

# 箱型浮式消浪设施水动力特性研究

于定勇, 谢雨嘉, 黄东燕, 赵建豪

(中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100)

**摘要:**为研究敷设消浪材料不同构造浮箱的消浪性能,通过物模试验得到规则波作用下不同周期、不同波高、不同锚泊方式及不同结构形式下浮箱的透射系数( $C_t$ )、反射系数( $C_r$ )及波能衰减系数( $C_s$ )。研究表明:随着相对堤宽( $B/L$ )的增大,不同构造浮箱的透射系数均逐渐减小,反射系数逐渐增大,波能衰减系数逐渐增大;敷设消浪材料的浮堤相比于单浮箱透射系数减小了 0.10 左右,而采用方箱-垂直板式构造的浮堤消浪性能相对于单浮箱透射系数减小了 0.10~0.15,且敷设消浪材料的浮堤结构在研究的 2 种波高下,相对堤宽达到 0.30 时,透射系数可减小到 0.25;当浮堤采用张紧式锚泊时,其消浪性能相对于悬链式锚泊浮堤减小了 0.10 左右,通过对比不同构造浮箱的消浪性能,可为实际工程设计提供参考。

**关键词:**浮箱;物模试验;消浪性能;透射系数;反射系数

**中图分类号:**U656.2; P731.22

**文献标识码:**A

**文章编号:**1002-3682(2019)03-0187-07

**doi:**10.3969/j.issn.1002-3682.2019.03.003

**引用格式:** YU D Y, XIE Y J, HUANG D Y, et al. Study on hydrodynamic characteristics of floating box-type wave-dissipating facilities[J]. Coastal Engineering, 2019, 38(3): 187-193. 于定勇, 谢雨嘉, 黄东燕, 等. 箱型浮式消浪设施水动力特性研究[J]. 海岸工程, 2019, 38(3): 187-193.

箱型浮式消浪设施由多个单元体相互链接构成,可以根据需求调整设施长度,通常布置形式采用并列布置,当对掩护水域的消浪效果要求较高时,可采用双排浮箱串列布置的方式提高箱型浮式消浪设施的消浪性能,该方式施工方便,易于安拆和撤回,能够灵活便捷地适应掩护区域的消浪需求;设施采用锚链锚固,锚泊方式主要有悬链式锚泊和张紧式锚泊,底部透水,有利于水质交换,相对于传统防波堤造价较低,无论是在深海还是在近海的海洋牧场建设、应急抢险等方面均有一定的应用需求。

浮式消浪设施的诸多优点和应用价值使得学者们对其结构形式、锚固系统、透射系数计算等方面开展了许多研究,其中改进结构形式以提高其消浪性能是研究中的关注重点。Williams 和 ABUL-AZM<sup>[1]</sup>将 2 个矩形截面的柱型浮体通过上部的刚性甲板连接,并采用数值方法研究了双柱形浮体组合浮堤的水动力特性,研究发现结构的波浪反射特性与浮筒的宽度、吃水和间距以及系泊索刚度有很大的关系。杨彪等<sup>[2]</sup>利用物理模型实验研究了双浮箱-双水平板式浮堤的水动力特性,结果表明在双浮箱下面安装两层水平板能有效提高防波堤的消浪性能,显著减小防波堤的运动响应。Abdolali 等<sup>[3]</sup>通过实验比较了箱型、T 型和  $\pi$  型防波堤的消浪性能, $\pi$  型防波堤相对而言透射系数较小,增加相对宽度和相对水深明显降低了 T 型和箱型浮堤的透射系数。Mani<sup>[4]</sup>在传统浮箱底部安装了一排等间距的圆柱,通过实验研究了波浪参数、相对水深、宽度以及圆柱之间间距比等参数对消浪性能的影响,研究表明这种结构在降低相对宽度 0.15 的情况下能够实现小于 0.5 的透射系数,降低了造价。Chen 等<sup>[5]</sup>提出了一种双浮筒带网笼的浮堤单元体,并通过物模实验比较了传统双浮筒、浮箱和文中提出的浮体的性能,相比于传统的箱式浮式防波堤,这种浮堤具有更好的防波堤性能,说明采用带球网箱的防波堤能显著降低波浪的透射率。赵东梁等<sup>[6]</sup>设计了一种挺水植物制成的消浪装置,在一定的植物密度和宽度下,消浪效率能达到 65%。

**收稿日期:**2019-03-17

**资助项目:**国家自然科学基金项目——桩基环保型防波堤的基础理论与设计方法(51739010)

**作者简介:**于定勇(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事海浪与海上结构物相互作用方面研究. E-mail: dyu01@ouc.edu.cn

(王 燕 编辑)

综上,目前提高浮堤的消浪性能主要通过改变结构型式或利用多个类型浮体构成组合型浮堤来实现,虽然在一定程度上提升了性能,但增加了工期和施工的难度。因此,本文通过在单浮箱上敷设消浪材料,采用物理模型试验对不同构造的浮箱在多种工况下的消浪性能进行了对比研究,研究结果可为浮式防波堤的设计和工程应用提供参考。

## 1 方箱-消浪材料式浮堤水动力特性物模试验

### 1.1 模型设计

试验水槽为长 81.0 m、高 2.6 m、宽 1.4 m 的室内水槽;水槽试验段用高 2.6 m,长 40 m 的玻璃隔板分隔为宽分别为 0.6 m 和 0.8 m 的两部分,本文试验在 0.6 m 一侧进行实验。水槽一端安装有低惯量直流电机式造波机,能够产生波形平稳,满足要求,重复性较好的规则波及不规则波,造波机另一端水槽安装消能设施,能够吸收波浪能量减少波浪反射,其反射率满足试验规程要求。

试验数据的初步采集及处理采用 DS-30 系统,该系统由控制系统和传感器组成,具有实时监控、数据采集和数据处理等多项功能,性能稳定,精度可靠,可以满足试验需要。

原型尺度为 11.2 m×9 m×5 m 浮式方箱,根据波浪模型试验规程<sup>[7]</sup>,采用重力相似准则,模型比尺  $\lambda$  为 20。为研究不同模型构造和锚链布置下浮堤的消浪性能,设置了 4 组模型(表 1),其模型示意图如图 1 所示。

表 1 浮堤试验模型类型

Table 1 Types of the test models of floating breakwaters

模型名称	结构型式	锚泊方式
模型一	56 cm×45 cm×25 cm 浮式方箱	悬链式锚泊
模型二	在模型一的迎浪面及背浪面敷设多孔消浪材料	悬链式锚泊
模型三	将模型二敷设的消浪材料向下伸长 5 cm	悬链式锚泊
模型四	与模型三相同	张紧式锚泊

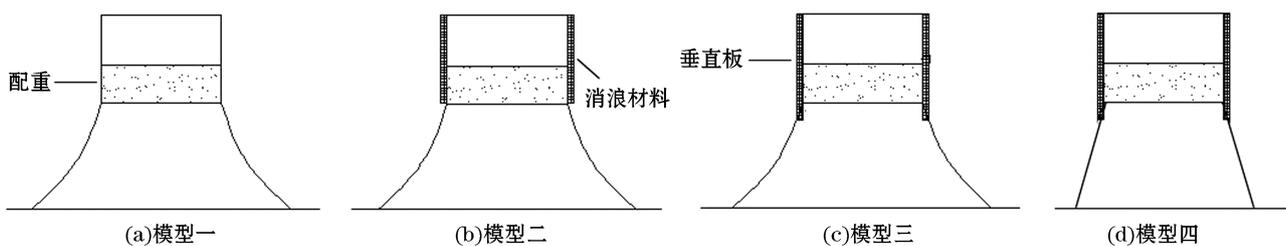


图 1 4 种模型示意

Fig.1 A sketch map of the four model types

模型二、三和四采用的消浪材料是一种塑料消浪丝束板材,宽度为 56 cm,厚度为 3 cm,采用优质改性 PP 高分子树脂材料,经挤塑、热熔、模塑成形的空间立体网络蜂窝状硬质丝束板材,其材料外观如图 2 所示。其相关具体技术指标:空隙率(%) $\geq 90$ ;丝条空间细密度( $m/m^3$ ) $\geq 30\ 000$ ;原材料密度( $g/cm^3$ ) $\geq 0.9$ 。



图 2 消浪材料

Fig.2 Wave-dissipating material

## 1.2 试验工况及方法

采用规则波进行试验,试验水深为 60 cm,浮箱的吃水为 18 cm,4 种模型分别选用波高 4 cm 和 6 cm(2 种),周期 0.98 s,1.07 s,1.16 s,1.29 s,1.43 s,1.67 s 和 1.85 s(7 种),共计 56 个工况。

利用 DS-30 系统对波面过程线进行采集,采样间隔 0.02 s,采样次数 1 024 次,在形成的波形较为稳定的有效时间段内进行采样,对每个工况试验进行重复,每次测量值的误差应小于 5%,根据试验结果调整试验次数,重复次数不应小于 3 次,将异常数据排除后,取 3 次试验结果的平均值作为最终结果。根据 Goda<sup>[8]</sup> 两点法利用 MATLAB 编程分离入射波和反射波,得到较为准确的反射波高,计算反射系数( $C_r$ ),并进一步计算透射系数( $C_t$ ),其计算公式为

$$C_r = H_r / H_i, \quad (1)$$

$$C_t = H_t / H_i, \quad (2)$$

式中, $H_r$  为反射波高, $H_i$  为入射波高, $H_t$  为透射波高。求得反射系数和透射系数以后,可得能量耗散系数  $C_s$ :

$$C_s = \sqrt{1 - C_r^2 - C_t^2}。 \quad (3)$$

堤前和堤后分别布设 2 个相邻的波高仪,用于两点法分离入射波和反射波。相邻 2 个波高仪的距离需要合理布置,对于规则波,距离应该为  $0.05L_{\max} \sim 0.45L_{\min}$ ,本试验的波长范围为 1.12~5.36 m,因此取 2 个波高仪距离为 0.35 m,满足实验要求。浪高仪与模型的距离应当大于  $0.25L$ ,试验中 2 个波高仪距离模型的距离为 1.2 m,能够满足试验要求,试验整体布置见图 3。

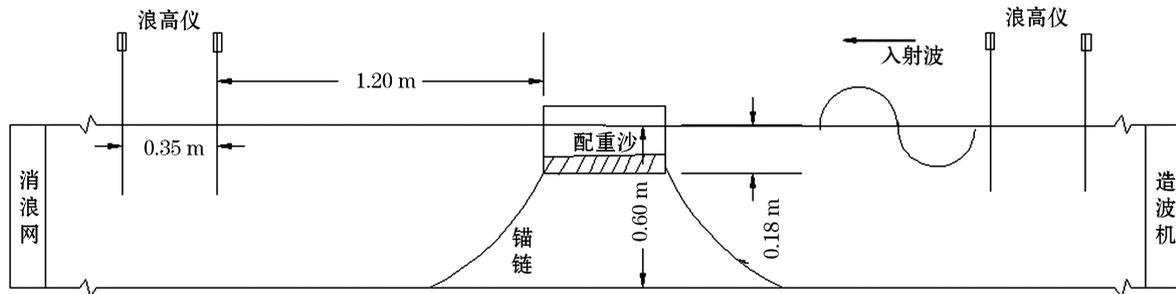


图 3 试验整体布置

Fig.3 Overall layout of the model tests

## 2 物模试验结果分析

### 2.1 不同相对堤宽下浮箱的消浪性能

基于测得的数据所计算的结果,以相对堤宽(浮堤宽度( $B$ )与波长( $L$ )之间的比值,即  $B/L$ )为自变量, $C_t$ , $C_r$ , $C_s$  分别为因变量作图,分析了不同相对堤宽下浮堤的消浪性能变化。不同试验周期下的相对堤宽( $B/L$ )见表 2。

在其他条件相同,入射波高分别为 4 cm 和 6 cm 的工况下,模型一的透射系数( $C_t$ )、反射系数( $C_r$ )及波能衰减系数( $C_s$ )变化分别见图 4a、图 4b 和图 4c。由图 4 可知:模型一  $C_r$  随  $B/L$  的增大而增大, $C_s$  也随  $B/L$  的增大而增大,而  $C_t$  却随  $B/L$  的增大而减小;但当波高从 4 cm 增加为 6 cm 时, $C_t$  减小,而  $C_r$  和  $C_s$  却均增大。对于单浮箱来说,波高增加时,波浪与浮箱的相互作用增强,亦增加了浮箱对入射波的反射和耗散,从而一定程度上减小了透射波高。

表 2 不同试验周期下的相对堤宽

Table 2 Relative breakwater width under different periods of tests

$T/s$	$L/m$	$B/L$	$T/s$	$L/m$	$B/L$
0.98	1.48	0.30	1.43	2.79	0.16
1.07	1.74	0.25	1.67	3.46	0.13
1.16	2.00	0.23	1.85	3.96	0.11
1.29	2.38	0.19			

注:空白处无数据

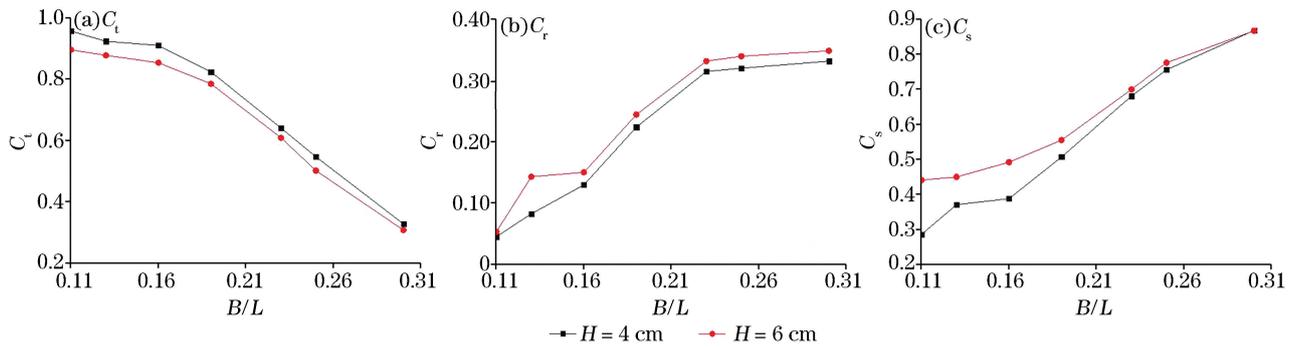


图 4 模型一的透射系数( $C_t$ )、反射系数( $C_r$ )及波能衰减系数( $C_s$ )随相对堤宽( $B/L$ )的变化

Fig.4 Changes of  $C_t$ ,  $C_r$  and  $C_s$  in model 1 with the relative breakwater width

对于敷设消浪材料且为方箱-垂直板式结构型式的模型三,其  $C_t$ 、 $C_r$  及  $C_s$  变化分别如图 5a、图 5b 和图 5c 所示。由图 5 可知:模型三的  $C_r$ 、 $C_s$  和  $C_t$  的变化趋势与模型一基本一致;对于敷设消浪材料的模型三,其  $C_t$ 、 $C_r$  和  $C_s$  在不同入射波高下相对模型一差距较小,在研究范围内的相对堤宽和波高下,消浪性能均好于单浮箱。

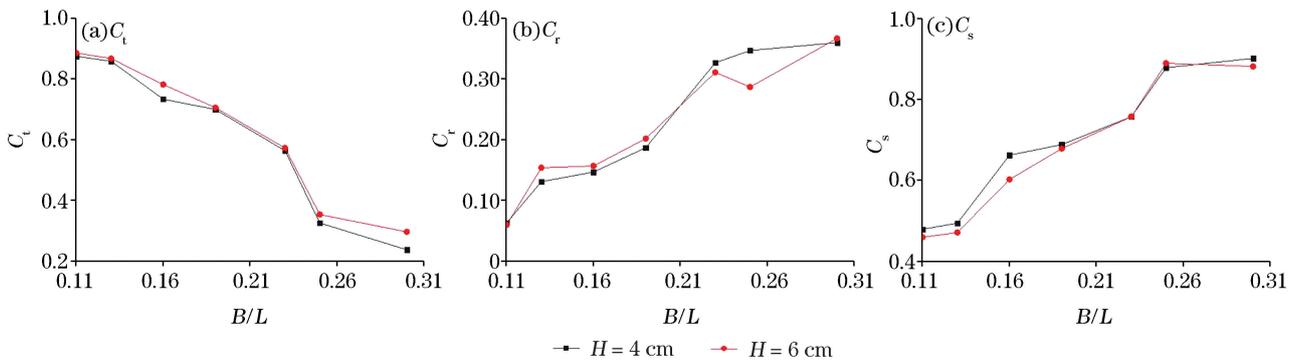


图 5 模型三的透射系数( $C_t$ )、反射系数( $C_r$ )及波能衰减系数( $C_s$ )随相对堤宽( $B/L$ )的变化

Fig.5 Changes of  $C_t$ ,  $C_r$  and  $C_s$  in model 3 with the relative breakwater width

## 2.2 不同锚泊方式下的消浪性能

模型三与模型四均为方箱-垂直板型即敷设消浪材料伸出的浮堤,模型三锚链有一定的拖地长度,为悬链式锚泊;模型四采用同一类型的不锈钢锚链,但锚链无拖地段,采用张紧锚泊。除锚链张紧状况不一

样外,水深及吃水深度等参数均保持相同。由于  $B/L$  对模型的消浪性能有一定影响,因此取  $B/L$  为自变量,便于比较不同锚泊方式下浮堤消浪性能的变化情况,模型三和模型四消浪性能结果对比如图 6 所示。模型四的  $C_t$  总体小于模型三(图 6a),且当  $0.15 < B/L < 0.25$  时,模型四  $C_t$  减小幅度较大,在  $H_i = 4$  cm 时,  $C_t$  值减小了约 0.15;在  $B/L < 0.15$ ,即较长周期波浪作用下,采用张紧式锚泊减小了透射波高,但减小幅度较小;在  $B/L > 0.25$ ,即较短周期波作用下,2 个模型的  $C_t$  较为接近。然而,模型三和模型四的  $C_r$  变化不大,锚固张紧形式对  $C_r$  的影响较小(图 6b)。模型四  $C_s$  较大,与  $C_t$  相对应,且当  $B/L$  为  $0.15 \sim 0.25$  时,  $C_s$  增加幅度更大(图 6c)。锚链张紧时增加了对模型的约束,波浪与模型相互作用增强,在  $C_r$  变化较小的情况下,所敷设的多孔消浪材料对入射波能量的耗散增加,导致  $C_t$  减小,在入射波高较小且  $B/L$  为  $0.15 \sim 0.25$  时,  $C_t$  的减小幅度较明显。

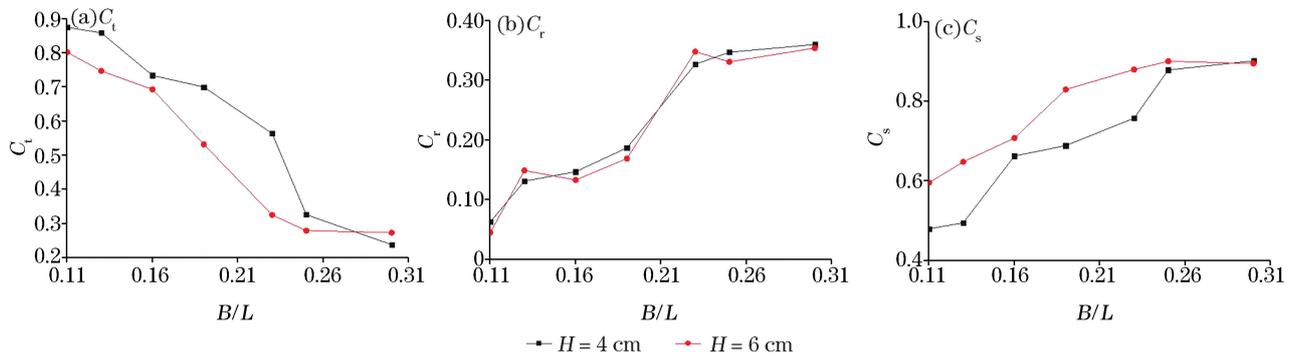


图 6 不同系泊形式下的透射系数( $C_t$ )、反射系数( $C_r$ )及波能衰减系数( $C_s$ )

Fig.6  $C_t$ ,  $C_r$  and  $C_s$  under the cases of different mooring types

### 2.3 不同结构型式浮堤消浪性能对比研究

研究 4 个模型的  $C_t$ ,  $C_r$  和  $C_s$ , 并对比其消浪性能可知:随着  $B/L$  的增加,4 种模型设置均呈现出相同的变化规律,均为  $C_t$  逐渐减小、 $C_r$  逐渐增大、 $C_s$  逐渐增大;当周期为 0.98,即  $B/L$  为 0.30 时,  $C_r$  约为 0.35,  $C_t$  小于 0.3;而当周期为 1.85,即  $B/L$  为 0.11 时,  $C_r$  下降到了 0.06 左右,此时  $C_t$  增加到 0.9 左右,这说明透射波高的减小主要受模型对入射波反射强弱的影响。模型四的  $C_t$  在相同周期入射波作用下最小,模型一  $C_t$  最大(图 7a)。不同模型的  $C_r$  整体差距较小,但模型一的  $C_r$  大于模型二,这说明多孔塑料消浪材料对波浪的反射效果要弱于密度较大的有机玻璃表面,敷设消浪材料的浮箱透射系数较小,主要是由于敷设多孔塑料消浪材料可以加强结构对波浪的耗散效果,从而减小了透射波高,达到提高消浪效果的作用(图 7b 和图 7c)。

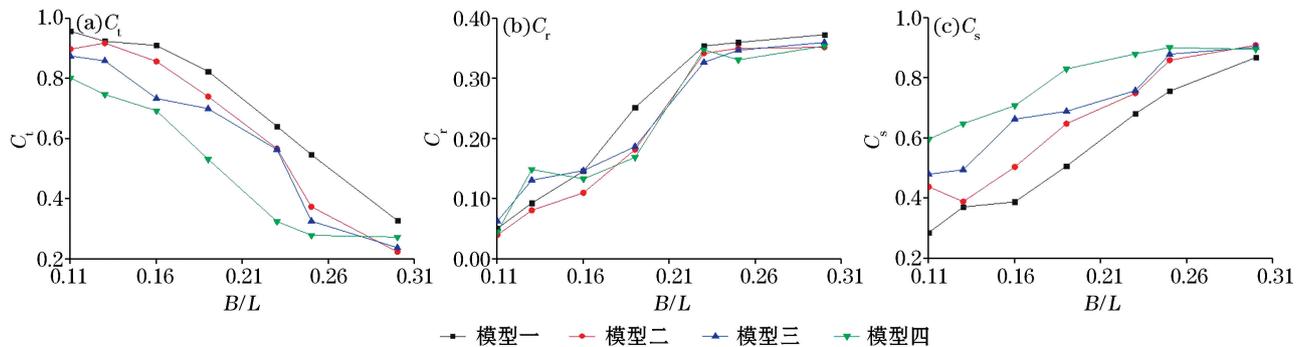


图 7 不同结构型式的透射系数( $C_t$ ),反射系数( $C_r$ )和波能衰减系数( $C_s$ )

Fig.7  $C_t$ ,  $C_r$  and  $C_s$  of the floating boxes with different structures

### 3 结 论

通过物理模型试验对不同锚链设置及结构型式共 4 种浮箱的消浪性能进行了研究,得到主要结论:

1)对于不同结构型式的浮堤,均有随着周期增加,波长增加,其相对堤宽( $B/L$ )减小时,反射系数( $C_r$ )逐渐减小,透射系数( $C_t$ )增大,波浪衰减系数( $C_s$ )减小的特性。

2)单浮箱在入射波高为 6 cm 时的透射系数( $C_t$ )小于入射波高为 4 cm 时的透射系数( $C_t$ ),敷设消浪材料后,浮箱在 2 种入射波作用下的  $C_t$  均有减小,此时入射波高为 4 cm 时的  $C_t$  小于入射波高为 6 cm 时的  $C_t$ ,说明该消浪材料对波高较小的波浪消浪效果更好。

3)采用张紧锚泊的浮箱  $C_t$  小于悬链系泊时的浮箱。在 4 种模型中,采用张紧锚泊,并敷设消浪材料的方箱-垂直板结构形式浮堤的  $C_t$  最小,消浪效果较好。

#### 参考文献 (References):

- [1] WILLIAMS A N, ABUL-AZM A G. Dual pontoon floating breakwater[J]. *Ocean Engineering*, 1997, 24(5): 465-478.
- [2] YANG B, CHEN Z J, WANG G Y, et al. Experimental investigation of twin pontoon-twin horizontal plate floating breakwater[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamic(Ser.A)*, 2014, 29(1): 69-82. 杨彪, 陈智杰, 王国玉, 等. 双浮箱-双水平板式浮式防波堤试验研究[J]. *水动力学研究与进展(A 辑)*, 2014, 29(1): 69-82.
- [3] ABDOLALI A, KOLAHDOOZAN M, TAHERSHAMSI A. Experimental study of the performance of floating breakwaters with heave motion[J]. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 2014, 47(1): 59-70.
- [4] MANI J S. Design of Y-frame floating breakwater[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1991, 117(2): 105-119.
- [5] JI C Y, CHEN X, CUI J, et al. Experimental study of a new type of floating breakwater[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 105: 295-303.
- [6] ZHAO D L, HAN M, YU G L. Experimental study on effectiveness of floating vegetation on wave dissipater[J]. *Water Resources Protection*, 2015, 31(5): 53-57. 赵东梁, 韩梅, 喻国良. 浮式植物体消浪效果的试验研究[J]. *水资源保护*, 2015, 31(5): 53-57.
- [7] Nanjing Water Conservancy Research Institute. Wave model test procedure: JTJ/J 234-2001[S]. Beijing: China Communications Press, 2002. 南京水利科学研究所. 波浪模型试验规程: JTJ/J 234-2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [8] GODA Y, SUZUKI Y. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments[J]. *Coastal Engineering Proceedings*, 1976, 1(15): 73.
- [9] ZHANG W, CHENG Y, MA Z, et al. Experimental study on effectiveness of floating vegetation on wave dissipater[J]. *Port Engineering Technology*, 2011, 48(3): 4-6. 张伟, 程勇, 马哲, 等. 浮式方箱防波堤的 AQWA 数值模拟研究[J]. *港工技术*, 2011, 48(3): 4-6.
- [10] MIZUTANI N, RAHMAN M A. Performance of submerged floating breakwater supported by perforated plates under wave action and its dynamics[C]//Sixth International Conference on Civil Engineering in the Oceans. ASCE, Baltimore, 2006: 329-341.

## Study on Hydrodynamic Characteristics of Floating Box-Type Wave-Dissipating Facilities

YU Ding-yong, XIE Yu-jia, HUANG Dong-yan, ZHAO Jian-hao  
(College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** In order to study the wave-dissipating performance of floating boxes with different structures and laid with wave-dissipating material, the transmission coefficient  $C_t$ , reflection coefficient  $C_r$  and wave-energy attenuation coefficient  $C_s$  of the floating boxes with different structures and mooring types are obtained by physical model testing under the action of regular waves with different periods and heights. The results indicate that with the increase of relative breakwater width ( $B/L$ ), the transmission coefficient of the floating boxes with different structures decreases gradually, and their reflection coefficient and wave-energy attenuation coefficient increase gradually. Comparing with a single floating box, the transmission coefficient of floating breakwaters laid with wave-dissipating material decreases by about 0.10, whereas the transmission coefficient of the floating breakwater with a square box-vertical plate structure decreases by 0.10~0.15. In the case that the relative breakwater width reaches to 0.30, the transmission coefficient of the floating breakwaters laid with wave-dissipating material decreases to about 0.25 at the two wave heights studied. When tensional mooring is adopted, the wave-dissipating performance of the floating breakwaters decreases by about 0.10 compared with that of the floating breakwaters applying suspended chain mooring. By comparing the wave-dissipating performance of the floating boxes with different structures, references can be provided for the design of practical engineering.

**Key words:** floating box; physical model test; wave-dissipating performance; transmission coefficient; reflection coefficient

**Received:** March 17, 2019