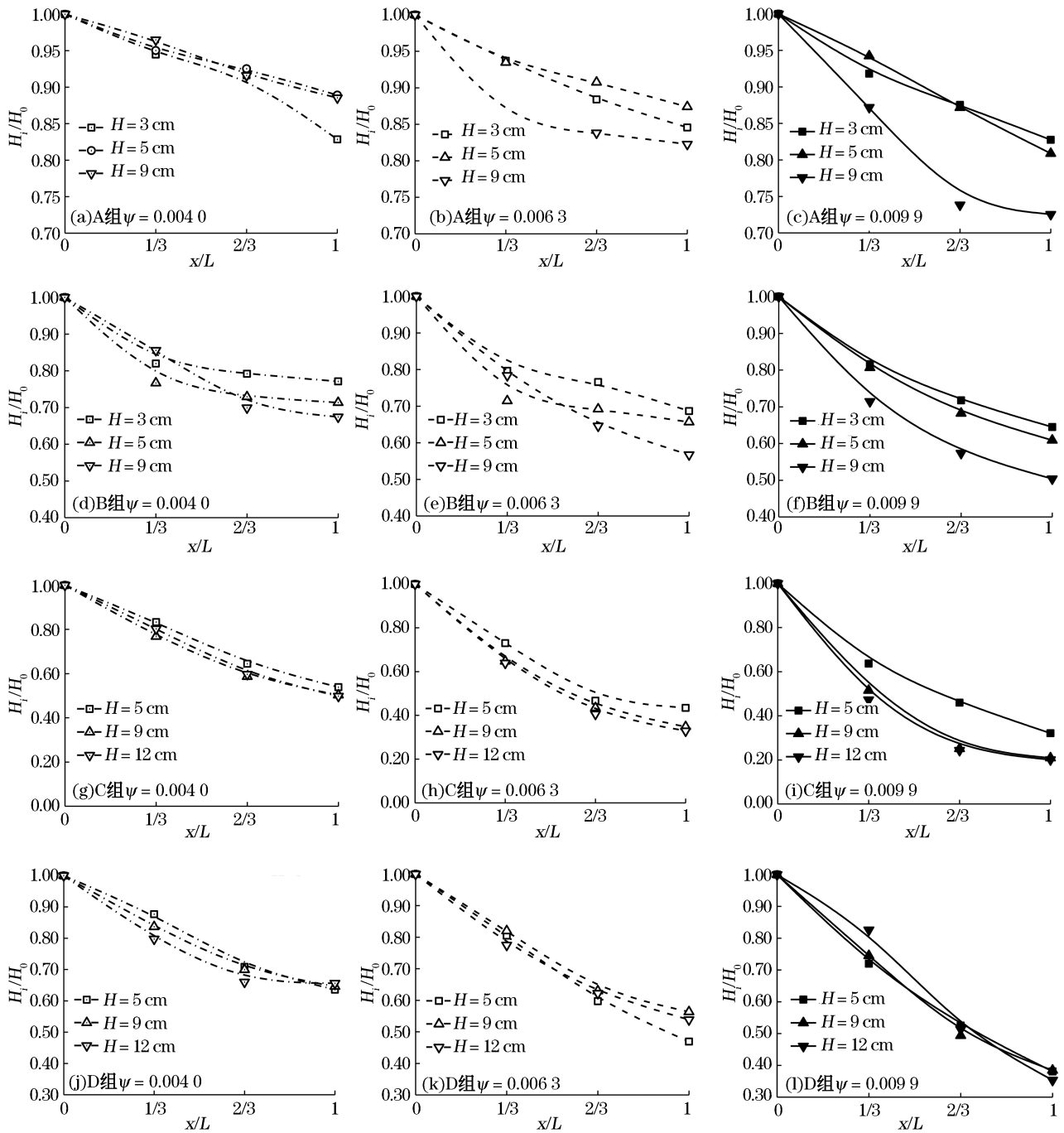
Fig.7 The wave height attenuation induced by the leaves of the plants

3.5 分布密度对植物带沿程波高衰减特性的影响

本实验中不同淹没度下植物分布密度对沿程波高衰减影响的实验结果如图 8 所示。从 A 组图可以看出,当淹没度 α 为 0.556 时,植物带的沿程波高衰减强度随分布密度 ψ 的增大而增大,此时沿程波高衰减与 Dalrymple 幂函数形式和 Kobayashi 指数形式的波高衰减规律较为吻合。从 B 组图可以看出,当 α 为 0.667 时,植物带的沿程波高衰减强度也随 ψ 的增大而增大; ψ 为 0.004 0 和 0.006 3 时,仅小波高($H=3$ 和 5 cm)波浪沿程波高衰减与上述波高衰减规律基本一致;而 ψ 为 0.009 9 时,对于所有工况($H=3, 5$ 和 9 cm),植物带沿程波高衰减均与上述波高衰减规律一致。

从 C 组图可以看出,当 α 为 0.778 时,随着 ψ 的增大,植物带的沿程波高衰减强度增大,植物带消波的边

界效应明显增强,此时植物带沿程波高衰减与上述波高衰减规律一致。从D组图可以看出,当 α 为1.0时,随着 ψ 的增大,植物带的沿程波高衰减强度增大;仅当 ψ 为0.004 0和0.006 3时,此时沿程波高衰减与上述的波高衰减规律完全吻合;而 ψ 为0.009 9时,仅小波高($H=3, 5\text{cm}$)波浪沿程波高衰减与上述波高衰减规律基本一致。综上所述,随着 ψ 的增大,植物带沿程波高衰减强度增大,这与王磊等^[21]的研究结论是一致的, ψ 对于沿程波高衰减特性的影响与 α 和 H 相关。



注: A组: $\alpha=0.556$; B组: $\alpha=0.667$; C组: $\alpha=0.778$; D组: $\alpha=1.000$

图8 植物带沿程波高衰减随分布密度的变化规律

Fig.8 Changes of the wave height attenuation cross over the coastal vegetation with the plant distribution density

3.6 植物带各部分波高衰减规律分析

本实验中模型 1,2,3 和 4 作用下植物带沿程波能衰减百分比的实验结果如表 2 和表 3 所示。从表 2 和表 3 可以看出,当植物处于非淹没状态时($\alpha < 0.778$),植物带 S(0~1.5m)波能衰减百分比随入射波高 H 的增大而增大;而当植物处于淹没状态下时($\alpha = 1.000$),植物带 S 波能衰减百分比随 H 的增大而减小。但分析表 2 和表 3 可以发现,当 $\alpha < 0.778$ 时,对于模型 1,2,3 和 4 而言,植物带消波时出现 S2 部分波能衰减百分比大于 S1 部分以及 S3 部分大于 S2 部分的现象。这表明尽管植物带沿程波高 H_i 呈现递减趋势,但植物带消波时存在后一部分的波能衰减较前一部分更强的情况;当 $\alpha = 1.000$ 时,植物带消波时出现 S1 部分波能衰减百分比大于 S2 部分以及 S2 部分大于 S3 部分的情况,即植物带消波时存在前一部分的波能衰减较后一部分更强的情况。

表 2 模型 1 和 2 的植物带沿程波能衰减百分比

Table 2 The percentage of the wave energy attenuation induced by vegetation in model 1 and 2

模型 1(茎)						模型 2(茎+根)					
α	H/cm	S1/%	S2/%	S3/%	S/%	α	H/cm	S1/%	S2/%	S3/%	S/%
0.556	3	12.3	2.7	0.5	15.4	0.556	3	14.4	4.3	1.8	20.5
	5	9.6	5.1	2.0	16.7		5	13.1	5.6	3.0	21.7
	9	7.4	8.2	1.6	17.2		9	11.3	9.8	0.8	21.9
0.667	3	9.5	9.2	0.5	19.2	0.667	3	10.6	4.3	1.9	16.8
	5	13.1	6.1	0.7	19.9		5	9.4	3.7	4.0	17.1
	9	12.0	8.9	0.6	21.6		9	8.7	5.0	3.9	17.5
0.778	5	8.4	0.8	4.2	13.4	0.778	5	6.2	4.0	6.6	16.7
	9	5.6	3.1	7.2	16.0		9	4.6	6.2	6.6	17.5
	12	1.2	3.1	12.8	17.0		12	4.6	11.0	2.5	18.0
1.000	5	14.0	2.0	3.5	19.6	1.000	5	7.2	7.0	5.1	19.3
	9	7.4	7.7	4.0	19.0		9	9.9	5.7	1.0	16.7
	12	6.3	11.2	0.1	17.6		12	9.0	1.5	3.0	13.5

表 3 模型 3 和 4 的植物带沿程波能衰减百分比

Table 3 The percentage of the wave energy attenuation induced by vegetation in model 3 and 4

模型 1(茎)						模型 2(茎+根)					
α	H/cm	S1/%	S2/%	S3/%	S/%	α	H/cm	S1/%	S2/%	S3/%	S/%
0.556	3	7.4	7.4	2.9	17.7	0.556	3	14.6	4.0	4.4	23.0
	5	11.4	4.6	3.2	19.1		5	11.4	6.7	5.9	23.9
	9	13.5	9.9	0.7	24.1		9	15.4	13.0	1.3	29.6
0.667	3	21.1	10.9	8.8	40.7	0.667	3	20.2	4.0	16.7	40.9
	5	27.8	7.4	7.7	42.9		5	22.9	11.9	7.0	41.8
	9	26.4	16.8	3.9	47.1		9	26.6	14.5	7.2	48.3
0.778	5	42.7	18.3	11.1	72.1	0.778	5	38.1	17.2	13.5	68.8
	9	49.5	19.5	8.4	77.3		9	45.7	27.8	4.4	78.0
	12	48.7	23.7	6.6	78.9		12	49.8	24.4	4.5	78.6
1.000	5	36.9	18.4	13.1	68.4	1.000	5	32.9	18.1	13.9	64.9
	9	32.5	18.8	15.8	67.1		9	31.1	23.2	10.1	64.4
	12	23.7	24.9	18.3	66.9		12	15.2	32.1	16.4	63.7

综上所述,植物带 S 与植物带中各部分(S1, S2 和 S3)波能衰减特性的不同,植物带消波并不是各部分植物带消波的线性叠加。因而,在实验分析植物带宽度对消波特性的影响时,不宜将浪高仪直接放置于植物带中,测得沿程浪高数据进而分析植物带宽度对消波特性的影响。对比吉红香等^[15]和曹海锦等^[22]所开展的植物带宽度对于消波特性影响的实验研究中浪高仪布置方案,根据本文研究结果,上述布置方案应作合理的改进,进而得出植物带宽度对于消波特性影响更为有效的结论。

3.7 讨 论

本实验结果表明,植物带沿程衰减规律与 Dalrymple 等^[2]提出的幂函数形式和 Kobayashi 等^[3]提出的指数形式的波高衰减规律并非完全吻合。本实验中植物带沿程衰减规律与淹没度和入射波高有关,这与 Sánchez-González 等^[19]的研究结果一致。

Sánchez-González 等^[19]指出式(4)和式(6)的得出均是基于在建立波能耗散方程(1)时,对水平方向上拖曳力 F_x 进行线性化的处理并忽略作用在植物上的惯性力,从而得到植物带所产生的能耗项为

$$\epsilon_v = \int_{-h}^{-h+\alpha h} F_x u dz, \quad (9)$$

式中, h 为水深; α 为植物淹没度; u 为波浪水质点运动速度; F_x 为水平拖曳力, $F_x = \frac{1}{2} \rho C_D b_v N u |u|$, ρ 为流体密度, C_D 为拖曳力系数, b_v 为植物迎浪面断面宽度, N 为植物株数。

从式(9)可以看出,波浪水质点运动速度 u 越大,植物所产生的波能耗散越大。通常,植物带沿程波高逐渐衰减,相应的 u 值呈递减趋势。因而,随着波浪在植物带中传播,植物带中的波能衰减强度逐渐减弱,这正是 Dalrymple 幂函数形式和 Kobayashi 指数形式的波高衰减规律所反映出的植物带消波边界效应产生的机理。但正如 Lima 等^[23]所指出的,上述波浪传播模型中所涉及的植物带的阻力效应均是单株植物的阻力效应的线性叠加,而当植物分布密度较大时,植物之间相互作用较强。此时,当波浪水质点运动速度较大时,前株植物所形成的较大尾涡区对后株植物形成屏蔽效应,使得后株植物实际拖曳力减小,其产生的波能损耗减弱。因而,本实验中出现植物带沿程波高衰减与 Dalrymple 幂函数形式和 Kobayashi 指数形式的波高衰减规律并不一致的情况,植物带消波的边界并不存在。例如:3.2 节中淹没度为 0.778 时,随着波浪在植物带中传播,植物带波能衰减逐渐增强。

基于本实验数据可以发现,在基于数值分析理论建立植物消波模型时,应当充分考虑植物淹没度和入射波高两个因素的影响。当植物分布密度较大,植物间的相互作用较强时, Dalrymple^[2]和 Kobayashi^[3]的波浪传播模型的有效性有待进一步提高。

4 结 论

通过物理模型实验探讨了综合考虑根茎叶影响的植物带沿程波高衰减特性。研究表明,根、茎、叶和植物分布密度 ψ 对植物带沿程波高衰减特性的影响与淹没度 α 和入射波高 H 相关。当 α 为 0.778 时,茎与根作用下的植物带沿程波高衰减强度沿向岸方向逐渐增强,植物带沿程波高衰减规律与 Dalrymple 幂函数形式和 Kobayashi 指数函数形式的波高衰减规律并不一致。叶的存在明显增强植物带沿程波高衰减强度,增强了植物带消波的边界效应。非淹没情况下($\alpha < 0.778$),叶作用下的植物带沿程波高衰减服从幂函数形式和指数形式的波高衰减规律。随着 ψ 的增大,植物带沿程波高衰减强度增大,植物带消波的边界效应增强。研究发现,植物带消波并不是各部分消波作用的线性叠加。当 ψ 较大,植物间的相互作用较强时, Dalrymple 和 Kobayashi 波浪传播模型的有效性有待进一步提高。研究得到了根茎叶作用下的植物带沿程波高分布规律的基本认识,有助于完善生物海岸的水动力学理论,为采用近岸植物消波护岸提供一定的理论指导。

参考文献(References) :

- [1] WU G X, LI H J, LIANG B C, et al. Subgrid modeling of salt marsh hydrodynamics with effects of vegetation and vegetation zonation [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, doi: 10.1002/esp.4121.
- [2] 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): 142-150.
- [3] KOBAYASHI N, RAICHLER A W, ASANO T. Wave attenuation by vegetation[J]. *Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering*, 1993, 119(1): 30-48.
- [4] 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.
- [5] VO-LUONG P, MASSEL S. Energy dissipation in non-uniform mangrove forests of arbitrary depth[J]. *Journal of Marine Systems*, 2008, 74(1-2): 603-622.
- [6] 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.
- [7] WU W C, MA G, COX D T. Modeling wave attenuation induced by the vertical density variations of vegetation[J]. *Coastal Engineering*, 2016, 112: 17-27.
- [8] 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): 251-266.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] CHEN X, CHEN Q, ZHAN J, et al. Numerical simulations of wave propagation over a vegetated platform[J]. *Coastal Engineering*, 2016, 110: 64-75.
- [12] CHEN J, ZHAO J, JIANG C B, 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. 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.
- [13] CHEN J, HE F, JIANG C B, et al. Experimental investigation on drag coefficient of rigid vegetation influenced by regular waves[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(7): 846-857. 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.
- [14] HE F, CHEN J, JIANG C B, 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. 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.
- [15] HE F, CHEN J, JIANG C B, 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(5): 395-403. 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*, 2017, 32(5): 395-403.
- [16] CHEN J, GUAN Z, JIANG C B. Study of sediment transport by tsunami waves: V. influence of mangrove[J]. *Advance in Water Science*, 2016, 27(2): 206-213. 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.
- [17] JIANG C B, GUAN Z, CHEN J, et al. Experimental study on changes of cross-shore beach profile by regular waves under the influence of mangroves[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2017, 36(1): 95-105. 蒋昌波, 管喆, 陈杰, 等. 红树林对规则波作用下岸滩剖面变化影响实验研究[J]. *热带海洋学报*, 2017, 36(1): 95-105.
- [18] MAZDA Y, MAGI M, IKEDA Y, et al. Wave reduction in a mangrove forest dominated by *Sonneratia* sp.[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2006, 14(4): 365-378.
- [19] SÁNCHEZ-GONZÁLEZ J F, SÁNCHEZ-ROJAS V, MEMOS C D. Wave attenuation due to *Posidonia oceanica* meadows[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2011, 49(4): 503-514.
- [20] AUGUSTIN L N. Laboratory experiments and numerical modeling of wave attenuation through artificial vegetation[D]. Texas: Texas A&M University, 2007.

- [21] WANG L, FANG K Z, YIN J, et al. A numerical model for coastal wave propagation in the rigid vegetation area[J]. *The Ocean Engineering*, 2015, 33(6): 62-69. 王磊, 房克照, 尹晶, 等. 近岸波浪在刚性植被区域传播的数值模型[J]. *海洋工程*, 2015, 33(6): 62-69.
- [22] CAO H J, FENG W B. Study on the characteristic of wave dissipation by artificial flexible vegetation field[J]. *The Ocean Engineering*, 2014, 32(3): 36-44. 曹海锦, 冯卫兵. 人工柔性植被场中波浪衰减特性研究[J]. *海洋工程*, 2014, 32(3): 36-44.
- [23] LIMA S F, NEVES C F, ROSAURO N M L. Damping of gravity waves by fields of flexible vegetation[J]. *Coastal Engineering*, 2006, 5: 491-503.

Experimental Study on Wave Height Attenuation Induced by the Coastal Vegetation Under Regular Waves

HE Fei¹, CHEN Jie^{1,2,3}, JIANG Chang-bo^{1,2,3}, ZHAO Jing¹

(1. *School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;*

2. *Key Laboratory of Water Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China;*

3. *International Research Center of Water Science & Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)*

Abstract: The characteristics of wave height attenuation induced by the coastal vegetation are studied based on wave attenuation experiments in which the effects of roots, stems and leaves of the plants are taken into account. The results from the experiments show that the intensity of wave height attenuation induced by roots and stems of the plants increases gradually toward the land when the submergence of the plants is equal to 0.778. This phenomenon is not consistent well with the wave height attenuation either in the power function form proposed by Dalrymple or in the exponential form suggested by Kobayashi. In the case of emergent vegetation, the wave height attenuation induced by leaves of the plants follows the laws proposed by Dalrymple and Kobayashi, and the intensity of wave height attenuation increases with the increasing of the vegetation density. It is found that the influences of the roots, stems, leaves and density of vegetation on the wave height attenuation are correlated to the plant submergence and the incident wave height. Furthermore, the wave attenuation in the coastal vegetation zone is not a linear superposition of the wave attenuation in each part of the zone. When the vegetation density is higher, the effectiveness of the wave propagation models proposed by Dalrymple and Kobayashi needs to be improved further.

Key words: vegetation zone; wave height attenuation; submergence; exponential form

Received: February 19, 2017