

文章编号:1005-9865(2024)04-0110-09

考虑刚柔组合的海岸复合型植被消波特性研究

王永胜¹, 周 曾^{1, 2}, 刘治宇³, 陈俊昂⁴, 靳 闯^{2, 3}, 侯 棚⁵, 龚 政^{1, 2}

(1. 河海大学 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省海岸海洋资源开发与环境安全重点实验室(河海大学), 江苏 南京 210098; 3. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 4. 广东省水利电力勘测设计研究院有限公司, 广东 广州 510635; 5. 珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611)

摘 要: 海岸植被在消减波浪能量方面发挥着重要作用, 植被消波是海岸生态防护的重要形式。以广州市南沙区龙穴岛北部近岸水力特征为基础, 通过波浪水槽物理模型试验探究不同淹没度、入射波高及柔性植被宽度比条件下单一型植被(柔性、刚性)和复合型植被(刚柔组合)消浪效果。研究表明: 当淹没度 $\alpha=0.67$ (低于树冠形心处淹没度0.03即水深略低于树冠形心)或 $\alpha>1.00$ (水深高于树冠顶部)时, 单一型刚性植被消浪效果最优; 当淹没度 α 增大至0.78和0.83(分别高出树冠形心处淹没度0.08和0.13)时, 柔性和刚性复合型植被消浪效果更好。随着波高的增大, 单一型植被与复合型植被的消浪效果均增强。柔性植被宽度比值 B/B_0 对植被消浪系数 K 的影响与淹没度和波高有关: 当 $\alpha<1.00$ 时, 消浪系数 K 随 B/B_0 的增大先增大后减小; 当 $\alpha=1.00$ 时, 消浪系数 K 随 B/B_0 的增大先减小后增大再减小, 且均在 B/B_0 时消浪系数达最大; 当 $\alpha>1.00$ 时, 消浪系数 K 随 B/B_0 的增大呈现减小的变化趋势。研究可为当地植被生态护岸工程建设提供理论支撑。

关键词: 植被消波; 消浪效果; 复合植被; 柔性植被; 海岸防护; 淹没度

中图分类号: P753; TV139.2 文献标志码: A DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2024.04.011

Research on wave dissipation characteristics of coastal composite vegetation considering rigid-flexible combination

WANG Yongsheng¹, ZHOU Zeng^{1, 2}, LIU Zhiyu³, CHEN Junang⁴, JIN Chuang^{2, 3}, HOU Peng⁵, GONG Zheng^{1, 2}

(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Coast Ocean Resources Development and Environment Security, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Guangdong Hydropower Planning & Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510635, China; 5. Pearl River Water Resources Research Institute, Guangzhou 510611, China)

Abstract: Coastal vegetation plays an important role in wave energy dissipation. Vegetation wave dissipation is an important form of coastal ecological protection. Based on the hydrodynamic characteristics of the nearshore area north of Longxue Island, Nansha District, Guangzhou City, this study investigates the wave dissipation effects of single-type vegetation (flexible, rigid) and composite vegetation (rigid-flexible combination) under different submergence degrees, incident wave heights, and width ratios of flexible vegetation through physical model experiments in a wave flume. The results show that when the submergence degree $\alpha=0.67$ (lower than the submergence degree at the crown center, which is 0.03, indicating that the water depth is slightly below the crown) or $\alpha>1.00$ (water depth higher than the top of the crown), the wave dissipation effect of single-type rigid vegetation is optimal. When the submergence degree α increases to 0.78 and 0.83 (respectively, 0.08 and 0.13 higher than the submergence degree at the crown

收稿日期: 2023-07-25

基金项目: 广州市南沙区水务局科技项目(穗南水合2022-263); 国家自然科学基金资助项目(41976156, 42206163)

作者简介: 王永胜(2000—), 男, 辽宁朝阳人, 研究方向为海岸生态防护。E-mail: ys.wang@hhu.edu.cn

通信作者: 靳 闯(1990—), 男, 副研究员, 主要从事海岸动力地貌学研究。E-mail: c.jin@hhu.edu.cn

center), the wave dissipation effect of flexible and rigid composite vegetation is better. With the increase of wave height, both single-type vegetation and composite vegetation show enhanced wave dissipation effects. The ratio of the width of flexible vegetation B/B_0 affects the vegetation wave dissipation coefficient K , which is related to the submergence degree and wave height. When $\alpha < 1.00$, K increases first and then decreases with the increase of B/B_0 ; when $\alpha = 1.00$, K decreases first and then increases, then decrease again with the increase of B/B_0 , and K reaches its maximum when $B/B_0 = 0$; when $\alpha > 1.00$, K shows a decreasing trend with the increase of B/B_0 . This study provides theoretical support for the construction of local vegetation ecological shoreline protection projects.

Keywords: vegetation wave dissipation; wave dissipation effect; composite vegetation; flexible vegetation; coastal protection; submergence degree

水生植物是海岸生态护岸的重要形式,由于在缓流消浪方面的重要作用,其在海岸防护及防灾减灾方面有着广泛应用。同时,植物消波作为一种新型的生态消波护岸措施,对于未来降低堤顶高程及海堤建设投资具有重要意义。

目前针对单一型植被消浪效果,多采用不同水深、波浪要素(如波高、波周期、波陡度等)、植被参数(如植被高度、刚度、密度、迎水面面积等)的试验方法进行分析^[1]。已有研究表明,随水深的增加,柔性植被的消浪效果呈现先增大后减小的趋势,当水深与植被高度一致时消浪效果较好^[2-3]。值得注意的是,柔性植被在波浪作用下发生晃动会产生二次造波现象,水深与植被高度一致时造波现象最为明显,该现象会导致植被消浪效果大幅降低^[2, 4]。植被宽度也是影响消浪效果的重要因素,随植被宽度的增加,柔性植被消浪效果逐渐提升^[5-6]。此外,试验中柔性植被材料刚度越大,水体紊动强度越强,植被消浪效果越好^[7]。对于刚性植被,学者们通过定义淹没度($\alpha = h/h_v$, h 为水深, h_v 为植被高度)综合考虑水深和植被高度对消浪效果的影响^[8-9]。研究表明:刚性植被的消浪效果随淹没度的增大先增大后减小^[9-10],水深处于树冠形心时消浪效果最好^[8, 10];当植被处于未被完全淹没状态时,波高越大,植被消浪效果越好^[11-12];随植被宽度的增大,消浪效果先增大后趋于不变,当宽度处于30~50 m时最为合适^[13]。此外,植被的分布特征也是影响消波效果的重要因素,当刚性植被呈交错分布时,植被对波浪的扰动程度较大,波能反射和衰减较多,消浪效果最好^[11-13]。

然而,国内外学者针对复合型植被(不同植被组合)消浪效果的研究较少,周悦等^[14]和Ren等^[15]针对不同植被组合开展消波试验研究,发现单一型植被在不同水深和波高等水动力条件下消浪效果的差异较大,复合型植被整体消浪效果较好。复合型植被在水位低于大树树冠时可以发挥小树树冠消浪优势及柔性植被密植消浪优势,在水位处于大树树冠底端与顶部之间时,可以利用大树树冠消浪优势。张茂章和宋正明^[16]通过植被消能效益计算验证了这一结论。为进一步探究不同植被类型对水体的耗能机理,Chembolu等^[17]针对不同植被斑块开展缓流试验研究,发现混合植被带来的额外阻力降低了树冠顶部剪切产生的湍流,并将其峰值移至树冠上方。

由于柔性和刚性植被对水深、波浪动力的响应存在差异,柔性-刚性植被的复合并非简单的线性叠加,目前针对复合植被的消浪特性及其与单一型植被消浪效果的差异性研究仍然缺乏。以广州市南沙区龙穴岛北部为研究对象,通过物理模型试验探究不同水深、波高以及复合植被排列方式条件下的消浪特性,与单一型植被消浪效果进行对比,分析复合型植被消波的优势及工程可行性。

1 试验设置

以广州市南沙区龙穴岛北部为研究对象,根据现场观测、设计资料和数值模拟结果可知,当地低矮红树林物种高度通常为2~4 m,研究区域20、50、100及200年一遇的设计水位,分别为2.63、2.96、3.21和3.46 m。综合考虑试验设备条件,选取长度比尺为1:12,试验中水深、波高和植被尺寸根据长度比尺进行换算;时间比尺为1:3.46,试验波周期通过时间比尺进行计算。试验在风浪水槽内进行,水槽尺寸为85 m×1.0 m×1.5 m(长×宽×高),水槽中设置有梯形平台,高20 cm,上底长5 m,下底长9 m,三角形斜坡底边长2 m。试验中植被带宽度为2.5 m,每50 cm设置一个波高仪,采样频率20 Hz,精度 10^{-5} cm,试验布置如图1(a)所示。

试验采用高度15 cm、直径8 mm的硅胶圆棒模拟柔性模型树,见图1(b),密度为2 500株/m²。刚性植被以铁丝绞线为树干,塑料仿真树冠为模型树冠,见图1(c)。模型树高30 cm,树冠高18 cm,树冠直径16 cm,树干高12 cm,树干直径1 cm,密度为32株/m²。试验中刚性模型树排列方式为交错分布,相邻刚性模型树在

底板长度方向相距 18 cm, 宽度方向相距 16 cm, 柔性模型树排列方式为正方形, 相邻柔性模型树相距 2 cm。试验布置方案共 5 种, 单一型植被 2 种, 树型分别为刚性植被和柔性植被; 复合型植被 3 种 (如图 2(a)), 主要为前柔后刚复合型植被, 包括组合 1 (前 0.5 m 为柔性植被, 后 2.0 m 为刚性植被), 组合 2 (前 1.0 m 为柔性植被, 后 1.5 m 为刚性植被), 组合 3 (前 1.5 m 为柔性植被, 后 1.0 m 为刚性植被)。具体试验模型参数见表 1, 植被布置方式如图 2(b) 所示。

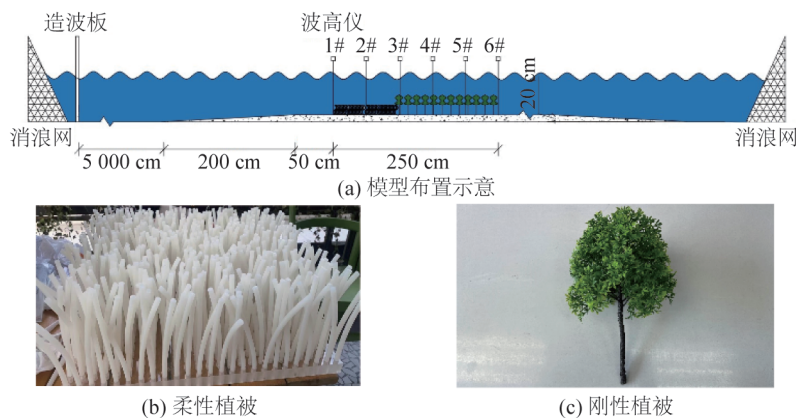


图 1 植被模型及模型布置示意

Fig. 1 Vegetation model and layout schematic

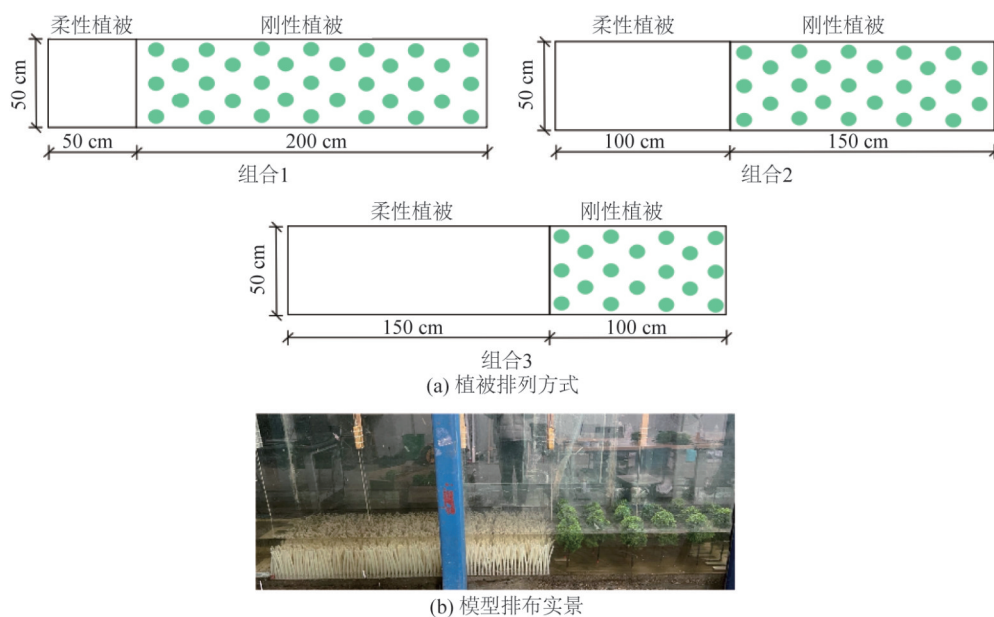


图 2 模型排列方式及实景布置

Fig. 2 Arrangement and layout of the model

结合南沙区 20、50、100 及 200 年一遇设计水位, 综合考虑植被淹没情况和试验水槽设备造波能力限制, 植被区前端试验水深分别取 20.0、23.5、25.0、30.0 和 35.0 cm。当水深为 20.0 cm 时, 入射波高为 7.0 cm 和 9.0 cm; 当水深为 23.5 cm 和 25.0 cm 时, 入射波高为 7.0、9.0 和 11.0 cm; 当水深为 30.0 cm 和 35.0 cm 时, 入射波高为 7.0、9.0、11.0 和 12.5 cm。试验采用规则波, 周期均为 1 s, 具体试验组次如表 2 所示。试验时, 待波面平静后再进行下一次试验, 每组试验均进行 1~2 次重复试验, 取平均值作为最终结果, 沿程波高数据采集时间不少于 60 s。无植被时, 通过 Goda 两点法 (1# 浪高仪和 6# 波高仪) 计算, 波浪反射影响小于 6.63%。

定义 K 为消浪系数用于分析不同植被模型的消浪效果:

$$K = \frac{H_0 - H_{2.5}}{H_0} \times 100\% \quad (1)$$

在植被区前端建立坐标系, H_0 表示植被区前端的波高, $H_{2.5}$ 表示植被区尾端的波高。消浪系数 K 越大, 植被消浪效果越好。

表 1 试验模型参数
Tab. 1 Model parameters

模型编号	植物模型	树型	宽度/m	高度/cm	密度/(株·m ⁻²)
M1	刚性植被	刚性	2.5	30	32
M2	柔性植被	柔性	2.5	15	2 500
M3	组合 1	柔性+刚性	0.5+2.0	15+30	2 500+32
M4	组合 2	柔性+刚性	1.0+1.5	15+30	2 500+32
M5	组合 3	柔性+刚性	1.5+1.0	15+30	2 500+32

表 2 试验工况
Tab. 2 Experimental conditions

模型编号	植物模型	试验水深 h /cm	入射波波高 H /cm	入射波周期 T /s
1	刚性植被 (M1 表示)	20.0	7.0、9.0	1
		23.5	7.0、9.0、11.0	
		25.0	7.0、9.0、11.0	
		30.0	7.0、9.0、11.0、12.5	
		35.0	7.0、9.0、11.0、12.5	
2	柔性植被 (M2 表示)	20.0	7.0、9.0	1
		23.5	7.0、9.0、11.0	
		25.0	7.0、9.0、11.0	
		30.0	7.0、9.0、11.0、12.5	
		35.0	7.0、9.0、11.0、12.5	
3	组合 1 (M3 表示)	20.0	7.0、9.0	1
		23.5	7.0、9.0、11.0	
		25.0	7.0、9.0、11.0	
		30.0	7.0、9.0、11.0、12.5	
		35.0	7.0、9.0、11.0、12.5	
4	组合 2 (M4 表示)	20.0	7.0、9.0	1
		23.5	7.0、9.0、11.0	
		25.0	7.0、9.0、11.0	
		30.0	7.0、9.0、11.0、12.5	
		35.0	7.0、9.0、11.0、12.5	
5	组合 3 (M5 表示)	20.0	7.0、9.0	1
		23.5	7.0、9.0、11.0	
		25.0	7.0、9.0、11.0	
		30.0	7.0、9.0、11.0、12.5	
		35.0	7.0、9.0、11.0、12.5	

2 结果分析

为综合考虑波高和水深的影响,定义相对波高为 H/h (H 为波高, h 为水深),同时引入淹没度 $\alpha=h/h_v$ (h 为水深, h_v 为刚性植被高度),探讨不同淹没度条件下植被消浪效果。为直观体现在植被区总长度不变情况下,不同刚柔性植被宽度对植被消浪效果的影响,定义柔性植被宽度比 B/B_0 (B 为柔性植被区宽度, B_0 为植被区总宽度 2.5 m)。定义 S_i ($i=20、23.5、25、30$ 和 35) 为不同静水位下一倍波高内刚性植被冠层的迎浪面积。

2.1 不同淹没度条件下植被消浪效果

2.1.1 单一型植被

波高 $H=7.0$ 、 9.0 和 11.0 cm 条件下, 5 种植被模型 (M1~M5) 的消浪系数 K 随淹没度 α 的变化规律如图 3 所示。其中, 刚性植被 (M1) 的消浪系数随淹没度 α 的增加逐渐减小, $\alpha=0.67$ 时消浪系数最大, 在 70% 左右。主要原因在于, 试验中刚性植被树冠形心处淹没度 $\alpha=0.70$, 依据前人研究结论可知, 对于单一型刚性植被, 当水深位于植物冠部形心上下时消浪效果最佳^[8,10]。试验中 α 最小为 0.67, 最接近树冠形心处淹没度, 故此时植被消浪效果最佳。此外, 由于波浪传播的能量主要集中在水面一倍波高以内, 结合试验刚性植被树冠的形状, 以梯形近似计算 S_t , 在水深 20、23.5、25、30 和 35 cm 处平均树冠直径分别为 16.33、13.37、11.90、5.67 和 0 cm。在 $H=7.0$ 、 9.0 和 11.0 cm 条件下, $S_{20}>S_{23.5}>S_{25}>S_{30}>S_{35}$ 。随 α 的增大, 植被迎浪面积逐渐减小, 树冠层对各个方向上波浪产生的冲击能力减弱, 水体紊动强度降低, 消浪效果逐渐降低。

随淹没度 α 的增大, 柔性植被 (M2) 的消浪系数从 62% ($\alpha=0.67$) 增大至 70% 左右 ($\alpha=0.78$) 后逐渐减小至 11% 左右 ($\alpha=1.17$), 整体随淹没度的增大先增大后减小, 见图 3(a) 和 3(b)。而前人研究结论表明^[2-3], 当水深淹没柔性植被后, 水深越大, 柔性植被的消浪效果越小, 与文中试验的结果存在一定差异。可能原因是: 试验采用的柔性植被与谭超等^[7]试验中相近, 但刚度较大, 消浪效果强; 此外, 文中试验柔性植被密度较大, 迎水面截面积较大。结合以上 2 种原因, 在水深淹没植被后, 可能出现柔性植被消浪效果随淹没度的增大先增大后减小的现象, 但仍需通过进一步研究来证实。

2.1.2 复合型植被

根据图 3 可知, 3 种复合型植被 (M3、M4 和 M5) 消浪系数均随淹没度 α 的增加先增大后减小, 且均在 $\alpha=0.78$ (淹没度高出树冠形心处淹没度 0.08) 时达最大值。3 种复合型植被消浪系数间的差异随 α 的增大先减小后增大, 当 $\alpha=0.83$ 时, M3~M5 的消浪系数近似相等。综上所述, 复合型植被消浪系数随淹没度 α 的增加先增大后减小, $\alpha=0.78$ (淹没度高出树冠形心处淹没度 0.08) 时达最大值; $\alpha=0.83$ (淹没度高出树冠形心处淹没度 0.13) 时, 3 种前柔后刚复合型植被的消浪效果趋于一致。

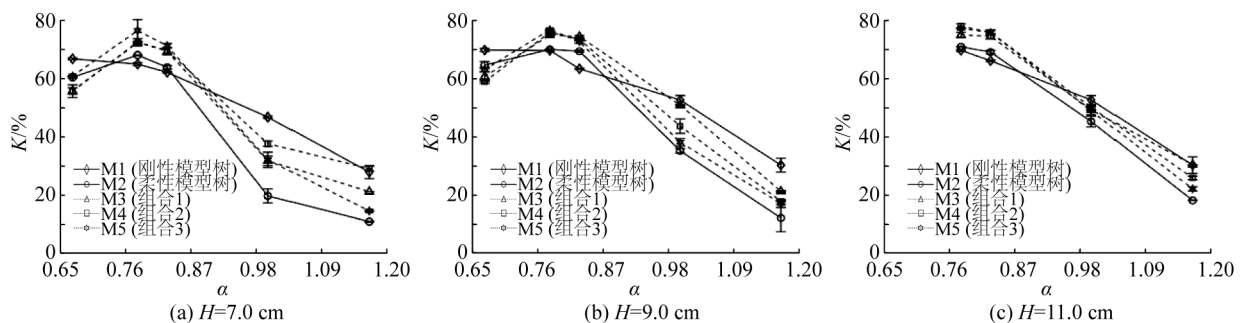


图 3 消浪系数 K 随淹没度 α 的变化规律

Fig. 3 Variation of wave dissipation coefficient K with submergence degree α

2.1.3 单一型植被对比复合型植被

根据本次试验结果, 对比单一型植被和复合型植被, 当 $\alpha=0.67$ 时, 单一型植被的消浪系数高于复合型植被, 其中, M1 的消浪系数在不同波高下均最大, 且高出同条件下复合型植被消浪系数至少 6%。由此可见, 当 $\alpha=0.67$ (低于树冠形心处淹没度 0.03 即水深略低于树冠形心) 时, 单一型植被消浪效果优于复合型植被, 且单一型刚性植被消浪效果最好。随 α 的增加, 复合型植被消浪效果显著提升, 当 α 增大至 0.78 和 0.83 (淹没度分别高出树冠形心处淹没度 0.08 和 0.13) 时, 复合型植被消浪系数整体高于单一型植被, 其中 M5 的消浪系数在不同波高下均最大, 且高出同条件下单一型植被消浪系数至少 6%。可以看出, 当 α 高出树冠形心处淹没度 (0.08~0.13) 时, 复合型植被消浪效果更好。随 α 继续增大至 1.17 的过程中, M1~M5 的消浪效果均逐渐减小, 但 M1 消浪效果减小缓慢, 整体高于复合型植被。其原因主要在于: 当水深淹没刚性植被后, 柔性植被消浪作用很小, 整体消浪作用基本由大树树冠承担。因此, $\alpha=0.67$ (低于树冠形心处淹没度 0.03 即水深略低于树冠形心) 或 $\alpha \geq 1.00$ (水深高于树冠顶部) 时, 单一型植被消浪效果更好; 当 α 增大至 0.78 和 0.83 (分别高出树冠形心处淹没度 0.08、0.13) 时, 复合型植被消浪效果更好。

2.2 不同波高条件下植被消浪效果

2.2.1 单一型植被

在4种淹没度 $\alpha=0.78$ 、0.83、1.00和1.17条件下,5种不同植被分布(M1~M5)的消浪系数 K 随相对波高的变化规律如图4所示。可以看出,M1和M2的消浪系数均随相对波高的增大而增大,与前人的研究结论^[10, 12]一致。随着入射波高的增大,植被迎浪面积增加,当水质点接触到植被时,水质点速度突然变大,导致水体紊动作用增强,波能耗散增强,故消浪效果增大。当 $\alpha=0.83$ 、1.00和1.17时,M2的消浪系数随相对波高的增长速度高于M1,即在 $\alpha>0.83$ 时,与刚性植被相比,柔性植被消浪系数对波高变化的敏感度更大。此外,当 $\alpha=0.78$ 、1.00和1.17时,随相对波高的增大,M1和M2消浪系数间的差异逐渐减小,且在 $\alpha=1.00$ 时,该现象最明显。可见,在大部分水深下,波高越大,刚性植被与柔性植被的消浪效果差异越小。综上所述,波高越大,单一型植被消浪效果越好;波高越大,刚性植被和柔性植被消浪效果差异越小。

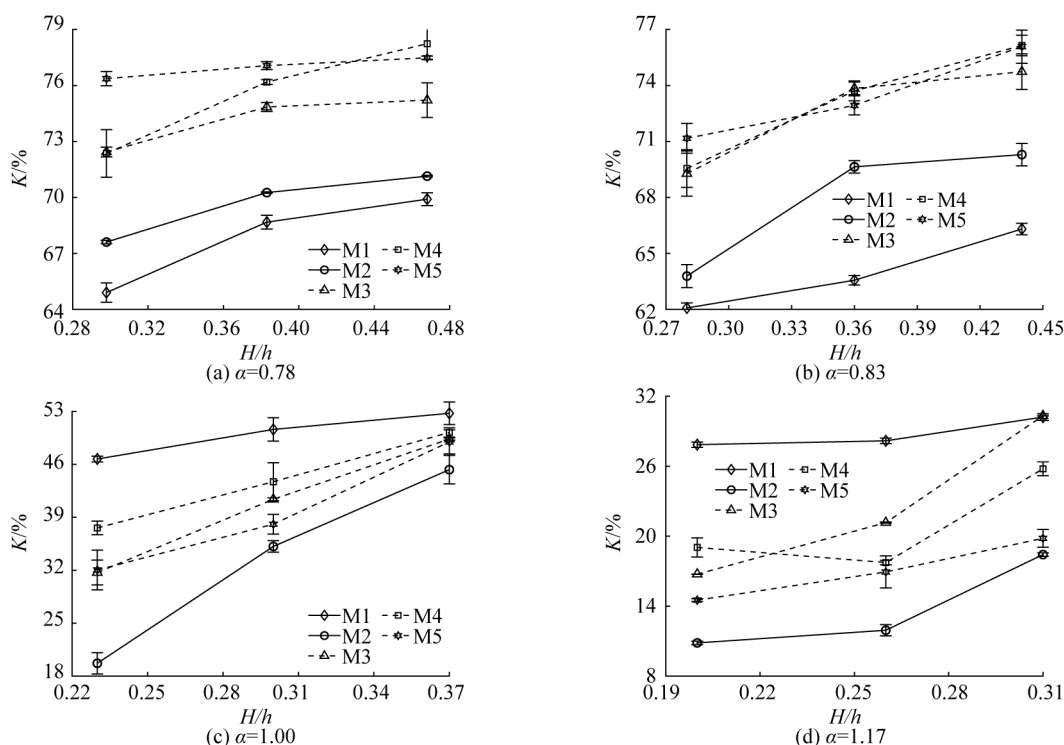


图4 消浪系数 K 随相对波高 H/h 的变化规律

Fig. 4 Variation of wave dissipation coefficient K with relative wave height H/h

2.2.2 复合型植被

由图4可知,除 $\alpha=1.17$ 时的M4组合外,3种复合型植被(M3、M4和M5)消浪系数均随相对波高的增大而增大。当 $\alpha=0.78$ 和0.83时,M4的消浪系数随相对波高的增长速度明显高于M3和M5,可见, $\alpha<0.83$ 时, $B/B_0=0.4$ 的前柔后刚复合型植被的消浪效果随波高增大的敏感度更大。当 $\alpha=1.00$ 时,M4的消浪系数整体高于M3和M5,但随相对波高的增大,3种复合型植被(M3、M4和M5)消浪系数间的差异逐渐减小。当 $\alpha=1.17$ 时,水深远高于柔性植被,刚性植被树冠起主要消浪作用, B/B_0 越小,消浪效果越好,因此M5的消浪系数随相对波高的增长速度低于M3和M4。综上所述,波高越大,前柔后刚复合型植被消浪效果越好,但柔性植被宽度比 B/B_0 不同,消浪效果随波高增大的敏感度也不同。

2.2.3 单一型植被对比复合型植被

对比单一型植被和复合型植被可知,二者的消浪系数随相对波高变化趋势相同,均随着相对波高的增大而增大。当 $\alpha=1.00$ 和1.17时,随相对波高的增大,单一型植被和复合型植被消浪系数间的差异逐渐减小,当 $\alpha=1.00$ 时该现象最为明显。此外, $\alpha\leq 0.83$ 时,复合型植被的消浪效果整体优于单一型植被,主要原因在于,柔性及刚性植被交界处的阻力并不连续,当波浪与刚性植被相遇时,植被冠层顶部产生垂直动量交换,水体紊动作用增强,波能耗散增强。此外,混合植被带来的额外阻力降低了树冠顶部剪切产生的湍流,并将

其峰值移至树冠上方^[17]。 $\alpha \geq 1.00$ 时,水深高于或等于两倍柔性植被高度(30 cm),柔性植被消浪作用较小,刚性植被树冠起主要消浪作用,因此,不同波高下单一型刚性植被消浪效果较好。综上所述,波高对不同类型植被消浪效果的影响趋势大体相同,当 $\alpha \leq 0.83$ 时,前柔后刚复合型植被的消浪效果整体优于单一型植被; $\alpha \geq 1.00$ 时,单一型刚性植被消浪效果较好。当 $\alpha \geq 1.00$ 时,波高越大,单一型植被和复合型植被的消浪效果差异越小。

2.3 柔性植被宽度比对消浪效果的影响

在淹没度 $\alpha=0.78$ 、0.83、1.00和1.17,波高 $H=7.0$ 、9.0和11.0 cm条件下,植被消浪系数 K 随柔性植被宽度比值 B/B_0 的变化规律如图5所示。当 $\alpha=0.78$ 和0.83时,植被消浪系数随 B/B_0 的增大先增大后减小,且在大部分波高下(除 $\alpha=0.78$ 、 $H=11.0$ cm; $\alpha=0.83$ 、 $H=9.0$ cm外),最大消浪系数出现在 $B/B_0=0.6$ 时。而 $\alpha=1.00$ 时,植被消浪系数随 B/B_0 的增大先减小后增大再减小,且均在 $B/B_0=0$ 时消浪系数达最大。可见,柔性植被宽度比值 B/B_0 对植被消浪系数 K 的影响与水深有关。此外, $\alpha=1.00$ 时,随波高的增大,消浪系数 K 随 B/B_0 的变化幅度明显减小。 $\alpha=1.17$ 时,波高 $H=7.0$ cm对应的曲线变化趋势与 $H=9.0$ cm和11.0 cm时不同。综上所述,柔性植被宽度比值 B/B_0 对植被消浪系数 K 的影响与淹没度 α 和波高 H 有关,当 $\alpha < 1.00$ 时,植被消浪系数 K 随 B/B_0 的增大先增大后减小,最大消浪系数出现在 $B/B_0=0.6$ 附近;当 $\alpha=1.00$ 即水深处于树冠顶部时,植被消浪系数随 B/B_0 的增大先减小后增大再减小,同时,波高越大,消浪系数 K 随 B/B_0 的变化幅度越小; $\alpha > 1.00$ 即水深淹没刚性植被后, $B/B_0=0$ 时植被消浪效果最好。因此,基于现有试验组次研究,对于广州市南沙区龙穴岛北部海岸,在50年一遇设计水位下($h=2.96$ m, $\alpha=1.00$)和200年一遇设计水位下($h=3.46$ m, $\alpha=1.17$),树高3.6 m,树冠高2.16 m的单一型刚性树防浪林消浪效果较好。

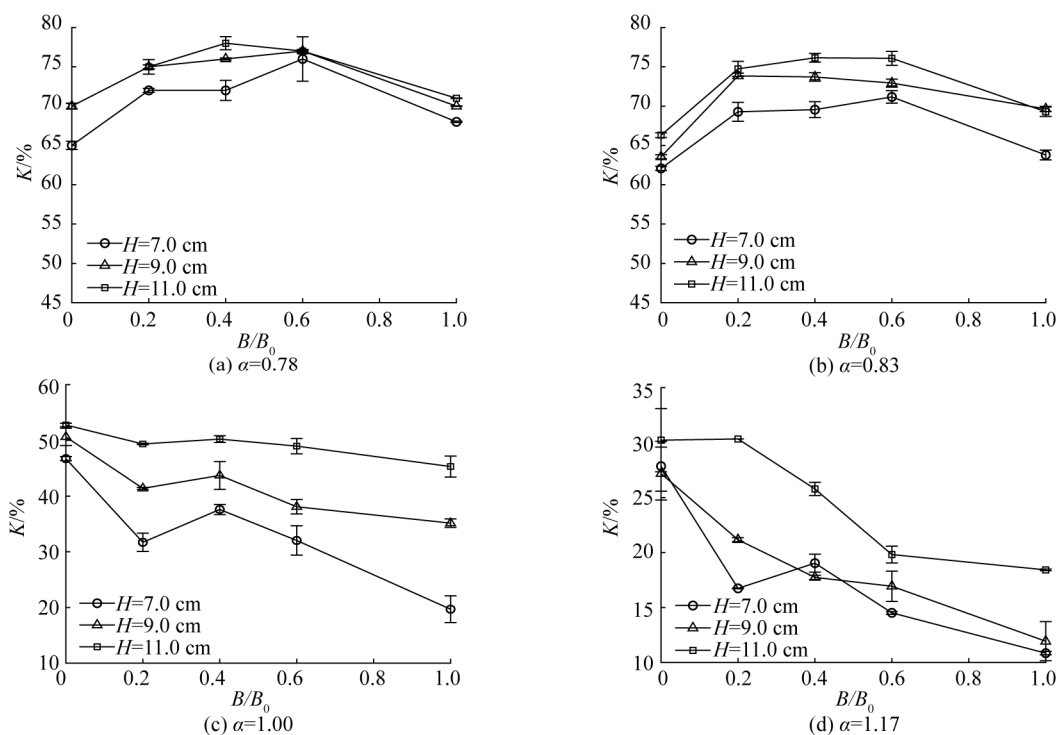


图5 消浪系数 K 随柔性植被宽度比 B/B_0 的变化规律

Fig. 5 Variation of wave dissipation coefficient K with ratio of flexible vegetation width B/B_0

2.4 厄塞尔数与消浪系数的相关关系

厄塞尔数(Ur)是流体力学中的无量纲数,表示波浪的非线性程度, $Ur=L^2H/h^3$, h 为水深, H 为入射波波高, L 为波长。已有研究发现消浪特性与波浪非线性间存在联系,通过探究消浪系数与植物群前后波浪厄塞尔数差值的关系来分析植物消浪对波浪非线性的影响。为便于分析,定义厄塞尔数差值 $\Delta Ur=Ur_1-Ur_2$, Ur_1 为植物群前方入射波的厄塞尔数, Ur_2 为植物群后方透射波的厄塞尔数。

ΔUr 随消浪系数 K 变化的结果如图6所示,整体看来, ΔUr 与 K 满足一定指数函数关系, ΔUr 随 K 的增大逐渐增大。植被消浪效果越好,经过植物模型的波浪表现出的非线性越强,这与何飞等^[8]的研究结果一致。

此外,文中研究也发现 K 越大, ΔU_r 的离散程度越大。

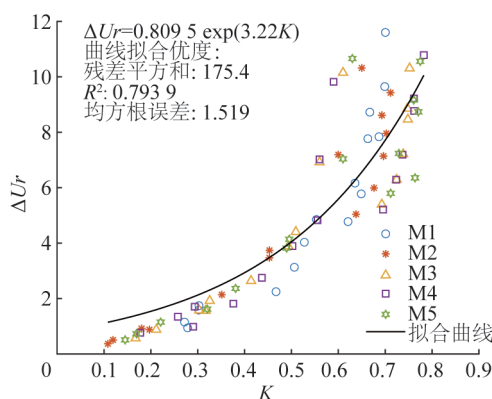


图6 ΔU_r 随消浪系数 K 的变化规律

Fig. 6 Variation of ΔU_r with the wave dissipation coefficient K

3 结 语

基于广州市南沙区龙穴岛的水动力及主要植被类型,通过物理模型试验方法分析了不同淹没度、波高以及排列方式条件下复合型植被的消浪效果,并与单一型植被消浪效果进行了对比,研究结果表明:

1)单一型刚性植被的消浪效果随淹没度的增加逐渐减小,单一型柔性植被的消浪效果随淹没度的增加先增大后减小。复合型植被消浪效果均随淹没度的增加先增大后减小,且均在淹没度 $\alpha=0.78$ (淹没度高出树冠形心处淹没度0.08)时达最大值。当水深略低于树冠形心($\alpha=0.67$,低于树冠型心处淹没度0.03)或水深高于或等于树冠顶部($\alpha \geq 1.00$)时,单一型刚性植被消浪效果更好;水深位于树冠型心与树冠顶部之间时,复合型植被消浪效果更好。

2)前柔后刚复合型植被消浪效果随波高的增大而增大,柔性植被宽度比 B/B_0 不同,消浪效果随波高增大的敏感度也不同。 $\alpha \leq 0.83$ 时,前柔后刚复合型植被的消浪效果整体优于单一型植被; $\alpha \geq 1.00$ 时,单一型刚性植被消浪效果较好。

3)柔性植被宽度比值 B/B_0 对植被消浪系数 K 的影响与水深 h 和波高 H 有关,当水深处于树冠形心与树冠顶部之间时,植被消浪系数 K 随 B/B_0 的增大先增大后减小再减小,最大消浪系数出现在 $B/B_0=0.6$ 附近;当水深处于树冠顶部时,消浪系数 K 随 B/B_0 的增大先减小后增大再减小,同时,波高越大,消浪系数 K 随 B/B_0 的变化幅度越小;在水深淹没刚性植被后, $B/B_0=0$ 时植被消浪效果最好。基于现有试验组次研究,对于广州市南沙区龙穴岛北部海岸,在50年一遇设计水位下($h=2.96$ m, $\alpha=1.00$)和200年一遇设计水位下($h=3.46$ m, $\alpha=1.17$),树高3.6 m,树冠高2.16 m的单一型刚性树防浪林消浪效果较好。

研究结果可为新型生态式消波护岸结构设计提供科学依据,对于未来降低堤顶高程及建设生态海堤具有指导意义。

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 J, HE F, JIANG C B, 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))
- [2] 邓伟,冯卫兵,汪涛,等.柔性植物对海堤堤前波高的影响试验[J].科学技术与工程,2013,13(3):816-820.(DENG W, FENG W B, WANG T, et al. Experimental on wave dissipation by flexible vegetation in front of breakwater[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(3): 816-820. (in Chinese))
- [3] 吴迪,冯卫兵,石麒麟.柔性植物消浪及沿程阻流特性试验研究[J].人民黄河,2014,36(12):79-81.(WU D, FENG W B, SHI Q L. A physical model study of the effect of the flexible vegetation on wave height attenuation and along the way of flow structure[J]. Yellow River, 2014, 36(12): 79-81. (in Chinese))
- [4] 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.(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. (in Chinese))
- [5] 冯卫兵, 汪涛, 邓伟. 柔性植物消波特性试验研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(26): 6687-6690. (FENG W B, WANG T, DENG W. A study of the effect of the flexible vegetation on wave absorbing [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(26): 6687-6690. (in Chinese))
- [6] 陈德春, 周家苞. 人工水草缓流和消波研究[J]. 河海大学学报, 1998, 26(5): 99-103. (CHEN D C, ZHOU J B. A study of effect of artificial sea weeds on current slowing and wave absorbing [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 1998, 26(5): 99-103. (in Chinese))
- [7] 谭超, 黄本胜, 刘达, 等. 不同刚度植物杆群对规则波传播及紊动特性影响研究[J]. 海洋工程, 2016, 34(6): 38-45. (TAN C, HUANG B S, LIU D, et al. Preliminary study on effect of rod groups of different stiffness on regular wave propagation and turbulence characteristics[J]. The Ocean Engineering, 2016, 34(6): 38-45. (in Chinese))
- [8] 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): 770-778. (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(6): 770-778. (in Chinese))
- [9] 孙飏, 董增川, 韦一鸣, 等. 水深与刚性植被高度的相对关系对防浪林消浪效果的影响[J]. 黑龙江水利科技, 2020, 48(11): 1-8. (SUN B, DONG Z C, WEI Y M, et al. Influence of the relative relationship between water depth and height of rigid vegetation on wave dissipation effect of wave break forest[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2020, 48(11): 1-8. (in Chinese))
- [10] 龚尚鹏, 陈杰, 蒋昌波, 等. 孤立波作用下植物带消浪效果影响因素分析[J]. 海洋工程, 2020, 38(2): 65-72. (GONG S P, CHEN J, JIANG C B, et al. Analysis of the factors affecting the wave dissipation effect of vegetation under the action of solitary waves[J]. The Ocean Engineering, 2020, 38(2): 65-72. (in Chinese))
- [11] 蒋昌波, 熊玉章, 屈科, 等. 非淹没刚性植物对海啸作用下海堤水动力特性影响数值模拟研究[J]. 海洋工程, 2021, 39(5): 1-15. (JIANG C B, XIONG Y Z, QU K, et al. Numerical investigation on effects of emergent rigid vegetation patch on hydrodynamic characteristics of seawall under tsunami wave[J]. The Ocean Engineering, 2021, 39(5): 1-15. (in Chinese))
- [12] 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 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. (in Chinese))
- [13] 王建婷, 董增川, 徐伟, 等. 嫩江干流防浪林消浪影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 30-36. (WANG J T, DONG Z C, XU W, et al. Influencing factors analysis of wave dissipation of the wavebreak forest in mainstream of Nenjiang River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(1): 30-36. (in Chinese))
- [14] 周悦, 董增川, 曹海锦, 等. 刚柔组合型植被消浪特性的试验研究[J]. 水力发电学报, 2019, 38(3): 32-39. (ZHOU Y, DONG Z C, CAO H J, et al. Experimental study on wave attenuation characteristics of rigid-flexible combined wavebreak forests[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(3): 32-39. (in Chinese))
- [15] REN J, DONG Z C, JIN D W, et al. Wave-attenuation characteristics of combined-vegetation wave break forests for big rivers with large flood water level changes[J]. Water Science and Technology, 2021, 83(4): 831-840.
- [16] 张茂章, 宋正明. 不同林相结构防浪林的消波性能计算[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(6): 40-43. (ZHANG M Z, SONG Z M. Calculation on wave dissipation performance for different wave break forest structures [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(6): 40-43. (in Chinese))
- [17] CHEMBOLU V, KAKATI R, DUTTA S. A laboratory study of flow characteristics in natural heterogeneous vegetation patches under submerged conditions[J]. Advances in Water Resources, 2019, 133: 103418.