

DOI:10.11784/tdxbz202510003

不规则波浪作用下植物蜂巢生态护岸水动力特性试验研究

张金凤¹, 何 茜¹, 张 娜², 徐玲玲³, 王一航¹, 吉红香⁴

(1. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300072;

2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456;

3. 中国电建集团福建省电力勘测设计院有限公司, 福州 350003; 4. 广东省水利水电科学研究院, 广州 510610)

摘 要: 综合考量自然环境与岸坡防护需求, 植物生态护岸结构的水力特性研究对生态护岸的发展、岸坡的治理及保护具有重要意义. 为探究不规则波浪作用下柔性植被与蜂巢格室结合的复合型护岸系统的水动力特性, 以天津沿海典型碱蓬植被-蜂巢护岸体系为研究对象, 开展不规则波浪作用下水槽模型试验, 探讨植物密度和高度对蜂巢生态护岸断面不规则波浪爬高、越浪及波生流近底流速的影响. 研究发现随着植物密度和高度的增加, 不规则波浪的爬高和越浪均呈现下降趋势, 各波浪要素作用下的不规则波浪爬高衰减率在 10%~50%之间, 越浪衰减率最大达到 90%以上. 设计高水位时, 较小的植物高度反而会使近底流速略微增大, 较大的植物高度才能起到降低近底流速、减小对坡面冲刷影响的效果. 与规则波浪作用下试验结果相比, 不规则波浪的波浪爬高衰减率最大降低至 40%, 越浪衰减率最大可达到 90%以上. 研究结果表明植物对不规则波浪的波高衰减效果更好, 对越浪衰减程度两者均较好. 因此, 植物蜂巢生态护岸在规则波浪与不规则波浪作用下均能起到有效削弱来浪的效果, 通过增加种植植物的高度及密度能更有效地防护岸坡. 探究不规则波浪作用下柔性植被的密度与高度对蜂巢生态护岸水动力特性的影响规律, 能够为相关生态护岸工程的设计与施工提供参考.

关键词: 不规则波浪; 植物蜂巢生态护岸; 越浪; 爬高; 水槽模型试验

中图分类号: TV861

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)08-0827-09

Experimental Study on Hydrodynamic Characteristics of Vegetated Ecological Honeycomb Revetment Under Irregular Waves

Zhang Jinfeng¹, He Xi¹, Zhang Na², Xu Lingling³, Wang Yihang¹, Ji Hongxiang⁴

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China;

3. PowerChina Fujian Electric Power Engineering Co., Ltd., Fuzhou 350003, China;

4. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China)

Abstract: With the comprehensive consideration of natural environment and the requirements for bank slope protection, the research on the hydrodynamic characteristics of vegetated ecological revetments is crucial for the development of ecological revetments, as well as the management and protection of bank slopes. To study the hydrodynamic characteristics of a composite revetment system combining flexible vegetation and honeycomb structures under irregular waves, a revetment system consisting of Suaeda salsa which is typical in the coastal area of Tianjin and honeycomb structures is taken as a research object in this paper, and water-tank model experiments were conducted under irregular waves, so as to examine the effects of plant density and plant height on the irregular wave run-up, overtopping and near-bed flow velocity. Results demonstrate that both the wave run-up and the overtopping of irregu-

收稿日期: 2025-10-08; 修回日期: 2026-04-06.

作者简介: 张金凤 (1978—), 女, 博士, 教授.

通信作者: 张金凤, jfzhang@tju.edu.cn.

基金项目: 天津市科技计划资助项目(2019-1); 天津市交通运输科技发展计划资助项目(2020-12).

Supported by the Tianjin Science and Technology Plan Project, China(No. 2019-1), the Science and Technology Development Program of Transportation Committee of Tianjin, China(No. 2020-12).

lar waves decreased with the increasing plant density and plant height. The attenuation rates of irregular wave run-up ranged from 10% to 50% across the tested conditions, while the maximum attenuation rate of overtopping exceeded 90%. At the design high-water level, a smaller plant height was found to slightly increase the near-bed flow velocity, whereas a greater plant height can effectively reduce the velocity, thereby mitigating the impact of potential slope scour. Compared with the experimental results under regular waves, the attenuation rate of irregular wave run-up was as low as 40%, while the attenuation rate of overtopping can reach over 90%. These findings confirm that the plants are more effective for the attenuation of irregular wave run-up, but they are conducive to the attenuation of overtopping under both the regular and irregular waves. Therefore, the vegetated ecological honeycomb revetment can effectively dissipate the incoming wave energy under both waves, and its protective performance can be enhanced by increasing the plant density and height. The exploration of the effects of the density and height of flexible vegetation on the hydrodynamic characteristics of ecological honeycomb revetments can provide a reference for the design and construction of similar ecological revetment engineering.

Keywords: irregular wave; vegetated ecological honeycomb revetment; overtopping; run-up; water-tank model experiment

传统护岸采用刚性结构硬质材料应对海岸侵蚀问题,但其对近海水动力条件的改变可能会减少沿海地区的沉积物供应,导致海岸线发生总体性退移,一定程度上降低了海堤对风暴潮(洪)水和波浪的防御能力^[1-2]。海岸带上的水生植被具有重要的消浪能力,涌浪缓冲效果明显,对于护岸固堤和提高海岸的防灾减灾能力至关重要^[3]。除了具有岸坡防护功能外,其还兼顾了生态恢复功能和景观功能,因此环境友好型绿色护岸在实际工程中得到了广泛应用^[4-7]。借助海岸带植被构建复合或柔性护岸体系以实施海岸修复及防护,既采用环保经济材料加固岸线,又借助植物消减波浪力以缓解堤基侵蚀^[8],是一项经济、生态的优选策略。

当前学者对水生植被的消浪效果进行了一系列研究工作。曹大正等^[9]发现互花米草具有明显的缓流消浪功能:随着互花米草宽度的增加,植物的防冲固土效果增强,底层流速衰减率和波高衰减率得到了提高。Yang 等^[10]经实地测量指出:在中国长江河口崇明岛东侧区域,植被前沿 7.5 m 处波高降低了 30%,达到 51 m 距离时波高衰减率已达到 79%。Hashim 等^[11]通过采用人工红树林模拟物进行试验研究,其成果揭示:红树林海岸所展现出的波高衰减程度是缺乏红树林海岸区域的对应值 2.5 倍以上。Mazda 等^[12]在对越南红树林的研究说明红树林对周期范围为 5~8 s 的涌浪具有明显的缓冲效果,红树林的消浪效能与多种因素紧密相关,包括水体深度、初始波高、波浪周期等波浪特性参数以及红树林的种类、树木间的空间布局等植被特性;其根据现场实测数据,还提出考虑红树林影响的拖曳力系数公式。这些研究成果揭示了海岸植被的密度与波浪参数等因素对其消浪

效果的影响规律。

物理缩尺模型试验通过在实验室环境中模拟波浪动力过程,可实现对波浪运动与传播现象的定性观测及定量数据分析。Yin 等^[13]采用塑料仿生柔性植被模型开展规则波浪衰减研究,结果表明波浪透射系数随植物相对行距、相对密度、波高相对值及波陡的增大而显著降低。白玉川等^[14]基于桧柏树枝构建植物模型试验,发现植物消浪效果随水深增大而提升,且斜坡地形较平陆地形具有更显著的波高衰减效应。王一航^[15]构建以真实碱蓬植被构建的蜂巢生态护岸断面模型,探索了在规则波浪和不同植物条件下波浪特性变化,但并未研究不规则波浪作用下不同密度与植株高度的植物对波浪的消浪效果。Tschirky 等^[16]和 Lara 等^[17]均采用真实植物来探究植物对波浪的影响规律:在依托模型植物实施的试验进程中,初期阶段仅通过 PVC 圆管来模仿植物的刚性主干;随后,融入对植物柔韧枝叶及根系结构的精细模拟,采用真实植物作为研究对象以进行试验。针对不规则波浪作用下柔性植被与蜂巢格室结合的复合型护岸系统的水动力特性,现有试验尚缺乏深入研究。为此,本研究选取天津地区的典型盐沼植物碱蓬,通过水槽模型试验,重点探讨不规则波浪作用下柔性植被的密度与高度对蜂巢生态护岸水动力特性的影响规律,以期对相关生态护岸工程的设计与施工提供参考。

1 试验布置

1.1 试验设备与布置

不规则波浪作用下的植物护岸水动力特性试验在天津大学港口与海岸工程实验室内的波浪水槽展

开,水槽规格为 35 m×1 m×1 m. 试验采用 AFM-124 型造波机、DS-30 多点型波高仪、Nortek Vectrino 小威龙 ADV、DJ800 多功能监测系统、摄像机、越浪水箱、量筒等设备,选取在天津当地植株分布方式为植生组型的碱蓬植株,假设忽略表面张力效应,植物比尺为 1:1. 本节试验采用重力相似准则,各项比尺分别为:几何比尺为 $\lambda_l=10$;时间比尺为 $\lambda_t=\lambda_l^{1/2}=3.16$;重量比尺为 $\lambda_v=\lambda_l^3=1\,000$.

试验采用的护岸断面模型高度为 0.7 m,坡度为 1:3.5,护面蜂巢格室的厚度为 10 cm,内回填 3~6 g 碎石;位于格室下方的主体堤身高度为 0.6 m,整个模型的长度为 2.1 m,护岸断面植物布置如图 1 所示. 为有效防止土壤流失并确保水体的自然渗透与排放,在蜂巢格室结构与核心堤体层次间设置了土工织物隔离层. 此外,于模型坡脚安装碎石防护层,旨在加固边坡稳定性,避免水流侵蚀造成的潜在不稳定风险. 护岸断面模型简图及传感器布设图参考文献 [18],如图 2 和 3 所示.

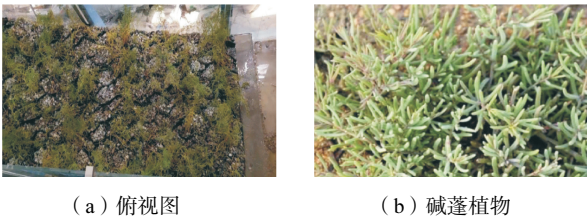


图 1 试验护岸断面植物布置

Fig.1 Layout of plants on experimental revetment cross-section

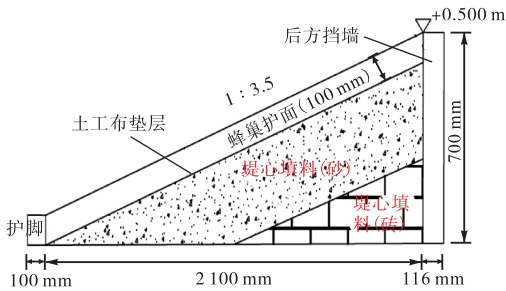


图 2 护岸断面模型立面

Fig.2 Elevation view of revetment cross-section model

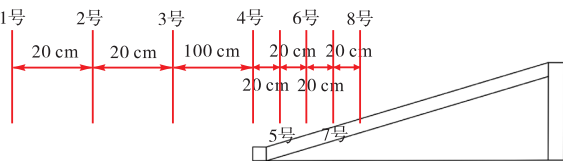


图 3 护岸断面 8 个传感器布置示意

Fig.3 Schematic of layout of eight sensors on revetment cross-section

1.2 试验工况

本研究基于真实碱蓬植株开展水槽模型试验,系

统量化植物密度与高度对护岸水动力特性的影响机制. 采用 500 株/m²、750 株/m² 和 1 000 株/m² 共 3 种不同的密度开展试验,探究不规则波浪作用下植物密度对护岸水动力特性的影响. 采用 6 cm、10 cm 和 20 cm 共 3 种不同的高度开展试验,探究不规则波浪作用下植物高度对护岸水动力特性的影响. 植物高度及植物密度如表 1 所示.

表 1 试验选取的植物参数
Tab.1 Selected plant parameters for experiments

参数	数值
植物密度/(株/m ²)	1 000
	750
	500
植物高度/cm	20
	10
	6

参照天津市沿海地区长期水文观测资料记录,本节选取设计低水位、设计平均水位和设计高水位共 3 种典型水位情形作为试验研究的工况基础. 采用的原型及模型试验参数如表 2 所示. 通过使用 JONSWAP 谱生成不规则波浪,有效波高 $H=0.1$ m,谱峰周期 $T=2.00$ s;将实际波浪谱与标准 JONSWAP 波浪谱进行比较,二者拟合较好,如图 4 所示.

表 2 原型及模型试验参数对照
Tab.2 Comparison of parameters between prototype and model tests

参数	原型试验数值	模型试验数值
设计高水位/m	6.30	0.630
设计平均水位/m	4.60	0.460
设计低水位/m	3.47	0.347
谱峰周期 T/s	3.0	0.95
	4.0	1.26
	5.0	1.58
	6.0	1.90
波高 H/m	0.4	0.04
	0.6	0.06
	0.8	0.08
	1.0	0.10

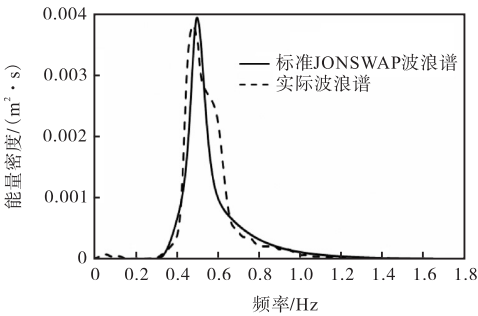


图 4 标准 JONSWAP 波浪谱与实际波浪谱比较结果
Fig.4 Results of comparison between standard JONSWAP wave spectrum and actual wave spectrum

2 试验结果

2.1 不规则波浪爬高试验结果

通过不规则波浪爬高衰减率 ΔR 研究不同植物密度与不规则波浪爬高 R 之间的关系, 如式(1)所示。

$$\Delta R = \frac{R_0 - R_N}{R_0} \quad (1)$$

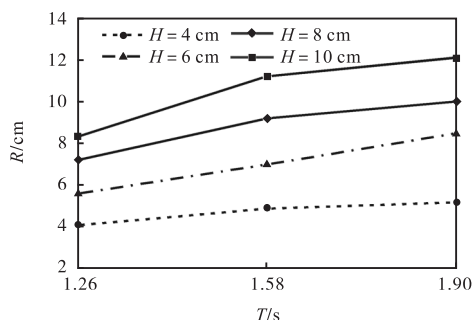
式中: R_0 为无植物分布时的不规则波浪爬高, cm; R_N 为植物密度 N (分别为 500 株/m²、750 株/m² 和 1000 株/m²) 对应的不规则波浪爬高, cm。

通过 ΔR 研究不同植物高度与不规则波爬高之间的关系, 如式(2)所示。

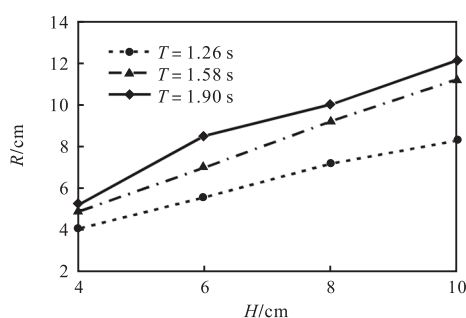
$$\Delta R = \frac{R_0 - R_{H'}}{R_0} \quad (2)$$

式中 $R_{H'}$ 为植物高度 H' (分别为 6 cm、10 cm 和 20 cm) 对应的不规则波浪爬高, cm。

考虑设计平均水位工况下, 波浪周期分别取 0.95 s、1.26 s、1.58 s 和 1.90 s 的不规则波浪爬高, 得到不同植物密度及不同植物高度下不规则波爬高及不规则波浪爬高衰减率变化, 如图 5 ~ 图 7 所示。



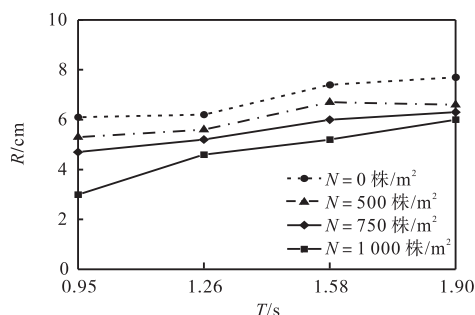
(a) 波浪爬高随周期变化



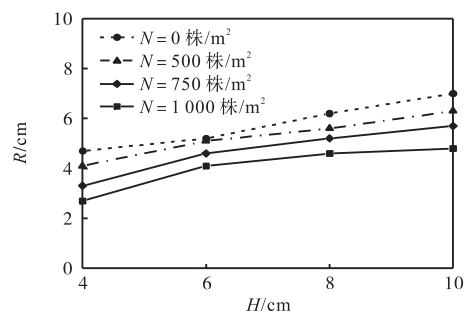
(b) 波浪爬高随波高变化

图 5 波浪爬高变化(植株密度为 500 株/m², 水位为 46.0 cm)

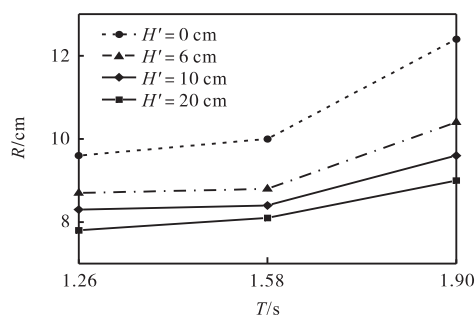
Fig.5 Variations in wave run-up (plant density is 500 plants/m² and water level is 46.0 cm)



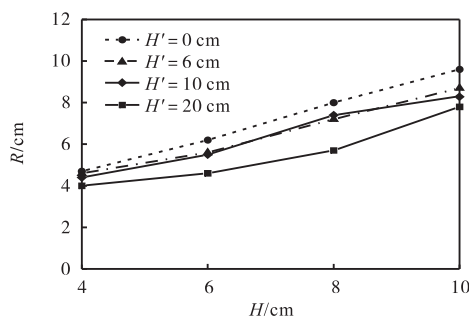
(a) $H=6$ cm, 不同周期和不同植物密度



(b) $T=1.26$ s, 不同波高和不同植物密度



(c) $H=10$ cm, 不同周期和不同植物高度



(d) $T=1.26$ s, 不同波高和不同植物高度

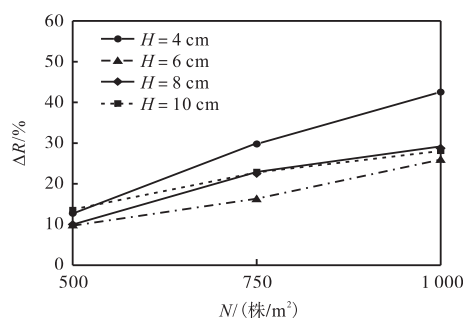
图 6 波浪爬高变化(水位为 46.0 cm)

Fig.6 Variations in wave run-up (water level is 46.0 cm)

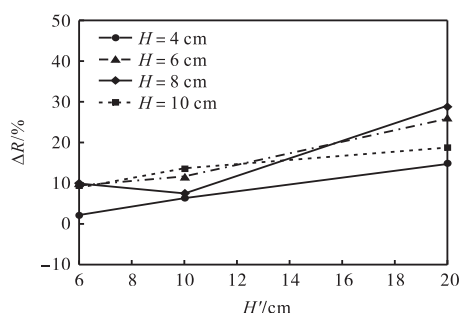
根据分析结果可知, 随着植物密度的增大和植物高度的增加, 不同工况下的不规则波浪爬高呈下降趋势, 爬高衰减率则呈上升趋势。相比仅有碎石的蜂巢

护岸, 植物密度为 1000 株/m² 时各种波浪要素作用下的爬高大约减少了 10% ~ 50%; 植物高度为 20 cm 时各种波浪要素作用下的爬高大约减少了 0 ~ 35%。

此外,对比不同水位之间植物高度与不规则波浪爬高的关系可以发现,设计低水位的植物高度与不规则波浪爬高之间的关系线性较强。



(a) $T = 1.26$ s, 不同植物密度和不同波高



(b) $T = 1.26$ s, 不同植物高度和不同波高

图 7 波浪爬高衰减率变化(水位为 46.0 cm)

Fig.7 Variations in attenuation rate of wave run-up (water level is 46.0 cm)

岸坡植被通过湍流耗散削弱不规则波浪能量,导致波浪爬高随植物密度与高度的增加呈衰减趋势。同时,密度的增大会使植物茎干间距减小,引发流动分离并增强了茎干群对水流的拖曳作用。高植物高度下,柔性叶片受波动作用产生滞后变形,波浪能量转化为叶片应变能,形成阻力耗散。同时,波浪能量集中分布于静水位上、下 1 倍波高范围内,增大植物高度可使其更有效地覆盖这一能量核心区,通过增强的耗散与摩阻作用更有效地衰减波浪爬高。

2.2 不规则波浪越浪试验结果

设计平均水位下,部分试验组次发生越浪。通过不规则波浪单宽平均越浪量衰减率 Δq 研究不规则波浪作用下不同植物密度与单宽平均越浪 q 之间的关系,如式(3)所示。

$$\Delta q = (q_0 - q_N) / q_0 \quad (3)$$

式中: q_0 为无植物分布时的不规则波浪单宽平均越浪, $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$; q_N 为植物密度 N (分别为 500 株/ m^2 、750 株/ m^2 和 1000 株/ m^2)对应的不规则波浪单宽平均越浪, $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。

通过 Δq 研究不规则波浪作用下不同植物高度与单宽平均越浪之间的关系,如式(4)所示。

$$\Delta q = (q_0 - q_{H'}) / q_0 \quad (4)$$

式中 $q_{H'}$ 为植物高度 H' (分别为 6 cm、10 cm 和 20 cm)对应的不规则波浪单宽平均越浪, $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。

对各组次越浪进行统计,结果如表 3 所示,可以看出随着植物密度的增加,发生越浪的组次减少,在波浪要素相同的条件下,越浪随植物密度的增大而显著降低。此外,随着波高的增加,越浪的衰减幅度有所减小。图 8~图 10 分别展示了在不同波浪周期、波高及植物参数条件下,单宽平均越浪及其衰减率的变化情况。结果表明:水位和周期保持不变时单宽平均越浪随着波高的增加而增大,相同水位和波高条件时单宽平均越浪随着周期的延长而上升。

表 3 不规则波浪作用下越浪数据

Tab.3 Overtopping data under irregular waves

$N/$ (株/ m^2)	H/cm	$q/(\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s}))$		
		$T = 1.26$ s	$T = 1.58$ s	$T = 1.90$ s
0	6	—	0.832	1.120
	8	1.200	10.700	14.700
	10	10.900	27.400	52.500
500	6	—	0.385	0.294
	8	1.010	5.420	7.190
	10	3.970	14.700	25.500
750	8	—	1.880	1.340
	10	1.680	7.420	10.600
1000	8	—	0.072	0.264
	10	0.108	1.550	4.250

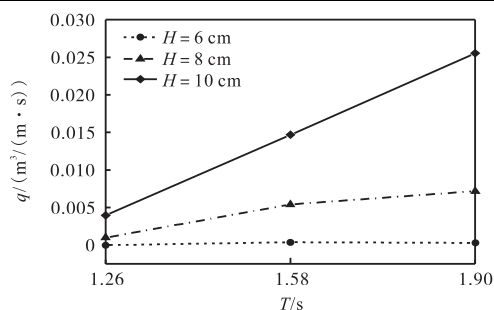


图 8 单宽平均越浪变化(植株密度为 500 株/ m^2 ,水位为 46.0 cm)

Fig.8 Variations in overtopping per unit width (plant density is 500 plants/ m^2 and water level is 46.0 cm)

相较于无植被的碎石蜂巢护岸,植物密度分别为 500 株/ m^2 、750 株/ m^2 和 1000 株/ m^2 的条件下,单宽平均越浪分别减少了 40%~80%、60%~90% 和 90% 以上。当植物密度较大时,不同波浪要素下的衰减率差值较小,说明此时越浪的衰减率主要受植物密度影响,受波浪要素影响较小。当植物高度为 6 cm 时,越浪衰减率在 50% 以上;当植物高度大于 10 cm 时,衰减率则达到 90% 以上,并且单宽平均越浪衰减率随着波高的增大而减小。因此,植物密度和高度改变会显著影响越浪的衰减程度。

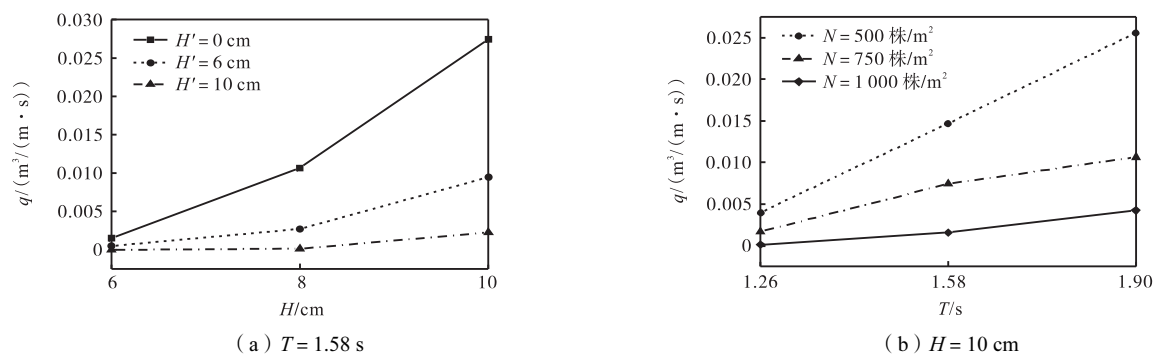


图 9 单宽平均越浪变化(水位为 46.0 cm)

Fig.9 Variations in overtopping per unit width (water level is 46.0 cm)

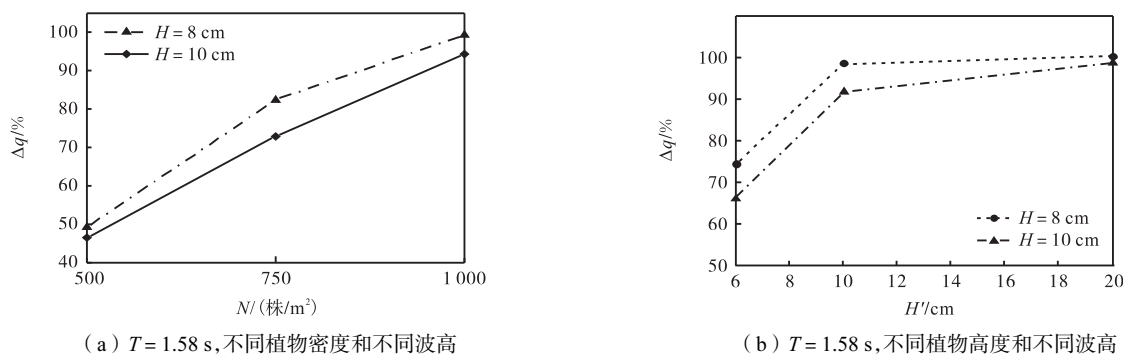


图 10 单宽平均越浪衰减率变化(水位为 46.0 cm)

Fig.10 Variations in attenuation rate of overtopping per unit width (water level is 46.0 cm)

2.3 不规则波浪近底流速试验结果

通过波生流近底流速变化率 Δv 探究不同波浪要素作用下不规则波浪近底流速 v 随植物密度的变化情况, 如式(5)所示。

$$\Delta v = (v_N - v_0) / v_0 \quad (5)$$

式中: v_0 为无植物分布时的不规则波浪波生流近底流速, cm/s; v_N 为植物密度 N (分别为 500 株/ m^2 、750 株/ m^2 和 1000 株/ m^2) 对应的不规则波浪波生流近底

流速, cm/s。

通过 Δv 探究不同波浪要素作用下 v 随植物高度的变化情况, 如式(6)所示。

$$\Delta v = (v_{H'} - v_0) / v_0 \quad (6)$$

式中 $v_{H'}$ 为植物高度 H' (分别为 6 cm、10 cm 和 20 cm) 对应的不规则波浪波生流近底流速。

不同波浪要素作用下近底流速变化率随植物高度的变化情况如图 11 所示, 可以看出随水位的升

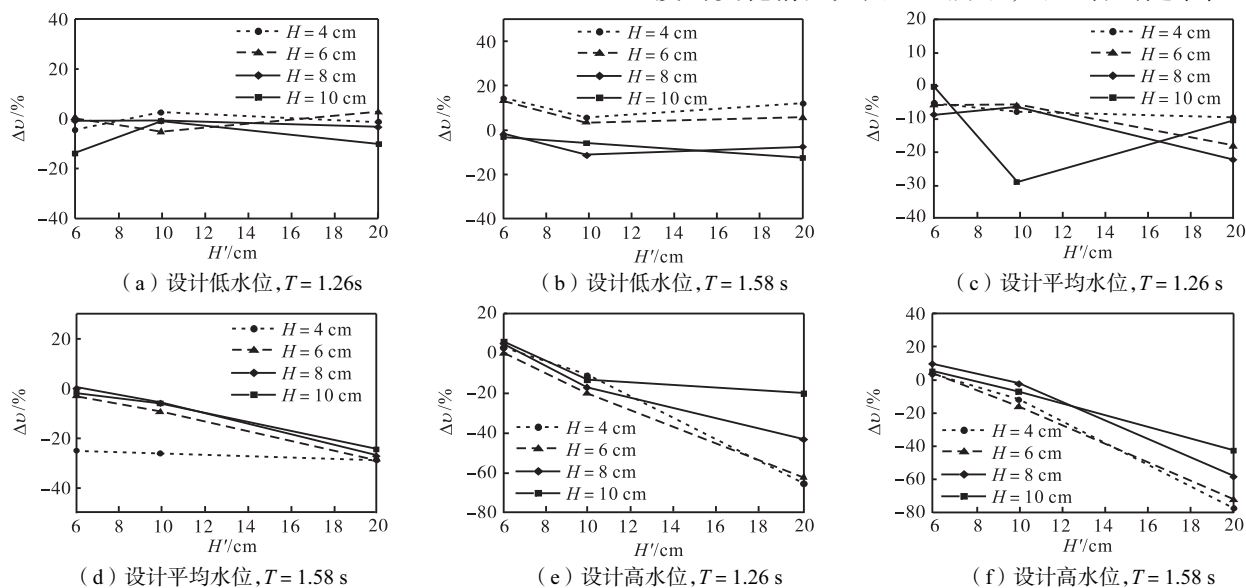


图 11 不同植物高度下的不规则波浪波生流近底流速变化率

Fig.11 Rate of change of near-bed flow velocity under irregular waves at different plant heights

高,植物高度对不规则波浪波生流近底流速的影响增大,高水位时不规则波浪近底流速随植物高度的增大呈现先增大后减小的趋势。相较仅有碎石的蜂巢护岸,植物高度为 6 cm 时各工况下的波生流近底流速升高了 0~20%,植物高度为 10 cm 时近底流速有升有降,植物高度为 20 cm 时近底流速降低了 40%~80%。由于植被存在使得表层流场存在收缩效应,表层时均流速显著降低。同时,底床摩阻主导机制使得近底边界层流速受坡面碎石摩阻控制,下部流道产生加速效应,因此近底平均流速不但没有减小,反而随植物密度增大呈轻微上升趋势。结果表明,植物高度大于 10 cm 时植被才能对护岸坡面波生流冲刷产生一定的抑制效果。

不同波浪参数下植被密度对波生流近底层流速分布影响较小,植被对护岸坡面波生流冲刷的抑制效果有限。由于植被存在使得表层流场存在收缩效应,茎叶系统通过增大表层水流阻力,导致植被区上部过流断面收缩,表层时均流速显著降低,表层流量损失迫使水体向茎叶稀疏的下部区域集中。同时,底床摩阻主导机制使得近底边界层流速受坡面碎石摩阻控制,下部流道产生加速效应,因此近底平均流速不但没有减小,反而随植物密度增大呈轻微上升趋势^[19]。

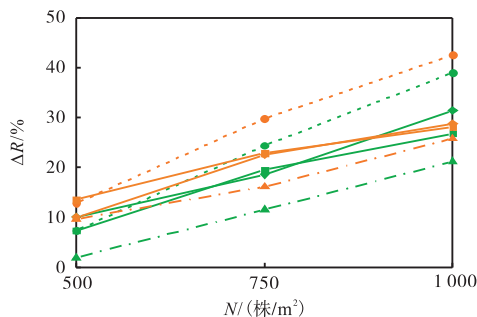
2.4 对比规则波浪作用下试验结果

对比张娜等^[20]规则波浪作用下柔性植物蜂巢护岸水动力特性试验,得到不同波浪工况作用下不同植物密度越浪,如表 4 所示。不同植物密度和植物高度下的波浪爬高衰减率及设计高水位下波生流近底流速变化率分别如图 12 和 13 所示。规则波浪的波浪爬高衰减率范围为 10%~40%;随着植物密度的增大和植物高度的增加,不同工况下的规则波浪爬高衰减率呈上升趋势,爬高则呈下降趋势。越浪衰减范围

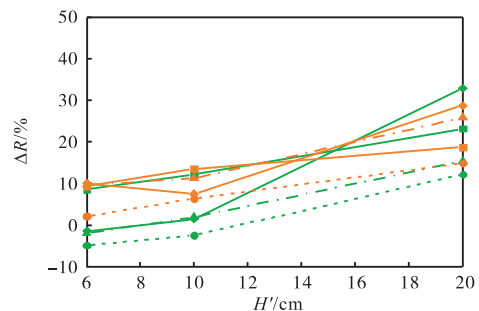
表 4 不同波浪工况作用下越浪数据

Tab.4 Overtopping data under different wave conditions

N/ (株/m ²)	H/cm	R/(10 ⁻⁵ m ³ /(m·s))					
		T = 1.26 s		T = 1.58 s		T = 1.90 s	
		规则 波浪	不规则 波浪	规则 波浪	不规则 波浪	规则 波浪	不规则 波浪
0	6	—	—	—	0.832	1.670	1.120
	8	0.876	1.200	4.050	10.700	38.900	14.700
	10	33.700	10.900	78.800	27.400	145.000	52.500
500	6	—	—	—	0.385	5.650	0.294
	8	77.000	1.010	1.670	5.420	13.000	7.190
	10	6.830	3.970	20.300	14.700	60.500	25.500
750	8	—	—	0.104	1.880	2.540	1.340
	10	3.430	1.680	8.350	7.420	25.900	10.600
1 000	8	—	—	—	0.072	—	0.264
	10	—	0.108	1.680	1.550	7.410	4.250



(a) $T = 1.26$ s, 不同植物密度和不同波高

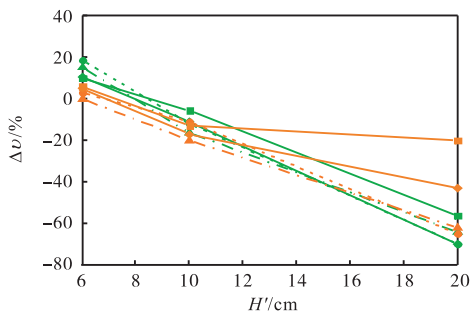


(b) $T = 1.26$ s, 不同植物高度和不同波高

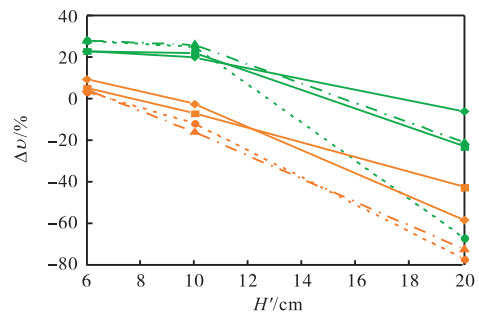
—●— 规则波浪, $H = 4$ cm —▲— 规则波浪, $H = 6$ cm —●— 规则波浪, $H = 8$ cm —●— 规则波浪, $H = 10$ cm
- - -▲- - 不规则波浪, $H = 4$ cm - - -▲- - 不规则波浪, $H = 6$ cm - - -▲- - 不规则波浪, $H = 8$ cm - - -▲- - 不规则波浪, $H = 10$ cm

图 12 不同波况作用下波浪爬高衰减率变化(水位为 46.0 cm)

Fig.12 Variations in attenuation rate of wave run-up under different wave conditions (water level is 46.0 cm)



(a) $T = 1.26$ s



(b) $T = 1.58$ s

—●— 规则波浪, $H = 4$ cm —▲— 规则波浪, $H = 6$ cm —●— 规则波浪, $H = 8$ cm —●— 规则波浪, $H = 10$ cm
- - -▲- - 不规则波浪, $H = 4$ cm - - -▲- - 不规则波浪, $H = 6$ cm - - -▲- - 不规则波浪, $H = 8$ cm - - -▲- - 不规则波浪, $H = 10$ cm

图 13 设计高水位下不同波况近底流速变化率

Fig.13 Rate of change of near-bed flow velocity under different wave conditions at design high-water level

为 50% ~ 90%, 最大可达 90% 以上; 越浪的衰减程度随波高的增大而增大, 且一定的水位和波高条件下越浪随着周期增加而增大。

与规则波浪作用下试验结果相比较, 不规则波浪爬高衰减率分布范围为 10% ~ 50%, 越浪的衰减率范围为 40% ~ 90%, 最大可达 90% 以上。通过分析可知, 植物对不规则波浪作用下的波高衰减效果更好, 植物密度、波高及波周期相同的条件下, 不规则波浪作用下的越浪小于规则波浪作用下的对应值; 两种波浪作用下, 越浪衰减程度均较好。在波周期较小的条件下, 两者的波生流近底流速衰减率差距不大, 随着波周期的增大, 规则波浪近底流速衰减率明显大于不规则波浪的对应值, 其变化幅度为 20% ~ 50%。此外, 规则波浪和不规则波浪的爬高、越浪随植物密度和植物高度的增加均呈下降趋势。

在相同植物密度、植物高度、波高与波周期条件下, 植物对不规则波浪的波高衰减效果更为显著, 且不规则波浪对应的越浪普遍低于规则波浪工况的对应值。因此, 植物蜂巢生态护岸在规则波浪与不规则波浪作用下均能起到有效削弱来浪的效果, 增加种植植物的高度及密度能更有效地防护岸坡。研究结果为生态护岸的设计与效能预测提供了更科学的试验依据。

3 结 论

本研究基于不规则波浪作用下植被护岸水动力特性的水槽模型试验, 探究植物密度和植物高度对护岸断面上不规则波浪爬高、越浪及波生流近底流速的影响, 得出以下结论。

(1) 在不规则波浪传播过程中, 护岸断面上植物的存在可以减轻波反射, 对不规则波浪部分特性具有明显的削减作用, 随植物密度和植物高度的增加, 不规则波浪爬高和越浪均呈下降趋势。植物密度为 1 000 株/ m^2 时各种波浪要素作用下的不规则波浪爬高衰减率范围为 10% ~ 50%, 越浪衰减率达到 90% 以上; 植物高度为 20 cm 时各种波浪要素作用下的不规则波浪爬高衰减率范围为 0% ~ 35%, 植物高度大于 10 cm 时越浪衰减率则达到 90% 以上。

(2) 在设计高水位条件下, 不规则波浪近底流速随植物高度的增加呈先升后降的趋势: 植物高度为 6 cm 时, 近底流速轻微增大, 对抑制岸坡冲刷效果的影响不明显; 植株高度为 20 cm 时, 植被可有效抑制近底流速并缓解坡面冲刷。植物密度的变化对近底

流速分布无显著影响。

(3) 相较植物对规则波浪作用下的波高衰减效果, 其对不规则波浪作用下的波高衰减效果更好; 两种波浪作用下, 越浪衰减程度均较好; 随着波周期的增大, 规则波浪近底流速衰减率明显大于不规则波浪的对应值。规则波浪与不规则波浪作用下的爬高和越浪均随植物密度与植物高度的增加而降低, 表明植物蜂巢生态护岸在不同波况下均具备良好的消浪性能。

(4) 植物蜂巢生态护岸对天津沿海不规则波浪作用具有良好的适应性与稳定性。在结构设计中, 应在保障植物自然生长的基础上尽可能提高植物种植密度; 当植物高度较小时, 施工时应考虑植物的生长期, 以保证植物根系的充分发展足够保护岸坡并应对冲刷; 移栽施工应避免低矮植株引发的近底流速增大风险; 应建立季节性动态维护机制, 在冬季植物休眠期对坡面进行加固。

参考文献:

- [1] Coelho C, Cruz T, Roebeling P. Longitudinal revetments to mitigate overtopping and flooding: Effectiveness, costs and benefits[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2016, 134: 93-102.
- [2] Day J W, Boesch D F, Clairain E J, et al. Restoration of the Mississippi Delta: Lessons from hurricanes Katrina and Rita[J]. *Science*, 2007, 315(5819): 1679-1684.
- [3] 李梦琦. 规则波与同向水流环境中柔性植被消浪数值模拟[D]. 南京: 东南大学交通学院, 2022.
Li Mengqi. Simulation Study on Wave Attenuation Through Flexible Vegetation with Following Currents [D]. Nanjing: School of Transportation, Southeast University, 2022 (in Chinese).
- [4] Quartel S, Kroon A, Augustinus P G E F, et al. Wave attenuation in coastal mangroves in the Red River Delta, Vietnam[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 29 (4): 576-584.
- [5] Tran Q B. Effect of mangrove forest structures on wave attenuation in coastal Vietnam[J]. *Oceanologia*, 2011, 53(3): 807-818.
- [6] Nguyen B T, Nandasena N A K, Dang V H, et al. Effect of river vegetation with timber piling on ship wave attenuation: Investigation by field survey and numerical modeling [J]. *Ocean Engineering*, 2017, 129: 37-45.
- [7] Henderson S M, Norris B K, Mullarney J C, et al.

- Wave-frequency flows within a near-bed vegetation canopy[J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 147: 91-101.
- [8] 杨沛钧. 柔性植被作用下波浪沿斜坡爬升过程的数值模拟[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2020.
- Yang Peijun. Numerical Simulation of Flexible Plant Effects on Wave Propagation Along the Slope[D]. Tianjin: School of Civil Engineering, Tianjin University, 2020 (in Chinese).
- [9] 曹大正, 王银生, 张冬然, 等. 互花米草在吹填筑挡工程上的试验与应用[J]. *中国工程科学*, 2005, 7(7): 14-23.
- Cao Dazheng, Wang Yinsheng, Zhang Dongran, et al. Application of *Spartina alterniflora* on blow-fill-construct sea wall engineering[J]. *Engineering Science*, 2005, 7(7): 14-23 (in Chinese).
- [10] Yang S L, Shi B W, Bouma T J, et al. Wave attenuation at a salt marsh margin: A case study of an exposed coast on the Yangtze Estuary[J]. *Estuaries and Coasts*, 2012, 35(1): 169-182.
- [11] Hashim A M, Khairuddin N. Performance of mangrove forests in coastal protection[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 567: 277-282.
- [12] Mazda Y, Magi M, Kogo M, et al. Mangroves as a coastal protection from waves in the Tong King delta, Vietnam[J]. *Mangroves and Salt Marshes*, 1997, 1(2): 127-135.
- [13] Yin Z G, Yang X Y, Liang B C, et al. Experimental investigation of wave attenuation through flexible plants on a flat bed[J]. *Journal of Coastal Research*, 2018, 34(3): 718-723.
- [14] 白玉川, 杨建民, 胡 颀, 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 (in Chinese).
- [15] 王一航. 规则波作用下植物蜂巢生态护岸水动力特性研究[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2019.
- Wang Yihang. Study on Hydrodynamics of Ecologically Vegetated Honeycomb-type Revetment Under Regular Waves[D]. Tianjin: School of Civil Engineering, Tianjin University, 2019 (in Chinese).
- [16] Tschirky P, Hall K, Turcke D. Wave attenuation by emergent wetland vegetation[C]//27th International Conference on Coastal Engineering (ICCE). Sydney, Australia, 2000.
- [17] Lara J L, Maza M, Ondiviela B, et al. Large-scale 3-D experiments of wave and current interaction with real vegetation. Part 1: Guidelines for physical modeling[J]. *Coastal Engineering*, 2016, 107: 70-83.
- [18] Zhang J F, Zhang N, Zhang Q H, et al. Numerical simulation of wave overtopping of an ecologically honeycomb-type revetment with rigid vegetation[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(11): 1615.
- [19] 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 (in Chinese).
- [20] 张 娜, 张金凤, 张庆河, 等. 规则波作用下柔性植物蜂巢护岸水动力特性试验研究[J]. *天津大学学报 (自然科学与工程技术版)*, 2021, 54(5): 441-449.
- Zhang Na, Zhang Jinfeng, Zhang Qinghe, et al. Experimental study of the hydrodynamics of revetment protection using honeycomb-type, flexible plants under the action of regular waves[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2021, 54(5): 441-449 (in Chinese).

(责任编辑: 武立有)