

自由水面式半圆体开孔海洋结构物水动力性能实验研究

翟钢军^{*1}, 马哲¹, Teh Hee-min², Vengatesan Venugopal²

(1. 大连理工大学 深海工程研究中心, 辽宁 大连 116024;

2. 爱丁堡大学 能源系统研究所, 英国 爱丁堡 EH9 3JL)

摘要: 提出了自由水面式半圆体开孔这一海洋结构物的新形式, 并对该型式结构物进行了不同水深、不同模型浸水深度, 以及不同波高和周期下系统的规则波及不规则波的模型实验研究. 对结构物的透射系数 C_t 、反射系数 C_r 以及能量耗散系数 C_d 进行了系统总结. 通过研究发现自由水面式半圆体开孔海洋结构物的消波性能随着模型相对水深以及相对板宽的增加而增强; 并且该结构具有较小的波浪反射率以及较好的能量耗散效果, 适合在海岸基础设施中推广建造.

关键词: 半圆体开孔式海洋结构物; 水深; 规则波; 不规则波

中图分类号: P751 **文献标志码:** A

0 引言

近年来, 相对传统的海洋工程结构物型式, 建造对自然影响更小的“软性结构”已成为国外研究热点. “软性结构”指的是为了维护海岸结构的天然性, 允许海洋工程结构物后方水域有一定能量的波浪存在. 自由水面式海洋工程结构物就是这种“软性结构”的代表, 通常也被叫做开敞式结构物, 因其不阻断海水流域, 近些年越来越受到海岸及海洋工程从业者的关注. 这种结构型式对解决结构物后方水体污染问题、近海鱼类正常迁徙以及结构物周围泥沙淤积等问题都有重要意义.

由于波浪的能量随着水深的增加逐渐减小, 波浪能量的有效作用深度一般远远小于其海域的海水深度. 从功能上说, 以消除波浪为目标的传统海洋工程结构物的本质就是将来浪反射回去, 使其远离港口码头岸线, 但是不可避免地会对海上小型船舶的航行造成影响.

Teh 等^[1]将自由水面式海洋工程结构物按照不同结构型式分为 4 类, 包括堆砌式结构、板式结构、沉箱式结构以及多体式结构.

(1) 堆砌式结构: 堆砌式海洋工程结构物具有

相对简单的外观设计, 典型的包括箱型、圆柱型、带前趾型以及梯型等结构型式. Koutandos 等^[2]进行了箱型自由水面式海洋工程结构物的物理模型试验. 该类型的结构物在浸入水深较大时具有很高的堤前反射, 当结构浸水深度与水深之比在 0.2~0.3, 相对入射波长宽度在 0.3 时, 反射波的能量约占入射波能量的 80%.

对于曲面型式的自由水面海洋工程结构物, Li 等^[3]应用 Tsay 等的近似法^[4]进行了长圆柱型结构波浪透射性能的数值模拟. 结果显示随着结构物几何尺寸以及浸水深度的增大, 波浪的透射效应减小. Sundar 等^[5]建立了一种组合式海洋工程结构物, 它被设计成前端为 1/4 曲面、后端为常规方箱的结构, 这种设计方式有利于消除波浪的反射能量. 试验结果表明在不规则海况下该种结构的波浪反射率最大值为 65%.

(2) 板式结构: 板式结构的海洋工程结构物通常由单层或多层水平/竖直板所组成, 目前已经报道过的类型有水平板、双重板、T 形板、L 形板以及 H 形板等. 对于单层水平放置的板式海洋工程结构物, Hu 等^[6]发现其波浪透射率随着结构物浸入水深的增加而增大. 对于双层板式海洋工程

结构物, Neelamani 等^[7]注意到板间距为水深的 0.4 倍时, 波浪反射系数最小。

Neelamani 等^[8,9]对 T 形和 $\perp$ 形海洋工程结构物进行了实验对比, 发现 T 形比 $\perp$ 形结构物在消波性能方面更加有效, 有效率约高出 25%。Neelamani 等^[10]又研究了 H 形海洋工程结构物的几何形式对波浪的影响, 结果表明在减小波浪能量方面, H 形结构物后方的挡板浸水深度比前方挡板的更加重要。

(3) 沉箱式结构: 沉箱式自由水面海洋工程结构物在水体与结构接触处筑有不透水的墙体, 最常见的结构型式有 U 形结构, 以及将其上下倒置的 Π 形结构。为了增加对波浪能的耗散, 往往在墙体上开有数量不等的孔。Brossard 等^[11]对迎浪面开孔的 U 形海洋工程结构物进行了相关的研究, 发现该种类型结构物的消波性能随着结构浸水深度的增加而增强。在结构安放型式方面, Günaydın 等^[12]通过对比实验结果, 总结出了 Π 形海洋工程结构物的消波性能要优于 U 形。

(4) 多体式结构: 典型的多体结构式海洋工程结构物由一定数量的水平板构成, 布置在水下一定深度的区域。这样的结构型式有助于减小波浪反射以及水平方向的波浪力。Wang 等^[13]设计了一种格栅式海洋工程结构物, 由一系列的水平板构成, 这些水平板可以有效约束流体粒子的竖向运动。当水平板间距约是波长的 $1/4$ 时, 结构物可以最有效地减低入射波高。波浪的透射系数随着水平板间距的增加呈增大的趋势, 但板间距对反射系数的影响不大。

综上所述, 大多数的自由水面式海洋工程结构物, 可以有效地减小结构物后方水域的波高, 但结构物前方的波浪反射效应较大, 对小型船舶的航行仍有一定的潜在风险。本文结合以上工作, 提出半圆体开孔式自由水面海洋工程结构物这一结构型式, 并对其进行模型实验研究, 评估其在水深下的波浪透射、反射以及能量耗散现象。

1 实验设置

1.1 实验模型

作者结合实际已经建造的传统式半圆体海洋工程结构物大小确定了实验模型尺寸, 并对开孔率(6%、9%和 12%)、孔洞尺寸(1 cm $\times$ 6 cm 和 3

cm $\times$ 6 cm)等参数进行了实验比较, 经过多次对比实验, 最终确定了如下的模型结构型式、材料和实验方案。

实验模型(SCB 模型)采用聚氯乙烯材料制作, 模型比尺为 1:20, 模型壁厚为 10 mm, 开孔率为 9%, 见图 1。迎浪方向模型布置有 6 排 4 列矩形孔洞, 每个孔洞的尺寸为 1 cm $\times$ 6 cm。在波浪作用下, 水体可以通过这些孔洞, 从而起到耗散波浪能量的作用。模型背面布置有 2 排 4 列的矩形孔洞, 孔洞尺寸为 3 cm $\times$ 6 cm。这些孔洞被设计用来减少波浪的跃浪现象以及波浪对模型后部的上托力。模型的直径为 0.500 m, 模型宽度为 0.395 m。模型两侧安装 2 块半圆形透明的有机玻璃板, 用来防止波浪冲击作用下模型产生较大变形, 并且不影响模型腔室内波浪响应的观测。

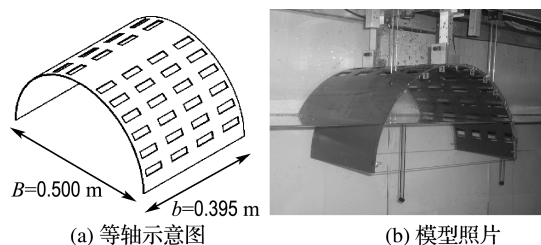


图1 SCB 模型

Fig. 1 SCB model

1.2 仪器设备

实验在爱丁堡大学能源系统研究所水槽中进行, 水槽长 22 m、宽 0.4 m、工作水深 0.7 m, 见图 2。在水槽首端安装有摇板造波机, 能对规则波及不规则波进行模拟, 本实验对不规则波采用 Jonswap 谱。在水槽尾端安置有海绵消波层, 可以有效地减小波浪传播到尾端的反射效果。模型安放在距离造波机 12 m 处。在模型的前方、内部、后方安插了 6 个浪高仪(WP1~WP6), 用以记录水槽内不同位置处的波面变化。浪高仪 WP1、WP2 和 WP3 被安置在模型前 2 m 处, 获取结构物前方的入射与反射波高。WP1、WP2 和 WP3 之间的距离随着波浪周期的改变而变化。WP4 被放置在模型前 0.05 m 处, 用以量测模型前端的波高变化。WP5 顺着模型顶端的矩形开孔位置插入, 用以量测模型腔内部的水位波动。WP6 用来量测透射波高, 布置在模型背面 2 m 处。

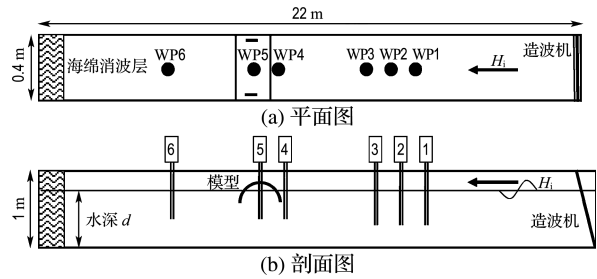


图2 实验设备示意图

Fig. 2 Sketch map of experimental set-up

1.3 实验组次

本文针对3种不同的水深条件($d=0.7、0.5$ 和 0.3 m),对半圆体海洋工程结构物消波性能进行了系统的实验研究. 每组波浪参数均进行3次不同模型浸入水深的实验,模型浸水深度 $D=$

$0.05、0.10$ 和 0.15 m . 因此相对水深 $D/d=0.071、0.100、0.143、0.167、0.200、0.214、0.300、0.333$ 和 0.500 .

在规则波条件下,实验模型选择了10个波浪周期 T ,范围从 $0.8\sim1.8\text{ s}$,间隔为 0.1 s . 波高 H 选取 $0.05、0.10$ 和 0.15 m . 在 Jonswap 谱条件下,谱峰周期 T_p 的选择与规则波相同,有义波高 $H_{1/3}$ 范围从 $0.04\sim0.14\text{ m}$,根据波浪周期不同,选取3或4个波高值进行实验. 波陡 $H_{1/3}/L_p$ 范围在 $0.01\sim0.12$ (L_p 是由线性微幅波理论公式算出的代表波长).

1.4 实验过程

本文选取 $T=1.3\text{ s}, H_i=0.10\text{ m}, d=0.5\text{ m}$ 不同模型浸水深度下的实验图片(见图3)进行说明.

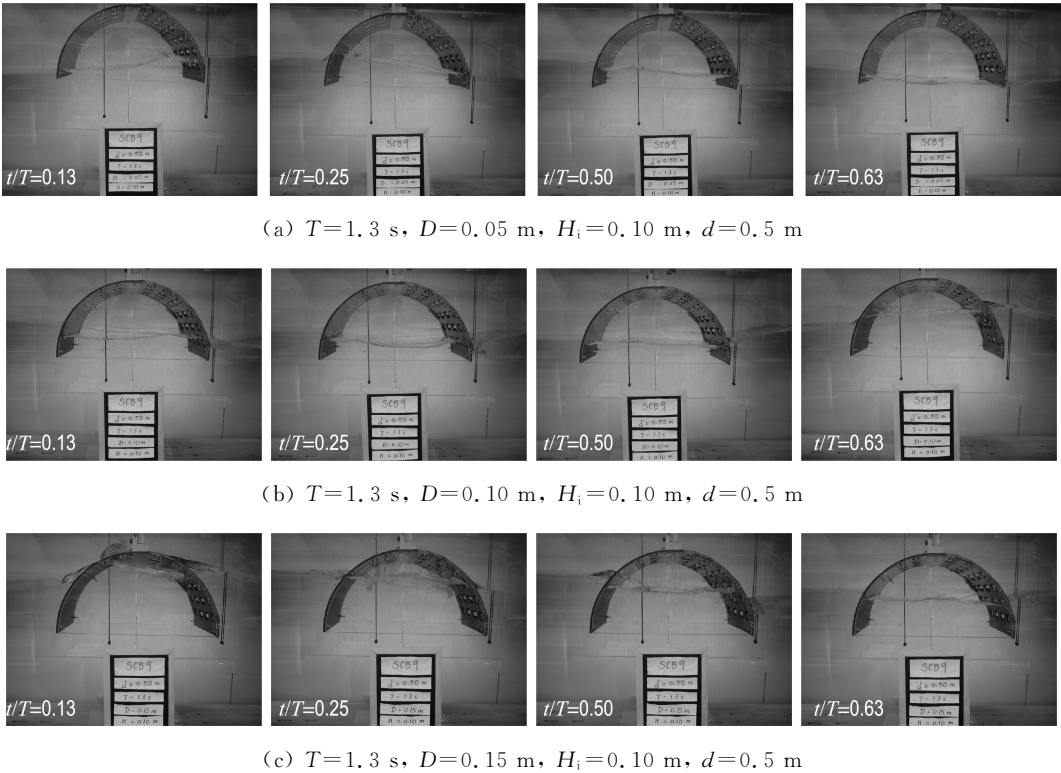


图3 波浪与结构物的相互作用

Fig. 3 Wave-structure interactions

2 实验结果

2.1 $C_t、C_r、C_l$ 的计算方法

为了系统真实地反映出结构物的工作性能,选取波浪的透射系数 C_t 、反射系数 C_r 以及能量耗散系数 C_l 作为主要的研究对象.

$$C_t = H_{m0,t}/H_{m0} \tag{1}$$

$$C_r = H_{m0,r}/H_{m0} \tag{2}$$

$$C_l = \sqrt{1 - C_r^2 - C_t^2} \tag{3}$$

式中: H_{m0} 是有义入射波高, $H_{m0,t}$ 和 $H_{m0,r}$ 分别是有义透射及反射波高. 由于能量的耗散很难被准确测量,结构物的能量耗散系数根据能量守恒

特性得出, 见式(3).

2.2 波浪透射

图 4 给出了规则波及不规则波作用下结构物透射系数 C_t 与相对板宽的关系. 从图中可以看出, 无论是规则波作用或者是不规则波作用下, 结构物透射系数 C_t 在所有的 H_i/L 以及 H_{m0}/L_p 区块中, 随着相对板宽在 $0.1 \sim 0.6$ 内的增加而呈降低趋势. 分析中将相同水深下的工况组合到一起, 并用相同的颜色来表示, 可以有效地发现水深变化对波浪衰减效果的影响. 总的来看, 在不同深度条件下, 波浪衰减差异最大值达 10%.

另一方面, 波浪的透射系数 C_t 受模型相对水深的影响较大. 在一个给定的 B/d 的条件下, 很明显地可以看出 C_t 随着 D/d 的增加而减小. 当评估相对水深 D/d 对 C_t 影响与 B/d 的关系时, C_t 的变化并不与 D/d 成比例关系, 因此对每一组 B/d 工况组合下, C_t 和 D/d 的关系应该被分别独立对待. 从图 4 中还可看出透射系数 C_t 一个细微的变化, 对于规则波来说, 随着 H_i/L 的增加, 透射系数 C_t 呈略微减小的趋势. 而在不规则波作用下, 这种变化并不明显.

2.3 波浪反射

与不规则波作用相比, 波浪的反射行为在规则波作用下更加复杂. 反射系数 C_r 相对各自的 D/d 随着 B/L 的增加而发生波动. 首先 C_r 逐渐增加, 在 $0.20 < B/L < 0.25$ 达到第一个峰值. 之

后, C_r 开始下降, 当 $0.35 < B/L < 0.40$ 时, C_r 跌至谷底, 见图 5(a). 然而, 在不规则波作用下, 上述的反射现象并不明显, C_r 几乎线性地随着 B/L_p 的增加而缓慢地增加 (见图 5(b)). 不论规则波作用或是不规则波作用, 反射系数 C_r 与相对板宽的关系, 整体上来看并不因水深的变化而发生较大变化. 并且在一定的水深条件下, 反射系数 C_r 变化不大, 因此, 水深对波浪反射效应的影响基本上可以忽略. 但是, 模型浸水深度对 C_r 的影响相比之下却很强烈, 随着浸水深度的增加, 反射系数 C_r 随之明显增大. 规则波与不规则波作用下 C_r 的变化趋势不同, 是由于规则波为单色频率作用波, 可以更好地发现不同波浪周期、频率下的结构物水动力性能变化, 而不规则波的波谱在一定程度上掩盖了一些细小的变化. 由此可见规则波实验对于海洋工程结构物实验的重要性.

2.4 波浪的能量耗散

如图 6 所示, 波浪能量的耗散性与如下四点有关: (i) 模型的浸水深度. 较大的模型浸水深度, 增加了波浪与结构物的作用面积, 从而引发更大的能量耗散. (ii) 波浪周期. 长周期波浪具有更强的透射性能, 可以更加容易地绕过消能装置, 因此结构物对高频波浪的消能效果更加理想. (iii) 实验水深. 随着实验水深的减小, 水槽底部对波浪运动产生的阻尼加剧, 从而引发能量耗散的增加. (iv) 波陡.

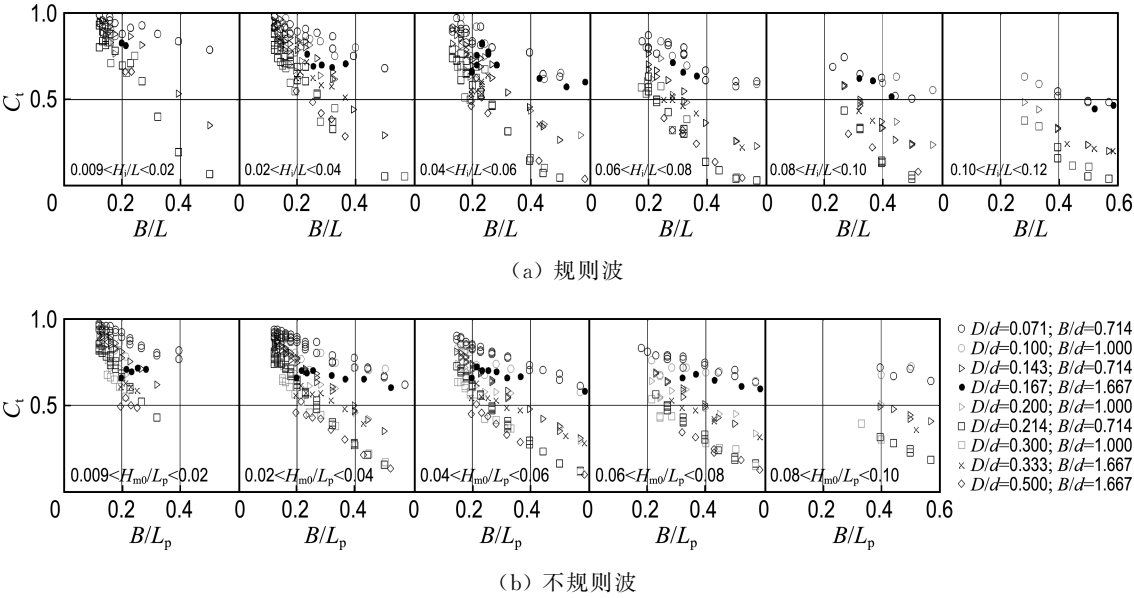


图 4 SCB9 模型在规则波及不规则波作用下的结构物透射系数 C_t 与相对板宽的关系
Fig. 4 C_t for the SCB9 model with respect to relative plate width in regular and irregular waves

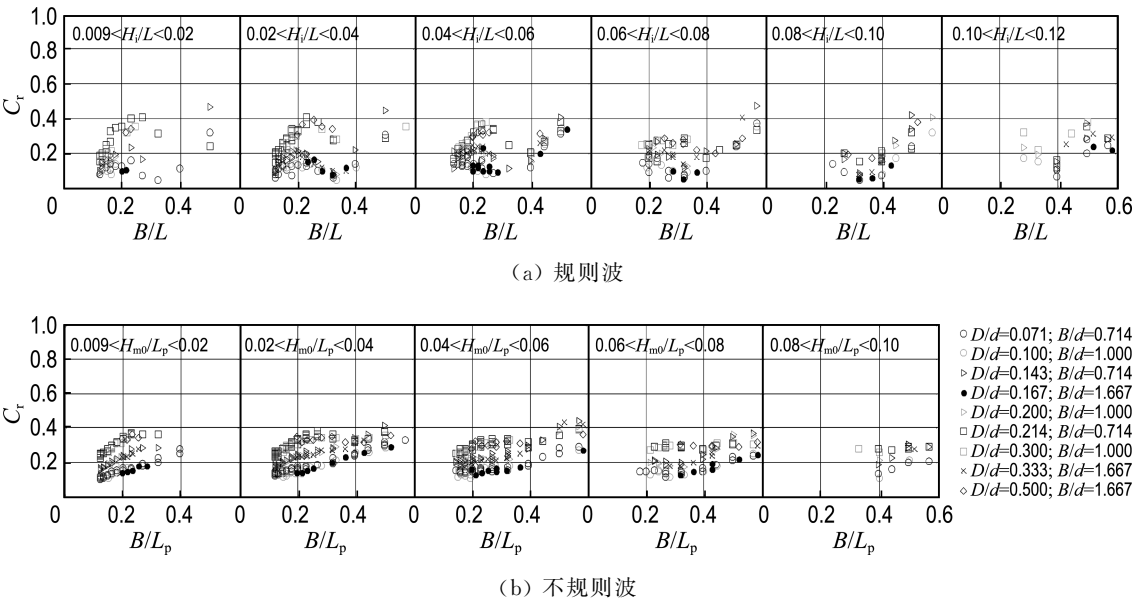


图5 SCB9模型在规则波及不规则波作用下的结构物反射系数 C_r 与相对板宽的关系
Fig. 5 C_r for the SCB9 model with respect to relative plate width in regular and irregular waves

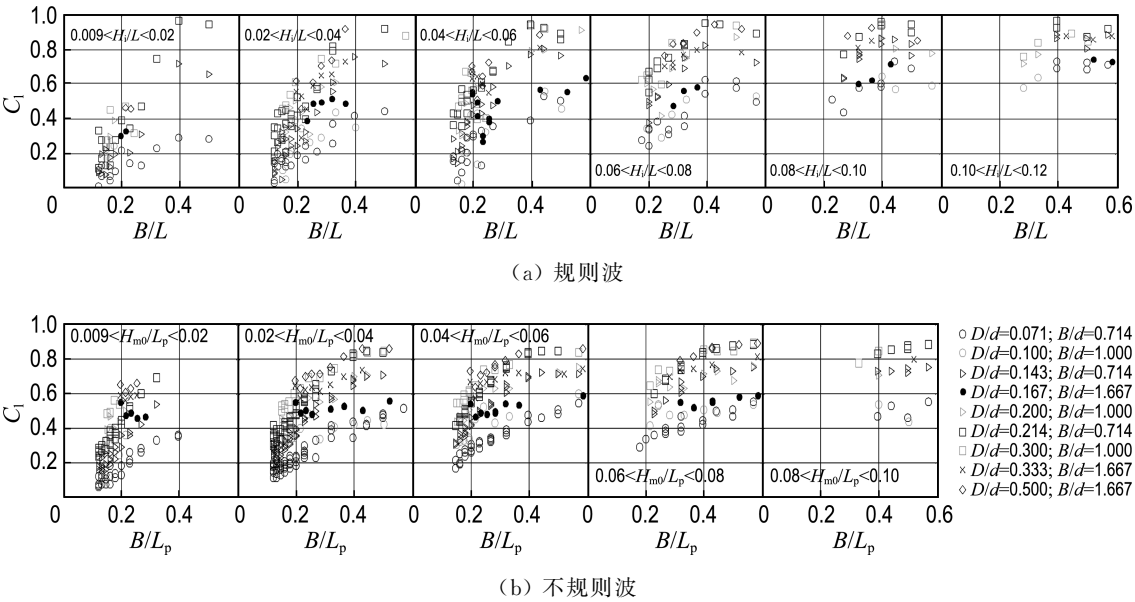


图6 SCB9模型在规则波及不规则波作用下的结构物消能系数 C_1 与相对板宽的关系
Fig. 6 C_1 for the SCB9 model with respect to relative plate width in regular and irregular waves

3 结 论

(1)波浪的透射系数 C_t 随着相对板宽的增加而降低,而反射系数 C_r 与耗散系数 C_1 则呈增加趋势.同时 C_t 、 C_r 、 C_1 均受到模型浸水深度的影响,虽然较大的模型浸水深度可以有效增加波浪能量的耗散并降低波浪的透射系数,但反射系数却随之增加.因此在实际工程中结构物的设计水位,要兼顾到波浪的反射以及越浪的影响.

(2)实验表明,在6~14 m的水深范围内,自由水面式半圆体结构物均表现了良好的水动力性能.在相对板宽大于0.2的条件下,波浪的能量耗散率可维持在50%以上,同时反射系数维持在0.2~0.4的较低范围内.因此该种结构型式很适合在海岸基础设施中推广建造.

(3)为了进一步增强结构物的消浪性能,可在结构物迎浪向底部加装格栅板(相当于增加了模型浸水深度),在保持自由水面式结构物特性的同

时,兼顾了控制波浪的反射作用,并额外提高波浪的能量耗散率,以达到降低波浪透射率的目的.

参考文献:

- [1] Teh Hee-min, Venugopal V, Bruce T. Performance analysis of a semicircular free surface breakwater [C] // **Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering-OMAE**. Beijing:OMAE, 2011:487-497.
- [2] Koutandos E V. Hydrodynamic analysis of a skirt breakwater [J]. **Proceedings of the ICE — Maritime Engineering**, 2007, **160**(3):121-133.
- [3] LI Dong-cheng, Panchang V, TANG Zhao-xiang, *et al.* Evaluation of an approximate method for incorporating floating docks in harbor wave prediction models [J]. **Canadian Journal of Civil Engineering**, 2005, **32**(6):1082-1092.
- [4] Tsay T K, Liu P L F. A finite element model for wave refraction and diffraction [J]. **Applied Ocean Research**, 1983, **5**(1):30-37.
- [5] Sundar V, Subbarao B V V. Hydrodynamic performance characteristics of quadrant front-face pile-supported breakwater [J]. **Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering**, 2003, **129**(1):22-33.
- [6] HU H, WANG K H, Williams A N. Wave motion

over a breakwater system of a horizontal plate and a vertical porous wall [J]. **Ocean Engineering**, 2002, **29**(4):373-386.

- [7] Neelamani S, Gayathri T. Wave interaction with twin plate wave barrier [J]. **Ocean Engineering**, 2006, **33**(3-4):495-516.
- [8] Neelamani S, Rajendran R. Wave interaction with T-type breakwaters [J]. **Ocean Engineering**, 2002, **29**(2):151-175.
- [9] Neelamani S, Rajendran R. Wave interaction with ‘ $\perp$ ’-type breakwaters [J]. **Ocean Engineering**, 2002, **29**(5):561-589.
- [10] Neelamani S, Vedagiri M. Wave interaction with partially immersed twin vertical barriers [J]. **Ocean Engineering**, 2002, **29**(2):215-238.
- [11] Brossard J, Jarno-Druaux A, Marin F, *et al.* Fixed absorbing semi-immersed breakwater [J]. **Coastal Engineering**, 2003, **49**(1-2):25-41.
- [12] Günaydın K, Kebdaşlı M S. Performance of solid and perforated U-type breakwaters under regular and irregular waves [J]. **Ocean Engineering**, 2004, **31**(11-12):1377-1405.
- [13] WANG Y, WANG G, LI G. Experimental study on the performance of the multiple-layer breakwater [J]. **Ocean Engineering**, 2006, **33**(13):1829-1839.

Experimental research on hydrodynamic performance of semicircular perforated free surface naval structure

ZHAI Gang-jun^{*1}, MA Zhe¹, Teh Hee-min², Vengatesan Venugopal²

(1. Deepwater Engineering Research Centre, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Institute of Energy Systems, The University of Edinburgh, Edinburgh EH9 3JL, UK)

Abstract: A new kind of perforated free surface semicircular naval structure is presented. The hydrodynamic characteristics of naval structure are investigated in regular and irregular wave conditions under the different water depths, submergence depths, wave heights and wave periods. The performance of the naval structure was evaluated in the form of transmission coefficient (C_t), reflection coefficient (C_r) and energy dissipation coefficient (C_1). It is found that the wave attenuation ability of the naval structure model improves with the increase of submerged depth and relative plate width. The naval structure performs better as an energy dissipater than as a wave reflector, and is suitable for offshore infrastructure construction.

Key words: semicircular perforated naval structure; water depths; regular wave; irregular wave