

· 综 合 ·



# 斜向波作用下带水平多孔板开孔沉箱 防波堤水动力特性研究\*

孙路<sup>1</sup>, 张廷辉<sup>2</sup>, 刘勇<sup>3</sup>

(1. 交通运输部规划研究院, 北京 100029; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;  
3. 中国海洋大学 山东省海洋工程重点实验室, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 基于线性势流理论和匹配特征函数展开法, 建立了斜向波与内部带水平多孔板开孔沉箱防波堤相互作用的解析解。通过与分区边界元解对比, 验证了解析解计算结果的正确性。给出数值算例, 分析了波浪入射角度、消浪室相对宽度等因素对开孔防波堤反射系数和波浪力的影响规律。研究结果可为物理模型试验和工程应用提供指导。

**关键词:** 斜向波; 开孔沉箱; 水平多孔板; 反射系数; 波浪力

**中图分类号:** O 353.2; U 656.2<sup>+</sup>4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2014)10-0001-06

## Oblique wave action on perforated caisson breakwater with inner horizontal porous plate

SUN Lu<sup>1</sup>, ZHANG Ting-hui<sup>2</sup>, LIU Yong<sup>3</sup>

(1. Transport Planning and Research Institute, Ministry of Transport, Beijing 100029, China;  
2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;  
3. Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** Based on linear potential theory and matched eigenfunction expansion method, this study develops an analytical solution for oblique wave interaction with a perforated caisson breakwater with an inner horizontal porous plate, which is confirmed by comparing with a multi-domain boundary element method solution. Numerical examples are given to examine the effects of the incident wave angle and the relative wave chamber width on the reflection coefficient and wave forces. The research results may serve as reference for physical model tests and practical engineering.

**Keywords:** oblique wave; perforated caisson; horizontal porous plate; reflection coefficient; wave force

开孔沉箱是将传统沉箱的前墙开孔, 在前开孔墙与后实体墙之间形成消浪室, 使波浪通过开孔墙进入消浪室消能。开孔沉箱可以显著降低结构的反射系数、波浪爬高和波浪力, 可以在保证结构安全的前提下节约成本。目前, 该结构已经在国内外的工程实践中得到大量应用。最近, Huang 等<sup>[1]</sup>对开孔沉箱防波堤的研究进展进行了总结。我国 2011 版 JTS 154-1—2011《防波堤设计与

施工规范》<sup>[2]</sup>也在附录 H 中给出了矩形开孔沉箱波浪力与反射系数的计算方法。

为了提高开孔防波堤的工作性能, 部分学者研究了一些改进的开孔防波堤结构。针对加拿大凯尔西 (Kelsey) 湾的旧防波堤改造工程, Isaacson 等<sup>[3]</sup>分析了内部带堆石开孔防波堤的水动力性能, 发现消浪室内填充块石后, 可以显著降低前开孔墙的波浪力。Theocharis 等<sup>[4]</sup>和 Faraci

收稿日期: 2014-03-13

\*基金项目: 国家自然科学基金 (51279224)

作者简介: 孙路 (1977—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事开孔防波堤研究。

等<sup>[5]</sup>分别考虑希腊比雷埃夫斯港和意大利锡拉库扎港的实际工程应用,在开孔沉箱内设置带斜坡的堆石结构,试验研究了结构的消浪特性,给出工程设计的指导建议。与以上在消浪室内填充块石的工程措施不同,Yip和Chwang<sup>[6]</sup>在开孔防波堤的消浪室内安装一水平实体板,研究发现:安装水平实体板后,防波堤达到最小反射时所对应的消浪室宽度大幅度减小。考虑到水平多孔板可以有效耗散波浪能量<sup>[7]</sup>,Liu等<sup>[8]</sup>提出内部带水平多孔板的新开孔沉箱结构,研究发现:水平多孔板可以显著提高开孔沉箱对实际海域中不同周期入射波的消减效果,并提高了结构的稳定性。

Liu等<sup>[8]</sup>在研究中考虑了正向入射波,实际工程中,波浪经常是斜向入射,因此,有必要研究斜向波条件下,内部带水平多孔板开孔沉箱的水动力特性。本文将考虑斜向入射波,利用匹配特征函数展开法建立带水平多孔板开孔沉箱水动力分析的解析模型,通过数值算例分析开孔沉箱的水动力特性。研究成果可为物理模型试验和工程实践提供有效指导。

## 1 控制方程和边界条件

图1给出当前研究问题的理想化示意图,沉箱的前墙均匀开孔,前开孔墙与后实体墙之间设置均匀开孔的水平多孔板。直角坐标系的原点 $o$ 位于开孔沉箱后实体墙与静水位交点处, $x$ 轴水平向右, $z$ 轴垂直向上。防波堤前水深为 $h$ ,水平多孔板的淹没深度为 $d$ ,水平板与水底之间的距离为 $a$ ,消浪室宽度为 $B$ 。波浪从左向右斜向入射,波浪入射方向与 $x$ 轴之间的夹角为 $\alpha$ ,入射波的波高为 $H$ ,波长为 $L$ ,波数为 $k_0$ ,波数在 $x$ 和 $y$ 方向的分量分别为 $k_{0x} = k_0 \cos\alpha$ 和 $k_{0y} = k_0 \sin\alpha$ 。将整个流域划分为3个子区域:0区位于沉箱左边外侧,1区位于沉箱内水平多孔板以上,2区位于沉箱内水平多孔板以下。在以下的数学分析中,因为开孔墙和水平多孔板的厚度相对入射波长(水深)而言为一小值,将其忽略。

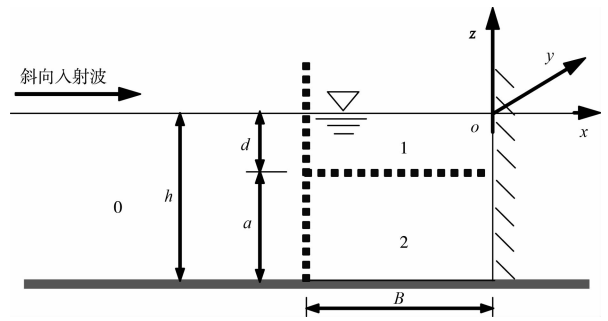


图1 斜向波与带水平多孔板开孔沉箱相互作用

基于势流理论,并考虑入射波为线性周期波,流体运动的速度势可以写为:

$$\Phi(x, z, t) = \text{Re} \left\{ -\frac{igH}{2\omega} \phi(x, z) e^{ik_{0y}y} e^{-i\omega t} \right\} \quad (1)$$

式中:Re代表对变量取实部; $i$ 为单位虚数; $g$ 为重力加速度; $\omega$ 为入射波的圆频率; $\phi$ 表示与时间 $t$ 和 $y$ 方向(沉箱长度方向)无关的空间速度势。

空间速度势 $\phi$ 满足以下控制方程和边界条件:

$$\frac{\partial^2 \phi_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_j}{\partial z^2} - k_{0y}^2 \phi_j = 0 \quad j=0, 1, 2 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial z} = \frac{\omega^2}{g} \phi_j \quad z=0, j=0, 1 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial z} = 0 \quad z=0, j=0, 2 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial x} = 0 \quad x=0, j=1, 2 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial z} = \frac{\partial \phi_2}{\partial z} = ik_0 G_h (\phi_2 - \phi_1) \quad z = -d \quad (6)$$

$$\frac{\partial \phi_0}{\partial x} = \frac{\partial \phi_j}{\partial x} = ik_0 G_v (\phi_0 - \phi_j) \quad x = -B, j=1, 2 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi_r}{\partial x} = -ik_{0x} \phi_r \quad x \rightarrow -\infty \quad (8)$$

式中: $\phi_r$ 为反射波的速度势。方程(6)和(7)为开孔板边界条件<sup>[9]</sup>,表示开孔板两侧的动水压力连续,且通过开孔板的法向速度与开孔板两侧的压力差成正比。比例系数 $G_h$ 和 $G_v$ 分别为水平多孔板和前开孔墙的开孔影响系数,需要通过试验来确定。当开孔影响系数等于0时,开孔板不透水(变为实体板);当开孔影响系数趋向无穷大时,开孔板完全透水(不存在)。

公式(2)~(8)描述了斜向波与带水平多孔板开孔沉箱相互作用的完整边值问题, 将利用匹配特征函数展开法进行解析求解。

## 2 解析分析

采用分离变量法, 满足控制方程(2)以及相关边界条件(3)~(6)和(8)的速度势级数解为:

$$\phi_0 = e^{ik_{0x}(x+B)} Z_0(z) + R_0 e^{-ik_{0x}(x+B)} Z_0(z) + \sum_{m=1}^{\infty} R_m e^{k_{mx}(x+B)} Z_m(z) \quad (9)$$

$$\phi_j = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos(\mu_{nx} x) Y_{n,j}(z) \quad j = 1, 2 \quad (10)$$

式中:  $R_m$  和  $A_n$  是待求的展开系数;  $k_{mx} = \sqrt{k_m^2 + k_{0y}^2}$ ;  $\mu_{nx} = \sqrt{\mu_n^2 - k_{0y}^2}$ ;  $Z_m(z)$  和  $Y_{n,j}(z)$  是沿水深变化的特征函数:

$$Z_0(z) = \cosh[k_0(z+h)] / \cosh(k_0 h) \quad (11)$$

$$Z_m(z) = \cos[k_m(z+h)] / \cos(k_m h) \quad m = 1, 2, \dots \quad (12)$$

$$Y_{n,1}(z) = \frac{\cosh[\mu_n(z+h)] - S_n \sinh[\mu_n(z+h)]}{\cosh(\mu_n h) - S_n \sinh(\mu_n h)} \quad (13)$$

$$Y_{n,2}(z) = \frac{[1 - S_n / \tanh(\mu_n a)] \cosh[\mu_n(z+h)]}{\cosh(\mu_n h) - S_n \sinh(\mu_n h)} \quad (14)$$

$$S_n = \frac{\mu_n \tanh^2(\mu_n a)}{\mu_n \tanh(\mu_n a) - ik_0 G_h [1 - \tanh^2(\mu_n a)]} \quad (15)$$

波数  $k_m$  满足水色散方程:

$$\omega^2 = gk_0 \tanh(k_0 h) = -gk_m \tan(k_m h) \quad m = 1, 2, \dots \quad (16)$$

复波数  $\mu_n$  满足波浪在水平多孔板上运动的复色散方程:

$$\omega^2 - g\mu_n \tanh(\mu_n h) = S_n [\omega^2 \tanh(\mu_n h) - g\mu_n] \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (17)$$

将速度势的表达式(9)和(10)代入前开孔墙边界条件(7), 在方程两边乘上特征函数  $Z_m(z)$  或  $Y_{n,j}(z)$ , 并沿整个水深积分, 可得到两组方程组, 将方程组中的  $m$  和  $n$  均截断到  $N$  项, 联立求解, 就得到展开系数  $R_m$  和  $A_n$  的值, 也就得到了流场内任意位置的速度势。

## 3 反射系数和波浪力

速度势表达式(9)中的第1项表示入射波; 第2项表示反射波; 第3项为非传播模态波, 在开孔沉箱前方沿  $x$  轴负方向迅速衰减。开孔沉箱反射系数定义为反射波高与入射波高比值, 表示为:

$$C_r = |R_0| \quad (18)$$

流域内任意点的动水压力为:  $p(x, z) = i\rho\omega\phi(x, z)$ , 其中,  $\rho$  为流体密度。斜向波作用下结构上的动水压力沿  $y$  轴(长度)方向作周期性变化。这里只考虑开孔沉箱防波堤横断面上的波浪力。将动水压力沿结构物表面积分, 得到前开孔墙与后实体墙上的水平波浪力 ( $F_1$  和  $F_2$ ) 以及水平多孔板上的垂向波浪力 ( $F_3$ ), 具体表达式如下:

$$F_1 = \frac{\rho g H}{2ik_0 G_v} \left[ i(1 - R_0) \cos\alpha \tanh(k_0 h) + \sum_{m=1}^N R_m \frac{k_{mx}}{k_m} \tan(k_m h) \right] \quad (19)$$

$$F_2 = \frac{\rho g H}{2} \sum_{n=0}^N \frac{A_n [\tanh(\mu_n h) - S_n]}{\mu_n [1 - S_n \tanh(\mu_n h)]} \quad (20)$$

$$F_3 = \frac{\rho g H}{2ik_0 G_h} \cdot \sum_{n=0}^N \frac{A_n \mu_n \sin(\mu_n B) [\sinh(\mu_n a) - S_n \cosh(\mu_n a)]}{\mu_{nx} [\cosh(\mu_n h) - S_n \sinh(\mu_n h)]} \quad (21)$$

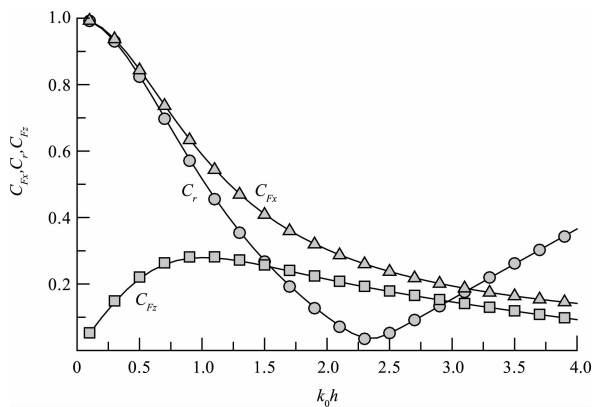
在式(19)和(21)的计算中, 分别利用了开孔板边界条件(7)和(6)。开孔防波堤无因次的总水平波浪力  $C_{Fx}$  和水平多孔板无因次的总垂直波浪力  $C_{Fz}$  分别定义为:  $C_{Fx} = |(F_1 + F_2) / (\rho g H h)|$  和  $C_{Fz} = |F_3 / (\rho g H B)|$ 。

## 4 结果与讨论

编制计算程序对带水平多孔板开孔沉箱的反射系数和波浪力进行了计算, 在计算中取截断数  $N = 40$ , 可以保证计算结果的收敛精度。

为验证本文解析方法的正确性, 利用分区边界元方法对本文问题进行了求解, 本文所研究问题的分区边界元解是在 Liu 等<sup>[10]</sup>的基础上改进得到的。控制方程(3)的基本解取零阶第二类修正的贝塞尔函数:  $\phi^*(x, z; \xi, \eta) = -\frac{1}{2\pi} K_0 [k_0 \sqrt{(x-\xi)^2 + (z-\eta)^2}]$ ,

其中  $(\xi, \eta)$  和  $(x, z)$  分别表示源点和场点；利用常数元对所有边界进行离散。图2给出本文解析解和分区边界元解的比较，计算条件为： $\alpha = 30^\circ$ ， $G_v = 2.0$ ， $G_h = 1.0$ ， $d/h = 0.2$ ， $B/h = 0.6$ 。可以看出，两种方法的计算结果一致，这证明了本文解析解的正确性。

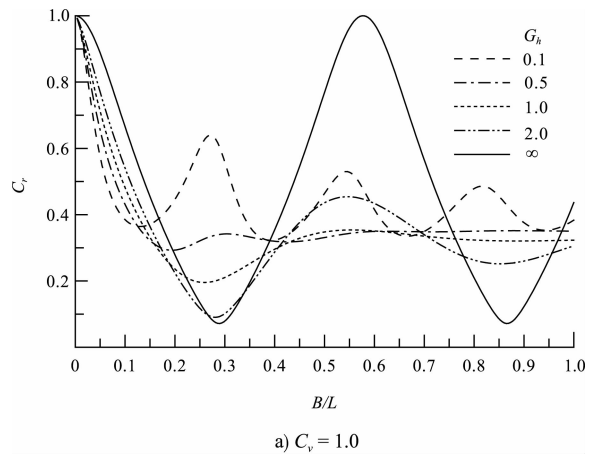


注： $\alpha = 30^\circ$ ， $G_v = 2.0$ ， $G_h = 1.0$ ， $d/h = 0.2$ ， $B/h = 0.6$ 。

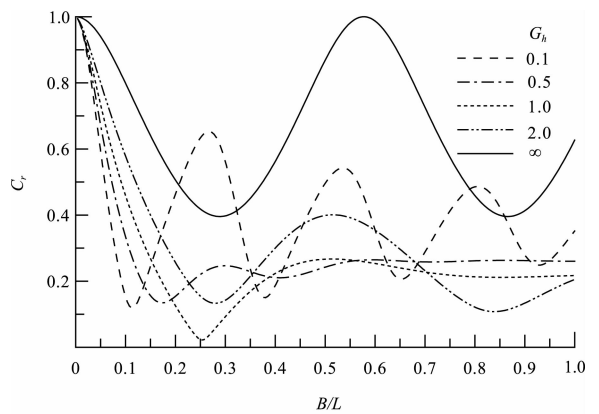
图2 本文解析解(线)与分区边界元解(点)计算结果的比较

图3考虑不同的水平多孔板开孔影响系数  $G_h$ ，给出开孔沉箱反射系数随消浪室相对宽度  $B/L$  的变化曲线。从图3可以看出，当开孔防波堤内部没有水平板时 ( $G_h = \infty$ ，即传统的开孔沉箱)，反射系数随  $B/L$  的增加在最小值和1之间呈周期性振荡变化，Chwang 和 Dong<sup>[11]</sup> 已经对这一变化规律进行了详细讨论。当消浪室内设置水平多孔板后，波浪将在水平多孔板上产生能量耗散和相位改变，这相当于在消浪室内设置了一个消能装置，此时，反射系数随  $B/L$  的增加在最大值和最小值之间摆动，摆动的幅值随  $B/L$  的增加而减小。特别是，如果选取合适的开孔影响系数 ( $G_v = 2.0$ ， $G_h = 0.5$ )，当  $B/L > 0.11$  时，内部带水平多孔板开孔沉箱的反射系数始终保持在0.3以下，这是在消浪室内安装水平多孔板的一个重要优点。当消浪室内没有水平板时，开孔沉箱只能在一定的  $B/L$  范围内保持低反射(图3中的实线)。在实际海况中，入射波的有效波长有可能发生较大变化 ( $B/L$  发生改变)，如果采用本文结构，可以更好地适应不同入射波条件，使开孔沉箱始终保持低反射。对比图3b)和3a)还可以看出，当  $G_v = 2.0$

时，带水平多孔板开孔沉箱的消能效果更好一些(相对  $G_v = 1.0$  而言)，因此，当开孔沉箱内设置水平多孔板后，应当适当增加前墙的开孔率。



a)  $C_v = 1.0$

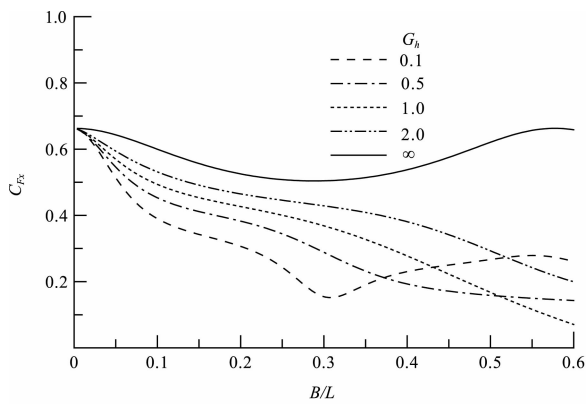


b)  $C_v = 2.0$

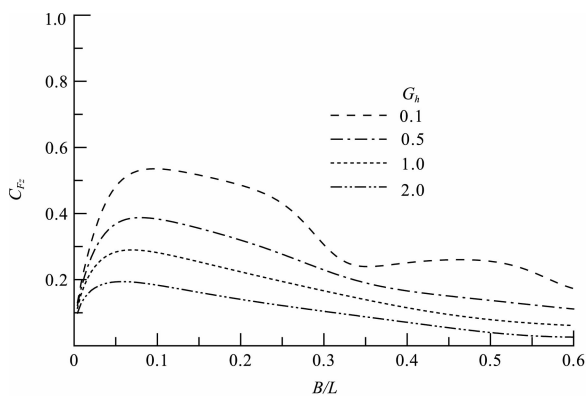
注： $\alpha = 30^\circ$ ， $k_0 h = 1.3$ ， $d/h = 0.2$ 。

图3 反射系数  $C$  随消浪室相对宽度  $B/L$  的变化

图4考虑不同的水平多孔板开孔影响系数  $G_h$ ，给出开孔沉箱总水平力和水平多孔板垂直力随消浪室相对宽度  $B/L$  的变化曲线。从图4a)可以看出，在开孔沉箱内设置水平多孔板后，开孔沉箱承受的总水平波浪力显著降低，这有利于提高开孔沉箱的稳定性。从图4b)可以看出，增加水平多孔板的开孔影响系数(开孔率增加)，水平多孔板承受的垂向波浪力显著降低，当  $G_h = \infty$  时，垂直力为0，并未在图中绘出。综合图4和3可以看出：在开孔沉箱内设置适当的水平多孔板，可以显著提高开孔沉箱的消浪性能，使结构始终保持低反射，并同时提高结构的稳定性。



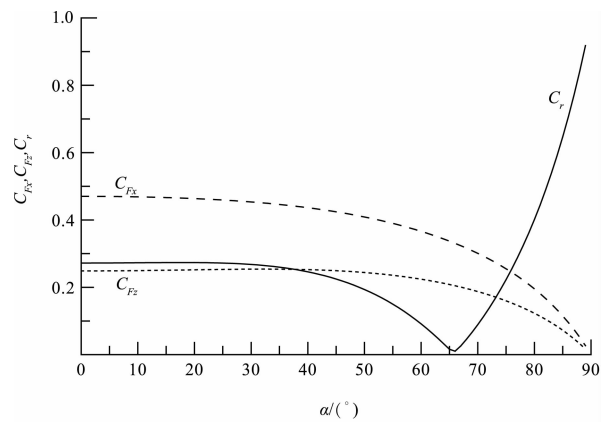
a) 开孔沉箱总水平力  $C_{Fx}$



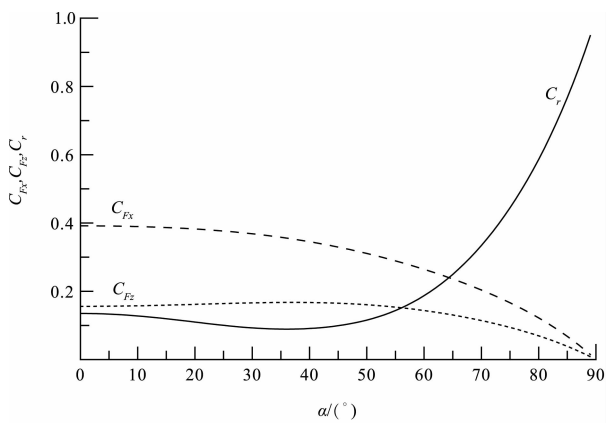
b) 水平多孔板总垂直力  $C_{Fz}$

注:  $\alpha = 30^\circ$ ,  $k_0 h = 1.3$ ,  $G_v = 2.0$ ,  $d/h = 0.2$ 。

图 4 波浪力随消浪室相对宽度  $B/L$  的变化



a)  $B/L = 0.15$



b)  $B/L = 0.3$

注:  $k_0 h = 1.3$ ,  $G_v = 2.0$ ,  $G_b = 1.0$ ,  $d/h = 0.2$ 。

图 5 水动力参数随波浪入射角度  $\alpha$  的变化

图 5 给出开孔沉箱防波堤的反射系数  $C_r$ 、水平波浪力  $C_{Fx}$  和垂向波浪力  $C_{Fz}$  随波浪入射角度的变化曲线, 考虑了消浪室相对宽度  $B/L = 0.15$  和  $0.3$  两种工况。从图 5 可以看出, 随着波浪入射角度的增加, 开孔沉箱反射系数先减小, 达到最小值后, 又急剧增加, 并趋近 1, 这与 Dalrymple 等<sup>[12]</sup> 针对多孔堆石防波堤的分析结果类似。考虑实际物理问题, 当波浪入射角度为  $90^\circ$  时, 波浪平行于防波堤传播, 结构反射系数应为 0。这与理论分析结果并不一致, 实际上, 本文理论模型并无法考虑波浪完全平行于防波堤传播的情况, 因此当波浪入射角度非常大时, 有必要开展更深入的试验研究。当波浪入射角度在  $30^\circ \sim 40^\circ$  时, 开孔沉箱防波堤的消能效果更好。与反射系数不同, 随着波浪入射角度的增加, 开孔沉箱的水平波浪力和水平多孔板的垂向波浪力均单调减小。

### 5 结语

在斜向波作用下, 研究了内部带水平多孔板开孔沉箱防波堤的反射系数和波浪力。基于线性势流理论, 利用匹配特征函数展开法建立了斜向波与带水平多孔板开孔沉箱相互作用的解析解, 并利用分区边界元方法验证了解析解的正确性。算例分析表明: 在开孔沉箱内设置水平多孔板, 可以有效降低结构的反射系数, 提高结构的稳定性; 存在一最优波浪入射角度, 使开孔沉箱的反射系数达到最低; 通过合理设计, 当消浪室宽度与入射波波长之比大于 0.11 时, 防波堤反射系数始终低于 0.3。在下一步工作中, 有必要以理论分析结果为指导, 开展物理模型试验, 进一步分析内部带水平多孔板开孔沉箱的水动力特性。

参考文献:

[1] Huang Z H, Li Y C, Liu Y. Hydraulic performance and wave loadings of perforated/slotted coastal structures: A review[J]. Ocean Engineering, 2011, 38: 1 031-1 053.

[2] JTS 154-1—2011 防波堤设计与施工规范[S].

[3] Isaacson M, Baldwin J, Allyn N, et al. Wave interactions with perforated breakwater[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 2000, 126(5): 229-235.

[4] Theocharis I T, Anastasaki E N, Moutzouris C I, et al. A new wave absorbing quay-wall for wave height reduction in a harbor basin [J]. Ocean Engineering, 2011, 38 ( 17): 1 967-1 978.

[5] Faraci C, Cammaroto B, Cavallaro L, et al. Wave reflection generated by caissons with internal rubble mound of variable slope [C]. Santander, Spain: Proc 33rd Int Coastal Engineering Conference: ASCE, 2012.

[6] Yip T L, Chwang A T. Perforated wall breakwater with internal horizontal plate[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126 ( 5): 533-538.

[7] Yu X P. Functional performance of a submerged and essentially horizontal plate for offshore wave control: a review [J]. Coastal Engineering Journal, 2002, 44 ( 2): 127-147.

[8] Liu Y, Li Y C, Teng, B. Wave interaction with a perforated wall breakwater with a submerged horizontal porous plate[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(17-18): 2 364-2 373.

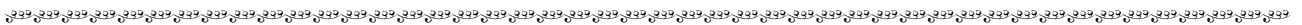
[9] Yu X P. Diffraction of water waves by porous breakwaters[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1995, 121(6): 275-282.

[10] Liu Y, Li H J, Li Y C. A new analytical solution for wave scattering by a submerged horizontal porous plate with finite thickness[J]. Ocean Engineering, 2012, 42: 83-92.

[11] Chwang A T, Dong Z. Wave-trapping due to a porous plate[C]. Hamburg: Proceedings of the 15th Symposium on Naval Hydrodynamics, 1984: 32-42.

[12] Dalrymple R A, Losada M A, Martin P A. Reflection and transmission from porous structures under oblique wave attack[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1991, 224: 625-644.

(本文编辑 武亚庆)



· 消 息 ·

### 加快长江经济带综合交通运输体系建设

交通运输部围绕发挥好长江黄金水道的作用，有如下考虑：第一，切实发挥规划的引领作用。结合“十三五”交通运输发展规划的编制工作，贯彻落实好指导意见和长江经济带综合交通网规划。第二，加快推进长江黄金水道等重点项目建设。全面加快长江干线航道系统治理和设施、设备建设。加快主要支流高等级航道建设，实施京杭运河升级扩能改造，全面推进长三角高等级航道网建设。加快长江经济带铁路、公路、民航机场建设。第三，着力提高服务和管理水平。加快形成以上海国际航运中心、武汉长江中游和重庆长江上游航运中心为核心的沿江港口体系，积极拓展沿江港口物流服务功能。大力发展绿色港口、生态航道、新能源船舶，加强船舶污染防控和治理。第四，加强科技攻关和法制建设。加强长江干线重点河段、重点滩险航道整治等方面的基础研究，扎实做好前期论证，为科学决策提供有力支撑。同时，推进《航道法》尽快出台，加快制定相关配套法规。

(摘编自《中国交通新闻网》)