

# 垂直导桩锚固方箱-水平板式浮堤消浪性能试验研究

王永学\*, 董华洋, 郑坤, 刘冲, 侯勇

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 提出了垂直导桩锚固方箱-水平板式浮堤, 通过实验室物理模型试验研究了规则波作用下浮堤模型的消浪性能和升沉运动响应. 探讨了相对宽度、水平板层数、水平板与方箱间距等几何参数对浮堤消浪性能与浮堤升沉运动的影响及消浪性能与浮堤升沉运动的相关性. 试验结果表明提出的方箱-水平板式浮堤的消浪性能好于单一方箱, 在  $B/L$  (模型宽度与波长比) 为 0.2 时, 其透射系数比方箱模型透射系数减小约 0.2, 升沉高度比方箱模型升沉高度减小 0.3 倍入射波高. 通过对透射系数的主要影响因素进行多元回归分析得到了透射系数的拟合公式.

**关键词:** 浮式防波堤; 水平板; 垂直导桩; 消浪性能; 升沉运动; 拟合公式

**中图分类号:** U656.24      **文献标志码:** A

## 0 引言

浮式防波堤的锚固方式是影响其运动响应和消浪性能的重要因素, Bruce<sup>[1]</sup>、王永学等<sup>[2]</sup>都对此进行了详细的介绍. 浮式防波堤的锚固形式按其对运动响应的影响可分为锚链锚定和垂直导桩锚固. 锚链锚定的浮堤在波浪作用下有横摇、升沉和横荡 3 个自由度的运动; 垂直导桩锚固的浮堤在波浪作用下仅有升沉运动. 由于垂直导桩锚固方式限制了浮堤的横摇和横荡, 其消浪性能要比锚链锚定的浮堤好. 又因避免了锚链锚定方式会出现的锚链断裂或锚链与浮堤连接处出现裂缝等状况, 使浮堤安全性提高. 目前国外很多游艇码头, 使用该种浮堤结构消浪并兼做码头.

目前对于垂直导桩锚固防波堤消浪性能的研究工作还很少, 其结构型式也仅限于矩形浮箱. 姚国权等<sup>[3]</sup>提出了几种经过改进的矩形浮式防波堤并进行了规则波试验, 结果发现用立柱阻挡横向运动型的前壁开口浮堤相比锚系浮堤可以大幅度减小堤后透射波高. Isaacson 等<sup>[4]</sup>进行了固定式和升沉运动型浮式防波堤的透射系数、反射系数、升沉高度的物理模型试验, 得出方箱的相对宽度和

吃水是影响浮箱式防波堤消浪性能的重要参数.

Balah 等<sup>[5]</sup>通过物理模型试验研究了垂直导桩锚固方箱模型的升沉运动响应及其对透射系数、反射系数的影响. 结果表明垂直导桩锚固浮堤的消浪性能取决于升沉运动与堤前立波之间的相位差. 将垂直导桩锚固浮堤与多个文献中的锚链锚定浮堤消浪结果进行对比, 发现垂直导桩锚固的浮堤具有更高的衰减波浪的能力.

Koutandos 等<sup>[6,7]</sup>试验研究了规则波和不规则波作用下固定式方箱与做升沉运动的方箱在消浪性能上的差别. 不规则波试验结果表明固定式方箱和升沉运动型方箱浮堤的透射系数、反射系数和波能衰减系数随相对宽度  $B$  (模型宽度) 和入射波长  $L$  的变化趋势不是很明显, 与规则波结果有一定的差别.

本文提出一种在方箱下加水平板的垂直导桩锚固浮式防波堤型式, 称为垂直导桩锚固方箱-水平板式浮防波堤. 提出该防波堤的思想是利用相邻两层水平板的间距小于波浪水质点椭圆运动轨迹的短轴直径来破坏波浪水质点的升沉及产生波浪破碎现象, 从而起到衰减波能的作用. 本文通过物理模型试验研究其消浪性能, 并分析相对宽度、

板层数等因素对透射系数、反射系数及升沉运动的影响。

## 1 物理模型试验

### 1.1 试验设备和测量仪器

试验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室的浑水水槽中进行。水槽长 56.0 m、宽 0.7 m、高 1.0 m,最大试验水深为 0.7 m。为减小造波机产生的二次反射对试验结果的影响,将水槽中部试验段至尾段用玻璃板分隔成宽 0.45 m、0.25 m 两个区域,其中宽 0.45 m 的区域作为试验区域。试验水槽的前端安装有实验室自制的非规则波造波机,可产生规则波和非规则波。该造波机采用微机控制并配备数据采集系统。水槽的末端安装有消能网,用以吸收波浪能量以减少波浪反射。试验波要素测量采用实验室研制的 DLY-1 型波高、滤波、应变混合式测量仪,浮堤模型的反射波高与透射波高测量采用天津水运工程科学研究所研制的 2000 型数据采集系统,模型的升沉运动测量采用一套 CCD 图像采集设备,采样周期为 0.04 s,图像分辨率为 768 pixel×576 pixel。

### 1.2 试验模型设计

试验按照重力相似准则进行模型设计,试验水深 0.4 m,波浪为规则波,入射波高  $H_i$  为 0.07 和 0.10 m,周期为 0.81~1.55 s。

模型的主体为用有机玻璃制作的一矩形方箱, $h \times B \times l = 9 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 44 \text{ cm}$ 。方箱上表面粘有一个红色的发光二极管,试验时通过采集此二极管在多个周期内的运动图片分析浮式防波堤的升沉运动响应。方箱下部为水平板,加水平板的目的是通过水平板抑制水质点的运动从而衰减波能以降低透射波高。水平板厚度  $c$  为 3 mm,宽  $b$  为 30 和 50 cm,间距  $e$  为 4.5 cm;水平板距方箱距离  $a$  为 4.5、9.0 和 13.5 cm。水平板用螺母连接到固定在方箱上的螺杆上。试验中设计了单一方箱、方箱下部为一层水平板和方箱下部为二层水平板共 3 种基本类型的浮堤模型,如图 1 所示。

模型四角处由上至下贯穿有空心钢管,埋在水槽地形下的钢丝绳穿过钢管,将钢丝绳拉紧后固定在水槽上的固定架上,来模拟垂直导桩锚固系统。钢管的内径略大于钢丝绳的直径且注有润滑油,使模型可以自由地做升沉运动。

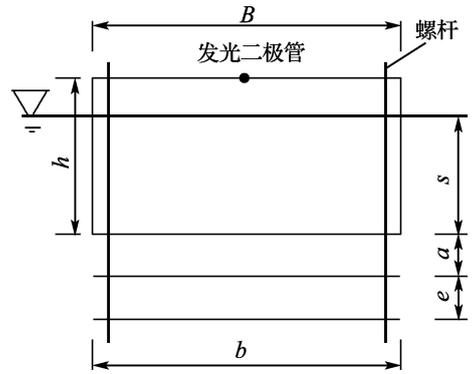
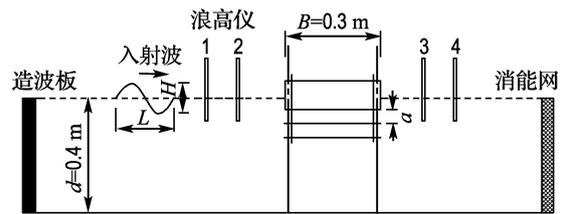


图 1 方箱-水平板式浮式防波堤示意图

Fig. 1 Sketch of pontoon-plates floating breakwater

### 1.3 模型整体布置

试验模型放在波浪水槽的大约中间位置,如图 2 所示。模型的前后各布置 2 个浪高仪,浪高仪距模型的距离均为 2 m 左右,浪高仪之间的间距按满足分离入、反射波的两点法要求选取。模型前方的两个浪高仪采集波面数据通过两点法分离出反射波高  $H_r$ ,从而得到反射系数  $K_r = H_r/H_i$ 。为消除水槽尾端消能网的反射对测量结果的影响,在模型后面设置两个浪高仪采集波面数据,同样通过两点法分离出透射波高  $H_t$ ,从而得到透射系数  $K_t = H_t/H_i$ 。试验数据全部由计算机自动采集和处理,波浪时间过程采样间隔为 0.02 s。当试验段的入射波浪稳定后开始采集数据,连续采集 1 024 个数据点。每组试验重复 3 次,取 3 次试验的平均值。



(a) 侧视图



(b) 俯视图

图 2 模型整体布置

Fig. 2 Sketch of experiment setup

模型的升沉运动通过分析放置在模型侧方的 CCD 图像采集设备采集的发光二极管的运动来获得。每次试验前要进行标定并且记录 CCD 镜头

到模型的垂直距离. 试验中与波面采集同步采集光点的运动, 采样间隔 0.04 s, 采集时间 12 s, 共采集 300 张运动图像. 图像处理时将试验模型在一个周期内的升沉运动最高点到最低点的距离找出作为模型的升沉高度  $H_n$ , 取连续几个周期的升沉高度平均值.

## 2 试验结果分析

### 2.1 单一方箱试验结果

为检验试验设计的合理性, 首先进行了垂直导桩锚固一方箱浮堤的消浪性能和升沉运动响应的试验研究, 并与 Balah 等<sup>[5]</sup>、Graw 等<sup>[8]</sup>和 Koutandos 等<sup>[7]</sup>的试验结果进行了比较.

图 3 给出本文方箱浮堤的消浪性能与 Koutandos 等<sup>[7]</sup>的方箱试验结果对比. 本文试验方箱高 9 cm, 宽 30 cm, 方箱吃水 6.75 cm, 试验水深 0.4 m, 相对吃水  $d_r/d=0.169$ ; Koutandos 等<sup>[7]</sup>的试验方箱高 1.5 m, 宽 2.0 m, 方箱吃水 0.4 m, 试验水深 2.0 m,  $d_r/d=0.2$ . 虽然本文试验与 Koutandos 等<sup>[7]</sup>的试验在试验条件上有差别, 但两者的相对吃水比较接近, 因此具有一定的可比性.

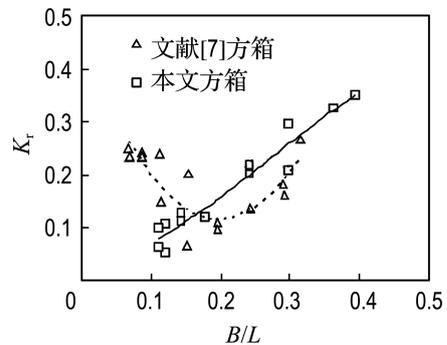
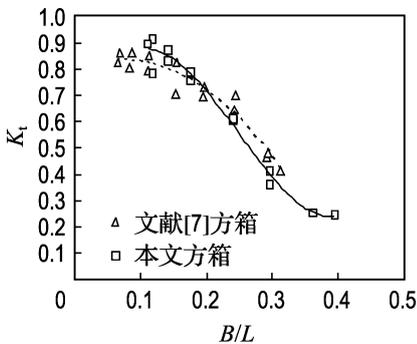
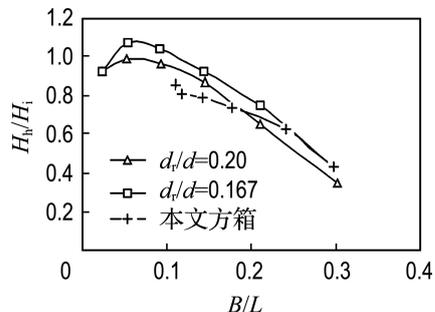
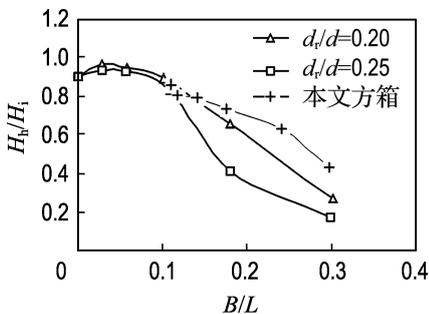


图 3 方箱模型的透射系数和反射系数的比较

Fig. 3 Comparison of transmission coefficient and reflection coefficient



(a) 与 Graw 等<sup>[8]</sup>试验结果的比较

(b) 与 Balah 等<sup>[5]</sup>试验结果的比较

图 4 方箱模型的升沉高度与 Graw 等<sup>[8]</sup>和 Balah 等<sup>[5]</sup>试验结果的比较

Fig. 4 Comparison of the experimental result with Graw's<sup>[8]</sup> and Balah's<sup>[5]</sup>

从图 3 试验数据的比较可以看出, 本文方箱模型的透射系数试验结果与 Koutandos 等<sup>[7]</sup>的方箱试验结果吻合较好, 透射系数随相对宽度  $B/L$  的增大而减小. 本文方箱模型的反射系数随着相对宽度  $B/L$  增大而增大, 而 Koutandos 模型的反射系数在相对宽度  $B/L \approx 0.2$  时有最小值, 在  $B/L > 0.2$  时随  $B/L$  增大而增大, 与本文方箱模型的试验结果变化趋势相符合, 产生这一差别的原因可能是两个方箱模型的尺度不同. 两个试验结果都表明这种升沉运动的浮箱反射系数很小, 本文方箱模型的反射系数最大在 0.35 左右, Koutandos 等<sup>[7]</sup>模型的在 0.3 左右.

图 4 为本文量纲一化升沉高度  $H_n/H_i$  的试验结果与 Graw 等<sup>[8]</sup>、Balah 等<sup>[5]</sup>试验结果的比较. Graw 等<sup>[8]</sup>的试验模型的相对吃水  $d_r/d=0.20, 0.25$ ; Balah 等<sup>[5]</sup>的试验模型的相对吃水  $d_r/d=0.167, 0.20$ ; 本文试验模型的相对吃水  $d_r/d=0.169$ . 可以看出本文试验模型的相对吃水与 Graw 等<sup>[8]</sup>和 Balah 等<sup>[5]</sup>的试验条件相近. 从图 4 的比较看本文的方箱模型量纲一化升沉高度  $H_n/H_i$  的变化规律与文献的结果基本一致.

### 2.2 方箱-水平板结构试验结果

在通过单一方箱的验证性试验之后,本文进行了方箱-水平板结构的消浪性能和升沉运动响应试验研究.图5和6是水平板层数对模型透射

系数、反射系数和升沉运动影响的典型试验结果.模型方箱吃水均为6.75 cm,水平板距方箱距离  $a = 4.5$  cm,入射波高  $H_i = 0.1$  m.

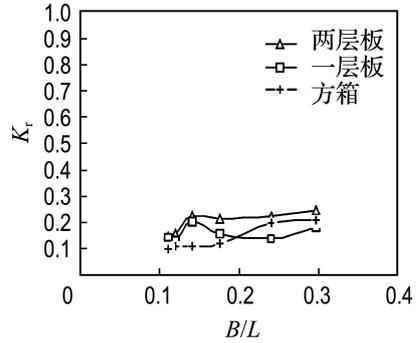
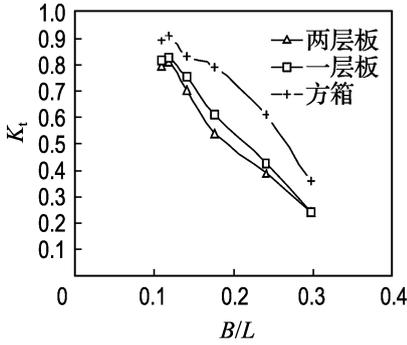


图5  $H_i = 0.1$  m 时水平板层数对透射系数和反射系数的影响

Fig. 5 Influence of number of plates on transmission and reflection coefficient with  $H_i = 0.1$  m

从图5可以看出与单一方箱相比,方箱下部加水平板后其透射系数明显降低.在其他条件相同的条件下,方箱下部加一层水平板时效果十分明显,如在  $B/L = 0.20$  时,透射系数约为0.5,比单一浮箱减小了0.2.方箱下部所加水平板从一层增加到两层,波浪的透射系数进一步减小,但减小的幅度没有一层板情形明显.因此建议在实际工程应用中板的层数不宜过多.

一步减小,但是减小的幅度没有一层板情形明显.这是由于单一方箱在波浪下运动时仅受到方箱周围水体的粘性阻碍作用,而加上水平板后整个浮堤的运动阻力增大,水平板层数增多,这种阻碍作用有所增加,升沉高度进一步减小.

从图6的比较可以看出,随着水平板层数增多,浮堤的升沉高度减小.相比单一方箱,方箱下部加一层水平板时浮堤的升沉高度明显减小,同样在  $B/L = 0.20$  时,相对升沉高度  $H_b/H_i$  大约减小0.3.水平板层数增加到两层时,升沉高度进

对本文的试验数据进行综合分析,确定了影响透射系数的主要量纲一因素为  $B/L, s/d$  以及  $n \times a/d$ .采用线性多元回归分析得到透射系数的拟合公式为(相关系数0.988,有效数据18个)

$$K_t = -3.82 \times n \times \frac{a}{d} \times \frac{s}{d} \times \frac{B}{L} - 2.80 \times \frac{B}{L} - 1.36 \times n \times \frac{a}{d} \times \frac{s}{d} + 1.24$$

式中: $B$ 为模型宽度; $L$ 为波长; $n$ 为水平板层数,本试验中的3种情况  $n$  分别为0、1、2; $a$ 为板与方箱之间的距离; $d$ 为试验水深; $s/d$ 为方箱相对吃水.图7为拟合公式计算值和与试验值的比较,由图可见,两者的差异大多在 $\pm 10\%$ 以内,总体吻合较好.

### 2.3 消浪性能和升沉运动相关分析

图8和9为  $B/L = 0.11017$  和  $B/L = 0.29720$  情况下不同方箱-水平板结构的透射系数、反射系数与对应的升沉高度的试验结果.总体上看,方箱模型的升沉高度明显大于方箱-水平板式浮堤模型.当入射波浪的周期较长时(如图7所示),水平板的不同布置方式对浮堤的升沉运动有

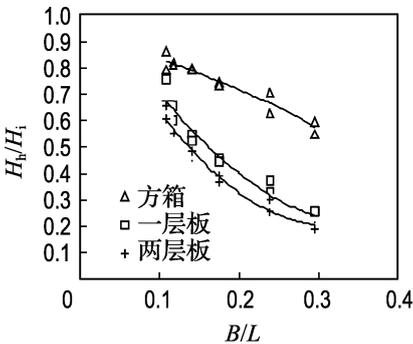


图6  $D/h = 0.75, a/h = 0.5$  时水平板层数对升沉运动的影响

Fig. 6 Influence of the number of plates on heave motion while  $D/h = 0.75$  and  $a/h = 0.5$

较大的影响,不同的方箱-水平板式浮防波堤结构的相对升沉高度变化范围为 0.5~0.9;与单一方箱浮堤相比,方箱下部增加水平板后,其透射系数减小约 10%。短周期波浪入射时(如图 9 所示),水平板的不同布置方式对浮堤升沉运动的影响不大,不同方箱-水平板式浮防波堤结构的升沉高度都在 0.2 附近,与单一方箱浮堤相比,方箱下部增加水平板后明显地减小了浮堤模型的升沉高度。对短波情形,水平板的不同布置方式对透射系数、反射系数有明显的影 响,其透射系数的变化范围在 0.2~0.4,反射系数的变化范围在 0.2~0.5。

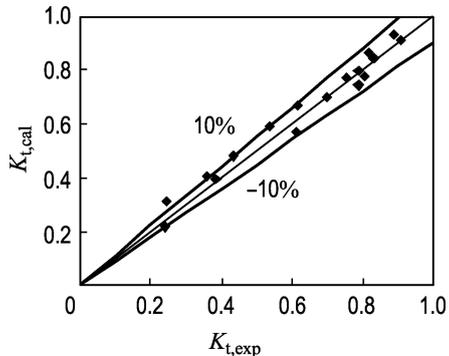


图 7 透射系数拟合公式与试验数据比较  
Fig. 7 Comparison of the transmission coefficient of experimental data and calculated results

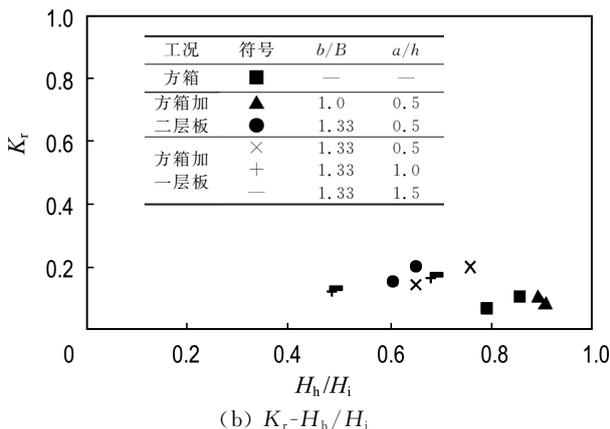
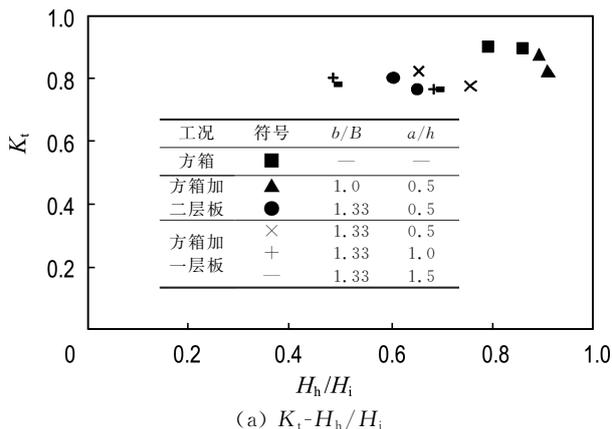


图 8  $B/L=0.11017$  时透射系数、反射系数与升沉高度

Fig. 8  $K_t, K_r$  versus  $H_h/H_i$  while  $B/L=0.11017$

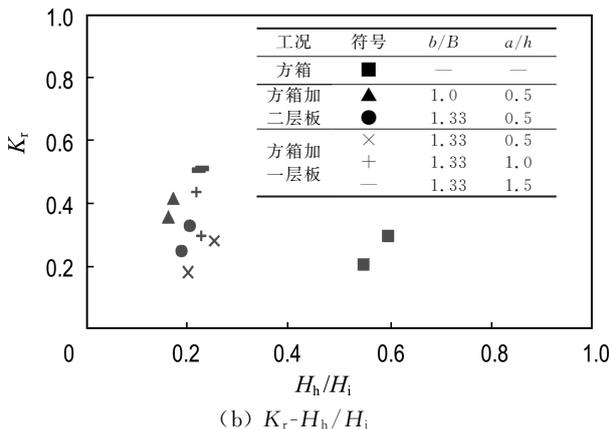
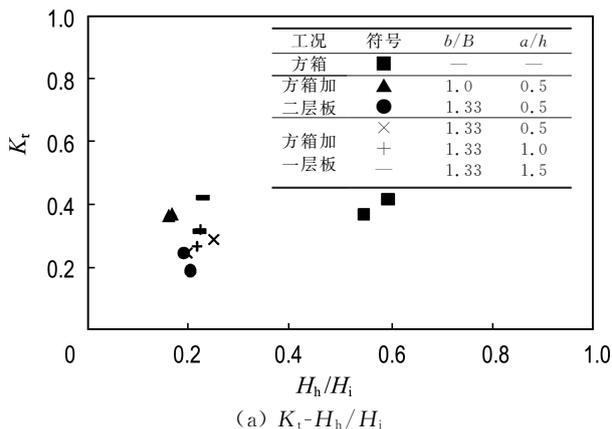


图 9  $B/L=0.29720$  时透射系数、反射系数与升沉高度

Fig. 9  $K_t, K_r$  versus  $H_h/H_i$  while  $B/L=0.29720$

### 3 结 语

本文对垂直导桩锚固的方箱-水平板式浮堤

多种模型方案的消波性能和升沉运动响应进行了试验研究. 试验结果表明相对宽度是影响消波效果和升沉运动的重要因素,方箱下加板可以减小

浮堤的升沉高度和增加反射系数,进而有效降低透射系数,加两层板的消波效果要好于一层板情形。本文的垂直导桩锚固的方箱-水平板浮防波堤,在相对宽度  $B/L$  约为 0.2 时,其透射系数比方箱模型透射系数减小约 0.2;升沉高度比方箱模型升沉高度减小约 0.3 倍入射波高。通过对透射系数的主要影响因素进行多元回归分析得到透射系数的拟合公式,误差基本能控制在  $\pm 10\%$  以内。

### 参考文献:

- [1] BRUCE L M. Floating breakwater design [J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 1985, **111**(2):304-318
- [2] 王永学,王国玉. 近岸浮式防波堤结构的研究进展与工程应用[C] // 2002 年度海洋工程学术会议论文集. 南昌:中国造船工程协会, 2002:314-321
- [3] 姚国权,麻志雄,丁炳灿. 矩形浮式防波堤的改进试验研究[J]. *海洋工程*, 1992, **10**(3):33-42
- [4] ISAACSON M, BALDWIN J. Wave propagation past

- a pile-restrained floating breakwater [J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 1998, **8**(4):265-269
- [5] BALAH M I, TOLBA E R. Behaviour of pile system floating breakwater [C] // *International Conference on Innovation in Concrete Structures: Design and Construction Dundee*. Scotland:Thomas Telford Press, 1999:115-121
- [6] KOUTANDOS E V, KARAMBAS T V. Floating breakwater response to waves action using a Boussinesq model coupled with a 2DV elliptic solver [J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 2004, **130**(5):243-255
- [7] KOUTANDOS E V, PRINOS P, GIRONELLA X. Floating breakwaters under regular and irregular wave forcing: reflection and transmission characteristics [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2005, **43**(2):174-188
- [8] GRAW K U, KALDENHOFF H, KOOLA P M, *et al.* Behavior of floating breakwaters under wave actions [D]. Panama: Suez Canal University, 1998

## Experimental study of wave attenuation performance of vertical pile-restrained pontoon-plates floating breakwater

WANG Yong-xue\*, DONG Hua-yang, ZHENG Kun, LIU Chong, HOU Yong

( State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

**Abstract:** A new kind of floating breakwater, vertical pile-restrained pontoon-plates floating breakwater is proposed. Laboratory physical model tests were performed to study the wave attenuation performance and heave motion response of different kinds of pontoon-plates models. Influence of model geometric parameters (relative pontoon width, plate width, number of plates, distance between bottom of pontoon and plate) in wave attenuation performance and heave motion response were discussed, as well as the relationship between the wave attenuation performance and heave motion response. The results indicate that the wave attenuation performance of the new structure is improved. Its transmission coefficient and heave motion height are reduced 0.2 and 0.3  $H_i$  ( $H_i$  is incident wave height) respectively compared with those of pile-restrained pontoon floating breakwater model at  $B/L = 0.2$ . Furthermore, the fitting expression of transmission coefficient is obtained by multiple regression analysis.

**Key words:** floating breakwater; plates; vertical pile-restrained; wave attenuation performance; heave motion; fitting expression