



新型浮式植物体消浪试验

赵东梁¹, 刘毅¹, 喻国良²

(1. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北武汉 430040;

2. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 针对一种浮式植物消浪装置的消浪效果展开试验研究, 在植物高度大于波高的前提下, 分析其在规则波作用下消浪效果的影响因素, 通过大量水槽试验给出了植物消浪装置透射系数及反射系数与植物密度、植物带相对宽度、波陡之间的关系。研究表明, 该浮式植物消浪装置具有良好的消浪效果, 在植物带高度大于波高的前提下, 植物带密度和相对宽度是影响消浪效果的最重要因素。

关键词: 浮式植物带; 透射系数; 规则波; 防波堤

中图分类号: U 653.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)08-0048-07

Effectiveness of floating wave dissipater with vegetation planted

ZHAO Dong-liang¹, LIU Yi¹, YU Guo-liang²

(1. Key Laboratory of Large-Span Bridge Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Wuhan 430040, China;

2. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The paper investigates the effectiveness of wave dissipation of a new type of breakwater which is a floating structure with vegetation planted. Under the premise that the height of the vegetation is higher than the wave, the factors influencing the effectiveness of wave dissipation of the floating wave dissipater in unidirectional regular wave environments are analyzed. Based on comprehensive experimental flume data, the effectiveness of wave dissipation of the floating wave dissipater with vegetation planted under regular wave are correlated with the plant density, relative width of the structure and wave steepness. The experiment results show that the plant density and the relative width of the structure are the most important factors affecting the wave dissipation, and this floating wave dissipater with vegetation planted plays a significant role in wave dissipation.

Keywords: floating vegetation wave dissipater; transmission coefficient; regular wave; breakwater

波浪是造成岸线、滩涂侵蚀的一个主要动力因素, 近岸破碎波浪掀沙往往危及堤岸安全。波浪也是近岸带和湖滨带水生植物的破坏因子, 大波浪不但使水生植物无法根植, 而且可直接损毁已有水生植物。因此, 通过消浪工程对岸线及海滨、湖滨水生带的保护往往是必要的。工程上常用的消浪方法有实体坝(堤)消浪、透空坝(堤、桩)消浪、植物消浪。在植物消浪方面, 国内外

就刚性植物和柔性植物两方面都开展了不少研究, 仍然是一个热点课题。Mendez^[1]提出了一种植被地区波浪计算模型, 包括在不同水深下植被地区的消波和波浪破碎。Möller^[2]针对英国东海岸湿地植物发展了一种通过数字照相技术评估植物密度的方法, 进而调查了大片湿地植物对孤立波波高的削减作用。Augustin等^[3]利用水槽试验和数值模拟研究了挺水和非挺水湿地植物的消浪。Kassi

收稿日期: 2015-05-28

作者简介: 赵东梁(1987—), 男, 助理工程师, 从事海洋工程研究。

等^[4]利用天然海滨湿地观测数据在评估刚性植物消浪模型和植物波浪耦合运动模型时发现, 柔性植物的消浪效果是刚性植物的一半; 模型必须选择合适的拖曳力系数。Philip 等^[5]通过水槽试验和数值模拟, 研究了非均匀植物波高的削减规律。在国内, 早在 1965 年, 南京水科院的章家昌^[6]在室内模拟平台上和野外平缓的滩地上种植防波林, 试验考虑了林木主干和林木枝叶的消波作用, 以及林木枝叶沿树干分布, 提出了计算林木的消波性能公式。颜学恭等^[7]对长江中下游防浪林不同类型林带结构进行了原型的消浪效果观测试验, 根据实测数据, 防浪林排数在 6 ~ 9 排可消浪 33% ~ 38%, 10 ~ 15 排可消浪 49% ~ 57.6%, 20 ~ 25 排可消浪 64% ~ 71%, 消浪效果显著。杨建明^[8]对护岸植物消浪效果进行的试验表明: 植物带的宽度越大, 消浪效果越好; 水淹植物越深 (不及植物顶), 消浪效果越明显; 当波浪周期达到某一值时, 植物摇摆和波浪趋于同步, 此时消浪作用几乎消失。

目前, 随着我国对生态环境和生态景观的日益重视, 为实现工程价值与环境景观的效益最大化, 宜将消浪技术与生态景观有机结合。为此, 本文拟对浮式植物消浪装置的消浪效果展开试验研究。

1 试验介绍

1.1 试验设计

试验在多功能水槽内进行, 水槽长 12 m、宽 1 m、深 0.8 m, 造波周期范围 0.5 ~ 5 s, 两端有良好的消波设施。浮式植物消浪装置见图 1, 植物种植在由高分子材料制成的矩形植物生长框内, 生长框高 7.5 cm, 生长框两侧浮筒为两端封闭的 PVC 管, 为生长框提供漂浮力。生长框长为 98 cm。试验中选用高 22 cm、头径为 6.046 cm 的圆叶聚乙烯刚性植物, 在试验条件下植物不倒伏, 且高出生长框上沿 8.5 cm, 确保入射波高小于植物高度。根据消波装置尺寸, 试验水深范围取 30 ~ 60 cm, 入射波高范围 4 ~ 8 cm。

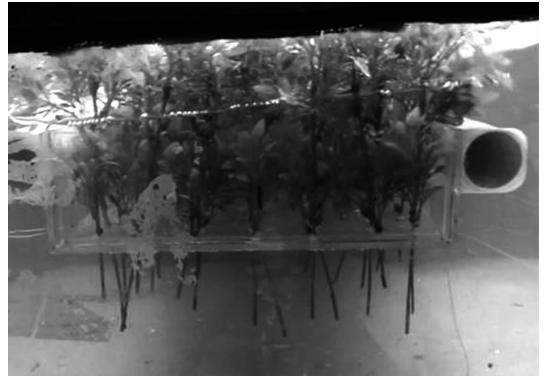


图 1 试验中漂浮式植物消浪装置

试验的整体布置见图 2, 植物生长框浮于水面, 生长框迎浪侧和背浪侧分别对称布置两根锚绳, 锚绳中部悬挂重物, 底端固定于底床; 在锚绳中部适当增加重力以保持装置在波浪作用下的稳定性; 适当增加生长框内碎石, 使生长框在静水条件下其上缘与水面齐平。漂浮式植物消浪装置距离造波机 5 m, 在波浪作用下在水槽中做二维运动。装置前后 1.5 m 处各布置两个浪高仪用于记录波面变化, 浪高仪 1[#]、2[#]的间距与浪高仪 3[#]、4[#]的间距均为 0.25 m, 测量数据采用 Goda 两点法^[9]分离出反射波高和透射波高, 进而求得反射系数及透射系数。试验开始前对所用测量仪器进行标定校准, 保证测量数据的准确性。

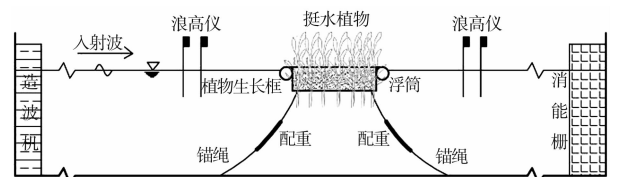


图 2 试验整体布置

1.2 试验工况

试验中, 水深 0.35 m, 分别针对 2 种入射波高、4 种周期 (0.881、0.784、0.693、0.640 s) 的规则波、5 种不同植物生长框宽度、9 种不同植物密度开展试验, 试验共计 360 组, 试验工况见表 1。采用 SDA100 传感器数据采集系统进行波高采集, 采样间隔为 0.01 s, 每次采样时间取 120 s, 每组试验至少重复 3 次, 结果取其平均值。

表1 试验工况

水深 d/m	波高 H/m	装置宽度 B/m	植物密度 ρ
0.35	0.08	0.45、0.35、0.25、 0.20、0.15	2.010、1.809、1.608、1.407、 1.212、1.005、0.804、0.603、0
0.35	0.06	0.45、0.35、0.25、 0.20、0.15	2.010、1.809、1.608、1.407、 1.212、1.005、0.804、0.603、0

2 消浪效果试验结果分析

影响植物生长框消浪效果的因素有：植物刚度、植物密度、植物茎叶情况、植物生长框宽度、入射波高、植物生长框入水深度及挺水高度、植物根须入水情况等。植物的消浪情形非常复杂，为简化起见，模拟植物挺水高度均大于越浪高度，挺水部分茎叶分布均匀，植物生长框挺水高度为0，模拟植物在消浪过程中基本没有发生倒伏，植物生长框入水深度、植物根须入水情况保持不变，且入水深度所占水深的比例大于1/8。本文用透射系数和反射系数反映装置的消浪效果，则生长框透射系数 C_t 与各影响因素之间的关系可以表示为：

$$C_t = H_t/H_i = f_1(\rho, B, H, L, d) \quad (1)$$

式中： C_t 为透射系数； H_t 为消浪装置后透射波高； H_i 为装置前入射波高； ρ 为植物密度； B 为装置宽度； L 为波长； H 为波高； d 为试验水深。

为便于无量纲化和简化测量、计算，定义植物密度 ρ 为植物头径面积之和与植物生长框底板面积的比值，即：

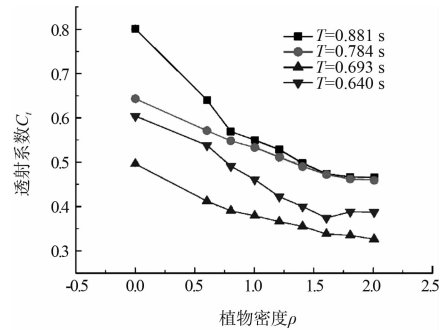
$$\rho = \left(\frac{\pi D^2}{4} \cdot N \right) / S \quad (2)$$

式中： D 为单棵植物的头径； N 为矩形框内植物棵数； S 为植物生长框底板面积。

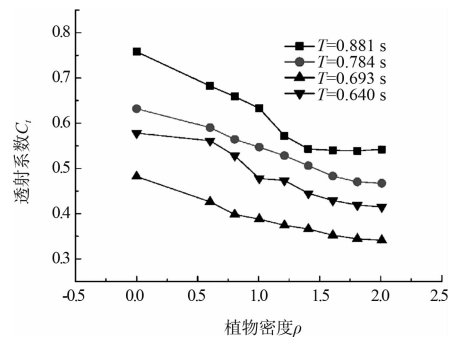
2.1 植物密度对消浪效果的影响

如图3所示，在水深0.35 m，波高为0.08、0.06 m，入射波周期为0.881、0.784、0.693、0.640 s和植物生长框宽度为0.35 m的情况下，透射系数都是随植物密度的增大而减小，且当植物密度大于1.6时，透射系数减小的趋势逐渐变缓，最后趋于一个常数。这说明，当植物密度大到一定程度之后，装置的消波效果进一步提升的空间小，即：继续增加植物密度对改善装置的消

波效果影响不大。本组试验表明，无论入射波高为0.08 m还是0.06 m，都是在入射波周期为0.693 s、植物密度接近2.0时消浪效果最好，消浪效率大约为66%。



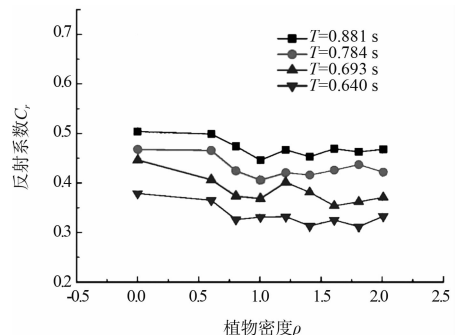
a) 入射波高为8 cm



b) 入射波高为6 cm

图3 透射系数 C_t 与植物密度 ρ 的关系

从图4中可以看出，对于宽度为45 cm的消浪装置，无论入射波高是8 cm还是6 cm，反射系数都是随着入射波周期的增大而增大，即入射波波长越大，反射系数就相应增大。同时反射系数基本都在0.3~0.55，说明入射波频率在试验中对反射系数的影响有限。另一方面，从图4中可知，无论是哪种频率的入射波，随着植物密度的改变，反射系数基本上都处于水平线附近，说明反射系数不随植物密度的改变而变化。



a) $B=45$ cm, $H=8$ cm

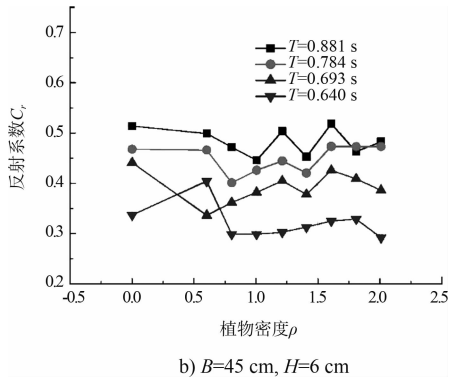


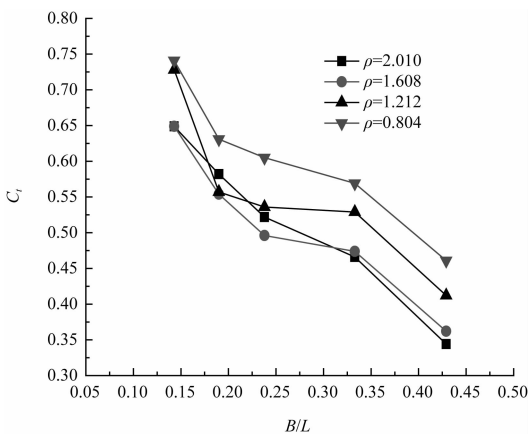
图 4 反射系数 C_r 与植物密度 ρ 的关系

2.2 相对宽度对消浪效果的影响

从图 5a) 中可知, 在周期为 0.881 s、入射波高为 8 cm、相对宽度为 0.15 ~ 0.43, 透射系数随相对宽度的增大而减小, 在相对宽度约为 0.43 时, 植物密度为 2.010 对应的透射系数最小, 大约为 0.35。从图 5b) 中可知, 波高为 8 cm、周期为 0.640 s 时, 在相对宽度为 0.22 ~ 0.70, 消浪装置的透射系数随浮式植物消浪装置相对宽度的增大先减小至一个最小值而后增大。在相对宽度为 0.37 时, 植物密度为 2.010 对应的透射系数最小, 也约为 0.35。从图 5 中反射系数和消浪体相对宽度的关系可知, 透射系数在某一相对宽度值附近达到最小值。图 5b) 中透射系数值并没有随相对宽度的增加逐渐减小最终趋于一个平衡值, 这与极值理论不相符, 应是试验数据不充分所致。

2.3 入射波波高对消浪效果的影响

图 6 为在入射波周期分别为 0.881、0.640 s 时, 植物密度为 2.010、0.804 的情况下, 不同入



a) 波高 8 cm, 周期 0.881 s

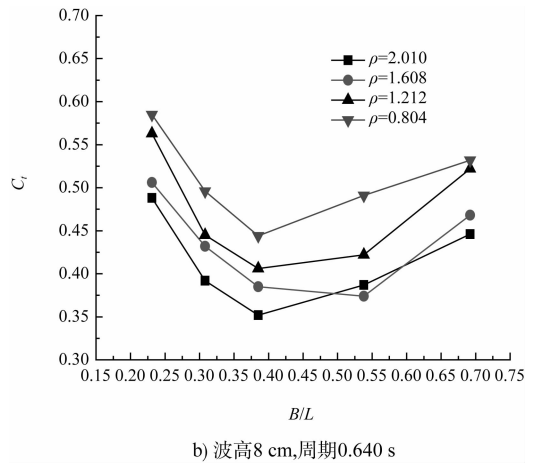
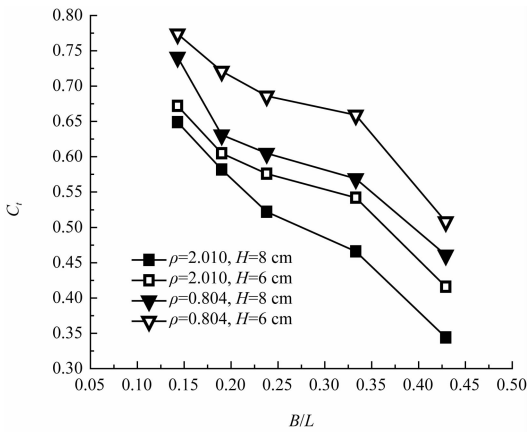
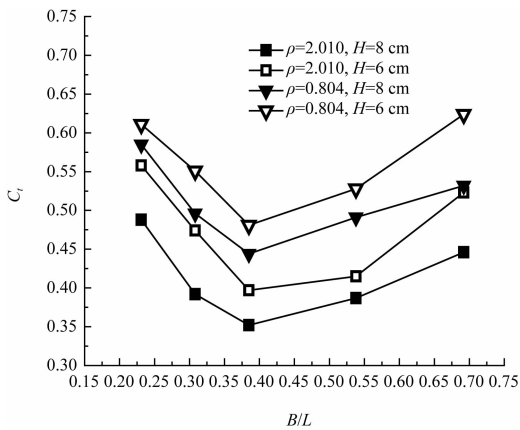


图 5 透射系数 C_t 与相对宽度 B/L 的关系

射波高的消浪装置透射系数随相对宽度的变化关系。从图 6 可知, 对于不同的入射波周期, 在植物密度相同的情况下, 波高为 0.08 m 所对应的透射系数小于波高为 0.06 m 所对应的透射系数, 这是因为试验中所选用的植物下部叶子少, 上部枝叶较多, 在波浪作用下上部枝叶较多部分对波浪消减作用更好的缘故。当水深淹没植物时, 波浪形成的大量水质点沿椭圆形轨迹有规律地运动, 植物随消浪装置的摇摆将水质点的椭圆形运动轨迹破坏, 所以波浪得以消减, 因此, 植物枝叶处于波浪运动区域越多对波浪的消减作用越明显。当波浪通过跃浪进入消浪装置的水深较浅时, 植物主要通过枝干部分来消减波浪, 枝干的摇摆运动幅度较小, 波浪会产生绕流现象, 对波浪的消减作用不明显。当跃浪进入消浪装置的水深太深时, 水深在波浪水质点集中运动区域的上方, 水质点的椭圆运动在水面以下自上而下逐渐减弱, 因此, 其消浪效果也不明显, 所以试验过程中必须保证挺水植物的高度大于跃浪的最大高度。波高较大的波浪水质点的椭圆运动较为强烈, 波浪可以充分带动植物枝叶运动, 植物枝叶的运动打乱了水质点的运动轨迹, 致使波浪发生破碎; 波高较小时, 波浪难以充分带动植物上部枝叶的运动。所以, 在入射波波高的合理范围之内, 适当增加入射波波高反而可以增大对波浪的衰减作用。



a) 周期为0.881 s

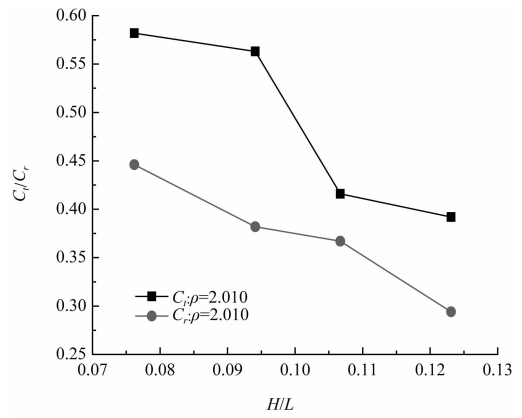


b) 周期为0.640 s

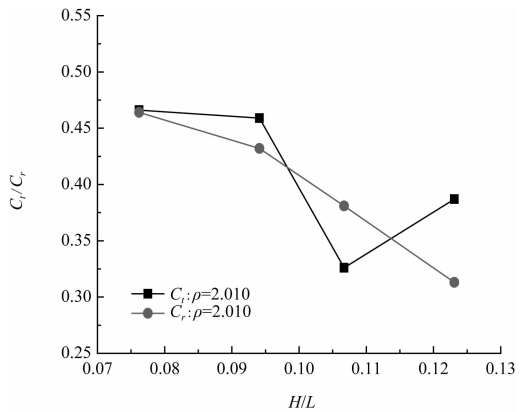
图6 透射系数 C_t 与波高 H 的关系

2.4 波陡对消浪效果的影响

为考察植物消浪装置消浪性能与波陡的关系，测量了在植物密度为 2.010 情况下的透射系数和反射系数，波陡对装置消浪效果的影响见图 7。从图 7 中透射系数及反射系数随波陡的变化结果可知，波陡对消浪装置的透射系数及反射系数有一定的影响，两种宽度的消浪装置入射波高是 8 cm 时，反射系数都是随波陡的增加而减小，说明波长越长反射系数越大。从图 7a) 可知，透射系数随波陡的增加而减小，但在图 7b) 中，透射系数随波陡的增大先抑后扬，当波陡为 0.106 时，透射系数最小大约为 0.32。这一极值点说明，当满足试验条件的波高为一定值时，植物消浪装置只是对一定范围内的波长的波浪有比较理想的消浪效果。



a) $B=20\text{ cm}, H=8\text{ cm}$

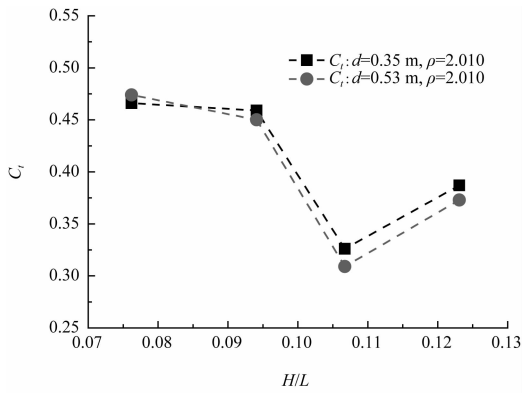


b) $B=35\text{ cm}, H=8\text{ cm}$

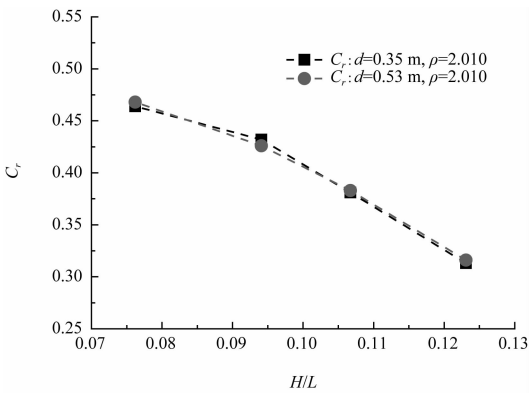
图7 透射系数、反射系数随波陡变化关系

2.5 水深对消浪效果的影响

在消浪装置中植物密度为 2.010 的前提下，将水深为 0.53 m 时的试验结果与水深为 0.35 m 时的试验结果进行对比分析（图 8）。根据图 8a) 可知，当水槽中试验水深增大时，装置的消浪效果略微变好，这是因为试验水深增加，试验过程中水槽底面对波浪的影响减小，波能在传递过程中自身损耗较小的缘故。但是，从图 8a) 中可知，试验水深对消浪效果的影响不大，透射系数的差值在 4% 以内。另一方面，由图 8b) 可知，水槽中试验水深的改变对反射系数基本上没什么影响，这是因为试验水深增加之后，入射波浪要素没有改变，消浪装置自身结构也没有变化，所以消浪装置前的反射波基本上与试验水深改变之前相同。



a) B=20 cm, H=8 cm



b) B=35 cm, H=8 cm

图 8 不同水深的装置透射系数及反射系数对比

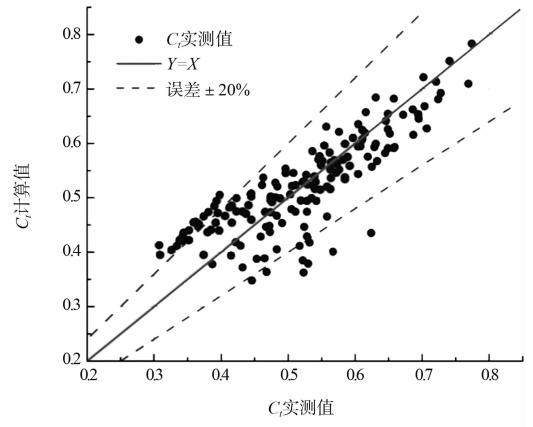
2.6 消浪效率公式

通过以上对消浪效果与其影响因素关系的分析, 忽略试验水深对消浪效果的影响, 从 360 个试验工况中选取 160 个, 对其试验数据做回归分析, 得到透射系数和反射系数的无量纲公式为:

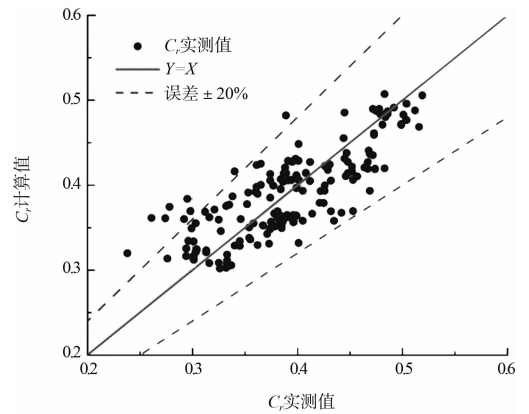
$$C_t = 0.262 \cdot 5 \left(\frac{1}{\rho} \right)^{0.1994} \cdot \left(\frac{B}{L} \right)^{-0.3292} \cdot \left(\frac{H}{L} \right)^{-0.1429} \quad (3)$$

$$C_r = 0.075 \cdot 6 \left(\frac{1}{\rho} \right)^{0.1753} \cdot \left(\frac{B}{L} \right)^{-0.0268} \cdot \left(\frac{H}{L} \right)^{-0.6033} \quad (4)$$

从图 9 可知, 试验实测的透射系数、反射系数数值与由式(3)、(4)得到的计算值基本吻合, 实测值与计算值的相关系数均高于 0.8, 超过 90% 的实测值与计算值的误差在 20% 以内。公式及试验数据表明, 该装置具备足够的植物密度和植物宽度, 可以削减来波的波高达 65%。



a) Ct 值



b) Cr 值

图 9 Ct、Cr 计算值与实测值比较

该装置的消浪效果与颜学恭等^[7]介绍的长江中下游不同结构防浪林的消浪效果相当, 但略低于浙江南部沿海的生物促淤海岸防护工程中互花米草的消浪效果。导致消浪效果偏低的原因可能在于, 植物生长框在水面上水平方向的固定欠佳, 植物生长框的前后运动导致了次生波的出现, 以及植物后方产生的尾涡相对于固定在床面上的刚性植物而言要小, 因此, 其消浪效率相对偏低。但与 Möller^[2]的野外调查结果相比, 该装置削减来波效率比英国东海岸湿地植物消浪效率高, 后者最大约 35%。英国东海岸盐沼植物为草类, 在波浪作用下的刚度小, 能够随波逐流, 因此, 其消浪效率低于刚性植物。

值得指出的是, 式(3)存在一些局限性, 如对植物茎叶分布、框体和植物根入水的相对深度、植物刚度等因素应进一步考虑。植物密度基本上对消浪装置的反射系数没有影响, 试验水槽中的

水深对反射系数影响非常小，所以，式(3)并没有考虑水深的影响。同时，本次试验中相对植物宽度的范围为0.143~0.692，波陡的范围为0.057~0.123，因此，要想进一步精确测量消浪装置的透射系数和反射系数，植物宽度及波高的试验组次也应增加。另一方面，消浪装置浮于水面，通过柔性体锚绳与试验水槽槽底相连，所以植物生长框的水平固定、锚绳的受力等有待深入开展研究。

3 结语

1) 该浮式植物消浪装置具有良好的消浪效果，在足够的植物密度和装置宽度情况下，消浪效率接近65%。

2) 在受规则波作用下，消浪装置的植物密度和植物生长框相对宽度是影响消浪效果的主要因素。

3) 在本试验条件下，植物密度越大，消浪效果越好，当植物密度超过1.6时，消浪效果趋于稳定；相对宽度在0.37~0.55，消浪效果最好，当相对宽度>0.55时，消浪效果又逐渐变差，说明固定的消浪装置对某一定频率的波浪消浪效果最佳。

4) 试验过程中保证发生跃浪且最大跃浪高度不大于植物的挺水高度的条件下，大波高反而会出现好一点的消浪效果。

5) 在消浪装置高度与试验水深比值在1/8~1/4时，改变试验水深对消浪效果的影响不大。消浪装置植物密度和试验水深基本对反射系数没有影响。

参考文献:

- [1] Fernando J M, Inigo J L. An empirical model to estimate the propagation of random breaking and non-breaking waves over vegetation fields [J]. Coastal Engineering, 2004, 51(2): 103-118.
- [2] Möller I. Quantifying salt marsh vegetation and its effect on wave height dissipation: Results from a UK East coast salt marsh [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, 69(3): 337-351.
- [3] Augustin L N, Irish J L, Lynett P. Laboratory and numerical studies of wave damping by emergent and near-emergent wetland vegetation [J]. Coastal Engineering, 2009, 56(3): 332-340.
- [4] Kassi C R, Stephen M H, Julia C M. Wave dissipation by flexible vegetation [J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(18): 1 029-1 033.
- [5] Philip J B, Daniel T C, WU W C. Laboratory observations and numerical simulations of wave height attenuation in heterogeneous vegetation [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2014, 140(1): 56-65.
- [6] 章家昌. 防波林的消波性能[J]. 水利学报, 1965, 12(2): 49-52.
- [7] 颜学恭, 曾祥培, 徐德新. 长江中游防浪林消能效益分析与研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 30(3): 51-53.
- [8] 杨建明. 植物消浪护岸动力机制理论分析与模型试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [9] Goda Y, Suzuki Y. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments[C]. Proc 15th Conf on Coastal Engineering: ASCE, N. Y., 1976: 828-845.

(本文编辑 武亚庆)

编辑部声明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动，他们建立伪网站，利用代理投稿和承诺上刊等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明，从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿和审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址：www.sygc.com.cn，敬请广大读者和作者周知并相互转告。