



规则波作用下不同类型植被消波特性试验研究

严开, 沈章熠, 陈洪洲, 沈良朵, 王祥宇, 卞宏伟

Experimental study on wave attenuation characteristics of different types of vegetation under regular waves

Yan Kai, Shen Zhangyi, Chen Hongzhou, Shen Liangduo, Wang Xiangyu, Bian Hongwei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12284/hyxb20260004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

Study on the influence of rigid plant roots and stems on the maximum shearing characteristics of boundary layer under regular wave
海洋学报. 2021, 43(12): 102–110 <https://doi.org/10.12284/hyxb2021181>

植被对波浪作用下床面切应力影响的数值模拟分析

Numerical study on influence of vegetation on bed shear stress under coastal waves
海洋学报. 2022, 44(11): 111–120 <https://doi.org/10.12284/hyxb2022125>

台风“烟花”作用下盐沼植被斑块对潮滩冲淤影响研究

Study on the impact of salt marsh vegetation patches on tidal flat erosion and accretion under the influence of Typhoon In-Fa
海洋学报. 2025, 47(3): 39–50 <https://doi.org/10.12284/hyxb2025044>

聚焦波作用下透水潜堤消波特性数值模拟研究

Numerical simulation of wave dissipation characteristics of permeable submerged breakwater under focused wave
海洋学报. 2022, 44(11): 121–132 <https://doi.org/10.12284/hyxb2022127>

基于无人机遥感的潮沟分异与植被及地形关系研究

Study on the relationship between tidal creeks divergence, vegetation and topography based on UAV remote sensing
海洋学报. 2023, 45(5): 107–117 <https://doi.org/10.12284/hyxb2023068>

现行黄河口保护区典型湿地植被时空动态遥感监测

Spatiotemporal dynamic remote sensing monitoring of typical wetland vegetation in the Current Huanghe River Estuary Reserve
海洋学报. 2022, 44(1): 125–136 <https://doi.org/10.12284/hyxb2022014>

关注微信公众号, 获得更多资讯信息

严开, 沈章熠, 陈洪洲, 等. 规则波作用下不同类型植被消波特性试验研究[J]. 海洋学报, 2026, 48(2): 58–69, doi:10.12284/hyxb20260004
Yan Kai, Shen Zhangyi, Chen Hongzhou, et al. Experimental study on wave attenuation characteristics of different types of vegetation under regular waves[J]. Haiyang Xuebao, 2026, 48(2): 58–69, doi:10.12284/hyxb20260004

规则波作用下不同类型植被消波特性试验研究

严开¹, 沈章熠¹, 陈洪洲¹, 沈良朵^{1*}, 王祥宇¹, 卞宏伟²

(1. 浙江海洋大学 海洋工程装备学院, 浙江 舟山 316022; 2. 自然资源部第四海洋研究所, 广西 北海 536009)

摘要: 为探究规则波作用下刚性、柔性以及刚柔组合型植被消波特性差异, 利用实验室水槽开展了一系列物理模型试验, 定量分析了刚性、柔性及刚柔组合型植被对波浪的衰减作用, 确定不同类型植被拖曳力系数 C_D 与雷诺数 Re 、邱卡数 KC 和厄塞尔数 Ur 的关系。研究表明, 3 种植被配置均能引起波高沿程递减; 随着入射波周期或植被淹没度的增加, 各植被类型的消波效果均减弱; 在波高影响方面, 刚性植被的消波效果随波高增大持续显著增强, 柔性植被则呈现先增强后减弱的非线性趋势, 而刚柔组合型植被兼具两者优势, 其消波效果亦随波高增大而增强。此外, 3 种植被的 C_D 可采用统一的理论公式表达, 其主要差异在于反映植被摆动对波高衰减的影响因子 γ 不同。 C_D 与 Re 、 KC 以及 Ur 之间均存在显著统计关系, 并可用统一经验公式描述。本研究结果可为海岸生态防护工程中植被的优化配置提供理论依据与设计参考。

关键词: 植被消波; 刚性植被; 柔性植被; 淹没度; 规则波

中图分类号: P753

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2026)02-0058-12

1 引言

随着全球气候变化和人类活动的不断加剧, 海岸带面临海岸侵蚀、海水倒灌和风暴潮等挑战, 严重威胁沿海生态安全与人类生产生活。海岸带植被作为一种有效的软防护措施, 不仅能长期适应海平面上升和极端气候变化, 还能通过自我修复和扩展能力, 持续提升海岸带的防灾减灾水平。

海岸带植被通常分为刚性植被(如红树林)和柔性植被(如海草)。当前研究中, 刚性植被常被概化为刚性圆柱群模型。前人^[1-10]通过物理模型试验, 测量植被区前后波高衰减来确定拖曳力系数 C_D , 并将其代入 Morison 方程, 以量化波流作用下圆柱所受的拖曳力, 从而直观呈现植被消波效能。这些研究主要聚焦于规则波、不规则波及孤立波等不同波型穿越刚

性植被时的波能衰减、流速变化。结果表明, 水动力参数(如波型、波高、水深及周期等)会显著影响消波效果。近年来, 有些学者研究的重心已从刚性圆柱群模型转向复合结构模型^[11-13], 旨在探究刚性植株不同结构(根、茎干、树冠)的差异化消波作用。相关研究发现: 植被刚度越大, 引起的紊动越强, 消波系数越大; 根、茎、树冠均参与消波, 效果受水动力和植株参数(如密度、高度等)共同影响。

对于柔性植被而言, 由于其自身刚度较低, 在波浪作用下易发生不同幅度的摆动, 这种动态响应显著影响其消波机制。早期研究中, Kobayash 等^[14]将海草简化为刚性圆柱模型, 给出了柔性植被拖曳力系数 C_D 的表达式, 但该模型未考虑植被摆动对波高衰减的影响。随后, Sánchez-González 等^[15]提出了规则波作用下包含海草摆动效应的消波解析模型, 建立了波

收稿日期: 2025-11-11; 修订日期: 2026-01-17。

基金项目: 浙江省自然科学基金联合基金资助项目(LGEY25E090003); 国家自然科学基金(42376205)。

作者简介: 严开(1985—), 男, 湖北省随州市人, 博士, 主要从事海岸水动力研究。E-mail: ahhfyan kai@163.com

* 通信作者: 沈良朵, 男, 副教授, 主要从事海岸水动力研究。E-mail: slduo@163.com

能衰减系数与 C_D 的关系, 推动了该领域从刚性假设向柔性建模的转变。为进一步真实反映柔性植被的消波特性, 许多研究者^[16-20] 采用真实海草或仿真柔性材料开展水槽实验, 给出了不同影响因素下 C_D 的具体表达式, 重点分析了波浪非线性、植被淹没度及海滩剖面演变等关键参数对消波效果的影响。这些研究逐步揭示了柔性植被在消波过程中复杂的动态相互作用, 为其消波机制的深入理解提供了重要依据。

对于刚柔组合植被, 目前研究比较少。前人^[21-24] 分别在不同水深条件下对不同组合型植被进行了消波试验。研究结果指出, 单一型植被在不同水深条件下消波效果差异较大, 组合型植被消浪效果整体较好, 但这些研究没有给出具体的 C_D 表达式。

尽管已有研究对单一类型植被的消波特性进行了研究, 目前关于组合植被的消波性能及其与单一植被效果的对比仍缺乏系统性研究。为此, 本研究通过物理模型试验, 定量分析了刚性、柔性及刚柔组合型植被对波浪的衰减作用, 基于实验数据拟合建立了相应的定量关系, 确定各类植被的拖曳力系数 C_D 。最终提出了一个可同时适用于刚性、柔性及刚柔组合型植被的 C_D 经验框架公式, 为组合植被条件下波浪衰减效果的准确预测提供参考依据。

2 试验布置、材料和方法

试验在实验室内水槽中进行, 水槽长、宽、高为 32 m, 0.8 m, 1 m, 采用伺服电机驱动推板式造波系统, 可生成周期为 0.5~3 s 的波浪, 满足试验所需波浪要求。在远离造波机的一侧安装消浪网, 以减少反射波带来的不利影响。植被区沿波浪传播方向的长度为 1 m, 宽 0.8 m, 距造波板 20.1 m。采用 8 个波高仪测量波高, 编号分别为 1#~8#, 采样频率为 50 Hz, 规则波波高采集时间不低于 61.4 s。在植被区共设置 5 个波高仪, 采用等间距布置, 间隔 0.25 m, 如图 1 所示。试验采用了 3 种植被模型, 分别为刚性、刚柔组合型模型及柔性模型。其中, 刚性植被由杨氏模量为 2.5~3.0 GPa 的 PVC 圆杆模拟。尽管 PVC 的弹性模量低于真实红树林(约 15 GPa), 但在此量级下, PVC 杆在波浪作用中变形可忽略, 符合实验室中对“刚性”植被的模拟要求^[25]; 柔性植被参考 Zeller 等^[26] 对野外海草模型弹性模量(约 0.3 GPa)的研究, 选用弹性模量为 0.4~0.7 GPa 的聚乙烯材料模拟; 刚柔组合型植被则是两者组合, 其中柔性在前, 刚性在后, 柔、刚占比为 1:1, 即各 0.5 m, 物理模型参见图 2。刚性圆杆直径 20 mm、高 0.5 m, 密度 400 株/m², 布置方式为正方形分布。柔性植株采用株状细长叶片结

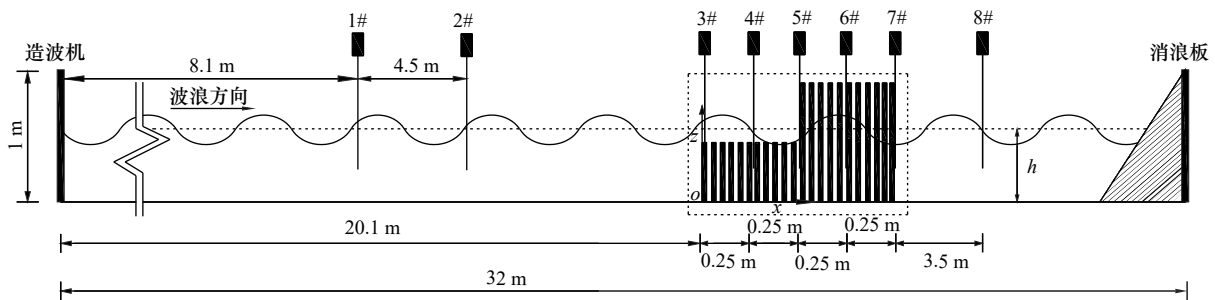


图 1 试验布置图

Fig. 1 Experimental layout diagram



图 2 试验中的植被模型

Fig. 2 Vegetation models in the experiment

a. 刚性; b. 刚柔组合; c. 柔性

a. Rigid; b. rigid-flexible composite vegetation; c. flexible

构, 每株配置 5 片宽度 4 mm、长度 0.29 m 的细叶。因叶片弯曲, 植株整体高度约为 0.26 m, 密度为

761 株/m², 采用交错排布方式。具体的植株排列方式、株距与行距详见图 3。

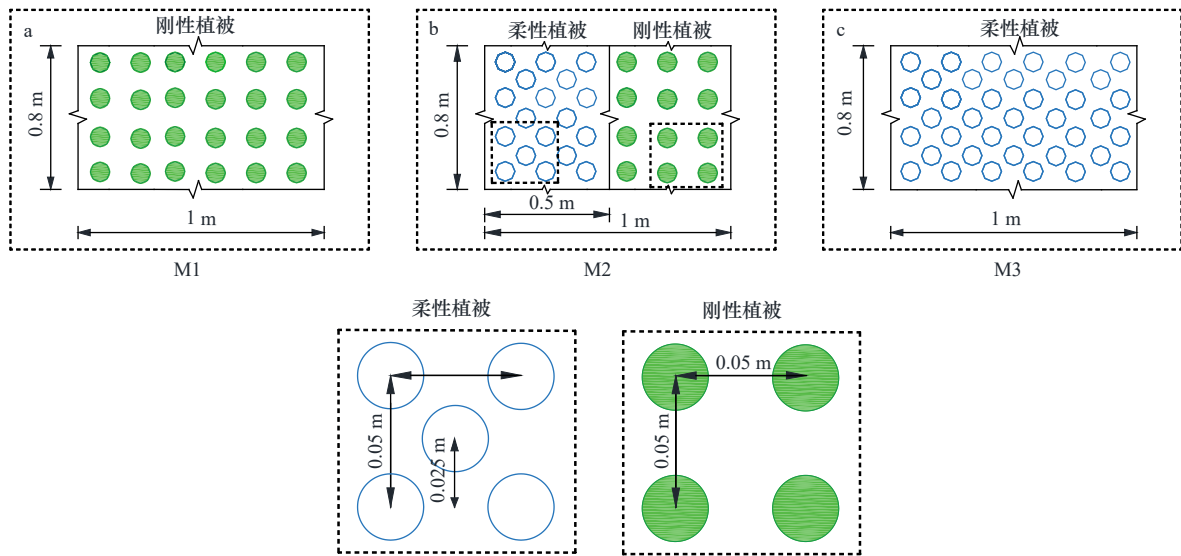


图 3 试验中植被排布方式、株距与行距

Fig. 3 Arrangement, plant spacing and row spacing of the vegetation in the experiment

空心蓝圈代表柔性植株, 实心绿圈代表刚性圆杆

Hollow blue circles represent flexible plants and solid green circles represent rigid circular rods

为了将 PVC 圆杆和柔性植株固定到水槽中, 以宽 0.80 m, 长 1 m, 厚 0.01 m 的有机玻璃板作为模型底座, 并在有机玻璃板上按预先设计的植被密度要求加工直径 20 mm 的圆孔。将 PVC 管或柔性植株固定到有机玻璃板预制孔后, 将玻璃板固定到水槽底部。试验中分别以 M1、M2 和 M3 代表刚性模型、刚柔组合型和柔性模型, 模型具体参数见表 1。

表 1 植被模型参数

Table 1 Vegetation model parameters

| 模型编号 | 树型 | 长度/m | 植被高度 h_v /cm | 密度/(株·m ⁻²) | 排布方式 |
|------|-----|---------|----------------|-------------------------|-------|
| M1 | 刚性 | 1 | 50 | 400 | 方形 |
| M2 | 柔+刚 | 0.5+0.5 | 26+50 | 761+400 | 方形+交错 |
| M3 | 柔性 | 1 | 26 | 761 | 交错 |

本试验共设置 5 组不同水深、入射波高与波浪周期, 组合形成多种规则波况 (见表 2)。具体试验工况设计如下: 在固定水深 $h = 0.3$ m 和周期 $T = 1.2$ s 条件下, 改变入射波高 H , 分别为 4 cm、5 cm、6 cm、7 cm、8 cm; 在固定水深 $h = 0.3$ m 和波高 $H = 6$ cm 条件下, 改变波浪周期 T , 分别为 0.8 s、1.0 s、1.2 s、1.4 s、1.6 s; 其余组次均统一在 $H = 5$ cm 与 $T = 1.2$ s 的基准条件下进行。每种波况均独立重复 3 次, 最终结果取 3 次测量的平均值。

表 2 试验工况

Table 2 Experimental conditions

| 组次 | 试验水深 h /cm | 入射波波高 H /cm | 入射波周期 T /s |
|----|--------------|---------------|---------------------|
| 1 | 20 | 5 | 1.2 |
| 2 | 25 | 5 | 1.2 |
| 3 | 30 | 4/5/6/7/8 | 1.2 |
| 4 | 30 | 6 | 0.8/1.0/1.2/1.4/1.6 |
| 5 | 35 | 5 | 1.2 |
| 6 | 40 | 5 | 1.2 |

试验中波浪在植被中的沿程衰减采用基于 Dalrymple 等^[8] 提出的能量守恒方程推导的公式 (1) 进行计算:

$$K_v = \frac{H_i}{H_0} = \frac{1}{1 + \beta_1 x}, \quad (1)$$

$$\beta_1 = \frac{4}{9\pi} C_D b_v N \frac{\sinh^3(k\alpha h_v) + 3 \sinh(k\alpha h_v)}{(2kh + \sinh(2kh)) \sinh(kh)} (H_0 k), \quad (2)$$

式中, x 为植被区内测点距原点 O 的距离, K_v 为植被区沿程波高衰减系数, $H_i (i = 0 \sim 4)$ 为植被内各测点处的波高, H_0 为植被区 $x = 0$ 处波高。令 $K_t = H_4/H_0$, K_t 表示波浪穿越植被区的透射系数, 它反应了整个植被区的消波性能。 β_1 是衰减因子, 采用最小二乘法拟合得出。 β_1 值越大, K_v 值越小, 植被消波性能越好。 b_v 是垂直于波向的单株植物单位高度上的植被面积 (对

于刚性植被,它是圆柱直径 d , N 是单位水平面积上植株密度, k 是波数, h_v 是植被高度, α 为淹没度, $\alpha = \min(h/h_v, 1)$ 。

波浪在柔性植被中的沿程衰减采用基于 Sánchez-González^[15]提出的能量守恒方程推导的公式(4)进行计算:

$$K_v = \frac{H_i}{H_0} = \exp(-\beta_2 x), \quad (3)$$

$$\beta_2 = \frac{4}{9\pi} C_D b_v m N \frac{\sinh^3(k\alpha h_v) + 3 \sinh(k\alpha h_v)}{(2kh + \sinh(2kh)) \sinh(kh)} (H_0 k)^\gamma, \quad (4)$$

式中, β_2 是柔性植被沿程衰减因子,采用最小二乘法拟合得出。 m 是单株柔性植物叶片个数, b_v 是单个叶片的宽度, γ 为考虑植被摆动对波高衰减的影响因子。公式(4)实际是将柔性植被类比为圆柱模型,但额外考虑了植被摆动的影响。Sánchez-González^[15]给出了量化柔性植株摆动影响的参考值: $\gamma = 0.82$ 。

刚柔组合型植被共同作用下的波高沿程衰减,一方面来源于刚性植被提供的阻力效应,另一方面则来自柔性植被摆动所产生动态能量耗散。沿程衰减系数 K_v 的表达形式可参照柔性植被的公式表示为

$$K_v = \frac{H_i}{H_0} = \exp(-\beta_3 x). \quad (5)$$

β_3 是刚柔组合型植被沿程衰减因子,其表达式和式(4)基本一致,唯有 γ 值因柔性摆动影响而不同。该组合植被的沿程衰减系数 K_v 以及沿程衰减因子 β_3 借鉴了柔性模式的公式,其适用性将在3.5节予以验证。

令 $\tilde{A} = \frac{4}{9\pi} b_v m N \frac{\sinh^3(k\alpha h_v) + 3 \sinh(k\alpha h_v)}{(2kh + \sinh(2kh)) \sinh(kh)}$,代入公式(4)可以建立刚柔组合型植被的 C_D 与波陡 $H_0 k$ 的关系式:

$$C_D = \beta_3 / (\tilde{A} (H_0 k)^\gamma). \quad (6)$$

多项研究表明, C_D 与雷诺数 Re 、邱卡数 KC 和厄

塞尔数 Ur 密切相关。雷诺数 Re 的定义为

$$Re = \frac{u_{\max} b_v}{\nu}, \quad (7)$$

式中, ν 表示水的运动粘度, u_{\max} 是植被带外区域水质点轨迹速度的最大值($x = 0.0$ m),该数值基于线性波理论计算得出,具体计算公式如下:

$$u_{\max} = \frac{H_0}{2} \frac{2\pi}{T} \frac{1}{\tanh(kh)}, \quad (8)$$

式中, T 为波周期。

Keulegan-Carpenter数(KC)表示在一个波浪周期内,水质点来回运动的距离与植被直径的比值,具体表达式为

$$KC = \frac{u_{\max} T}{b_v}. \quad (9)$$

厄塞尔数(Ur)表示波浪的非线性程度,其为波陡与相对水深的比值,可表示为

$$Ur = \frac{L^2 H_0}{h^3}, \quad (10)$$

式中, L 是入射波的波长。

3 试验结果与分析

3.1 入射波高对不同植被组合消波效果的影响

当波浪周期与水深恒定、仅改变入射波高的条件下,不同植被模型的沿程消波规律见图4。非淹没状态下刚性植被的沿程衰减系数 K_v 表现出明显的递减规律,见图4a。随着入射波高增加,衰减因子 β_1 值递增, K_v 值反而减小,表明在大波高情况下刚性植被消波性能更优,这与前人研究的结论^[6]一致。

对于单一型柔性植被,植被是否处于淹没状态对消波效果影响很大。淹没状态下(淹没度 $\alpha = 1.15$),柔性植被 K_v 沿程呈衰减趋势,见图4b;随着入射波高增大,沿程波高衰减因子 β_2 值呈现先增大后减小趋

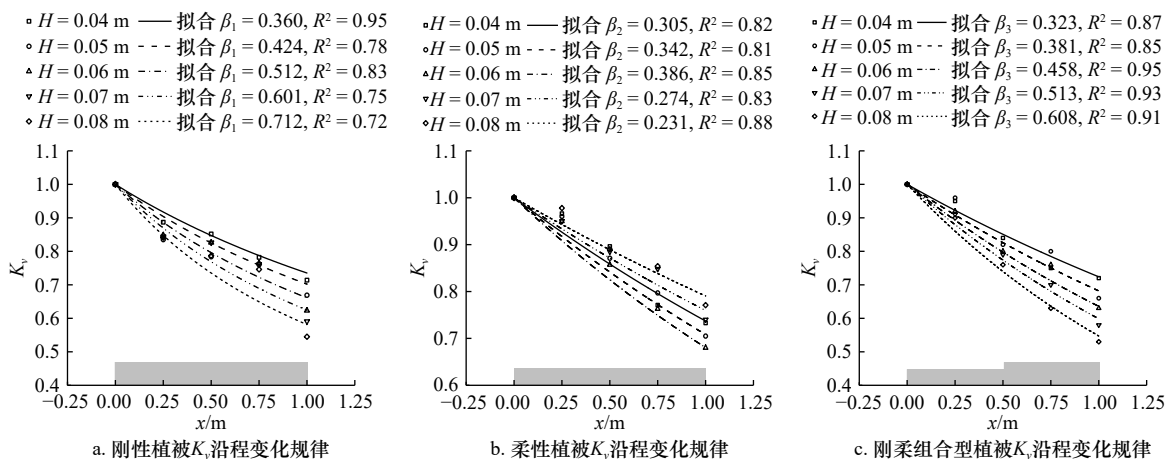


图4 入射波高对不同类型植被消波影响($T = 1.2$ s, $h = 0.30$ m)

Fig. 4 Effect of incident wave height on wave dissipation of different vegetation types ($T = 1.2$ s, $h = 0.30$ m)

势, K_v 值则相应出现先减小后增大趋势, 说明柔性植被对于小波高工况消波效率更佳。对于大波高情况, 柔性植被消浪效果显著变差, 这也与前人研究的结论^[13]一致。

刚柔组合型植被 K_v 值沿程同样表现出显著的下降趋势; 随着入射波高增大, 波高衰减因子 β_3 值增加, K_v 值相应减小, 表明在大波高情况下, 组合型植被的消波性能更优, 详见图 4c。对比 3 种植被模型的波高沿程变化可以发现, 刚性植被的 K_v 值沿程衰减最多, 刚柔组合型其次, 柔性的 K_v 值衰减最少。说明刚性植被消波效果最强、其次是刚柔组合型植被, 最差是柔性植被。

3.2 入射波周期对不同类植被消波效果的影响

在波高与水深恒定、仅改变入射波周期的实验条件下, 不同植被组合的消波性能呈现相似特征。图 5 给出了入射波周期对不同组合植被消波影响的结果。研究发现, 无论对于非淹没刚性植被、淹没柔性植被还是刚柔组合型植被, 其消波系数 K_v 均沿程衰减, 且 K_v 值随入射波周期增大而递增, 表明短周期条件下各类植被均具有更优的消波性能。该规律与既有研究结论^[13, 16]一致。对比结果表明, 在周期相同的条件下, 3 种植被模型的消波性能依次递减: 刚性植被最优, 刚柔组合型植被次之, 柔性植被最弱。

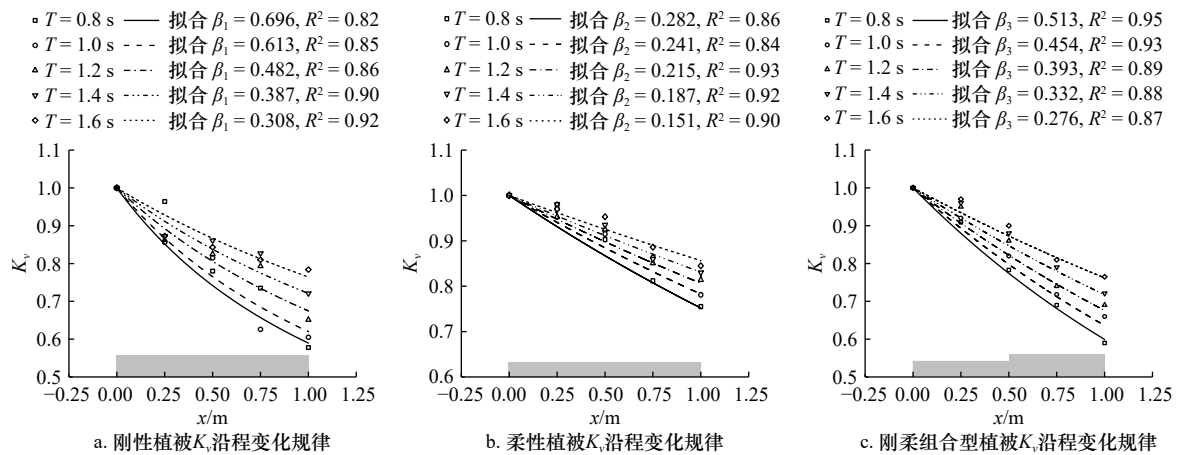


图 5 入射波周期对不同类植被消波影响 ($H = 0.06$ m, $h = 0.30$ m)

Fig. 5 Effect of incident wave period on wave dissipation of different vegetation types ($H = 0.06$ m, $h = 0.30$ m)

3.3 水深 (淹没度) 对不同类植被消波效果的影响

由于试验中刚性圆杆高度为 0.5 m, 高于最大水深 0.4 m, 其淹没度 α 都小于 1。对于柔性植被, 植株均高为 0.26 m, 当水深大于 0.26 m 时, 淹没度 α 都大于 1。对于刚柔组合型植被, 当水深大于 0.26 m 时, 柔性区域都处于水面以下, 刚性区域位于水面上,

此时刚柔组合型植被淹没度 α 仍以刚性植被淹没度来衡量。

在波高和周期恒定、仅改变水深的试验条件下, 不同类型植被的消波性能展现出差异性规律, 见图 6。研究发现, 非淹没状态下纯刚性植被的衰减系数 K_v 在植被区域内呈现沿程衰减趋势, 随着水深增加, 衰

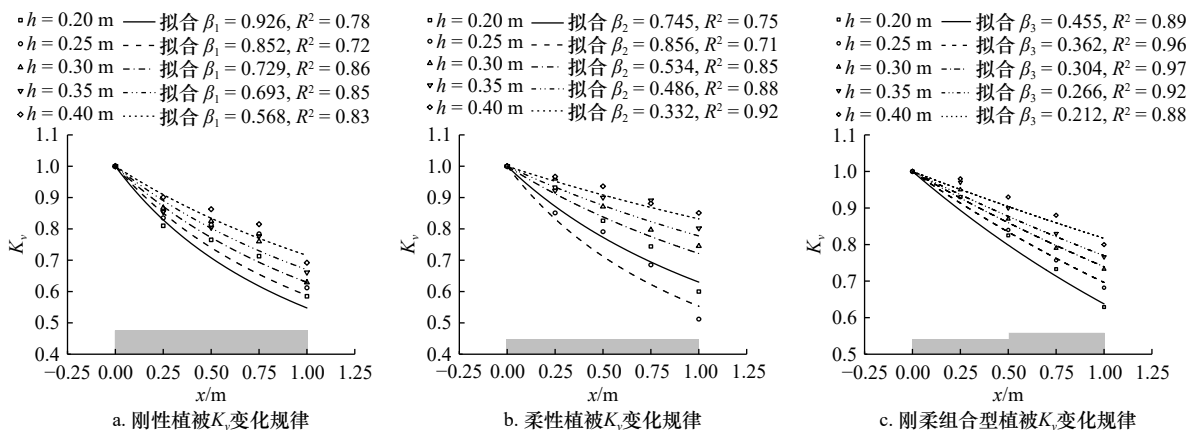


图 6 水深对不同类植被消波影响 ($H = 0.05$ m, $T = 1.2$ s)

Fig. 6 Effect of water depth on wave dissipation of different vegetation types ($H = 0.05$ m, $T = 1.2$ s)

减因子 β_1 值递减, K_v 值递增, 表明浅水条件下其消波性能更优, 见图 6a; 在淹没条件下, 柔性植被对波浪的衰减仍呈现沿传播方向逐渐减弱的趋势, 随着水深增大, 波高沿程衰减因子 β_2 值呈现先增大后减小的趋势, K_v 值则相应呈现先减小后增大趋势。这一现象表明柔性植被对水深比较敏感, 消波效果与淹没度紧密相关。当淹没度 $\alpha < 1$ (水深小于 0.26 m), 此时水深低于植株均高, 柔性植被消波效果比较好; 当淹没度 α 小于并接近 1 时 ($h = 0.25$ m), 衰减因子 β_2 值最大, K_v 值最小, 柔性植被消波效果达到最佳; 当淹没度 $\alpha > 1$ 时, 随着淹没度增大, 柔性植被消波效果显著变差, 见图 6b; 刚柔组合型植被的 K_v 值沿程呈现衰减特征, 随着水深增大, β_3 值递减, K_v 值递增, 显示浅水条件下刚柔组合型植被的消波性能具备显著优势, 见图 6c。

当水深较浅 ($h \leq 0.25$ m) 时, 3 种植被模型的消

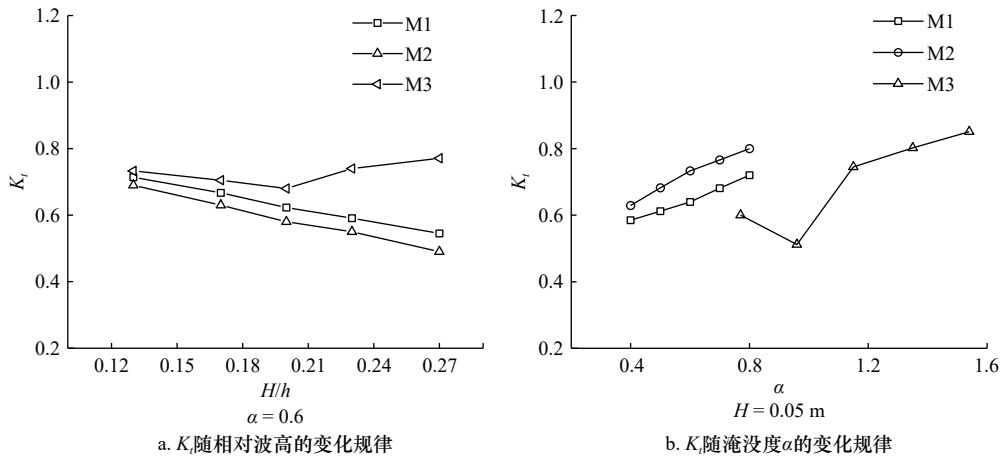


图 7 淹没度和相对波高对不同类型植被的消波影响

Fig. 7 Effect of submergence degree and relative wave height on wave dissipation of different types of vegetation

对于柔性植被, 当 $H/h < 0.2$ 时, K_t 值随 H/h 增大而减小; 而当 $H/h > 0.2$ 时, K_t 值则转为上升, 说明柔性植被对相对波高变化较为敏感, 过大的相对波高会显著削弱其消波效果。在 $H/h \approx 0.2$ 时, 柔性植被的消波性能达到最佳。

在波高 $H = 0.05$ m、周期 $T = 1.2$ s 的恒定波浪条件下, 图 7b 展示了不同植被组合的透射系数 K_t 随淹没度的变化规律。由于刚性植被与柔性植被的高度不同, 但两者均采用相同的淹没度公式计算, 因此两者的淹没系数 α 变化范围有所差异: 刚性植被 α 处于 0.4~0.8 之间, 而柔性植被 α 则处于 0.77~1.54 之间。对于刚柔组合型植被, 其淹没度仍参照刚性植被的标准进行衡量, 因此 α 变化区间亦为 0.4~0.8。分析图中结果显示, 当淹没度从 0.4 增至 0.8 时, 刚性植被 (M1) 与刚柔组合型植被 (M2) 的 K_t 值均逐渐上升, 表

浪效果表现为: 柔性植被最佳, 刚性次之, 刚柔组合型最弱。而在水深较大 ($h \geq 0.3$ m) 时, 柔性植被的消波效果显著下降, 反而弱于刚性植被; 刚柔组合型植被的消波性能则始终介于二者之间。

3.4 淹没度和相对波高对不同组合植被消波效果的影响

为探究淹没度与相对波高对不同植被组合消浪性能的影响, 引入相对波高 H/h 这一参量。图 7 展示了不同植被组合的透射系数 K_t 随相对波高和淹没度的变化特征。图 7a 为在水深 $h = 0.3$ m (淹没度为 0.6)、周期 $T = 1.2$ s 条件下, 不同植被组合的透射系数 K_t 随相对波高 H/h 的变化规律。由图可知, 随着 H/h 的增大, 除柔性植被 (M3) 外, 其余两种组合植被的 K_t 值均呈下降趋势。表明在淹没度为 0.6 时, 相对波高越大, 刚性植被与刚柔组合型植被的消波效果越好。

明透射的波浪波高逐渐增加, 消波效果逐渐减弱; 同时, 刚柔组合型植被的 K_t 值始终高于刚性植被, 说明其消波效果弱于后者。对于柔性植被, 当淹没度小于 1 时, K_t 值迅速下降, 消波效果增强; 当淹没度超过 1 时, K_t 值急剧上升, 消波效果减弱; 当淹没度进一步增大至 1.2 以上时, K_t 值增速趋缓, 淹没度的影响逐渐减弱。整体来看, 柔性植被在淹没度约为 1.0 时消波效果最佳, 这也与 Luhar 和 Nepf^[27]、Maza 等^[28] 结论一致。

3.5 拖曳力系数 C_D 与 KC 、 Ur 、 Re 的关系

波浪在穿过植被时, 其能量主要通过植被产生的拖曳力来耗散的^[14]。建立 C_D 与雷诺数 Re 、邱卡数 KC 和厄塞尔数 Ur 无量纲数之间关系, 能够有效揭示如涡旋脱落、植被变形及波浪非线性等复杂物理过程的内在机制。

公式 (2) 与 (4) 分别为刚性植被与柔性植被的拖

曳力系数 C_D 计算公式。两者主要区别在于反映植被摆动对波高衰减影响的因子 γ : 刚性植被通常取 $\gamma = 1$, 而柔性植被取 $\gamma = 0.82$ 。对于刚柔组合型植被, 其 C_D 计算可沿用柔性植被的公式形式, 关键在于确定其特定的 γ 值。在确定 γ 值之前, 由于刚性模型与柔性模型在推导 C_D 时所采用的沿程衰减因子不同, 因此需进一步评估何种模式更适用于刚柔组合型植被。

图 8 分别给出了基于刚性模型[即结合公式(1)与(2)]与柔性模型[即结合公式(3)与(4)]所建立的 C_D - KC 关系式与试验数据拟合对比情况。结果显示, 采用柔性模型所得 C_D - KC 表达式与试验数据吻合更好, 表明该模型更适用于描述刚柔组合型植被的水动力特性, 这也印证刚柔组合型植被采用柔性模型公式的正确性。

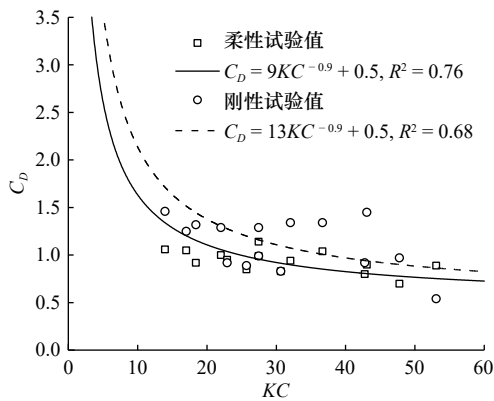


图 8 刚柔组合型植被模型两种拟合方案对比
Fig. 8 Comparison of two fitting schemes of rigid-flexible combined vegetation model

为确定刚柔组合型植被的波高衰减影响因子 γ , 通过非线性回归分析方法分析了不同 γ 值时刚柔组合型植被的拟合效果(图 9)。图中横坐标为基于拟合公式计算得到的“预测拖曳力系数 $C_D = \beta_3 / (\tilde{A}(H_0 k)^\gamma)$ ”,

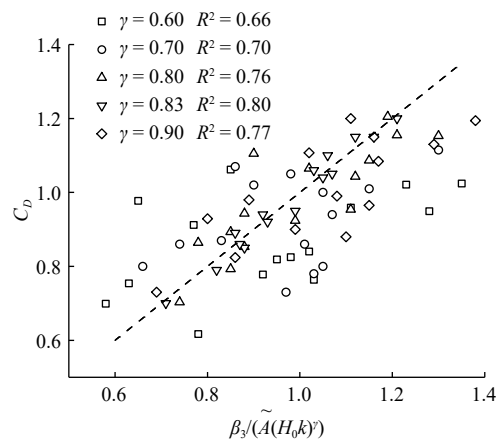


图 9 C_D 与 $H_0 k$ 的非线性回归拟合
Fig. 9 Nonlinear regression fitting of C_D and $H_0 k$

纵坐标为通过试验结果反演得到的“实测拖曳力系数 C_D ”。图中虚线为 $y=x$ 的 1:1 一致性参考线, 代表预测值与实测值完全吻合的理想情况。结果表明, 当 $\gamma = 0.83$ 时, 模型拟合度 R^2 达到最大值 0.80, 拟合程度最高, 说明该参数下公式(6)与实测数据最为吻合。

进一步分析表明, 在刚性植被模型基础上引入修正指数 γ , 可有效反映柔性及刚柔组合型植被因植物体摆动产生的水动力效应。 γ 表征了植被摆动对等效阻力的影响, 其值越小, 表明柔性效应越显著; 越接近 1, 则越接近刚性受力特征。经非线性回归得到组合植被的 $\gamma = 0.83$, 与单一柔性植被参考值(0.82)高度接近。这表明, 在组合植被中, 波浪能量耗散主要受前段柔性区摆动控制: 柔性部分通过初始削减与涡耗散显著降低传入后段的波能, 使整体阻力特性更接近柔性植被。而后段刚性区虽提供阻挡与局部分离作用, 但对 γ 的贡献相对次要, 因此组合体系的 γ 值与柔性植被参考值趋于一致。

为了研究不同类型植被消波的物理机制, 图 10

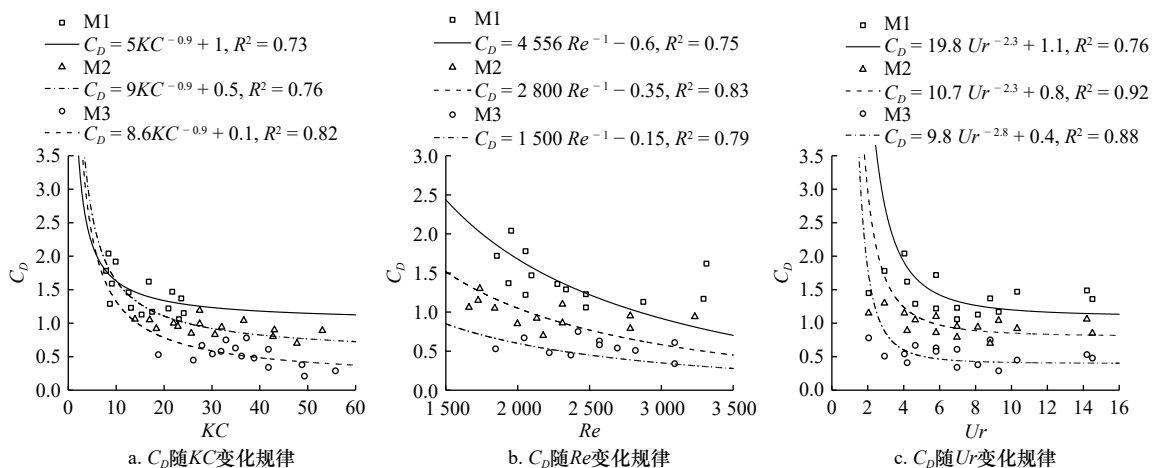


图 10 拖曳力系数 C_D 与 KC 、 Ur 、 Re 的关系
Fig. 10 Relationships between drag coefficient C_D and KC , Ur , Re

给出了3种模型的拖曳力系数 C_D 分别随 KC , Re , Ur 的变化情况。

图 10a 显示, 3种植被模型的 C_D 值都随 KC 增大逐渐减小, 并最终趋于平稳。拟合曲线表明, M1、M2 和 M3 的 C_D 值最终分别收敛于约 1.2、0.8 和 0.5。在相同 KC 条件下, M1 的 C_D 值最大, M2 次之, M3 最小。根据 Sarpkaya^[29-30] 的研究, 圆柱结构在流体中的水动力行为根据 KC 变化可分为 3 个阶段: $KC \leq 10$ 时, 流场对称, 无涡旋脱落, C_D 值较高且随 KC 增加急剧下降, 流动呈黏性主导; $10 \leq KC \leq 40$ 时, 流场失去对称性, 涡旋开始生成与发展; $KC > 40$ 时, 流动趋于稳定, 涡旋充分脱落, C_D 值趋于常数。对于刚性模型 M1, KC 范围为 $10 \leq KC \leq 24$, C_D 范围为 1.1~2.0, 此时圆柱周围仅有少量旋涡生成, 脱落。对于刚柔组合型 M2, KC 范围为 $14 \leq KC \leq 53$, C_D 范围为 0.8~1.3, 此时圆柱周围流场失去对称性, 涡旋开始出现大量脱落。对于柔性模型 M3, KC 范围为 $18 \leq KC \leq 56$, C_D 范围为 0.25~0.8, 此时叶片同样存在大量涡旋脱落。另外, C_D 随 KC 增大而降低的本质, 是周期性流场中惯性力相对黏性力增强, 使得流动分离点前移、尾流变宽、压力阻力下降^[29]。柔性模型 M3 通过主动摆动, 进一步加剧了这种流动分离与涡脱过程, 从而在相同 KC 下获得了远低于刚性模型 M1 的 C_D 。刚柔组合型植被 M2 的 C_D 行为, 实质上是前柔性区涡旋脱落与后刚性区经典绕流耦合的结果。

图 10b 呈现了 3种植被模式的拖曳力系数 C_D 随雷诺数 Re 的变化关系。可以看出, 3种植被模型的 C_D 值都随 Re 的增大而减小, 且减小的速率逐渐变缓, 这表明 Re 是影响植被拖曳力系数的重要参数。 Re 增大意味着流体惯性作用相对黏性作用增强, 导致植被所受阻力减小, 从而 C_D 值降低, 植被消波能力减弱。在相同 Re 条件下, M1 的 C_D 值最高, 且下降幅度最为显著, 说明其在低 Re 时阻力较大, 但随着流动惯性增强, 阻力迅速下降, 体现出刚性结构对流动状态变化较为敏感。M3 的 C_D 值初始较低, 并随 Re 增大逐渐趋于更低的稳定值, 反映出柔性植被易顺应流态变化, 阻力小且更为稳定的特性。M2 的 C_D 值及变化趋势介于 M1 与 M3 之间, 表明其阻力行为综合了刚性植被的显著阻力特征与柔性植被的平缓响应特点。 Re 效应核心在于边界层发展与分离行为。对于刚性模型 M1, Re 增加直接导致分离点从柱面向后移动, 尾流变窄, 阻力急剧下降。对于柔性模型 M3, 其变形本身是 Re 的函数: 在低 Re 时, 变形可能受黏性力支配; 在高 Re 时, 惯性力主导其大幅振荡。这种流

固耦合振动会改变有效截面与来流夹角, 并可能引发“锁定”等非线性现象^[27], 使得 C_D 随 Re 的变化曲线更为平缓。M2 的响应则是前部柔性单元振动与后部刚性单元绕流相互干涉的复合结果。

图 10c 给出了 C_D 与 Ur 的关系曲线, 可以看出, 3种植被模型的 C_D 都随 Ur 的增大而减小, 且减小的速率逐渐变缓, 最终趋近于一个相对稳定的数值: 1.25、0.95、0.5。这说明非线性较强的波浪环境中, 各类植被的消波效率均会下降。在相同 Ur 下, M1 的 C_D 值相对较高, 且下降幅度相对较大。这说明刚性植被阻力对波浪非线性变化敏感, 强非线性会削弱其阻挡作用。M3 的 C_D 初始值较低, 且随着 Ur 增大, 下降后稳定在更低的数值, 反映其通过叶片摆动适应流场, 减少非线性波浪的直接冲击, 但消波效率同步降低。M2 的 C_D 介于 M1 和 M3 之间, 表现为二者之间的过渡状态, 兼顾部分刚性阻力与柔性自适应特性。另外, Ur 增大意味着波浪更趋于非线性。这对植被的受力环境产生两方面影响: 一是作用力呈现更强的间歇性脉冲特征, 二是平均流速相对降低^[6]。刚性植被模型 M1 无法适应这种瞬时冲击, 其时间平均阻力因此显著下降。柔性植被模型 M3 的摆动能与非线性波浪中复杂的流速场产生更丰富的相位差, 部分“吸收”了冲击, 但也导致其整体能量耗散效率随非线性增强而系统性降低。M2 前部的柔性区首先承受并缓冲了非线性波浪的冲击, 从而保护了后部刚性区, 使其整体 C_D 响应介于两者之间。

综上, 3类植被的消波机制存在本质差异: 刚性植被模型 M1 主要依赖圆杆群的稳态阻挡、反射与有限的涡旋脱落; 柔性植被模型 M3 主要依靠叶片大振幅摆动引发的大量涡旋脱落、流固耦合阻尼及主动流场扰动来耗散波能; 刚柔组合型 M2 则同时融合了前部柔性区的摆动涡脱耗散与后部刚性区的阻挡、反射及受调制的涡脱机制。

3.6 拖曳力系数 C_D 公式形式讨论

本研究通过系统性的实验与分析, 揭示了刚性、柔性及刚柔组合型植被在波浪作用下所受拖曳力系数 C_D 的关键影响因素。研究表明, C_D 与 Re 、 KC 以及 Ur 之间均存在显著的统计关系, 且可统一用经验公式 $C_D = (a/X)^b + c$ 来描述, 其中 X 为 Re 、 KC 或 Ur , a 、 b 、 c 为拟合系数。

为验证试验成果的可靠性, 将所得数据与 Veelen 等^[31]、Reis 等^[32] 及 Gong 等^[18] 的研究结果进行了对比, 见表 3。在刚性植被情形下, 本试验获得的拖曳力系数 C_D 在相同的 Re 与 KC 条件下, 与 Reis 等^[32]、

Gong 等^[18]的结果基本一致。该一致性表明,尽管不同实验在设置上(如波浪水槽结构、造波方式及植被模型比例)可能存在差异,但植被消浪中 C_D 的核心力学机制是相通的,主要受无量纲参数 Re 、 KC 的控制。值得注意的是,在与 Veelen 等^[31]的研究进行比

较时,两者在具体数值上缺乏直接一致性。这主要是由于 Veelen 等^[31]的研究聚焦于更大的 KC 数范围。然而,从数学结构形式来看, Veelen 等^[31]所提出的 C_D 关系式与本试验完全一致,进一步印证了 C_D 随 Re 与 KC 变化规律的通用性。

表 3 C_D 与 KC 、 Ur 或 Re 关系综述

Table 3 Review on the relationships between C_D and KC , Ur , or Re

| 研究 | 波浪条件 | 植被类型 | 公式 | |
|-------------------------|------|------|---|--------------|
| Veelen等 ^[31] | 规则波 | 刚性 | $C_D = (81/KC)^{0.36} (53 \leq KC \leq 133)$ | $R^2 = 0.54$ |
| | | 柔性 | $C_D = 0.26 + (43/KC)^{5.3} (53 \leq KC \leq 133)$ | $R^2 = 0.54$ |
| Reis等 ^[32] | 规则波 | 刚性 | $C_D = 0.83 + (14.8/KC)^{1.24} (13 \leq KC \leq 68)$ | $R^2 = 0.71$ |
| | | | $C_D = 0.79 + (1014/Re)^{1.14} (895 \leq Re \leq 3615)$ | $R^2 = 0.69$ |
| | | 柔性 | $C_D = 1.11 + (22.4/KC)^{4.1} (22 \leq KC \leq 60)$ | $R^2 = 0.56$ |
| | | | $C_D = (5265/Re)^{0.33} (1520 \leq Re \leq 3025)$ | $R^2 = 0.25$ |
| Gong等 ^[18] | 规则波 | 柔性 | $C_D = 0.163 + (4.37/KC)^{2.07} (12 \leq KC \leq 45)$ | $R^2 = 0.65$ |
| 目前的研究 | 规则波 | 刚性 | $C_D = 5/KC^{0.9} + 1 (10 \leq KC \leq 24)$ | $R^2 = 0.73$ |
| | | | $C_D = 19.8/Ur^{2.3} + 1.1 (2 \leq Ur \leq 14)$ | $R^2 = 0.76$ |
| | | | $C_D = 4556/Re - 0.6 (1800 \leq Re \leq 3400)$ | $R^2 = 0.75$ |
| | | 刚柔组合 | $C_D = 9/KC^{0.9} + 0.5 (14 \leq KC \leq 53)$ | $R^2 = 0.76$ |
| | | | $C_D = 10.7/Ur^{2.3} + 0.8 (2 \leq Ur \leq 14)$ | $R^2 = 0.92$ |
| | | | $C_D = 2800/Re - 0.35 (1650 \leq Re \leq 3300)$ | $R^2 = 0.83$ |
| | | 柔性 | $C_D = 8.6/KC^{0.9} + 0.1 (18 \leq KC \leq 56)$ | $R^2 = 0.82$ |
| | | | $C_D = 9.8/Ur^{2.8} + 0.4 (2 \leq Ur \leq 14)$ | $R^2 = 0.88$ |
| | | | $C_D = 1500/Re - 0.15 (1800 \leq Re \leq 3150)$ | $R^2 = 0.79$ |

另外,虽然实验室尺度与天然尺度之间存在的差异,尤其是雷诺数 Re 的不同。在天然环境中,水生植被(如红树林、海草)所处的 Re 通常远高于实验室条件(可达 $10^4 \sim 10^5$ 量级)。然而,在波浪作用下的植被水动力学研究中,普遍认为 KC 数是控制周期性波浪力、涡旋生成与脱落过程的首要无量纲参数,其物理意义表征了波浪水质点运移幅度与植被特征尺寸的比值,直接决定了流场的分离特性与受力周期行为。

本研究的主要目的是揭示刚性、柔性及刚柔组合型植被在波浪作用下的宏观消浪机制与阻力特性差异,重点在于对比三者间的相对性能与机理。为此,试验设计以保证 KC 数范围与野外典型工况相似为核心(本试验 $KC \approx 10 \sim 56$, 覆盖了从黏性主导到充分涡脱的多个流态阶段),从而确保模型能够捕捉到植被消浪的关键物理过程。关于雷诺数的影响,虽然

实验室 Re (基于植被杆径/叶宽及波致流速,约 $10^3 \sim 10^4$ 量级)低于野外高值,但大量经典研究^[29-30]表明:在 $Re > 10^3$ 的湍流范围内,圆柱及类似结构的阻力系数 C_D 对 Re 的变化已不敏感。本试验的 Re 范围已满足该条件,因此所获得的 C_D 随 KC 、 Ur 的变化规律具有较好的机理代表性和定性可靠性。

4 结论

本研究采用物理模型试验方法,研究了不同类型植被消浪的特性,讨论了刚性、柔性及刚柔组合型植被在波浪作用下所受拖曳力系数 C_D 的关键影响因素,给出了 C_D 与 Re 、 KC 以及 Ur 之间的统计关系,结论如下:

(1) 对于刚性、柔性以及刚柔组合型植被,波高沿程都呈现衰减趋势,三者消浪方式存在显著差异:

刚性植被主要是通过圆杆群的阻挡和反射, 另外再加上少量的圆柱尾部旋涡脱落; 柔性植被主要依赖叶片摆动产生的大量涡旋脱落引起的波能耗散; 刚柔组合植被, 圆杆群的阻挡和反射以及大量涡旋脱落引起的波能耗散同时存在。

(2) 刚性植被消波效果分别随入射波周期和淹没度增大而降低, 随波高增加而显著增强。柔性植被消波效果分别随入射波周期和淹没度增大而降低, 随波高增加出现先增后减趋势。刚柔组合型植被消波效果分别随周期和淹没度增加而减弱, 但随波高增大而增强。

(3) 通过改进 Kobayashi 消波模型, 调整反映植被摆动对波高衰减影响的因子 γ 可以有效的显示组合植被中柔性部分的影响。组合植被的 γ 值(0.83)与单

一柔性植被参考值(0.82)高度一致, 表明其波浪消减性能主要受前段柔性区的摆动耗散主导, 而后段刚性区在等效阻力层面影响相对次要。

(4) 对于不同类型植被, C_D 与 Re 、 KC 以及 Ur 之间均存在显著的统计关系, 且可统一用经验公式来描述。

基于刚柔组合型植被的试验结果, 可以在海岸带生态修复中采用“迎浪侧柔性-背浪侧刚性”的分区配置: 前段以海草床、盐沼等柔性植被为主, 通过摆动诱发涡旋耗能削减入射波; 后段种植红树林等刚性植被, 对透射波进行二次拦截并提高防护稳定性。该复合配置体系不仅能发挥不同植被类型的消波特性, 还可提升防护系统对波况变化的适应能力与长期生态韧性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张明亮, 张洪兴, 徐红印, 等. 规则波和不规则波在刚性植物区波能衰减的试验研究[J]. 大连海洋大学学报, 2017, 32(3): 369-372.
Zhang Mingliang, Zhang Hongxing, Xu Hongyin, et al. Energy attenuation of regular and irregular waves in rigid vegetated waters[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2017, 32(3): 369-372.
- [3] 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, 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]. *Journal of Hydrodynamics*, 2015, 30(5): 506-515.
- [4] 白玉川, 杨建民, 胡喆, 等. 植物消浪护岸模型实验研究[J]. 海洋工程, 2005, 23(3): 65-69.
Bai Yuchuan, Yang Jianmin, Hu Mei, et al. Model test of vegetation on the bank to attenuate waves and protect embankments[J]. *The Ocean Engineering*, 2005, 23(3): 65-69.
- [5] 吉红香, 黄本胜, 邱秀云, 等. 滩地植物对波浪变形及消浪效果影响试验研究[J]. 广东水利水电, 2008(8): 14-18.
Ji Hongxiang, Huang Bensheng, Qiu Xiuyun, et al. Experimental study of the influence of vegetation planting on waves deformation and wave absorbing effect[J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2008(8): 14-18.
- [6] Huang Zhenhua, Yao Yu, Sim S Y, et al. Interaction of solitary waves with emergent, rigid vegetation[J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(10): 1080-1088.
- [7] Wang Yanxu, Yin Zegao, Liu Yong. Laboratory study on the drag coefficient for mangrove forests in regular waves[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 255: 111522.
- [8] Dalrymple R A, Kirby J T, Hwang P A. Wave diffraction due to areas of energy dissipation[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1984, 110(1): 67-79.
- [9] 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 Chao, Huang Bensheng, Liu Da, 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.
- [10] 杨琰青, 王雯, 顾中明, 等. 不同布置形态下刚性淹没植被对水流特性的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(5): 164-168.
Yang Yanqing, Wang Wen, Gu Zhongming, et al. Influence of rigid submerged vegetation on flow characteristics under different vegetation layouts[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(5): 164-168.
- [11] 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(6): 770-778.
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]. *Journal of Hydrodynamics*, 2017, 32(6): 770-778.
- [12] Wu Weicheng, Cox D T. Effects of vertical variation in vegetation density on wave attenuation[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2016, 142(2): 04015020.
- [13] Yin Zegao, Wang Yanxu, Liu Yong, et al. Wave attenuation by rigid emergent vegetation under combined wave and current flows[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 213: 107632.
- [14] Kobayashi N, Raichle A W, Asano T. Wave attenuation by vegetation[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*,

- 1993, 119(1): 30–48.
- [15] 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.
- [16] Luhar M, Nepf H M. Wave-induced dynamics of flexible blades[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2016, 61: 20–41.
- [17] 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, 84.
Wu Di, Feng Weibing, Shi Qilin. 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, 84.
- [18] Gong Shangpeng, Xu Sudong, Yin Kai, et al. Experimental study on wave attenuation and cross-shore profiles by submerged flexible vegetation[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 307: 118218.
- [19] Liu Shuo, Xu Sudong, Yin Kai. Optimization of the drag coefficient in wave attenuation by submerged rigid and flexible vegetation based on experimental and numerical studies[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 285(Pt 2): 115382.
- [20] 任姗, 冯民权. 含柔性植被明渠水流水力特性的试验研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(3): 186–192, 199.
Ren Shan, Feng Minquan. Experimental study on hydraulic characteristics of open channel with flexible vegetation[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, 31(3): 186–192, 199.
- [21] 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 Yue, Dong Zengchuan, Cao Haijin, et al. Experimental study on wave attenuation characteristics of rigid-flexible combined wavebreak forests[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2019, 38(3): 32–39.
- [22] Ren Jie, Dong Zengchuan, Jin Dawei, 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.
- [23] 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 Maozhang, Song Zhengming. 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.
- [24] 王永胜, 周曾, 刘治宇, 等. 考虑刚柔组合的海岸复合型植被消波特性研究[J]. *海洋工程*, 2024, 42(4): 110–118.
Wang Yongsheng, Zhou Zeng, Liu Zhiyu, et al. Research on wave dissipation characteristics of coastal composite vegetation considering rigid-flexible combination[J]. *The Ocean Engineering*, 2024, 42(4): 110–118.
- [25] Zhang Xiaofeng, Chua V P, Cheong H F. Hydrodynamics in mangrove prop roots and their physical properties[J]. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2015, 9(2): 281–294.
- [26] Zeller R B, Weitzman J S, Abbett M E, et al. Improved parameterization of seagrass blade dynamics and wave attenuation based on numerical and laboratory experiments[J]. *Limnology and Oceanography*, 2014, 59(1): 251–266.
- [27] Luhar M, Nepf H M. Flow-induced reconfiguration of buoyant and flexible aquatic vegetation[J]. *Limnology and Oceanography*, 2011, 56(6): 2003–2017.
- [28] Maza M, Lara J L, Losada I J. Tsunami wave interaction with mangrove forests: a 3-D numerical approach[J]. *Coastal Engineering*, 2015, 98: 33–54.
- [29] Sarpkaya T. Forces on cylinders and spheres in a sinusoidally oscillating fluid[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1975, 42(1): 32–37.
- [30] Sarpkaya T. Force on a circular cylinder in viscous oscillatory flow at low Keulegan-Carpenter numbers[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1986, 165: 61–71.
- [31] van Veelen T J, Fairchild T P, Reeve D E, et al. Experimental study on vegetation flexibility as control parameter for wave damping and velocity structure[J]. *Coastal Engineering*, 2020, 157: 103648.
- [32] Reis R A, Fortes C J E M, Rodrigues J A, et al. Experimental study on drag coefficient of flexible vegetation under non-breaking waves[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 296: 117002.

Experimental study on wave attenuation characteristics of different types of vegetation under regular waves

Yan Kai¹, Shen Zhangyi¹, Chen Hongzhou¹, Shen Liangduo¹, Wang Xiangyu¹, Bian Hongwei²

(1. School of Marine Engineering Equipment of Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2. The Fourth Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Beihai 536009, China)

Abstract: To investigate the differences in wave attenuation characteristics among rigid, flexible, and rigid-flexible composite vegetation under regular waves, a series of physical model tests were conducted in a laboratory flume. The wave attenuation effects of these three vegetation types were quantitatively analyzed, and the relationships between the drag coefficient (C_D) and Reynolds number (Re), Keulegan-Carpenter number (KC), and Ursell number (Ur) were determined. Results show that all three configurations induce a progressive along-flume reduction in wave height. Increasing incident wave period or vegetation submergence ratio consistently weakens wave dissipation for all vegetation types. The response to wave height differs by configuration: dissipation by rigid vegetation increases markedly and continuously with wave height, whereas flexible vegetation exhibits a nonlinear behavior, strengthening at first and then weakening as wave height further increases. The rigid-flexible combined configuration integrates these advantages and also shows enhanced dissipation with increasing wave height. Moreover, C_D for the three vegetation types can be represented using a unified theoretical expression; the primary distinction among configurations is the value of the influence factor γ , which accounts for the effect of vegetation swaying on wave-height attenuation. Statistically significant dependencies of C_D on Re , KC , and Ur are observed and can be parameterized by a unified empirical formulation. These results provide a theoretical basis and design reference for optimizing vegetation configurations in coastal ecological protection and restoration engineering.

Key words: vegetation wave dissipation; rigid vegetation; flexible vegetation; submergence degree; regular waves